

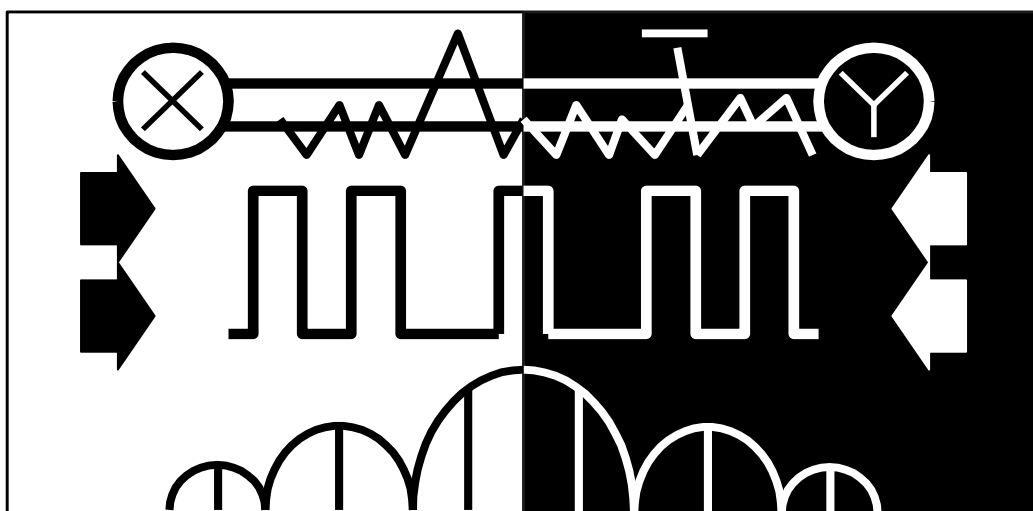
Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет информационных технологий и управления

Кафедра систем управления

**Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко,
Е. В. Тарасюк**

**ТЕЛЕМЕХАНИКА.
ЛИНИИ СВЯЗИ И БЕЗОПАСНОСТЬ
УСТРОЙСТВ И СЕТЕЙ**



Минск БГУИР 2023

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет информационных технологий и управления

Кафедра систем управления

**Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко,
Е. В. Тарасюк**

**ТЕЛЕМЕХАНИКА.
ЛИНИИ СВЯЗИ И БЕЗОПАСНОСТЬ
УСТРОЙСТВ И СЕТЕЙ**

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов учреждений высшего
образования по специальности «Информационные технологии
и управление в технических системах»*

Минск БГУИР 2023

УДК 621.398(075.8)
ББК 32.968я73
С65

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра автоматики, радиолокации и приемопередающих устройств
учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»
(протокол № 23 от 01.06.2022);

заведующий кафедрой интеллектуальных систем
Белорусского государственного университета
кандидат физико-математических наук,
доцент Е. И. Козлова

Сорока, Н. И.

С65 Телемеханика. Линии связи и безопасность устройств и сетей : учеб.
пособие / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко, Е. В. Тарасюк. – Минск :
БГУИР, 2023. – 240 с. : ил.
ISBN 978-985-543-682-0.

Приведены основные характеристики линий связи, рассмотрены примеры использования различных типов линий связи для передачи телемеханической информации, даны расчеты основных параметров цифровых линий связи, рассмотрены основные типы помех и их характеристики, приведены методы повышения помехоустойчивости сообщений, произведен анализ промышленных сетей, приведены примеры основных устройств в системе передачи информации, сформулированы требования к элементной базе и программному обеспечению телемеханических систем, рассмотрены принципы построения активных и пассивных датчиков, критерии оценки показателей надежности устройств телемеханики, изложены принципы аппаратного резервирования устройств и промышленных сетей, рассмотрена кибербезопасность промышленных систем телемеханики, а также приведены классы организации передачи и форматы кадров.

Может быть полезно студентам и магистрантам, изучающим дисциплину «Телемеханика», а также специалистам в области теории и техники передачи информации.

УДК 621.398(075.8)
ББК 32.968я73

ISBN 978-985-543-682-0

© Сорока Н. И., Кривинченко Г. А.,
Тарасюк Е. В., 2023
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Линии и каналы связи	8
1.1 Понятие о линии и канале связи	8
1.2 Проводные линии связи	13
1.2.1 Витая пара	19
1.2.2 Коаксиальный кабель	23
1.2.3 Волновод.....	24
1.3 Использование высоковольтных линий электропередачи в качестве линий связи.....	24
1.4 Использование распределительных силовых сетей в качестве линий связи.....	26
1.5 Радиолинии.....	28
1.5.1 Радиорелейные линии связи.....	39
1.5.2 Спутниковые линии связи	42
1.5.3 Космические радиолинии	45
1.5.4 Сотовая радиосвязь	46
1.5.5 Линейные системы индивидуальной связи	49
1.5.6 Телевизионные радиосистемы	49
1.6. Оптические линии связи	52
1.6.1 Атмосферные ОЛС	55
1.6.2 Космические ОЛС	56
1.6.3 Волоконно-оптические линии связи.....	57
1.6.4 Инфракрасное излучение.....	69
1.7 Структура линий связи.....	69
1.7.1 Конфигурация «точка – точка».....	70
1.7.2 Конфигурация радиальная «точка – точка».....	70
1.7.3 Конфигурация радиальная многоточечная	71
1.7.4 Конфигурация цепочечная	71
1.7.5 Конфигурация многоточечная кольцевая	71
1.7.6 Конфигурация смешанная	72
1.8 Способы передачи дискретных сообщений.....	72
1.9 Расчет основных характеристик цифровых линий связи	74
1.9.1 Энергетический расчет радиолинии «Космос – Земля».....	77
1.9.2 Энергетический расчет радиолинии «Земля – Космос».....	79
1.9.3 Энергетический расчет цифровой гидроакустической линии связи	79
1.10 Расчет волоконно-оптической линии связи	82
2 Помехи и их характеристики.....	84
2.1 Общие сведения о помехах.....	84
2.1.1 Сетевые помехи	86
2.1.2 Молнии и атмосферное электричество	86
2.1.3 Статическое электричество	87

2.1.4 Помехи через кондуктивные связи	87
2.1.5 Электромагнитные помехи	87
2.1.6 Другие типы помех	87
2.2 Математическое описание помехи	90
2.3 Виды искажений	94
2.4 Методы повышения помехоустойчивости	96
2.4.1 Методы повышения помехоустойчивости передачи дискретных сообщений	96
2.4.2 Методы повышения помехоустойчивости передачи непрерывных сообщений	99
2.5 Некоторые практические советы по обеспечению помехоустойчивости систем телемеханики	102
3 Промышленные сети, технологии передачи сообщений и функциональные блоки систем телемеханики	105
3.1 Общие сведения и основные определения	105
3.2 Методы организации доступа к линии связи	108
3.3 Технические характеристики промышленных сетей	109
3.3.1 Сенсорные сети	112
3.3.2 Контроллерные сети	116
3.3.3 Универсальные сети	119
3.3.4 Сети верхнего уровня	123
3.4 Беспроводные сети систем управления	124
3.4.1 Проблемы беспроводных сетей и пути их решения	124
3.4.2 <i>Bluetooth</i>	125
3.4.3 <i>ZigBee</i> и <i>IEEE 802.15.4</i>	126
3.4.4 <i>Wi-Fi</i> и <i>IEEE 802.11</i>	128
3.4.5 Сравнение беспроводных сетей	130
3.4.6 Инфракрасный канал	130
3.5 Технологии высокоэффективного использования линий связи	131
3.5.1 Технологии высокоскоростной передачи данных по локальным линиям связи	131
3.5.2 Параллельная передача данных и синхросигнала по группе витых пар проводов	135
3.5.3 Аппаратное резервирование	140
3.6 Устройства защиты от ошибок	142
3.6.1 Основные типы	142
3.6.2 Алгоритм функционирования УЗО	143
3.6.3 Структурная схема передающей части УЗО	144
3.6.4 Структурная схема приемной части УЗО	147
3.7 Модемы	149
3.7.1 Общие сведения	149
3.7.2 Структурная схема модема	153
3.7.3 Интерфейсы модемов	158

3.8	Устройства сопряжения с линиями и каналами	161
3.8.1	Выходное устройство	161
3.8.2	Входное устройство	162
4	Элементная база систем контроля и управления	165
4.1	Требования к элементной базе	165
4.2	Технические характеристики модулей серии <i>ADAM</i>	167
4.2.1	Модули нормализации и гальванической развязки серии.....	168
4.2.2	Устройства удаленного сбора данных и управления <i>ADAM-4000</i>	169
4.2.3	Коммуникационные модули.....	174
4.2.4	Контроллеры сбора данных и управления <i>ADAM-5000</i>	184
4.3	Датчики телеметрических систем.....	193
4.3.1	Определения и основные характеристики	193
4.3.2	Классификация телеметрических датчиков.....	194
4.3.3	Активные датчики	195
4.3.4	Пассивные датчики.....	195
4.3.5	Комбинированные датчики	197
4.3.6	Величины, влияющие на характеристики датчиков	197
4.4	Сетевое оборудование.....	198
4.4.1	Преобразователи интерфейса.....	200
4.4.2	Адресуемые преобразователи интерфейса	202
4.5	Требования к программному обеспечению	204
4.6	Описание пакета <i>GENESIS32</i>	205
4.7	Пример построения телеметрической системы.....	207
5	Кибербезопасность промышленных систем телемеханики	210
5.1	Источники проблем безопасности	210
5.2	Этапы обеспечения безопасности	212
6	Структуры форматов кадров телемеханических сообщений по стандарту МЭК 870	216
6.1	Классы организации передачи и форматы кадров	217
6.2	Процедуры в каналах передачи.....	220
	Приложение А. Кабели и монтажные провода.....	222
	Перечень сокращений	231
	Список использованных источников.....	235

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие написано на основе материалов лекций, которые в течение многих лет читались авторами в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», и составляет единый комплекс по дисциплине «Телемеханика» с учебным пособием «Телемеханика. Системы контроля и управления», изданного в двух частях в 2020 году, первая часть которого посвящена модуляции и кодированию, а вторая – принципам построения систем контроля и управления.

Авторы рассмотрели такие вопросы, как линии и каналы связи, помехи и их математическое описание, виды искажений полезных сообщений, промышленные сети, временная синхронизация в сетях, кибербезопасность, аппаратная надежность систем телемеханики.

Сообщения могут быть либо непрерывными, либо дискретными, и их передача осуществляется по линиям связи, в которых действуют помехи. От состояния линии связи зависит и качество передачи сообщений. Качество систем телемеханики, принцип их построения в достаточной степени характеризуют помехоустойчивость и пропускную способность. Эти основные характеристики тесно связаны между собой, т. к. улучшение одной из них достигается за счет снижения другой. В зависимости от назначения систем телемеханики требования к ним могут быть различными: в системах телеметрии наиболее существенной является точность полученной информации, а в системах телеуправления – исключение возможности выполнения ложных команд и получение достоверной информации о состоянии объекта.

Помехоустойчивость по своему определению должна характеризовать систему телемеханики в целом, однако такое исследование, а тем более ее синтез, является сложной задачей. Поэтому целесообразно оценивать помехоустойчивость отдельных звеньев системы, например, кодов, видов модуляции, приемников. При этом достаточно оперировать относительной помехоустойчивостью, что позволяет сравнить между собой различные варианты технических решений. Данные материалы изложены в [59].

Учебное пособие состоит из шести разделов и приложения.

Первый раздел посвящен физическим линиям связи, в нем приведены основные формулы и примеры расчета основных параметров, структуры линий и сетей передачи информации, расчет основных характеристик цифровых линий связи.

Во втором разделе рассматриваются помехи и их характеристики, дана классификация помех и их источников, математическое описание помех и виды искажений, методы повышения помехоустойчивости, а также некоторые практические советы по обеспечению помехоустойчивости систем телемеханики.

В третьем разделе рассматриваются функциональные блоки и узлы систем и устройств телемеханики, методы ограничения доступа к линиям связи, техни-

ческие характеристики промышленных сетей, беспроводные сети систем управления, технологии высокоэффективного использования линий связи, устройства защиты от ошибок, модемы и устройства сопряжения с линиями и каналами.

Четвертый раздел посвящен элементной базе. Сформулированы требования к элементной базе, приведены технологические данные контроллеров серии *ADAM*, рассмотрены принципы построения активных и пассивных датчиков телеметрических систем, приведен пример реализации системы телеизмерения.

В пятом разделе рассматриваются источники проблем кибербезопасности систем телемеханики, указаны этапы обеспечения безопасности и основные отличия в подходах к обеспечению безопасности в информационных технологиях и автоматизированных системах управления технологическим процессом (АСУТП).

Шестой раздел посвящен классам организации передачи телемеханических сообщений, форматам кадров и процедурам в каналах передачи.

В приложении приведены характеристики кабелей для локальных сетей, систем передачи данных, промышленных установок и приборных изделий.

Изложенный в учебном пособии материал предполагает, что студенты знакомы с основными понятиями теории информации и схемотехники, которые они изучали на младших курсах.

1 ЛИНИИ И КАНАЛЫ СВЯЗИ

1.1 Понятие о линии и канале связи

Линии связи являются основным, наиболее характерным и определяющим звеном системы передачи информации. От их состояния прежде всего зависит надежность действия систем телемеханики. Свойство, параметры и характеристики линий связи, а также их стабильность во времени и при изменении внешних условий определяют энергетические требования, предъявляемые к сигналу, оказывают влияние на его формирование и на используемые методы передачи, принципы построения схемных решений приемопередающей аппаратуры.

Линия связи – это физическая среда, по которой передаются сигналы.

Можно выделить два класса линий связи: проводные и беспроводные. Проводные линии связи по использованию подразделяются на воздушные и кабельные. На воздушных линиях металлические провода подвешиваются к изоляторам, укрепленным на специальных опорах. Используемый провод может быть стальным, медным или биметаллическим. К числу проводных воздушных линий связи относятся и высоковольтные линии электропередач (ЛЭП), которые кроме своего основного назначения – транспортировки электрической энергии – используются в качестве линий связи.

Для сооружения кабельных линий связи применяют специальную конструкцию системы металлических проводов – кабель, куда входят, кроме различного числа пар (чисел) проводов, дополнительные средства повышения механической и электрической прочности: специальная изоляция, свинцовые оболочки, битумные, резиновые, металлические покрытия. В зависимости от конкретного назначения и вида использования кабеля укладывают либо в земляные траншеи, либо в специальные места в канализации. К кабельным линиям могут быть отнесены и высоковольтные кабели распределительных силовых сетей на промышленных предприятиях. В отдельных случаях кабели применяются на воздушных линиях связи. Для проводных линий свойственен электрический процесс (движение свободных электронов), который и используется в качестве переносчика.

Беспроводные линии связи как естественные физические среды подразделяются на радиолинии, гидравлические, пневматические и акустические с воздушной средой линии.

Радиолинией, для которой характерен процесс распространения электромагнитных волн, принято называть околоземное и космическое пространство. Реально используемый диапазон частот для излучения электромагнитной энергии определяется частотами $3 \cdot 10^4$ – $3 \cdot 10^{12}$ Гц. В последние годы созданы генераторы оптического излучения – лазеры, возбуждающие электромагнитные колебания с частотами от $3 \cdot 10^{12}$ до $3 \cdot 10^{15}$ Гц. Существующая специфика излучения в этом диапазоне обусловила выделение его в так называемую оптическую линию связи. Что касается гидравлических линий, представленных водным пространством морей и океанов, то переносчиком в них являются механические колебания самой среды – звуковые волны, возбуждаемые специальными вибраторами.

Сооружение линий связи требует больших капитальных затрат, в большинстве случаев значительно превосходящих затраты на аппаратуру телемеханики. Это обстоятельство является одной из основных причин, обуславливающих необходимость наиболее эффективного их использования. Пути решения такой задачи находят в создании многоканальных систем передачи информации и повышении пропускной способности каналов связи.

Канал связи – это совокупность технических средств, обеспечивающих передачу сообщений по линии связи с заданной степенью верности от источника приемнику. Может быть организовано много каналов связи для передачи сообщений многим приемникам телеуправления (ТУ) или от многих источников телеизмерения (ТИ), телесигнализации (ТС) по одной линии связи.

В технике передачи информации находят применение механические, акустические, оптические, электрические и радиоканалы, различаемые по используемым линиям связи и по физической природе сигналов.

В телемеханике наибольшее применение нашли три типа каналов: электрические, радиоканалы и оптические. Основным, но не единственным признаком в пределах каждого вида каналов обычно служит диапазон рабочих частот (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Классификация линий связи по характеру используемых колебаний

Тип линии связи	Наименование линии связи	Диапазон частот, Гц
Механическая	Жесткая	< 10
	Гидравлическая	
	Пневматическая	
Акустическая	Акустическая с воздушной средой	$10-10^6$
	Гидроакустическая	$10-10^7$
Электрическая (проводная)	Воздушная	$0-2 \cdot 10^5$
	Симметричный кабель	$0-10^6$
	Коаксиальный кабель	$0-15 \cdot 10^6$
Беспроводная	Радиолиния	$0,3 \cdot 10^4-3 \cdot 10^{12}$
	Радиорелейная	$30 \cdot 10^6-3 \cdot 10^{10}$
	Космическая	
Оптическая	Оптическая с открытой средой	$0,3 \cdot 10^{15}-1 \cdot 10^{15}$
	Волоконно-оптическая	$0,3 \cdot 10^{15}-0,8 \cdot 10^{15}$

Если проводные линии связи используются только для передачи телемеханической информации, то они называются *выделенными линиями*, которые можно многократно использовать для передачи многих сообщений, применяя при этом методы частотного или временного разделения сигналов. Несмотря на то что физическая цепь является лучшим вариантом для организации каналов связи, он дорог и прокладка такой цепи на большие расстояния производится в исключительных случаях. Как правило, по проводным линиям связи передается

информация связи (телефонная связь, передача данных и т. д.), а для целей телемеханики предназначается телефонный канал, т. е. выделяется определенная полоса частот.

Если необходимо передать всего одно или два телемеханических сообщения, то это можно осуществить по занятому телефонному каналу, не прерывая разговор (технология *ADSL*).

Каналы связи для передачи телемеханической информации можно организовать не только по проводным линиям связи, но и по линиям электроснабжения и по радиотракту.

Независимо от числа линий связи каналы должны быть, во-первых, надежны и, во-вторых, уровень помех в линии связи не должен превышать допустимый во избежание нарушения достоверности передачи.

Каналы передачи информации состоят из линии связи, модулятора и демодулятора, кодирующего и декодирующего устройств, а также решающих устройств, позволяющих с высокой степенью достоверности принять и передать сообщение. Для увеличения надежности передачи применяются также каналы обратной связи. Варианты структур каналов приведены на рисунке 1.1.

Решающее устройство (РУ) служит для классификации сомнительных сигналов, отождествляя их с достаточно высокой степенью достоверности с состоянием источника информации или с определенным кодом.

Канал связи начинается со входа передатчика и оканчивается выходом приемника.

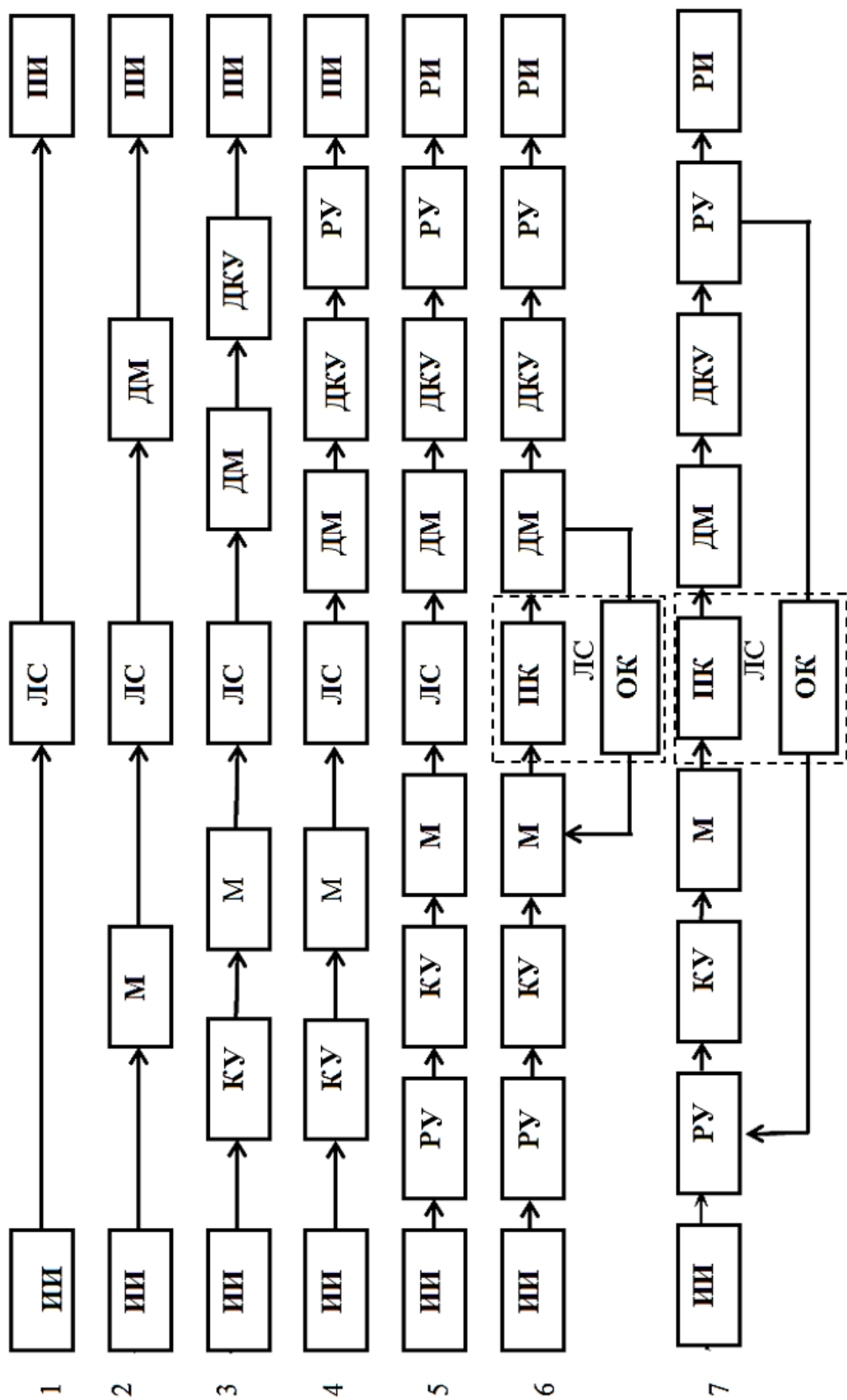
Каналы передачи информации по направлению передачи подразделяются на симплексные, полудуплексные и дуплексные.

Симплексные используются, когда передача данных должна осуществляться только в одном направлении, например, в системах контроля, в которых информация с датчиков передается в управляющий компьютер через регулярные промежутки времени.

Полудуплексные применяются, когда два взаимодействующих объекта обмениваются информацией поочередно, т. е. канал используется поочередно для передачи данных в обоих направлениях. В таком режиме каждый объект должен иметь возможность переключаться от состояния передачи к состоянию приема.

Дуплексные используются для обмена данными между двумя взаимодействующими объектами (устройствами) в обоих направлениях одновременно, например, когда пропускная способность канала позволяет потоку данных проходить в обоих направлениях независимо.

По виду электрических сигналов каналы связи подразделяются на аналоговые и дискретные (цифровые).



1 – элементарная; 2 – с модуляцией; 3 – с модуляцией и кодированием; 4 – с решающим устройством на приеме;
 5 – с решающим устройством на приеме и передаче; 6 – с информационной обратной связью;
 7 – с решающей обратной связью

Рисунок 1.1 – Варианты структур каналов передачи информации

На рисунке 1.1 приняты следующие обозначения элементов: ИИ – источник информации; М – модулятор; КУ – кодирующее устройство; РУ – решающее устройство; ЛС – линия связи; ДМ – демодулятор; ПК – прямой канал; ОК – обратный канал; ДКУ – декодирующее устройство; ПИ – получатель информации.

Цифровой канал является битовым трактом с цифровым сигналом на входе и выходе. На вход аналогового канала поступает непрерывный сигнал, и с его выхода снимается также непрерывный сигнал.

Различают следующие каналы: коммутируемые и выделенные, двух- и четырехпроводные.

Коммутируемые каналы предоставляются потребителям на время соединения по их требованию. Такие каналы принципиально содержат в своем составе коммутационное оборудование автоматических телефонных станций (АТС).

Выделенные (арендованные) каналы арендуются у телефонных компаний или (очень редко) прокладываются заинтересованной организацией. Такие каналы являются принципиально двухточечными. Их качество выше, чем у коммутируемых каналов, т. к. на них не влияет коммутационная аппаратура АТС.

Каналы, как правило, имеют двухпроводное или четырехпроводное окончание. Их называют, соответственно, двухпроводными и четырехпроводными.

Четырехпроводные каналы предоставляют два провода для передачи сигнала и еще два для приема. В таких каналах практически полностью отсутствует влияние сигналов, передаваемых во встречном направлении.

Двухпроводные каналы используют два провода как для передачи, так и для приема сигналов. Такие каналы позволяют экономить на стоимости кабелей, но требуют усложнения каналообразующей аппаратуры и аппаратуры пользователя. Двухпроводные каналы требуют разделения принимаемого и передаваемого сигналов, что реализуется при помощи дифференциальных систем, обеспечивающих необходимое затухание по встречным направлениям передачи. Наличие дифференциальных систем приводит к искажениям амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик канала и к специфической помехе в виде эхо-сигнала.

Физические каналы (среды) передачи данных бывают двух типов: открытые и закрытые. В закрытом канале распространение сигналов ограничено данным каналом, и за исключением небольших утечек сигнал не покидает среду передачи. К числу закрытых сред передачи относятся пара проводов, коаксиальный кабель, волновод, волоконно-оптический кабель.

В многоканальных системах тракты всех сигналов должны быть разделены каким-либо способом, чтобы сигнал каждого источника мог попасть в свой приемник. Такая процедура носит название разделения каналов или разделения сигналов. Различают следующие методы разделения каналов: пространственное (схемное), дифференциальное, частотное, временное, фазовое, кодовое, корреляционное, по уровню и форме. Наибольшее применение нашло частотное, временное и кодовое разделение каналов.

1.2 Проводные линии связи

Передача телемеханических сообщений осуществляется по телефонным двухпроводным и кабельным линиям связи, воздушным стальным и медным проводным линиям связи, симметричным и коаксиальным кабелям, по металлическим волноводам и волоконно-оптическим линиям связи.

Диапазон частот передаваемых сообщений для различных линий определяется материалом, из которого изготовлена линия связи, конструктивными особенностями (сечение провода, расстояние между проводами, экранирование и др.), а также уровнем и типом помех.

В высокочастотных каналах по воздушным стальным линиям из-за резкого возрастания затухания в стали используется диапазон частот от 3 до 25 кГц. Для воздушных медных и биметаллических цепей применяются многоканальные линии связи с диапазоном от 6 до 157 кГц. На более высоких частотах возрастает влияние радиовещательных станций длинноволнового диапазона. Существенный недостаток воздушных проводных линий – большая зависимость их характеристик от атмосферных условий.

Значительно лучшими характеристиками обладают кабельные линии связи. Они являются основой сетей магистральной дальней связи, по ним передают сигналы в диапазоне частот 12–550 кГц.

Наиболее широкополосными являются коаксиальные кабели. Они имеют рабочий диапазон до 8850 кГц. По металлическим волноводам передают сигналы в диапазоне 35–80 ГГц. Большой практический интерес представляют волоконно-оптические линии связи с диапазоном частот 300–800 ТГц.

Проводные линии (воздушные, кабельные) характеризуются первичными (активное сопротивление, емкость, индуктивность и проводимость) и вторичными (затухание, волновое сопротивление и пропускная способность) параметрами.

С подробными характеристиками кабелей для проводных линий связи можно ознакомиться в приложении А.

Электрическая линия связи представляет собой длинную линию с распределенными параметрами, которую можно представить в виде большого числа последовательно соединенных четырехполюсников (рисунок 1.2).

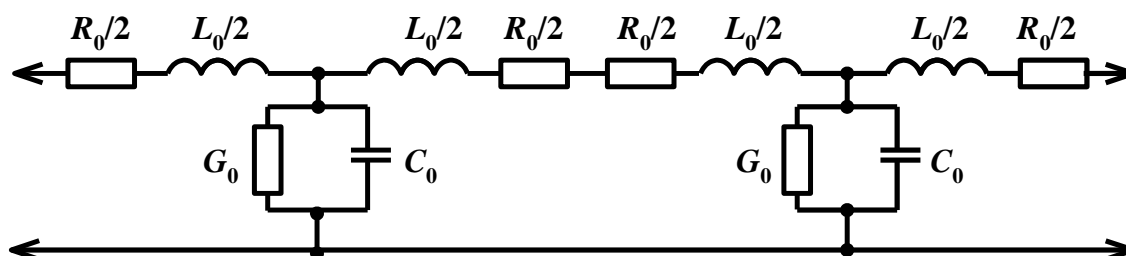


Рисунок 1.2 – Схема замещения электрической (проводной) линии связи

Сопротивление линии по постоянному току при температуре t , отличной от $20\text{ }^\circ\text{C}$:

$$R_t = R_0[1 + \alpha(t - 20)] \text{ Ом/км}, \quad (1.1)$$

где R_0 – сопротивление при $20\text{ }^\circ\text{C}$, Ом;

α – температурный коэффициент, который для меди равен $0,0039$, а для стали – $0,0046$.

Индуктивность двухпроводной цепи из однородных проводов:

$$L_0 = \left(4 \ln \frac{a}{r} + k\mu\right) \cdot 10^{-4} \text{ мГн/км}, \quad (1.2)$$

где a – расстояние между центрами проводов, см;

r – радиус проводов, см;

k – табличный коэффициент, учитывающий поверхностный эффект;

μ – относительная магнитная проницаемость материала провода (для меди $\mu_m = 1$, для стали $\mu_c = 140$);

Емкость двухпроводной цепи определяется по формуле

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{a}{r}} \text{ мкФ/км}. \quad (1.3)$$

Емкость однопроводной цепи:

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-6}}{18 \ln \frac{2h}{r}} \text{ мкФ/км}, \quad (1.4)$$

где h – расстояние от поверхности земли до провода, м.

Параметры R_0 , L_0 , C_0 , G_0 определяют волновое сопротивление

$$Z = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}, \quad (1.5)$$

где ω – частота сигнала;

G_0 – проводимость изоляции.

На высоких частотах (больших 10 кГц) или при малых потерях $R_0 \ll \omega L$ и $G_0 \ll \omega C$. В этом случае

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (1.6)$$

При нагрузке однородной линии на сопротивление, равное ее волновому сопротивлению, отражения в линии отсутствуют.

Таким образом, волновое (характеристическое) сопротивление – это сопротивление, которым можно заменить отрезанную часть бесконечно длинной линии так, что при этом в любых точках оставшейся линии значения тока и напряжения будут прежними.

Коэффициент распределения или постоянная передача линии:

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\varphi, \quad (1.7)$$

где α – постоянная затухания линии;

φ – коэффициент сдвига фаз между напряжением и током в линии.

Допустим, что в начале линии связи напряжения U_1 , ток I_1 и мощность сигнала P_1 , а на ее выходе U_2 , I_2 и P_2 соответственно, тогда затухание b_H , вносимое линией связи, в неперах (Нп) можно определить из следующих выражений:

$$b_H = \ln \frac{U_1}{U_2}; \quad b_H = \ln \frac{I_1}{I_2}; \quad b_H = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (1.8)$$

а в децибелах (дБ):

$$b_d = 20 \cdot \lg \frac{U_1}{U_2}; \quad b_d = 20 \cdot \lg \frac{I_1}{I_2}; \quad b_d = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2}. \quad (1.9)$$

Из выражений (1.8) и (1.9) следует, что затуханию в 1 Нп соответствует уменьшение напряжения или тока в $e = 2,718$ раз, а мощности – в e^2 раз, затуханию в 1 дБ соответствует уменьшение напряжения или тока в 1,12 раза, мощности – в 1,25 раза. Для перехода от неперов к децибелам или наоборот используют следующие соотношения:

$$1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ}; \quad 1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}.$$

Для оценки условий передачи сигнала в инженерной практике широко используется понятие об уровне сигнала – обобщенной энергетической характеристике, которая позволяет определить значения напряжения, тока и мощности сигнала в рассматриваемой точке x тракта передачи. Уровни сигналов в неперах определяются по следующим формулам:

$$P_H(U) = \ln \frac{U_x}{U_0}; \quad P_H(I) = \ln \frac{I_x}{I_0}; \quad P_H(P) = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{P_x}{P_0}. \quad (1.10)$$

Если за единицу измерения принять децибел (дБ), то уровни определяются по формулам

$$P_d(U) = 20 \cdot \lg \frac{U_x}{U_0}; \quad P_d(I) = 20 \cdot \lg \frac{I_x}{I_0}; \quad P_d(P) = 10 \cdot \lg \frac{P_x}{P_0}, \quad (1.11)$$

где P_0 – мощность условного нулевого уровня ($P_0 = (0,775^2/600) \cdot 10^3 = 1$ мВт при $U_0 = 0,775$ В, $I_0 = 1,29$ мА, $Z_0 = 600$ Ом).

В случае когда сопротивление отлично от 600 Ом, а уровень сигнала U_x выражается в вольтах, то

$$P_n(P) = \ln \frac{U_x}{0,775} - \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{Z}{600}. \quad (1.12)$$

Уровень в точке цепи, в которой $P_x = 1$ мВт, в соответствии с формулой (1.11) будет $P_d(P) = 10 \cdot \lg P_x = 0$ – нулевой уровень. Если мощность сигнала в рассматриваемой точке $P_x > 1$ мВт, то уровень сигнала в этой точке принято называть положительным (например, $P_x = 100$ мкВт, тогда $P_d(P) = 10 \cdot \lg 10 \cdot 10^3 = 40$ дБ). Если мощность в рассматриваемой точке $P_x < 1$ мВт, то уровень в этой точке называется отрицательным (например, $P_x = 1$ мкВт, тогда $P_d(P) = 10 \cdot \lg 10^{-3} = 60$ дБ).

С помощью таблицы 1.2 можно осуществить перевод децибел в ватты при общепринятом условном нулевом уровне, равном 1 мВт.

Таблица 1.2 – Перевод децибел в ватты при общепринятом условном нулевом уровне

Отношение мощностей	(-) дБ (+)	Отношение мощностей	(-) дБ (+)
1,0000	0,0	0,1000	10,0
0,8913	0,5	0,07943	11
0,7943	1,0	0,06310	12
0,7079	1,5	0,05012	13
0,6310	2,0	0,03981	14
0,5623	2,5	0,03162	15
0,5012	3,0	0,02512	16
0,4467	3,5	0,01995	17
0,3981	4,0	0,01585	18
0,3548	4,5	0,01259	19
0,3162	5,0	0,01	20
0,2818	5,5	10^{-1}	10
0,2512	6,0	10^{-2}	20
0,2239	6,5	10^{-3}	30
0,1995	7,0	10^{-4}	40
0,1778	7,5	10^{-5}	50
0,1585	8,0	10^{-6}	60
0,1413	8,5	10^{-7}	70
0,1259	9,0	10^{-8}	80
0,1122	9,5	–	–

Мощность на выходе линии длиной l :

$$P_2 = P_1 - \alpha \cdot l = P_1 - b, \quad (1.13)$$

где P_1 – мощность на входе линии;

α – удельное затухание линии, дБ/км или Нп/км;

b – затухание, вносимое линией связи, которое определяется из выражений (1.8) или (1.9).

Если известно допустимое затухание b (в децибелах или неперах), то допустимая длина линии связи

$$l = \frac{b}{\alpha}. \quad (1.14)$$

Удельное затухание для некоторых типов проводных линий связи приведено в таблице 1.3.

Пример 1.1. Определить максимальную длину стальной воздушной линии из проводов диаметром $d = 3$ мм с расстоянием между проводами $a = 60$ см при частоте $f = 3$ кГц, если отношение мощности сигнала на входе линии связи к мощности сигнала на выходе равно 7,4.

Решение. Из таблицы 1.3 $\alpha = 0,27$ дБ/км. Допустимое затухание $b_d = 10 \cdot \lg 7,4 = 8,7$ дБ. Максимальная длина линии связи $l_{\text{дmax}} = \frac{8,7}{0,27} = 3,2$ км.

Таблица 1.3 – Значения удельного затухания для некоторых типов линий связи

Тип линии связи	Диаметр провода d , мм	Расстояние между проводами a , см	Диапазон частот f , кГц	Удельное затухание α , дБ/км
Стальная	3	20	0,3–10	0,09–0,9
Стальная	3	60	0,3–10	0,09–0,74
Стальная	4	20	0,3–10	0,09–0,8
Стальная	4	20	3–30	0,34–1,36
Стальная	4	60	0,3–10	0,09–0,65
Биметаллическая (медь – сталь)	3,2; 4	20	0,3–10	0,045–0,135
Биметаллическая	3,2; 4	60	0,3–10	0,03–0,09
Медная	4	20	0,3–10	0,02–0,045
Медная	4	20	5–150	0,034–0,18
Медная	4	60	0,3–10	0,18–0,45
Медная	4	60	5–300	0,18–0,25

Пример 1.2. Определить затухание сигнала на частоте 10 кГц в медной линии связи с $d = 4$ мм, $a = 20$ см при передаче сигнала на расстояние $l = 100$ км.

Решение. Из таблицы 1.3 находим $\alpha = 0,045$ дБ/км, затухание $b = \alpha \cdot l = 0,045 \cdot 100 = 4,5$ дБ.

Как следует из выражения (1.13), уровень сигнала в рассматриваемой точке равен уровню сигнала в начале цепи минус затухание сигнала до данной точки. Пользуясь данным выражением, можно построить диаграмму уровней и затуханий, из которой могут быть получены ответы на ряд практических вопросов.

Пример 1.3. Построить диаграмму уровней и затуханий для цепи, характер и параметры которой приведены на рисунке 1.3, если уровень помех на всех участках $P_{\epsilon} = -20$ дБ, а требуемое превышение сигнала над помехой $\Delta P = 25$ дБ.

Решение. Здесь СУ – согласующее устройство с вносимым (собственным) затуханием, равным 2 дБ. В соответствии с исходными данными и принятым масштабом для уровней проводим на диаграмме линии уровня помех и минимально допустимого уровня.

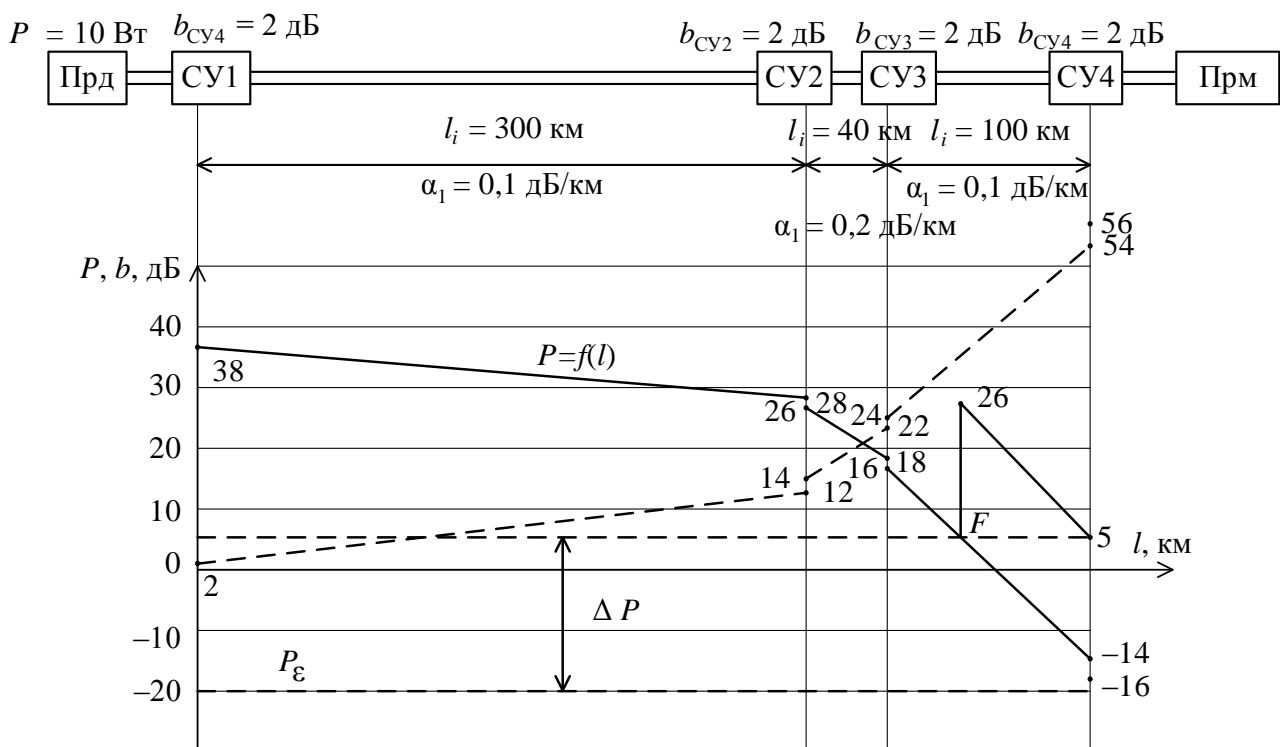


Рисунок 1.3 – Диаграмма уровней и затуханий

Для построения диаграммы уровней определяем уровень сигнала на входе передатчика (ПРД) $P(P_{\text{ПРД}}) = 10 \log(10 \cdot 10^3) = 40$ дБ. Поскольку расстояние от ПРД до СУ1 мало по сравнению с длинами участков цепи, предполагаем, что $P(P_{\text{ПРД}}) = 40$ дБ имеется на входе СУ1. Отметим этот уровень на ординате. В СУ1

имеет место затухание $b_{\text{СУ1}} = 2$ дБ, следовательно, вторая точка на диаграмме будет определена уровнем $P(P_{\text{ПРД}}) - b_{\text{СУ1}} = 40 - 2 = 38$ дБ. Это соответствует уровню сигнала на входе первого источника l_i . Полное затухание на участке $b_1 = \alpha_1 l_i = 0,1 \cdot 100 = 10$ дБ. Таким образом, сигнал на входе СУ2 будет иметь уровень $P = 38 - 10 = 28$ дБ. Отмечаем эти уровни и проводим линию между точками с уровнями +38 дБ и +28 дБ. Эта линия показывает изменение уровня сигнала на первом участке. Аналогично получаем последующие значения уровней и строим диаграмму уровней, из которой следует, что уровень сигнала на входе приемника (ПРМ) $P(P_{\text{ПРД}}) = -16$ дБ. Поскольку минимальный допустимый уровень на входе ПРМ равен +5 дБ (допустим, он соответствует чувствительности приемника), то в практике передачи необходимо установить усилитель с коэффициентом усиления $K_{\text{min}} = P_{\text{э}} + \Delta P(P_{\text{ПРД}}) = -20 + 25 - (-16) = 21$ дБ. Место установки усилителя определяется точкой F , в которой проводят корректировку диаграммы уровней: от уровня +5 дБ (уровень на входе усилителя) проводим вертикальную линию до уровня +26 дБ, что будет уравнено на входе усилителя, затем проводим параллельную построенной диаграмме уровней линию, которая определяет новое значение уровня на входе СУ4. При этом на входе приемника имеем требуемое значение уровня сигнал +5 дБ. В реальных условиях включение усилителя в точке F по каким-либо причинам (отсутствие источника питания) может быть неосуществимо. Тогда усилитель устанавливают в ином месте, ближе к ПРД, и в этой точке производится корректирование диаграммы уровней.

Построение диаграммы затуханий выполняется подобным же образом, с той лишь разницей, что $b = f(l)$ – возрастающая функция, а в месте установки усилителя величина затухания должна быть уменьшена на величину коэффициента усиления, т. е. на 21 дБ (на диаграмме рисунка 1.3 не показано). По диаграмме уровней можно записать:

$$P(P_{\text{ПРД}}) = P(P_{\text{ПРД}}) - \sum b_{\text{СУ1}} - \sum b_l + K_{\text{min}} = 40 - 8 - 48 + 21 = +5 \text{ дБ.}$$

Наиболее широко используются закрытые среды передачи, состоящие из скрученных вместе пар проводов (в одном кабеле может быть от 4 до 3000 таких пар).

1.2.1 Витая пара

Витая пара (англ. *twisted pair*) – вид кабеля связи, который представляет собой одну или несколько пар изолированных проводников, скрученных между собой (с небольшим числом витков на единицу длины) для уменьшения взаимных наводок при передаче сигнала и покрытых пластиковой оболочкой. Это один из компонентов современных структурированных кабельных систем. Используется в телекоммуникациях и в компьютерных сетях в качестве физической среды передачи сигнала во многих технологиях, таких как *Ethernet*, *Arcnet* и *Token ring*. В настоящее время, благодаря своей дешевизне и легкости в монтаже, является самым распространенным решением для построения проводных (кабельных) локальных сетей.

В зависимости от наличия защиты – электрически заземленной медной оплетки или алюминиевой фольги вокруг скрученных пар – определяют разновидности данной технологии:

- неэкранированная витая пара (*Unshielded twisted pair, UTP*);
- экранированная витая пара (*Shielded twisted pair, STP*);
- фольгированная витая пара (*Foiled twisted pair, FTP*);
- фольгированная экранированная витая пара (*Screened Foiled twisted pair, S/FTP*).

В некоторых типах экранированного кабеля защита может использоваться еще и вокруг каждой пары как индивидуальное экранирование. Экранирование обеспечивает лучшую защиту от электромагнитных наводок, как внешних, так и внутренних.

Из курса физики известно, что любой кабель обладает, кроме активного, также емкостным и индуктивным сопротивлениями, причем два последних зависят от частоты сигнала. Все три типа сопротивления определяют так называемый импеданс цепи. Наличие импеданса приводит к тому, что при распространении сигнала по кабелю он постепенно затухает, теряя часть своей первоначальной мощности.

Наряду с затуханием при распространении сигнала возникают различного рода помехи. Первый род помех – это индуцированные наводки паразитных сигналов, которые являются следствием хорошо известного явления электромагнитной индукции: изменение тока в замкнутом проводящем контуре порождает меняющийся во времени магнитный поток. Изменение магнитного потока, в свою очередь, индуцирует возникновение электрического тока в соседнем проводящем контуре. С учетом того что в кабеле близко расположены пары проводов, ясно, что изменение тока в одном из них приводит к появлению индуцированного тока в остальных парах проводов. Явление взаимной индукции носит распределенный характер, однако его более удобно характеризовать в двух локализованных точках – в начале и в конце кабеля.

Если взаимная индукция вычисляется в начале кабеля, то соответствующий тип помех будет называться *NEXT (Near-eND cRoSStaLk LoSS)*. Если же помехи, вызванные взаимной индукцией, рассматриваются в конце кабеля, то они называются *FEXT (FaR-eND cRoSStaLk LoSS)* (рисунок 1.4).

Величина переходного затухания на ближнем конце $A_{\text{бк}}$ (*NEXT*) может быть выражена следующим образом:

$$A_{\text{бк}} = 10 \log_{10}(U_{10}/U_{20}),$$

где U_{10} – уровень напряжения сигнала на передающей стороне;

U_{20} – уровень напряжения на принимающей паре во время передачи сигнала по передающей паре.

Линейное затухание витой пары ($A_{л}$) рассчитывается по формуле

$$A_{л} = 20 \log_{10}(U_{10}/U_{11}),$$

где U_{11} – уровень напряжения сигнала на приемной стороне.

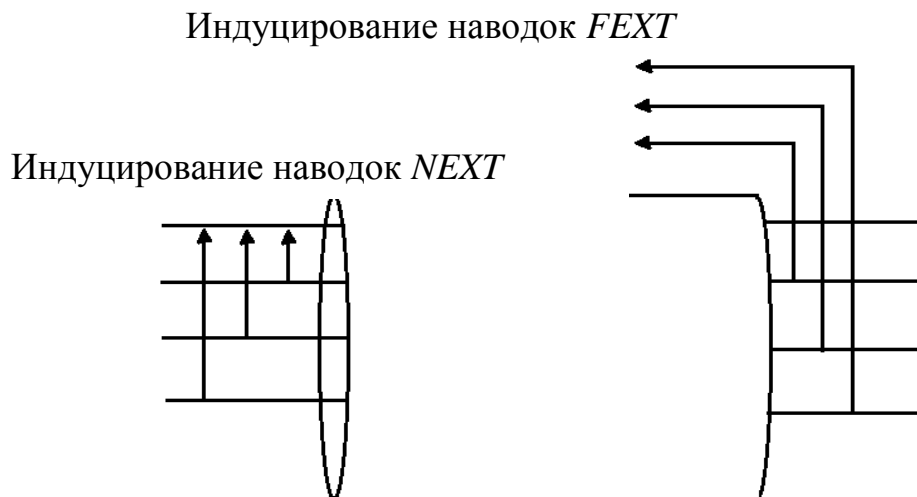
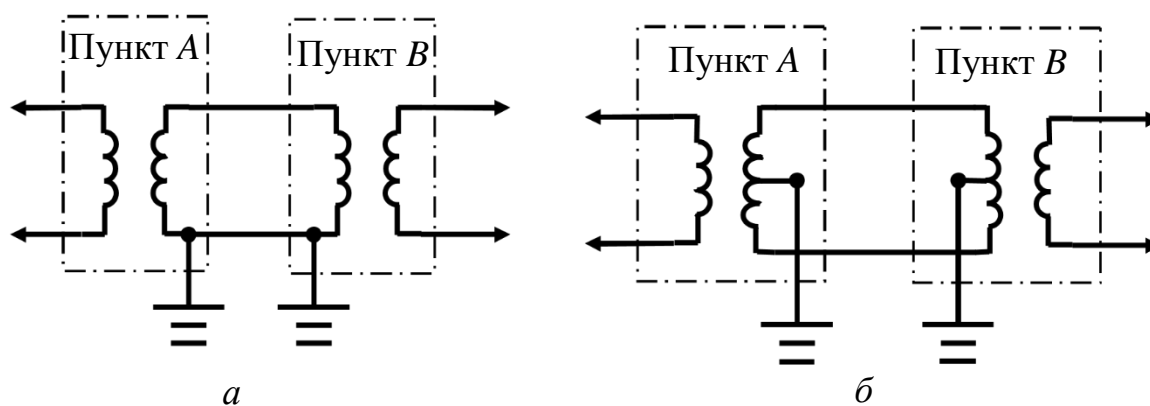


Рисунок 1.4 – Возникновение взаимных наводок в кабеле

Кроме того, при распространении сигнала возникает и другой тип помех, связанный с рассогласованием входного импеданса сетевого адаптера и кабеля. В результате подобного рассогласования возникает отражение сигнала, что также приводит к образованию шума.

Передача сигналов в описанных выше условиях помех требует использования хитроумных способов, позволяющих обеспечить необходимую скорость передачи и в то же время гарантировать безошибочное распознавание передаваемых сигналов.

При использовании пары проводов по схеме, приведенной на рисунке 1.5, *а*, линия не согласована с землей [12], почти все устройства, генерирующие шум, являются причиной возникновения в ней помех (наводок).



а – несогласованная; *б* – согласованная

Рисунок 1.5 – Виды проводных схем передачи

Вот почему для существенного уменьшения уровня шума в канале связи стала применяться согласованная двухпроводная линия (рисунок 1.5, б).

Существует несколько категорий кабеля «витая пара», которые нумеруются от *CAT1* до *CAT7* и определяют эффективный пропускаемый частотный диапазон. Кабель более высокой категории обычно содержит больше пар проводов, и каждая пара имеет больше витков на единицу длины. Категории неэкранированной витой пары описываются в стандарте *ISO 11801* (международный стандарт проводки в коммерческих зданиях):

- ***CAT1*** – полоса частот 0,1 МГц, телефонный кабель, всего одна пара. Ранее использовался в США. Проводники скручены между собой. Используется только для передачи голоса или данных при помощи модема;

- ***CAT2*** – полоса частот 1 МГц, старый тип кабеля, две пары проводников, поддерживал передачу данных на скоростях до 4 Мбит/с, использовался в сетях *token RING* и *ARCNet*. Сейчас иногда встречается в телефонных сетях;

- ***CAT3*** – полоса частот 16 МГц, двухпарный кабель, использовался при построении локальных сетей *10BASE-T* и *token RING*, поддерживает скорость передачи данных только до 10 Мбит/с. В отличие от предыдущих двух отвечает требованиям стандарта *IEEE 802.3*. Также до сих пор встречается в телефонных сетях;

- ***CAT4*** – полоса частот 20 МГц, кабель состоял из четырех скрученных пар, использовался в сетях *token RING*, *10BASE-T*, *10BASE-T4*, скорость передачи данных не превышала 16 Мбит/с, сейчас не используется;

- ***CAT5*** – полоса частот 100 МГц, четырехпарный кабель (витая пара), благодаря высокой скорости передачи (до 100 Мбит/с при использовании двух пар и до 1000 Мбит/с при использовании четырех пар) является самым распространенным сетевым носителем, используемым в компьютерных сетях до сих пор. При прокладке новых сетей пользуются несколько усовершенствованным кабелем *CAT5e* (полоса частот 125 МГц), который лучше пропускает высокочастотные сигналы;

- ***CAT6*** – полоса частот 250 МГц, применяется в сетях *Fast Ethernet* и *Gigabit Ethernet*, состоит из четырех пар проводников и способен передавать данные на скорости до 10 Гбит/с. Добавлен в стандарт в июне 2002 года. Существует категория *CAT6e*, в которой увеличена частота пропускаемого сигнала до 500 МГц. По данным *IEEE* 70 % установленных сетей в 2004 году использовали кабель категории *CAT6*, однако кабели *CAT5* и *CAT5e* вполне справляются в сетях *10GBASE-T*;

- ***CAT7*** – спецификация на данный тип кабеля пока не утверждена, скорость передачи данных – до 10 Гбит/с, частота пропускаемого сигнала – до 600–700 МГц; кабель экранирован.

Параметры промышленных кабелей для локальных вычислительных сетей, распределенных систем передачи данных, интерфейса *RS-232*, приборных кабелей и монтажных проводов приведены в приложении А.

1.2.2 Коаксиальный кабель

Коаксиальный кабель (от лат. *co* – совместно и *axis* – ось, т. е. «соосный») – вид электрического кабеля, состоящего из двух цилиндрических проводников, соосно вставленных один в другой. Чаще всего используется центральный медный проводник, покрытый пластиковым изолирующим материалом, поверх которого идет второй проводник – медная сетка или алюминиевая фольга. Благодаря совпадению центров обоих проводов потери на излучение практически отсутствуют; одновременно обеспечивается хорошая защита от внешних электромагнитных помех. Данный кабель обеспечивает передачу данных на большие расстояния. Используется в сетях кабельного телевидения и во многих других областях. Ранее использовался при построении компьютерных сетей (пока не был вытеснен витой парой). Основной характеристикой кабеля является волновое сопротивление. В зависимости от этой величины и толщины коаксиальный кабель делится на несколько категорий. Компьютерные сети на основе этого кабеля обычно требуют наличия терминаторов на оконечных точках.

Наиболее распространенные категории кабеля:

- *RG-8* и *RG-11* – «толстый» *Ethernet (Thicknet)*, 50 Ом, стандарт *10BASE5*;
- *RG-58* – «тонкий» *Ethernet (Thinnet)*, 50 Ом, стандарт *10BASE2*;
- *RG-58/U* – сплошной центральный проводник;
- *RG-58A/U* – многожильный центральный проводник;
- *RG-58C/U* – военный кабель;
- *RG-59* – телевизионный кабель (*Broadband/Cable Television*), 50 Ом (российский аналог – РК-50);
- *RG-59/U* – телевизионный кабель (*Broadband/Cable Television*), 75 Ом;
- *RG-62 ARNet*, 93 Ом (российский аналог – РК-75).

«Тонкий» *Ethernet*. Был наиболее распространенным кабелем для построения локальных сетей. Диаметр – примерно 6 мм – и значительная гибкость позволяли ему быть проложенным практически в любых местах. Кабели соединялись друг с другом и с сетевой платой в компьютере при помощи *T*-коннектора *BNC (British Naval Connector)*. Между собой кабели могли соединяться с помощью *I*-коннектора *BNC* (прямое соединение). На обоих концах сегмента должны быть установлены терминаторы. Поддерживает передачу данных до 10 Мбайт/с на расстояние до 185 м.

«Толстый» *Ethernet*. Более толстый по сравнению с предыдущим кабель – около 12 мм в диаметре – имел более толстый центральный проводник. Плохо гнулся и имел значительную стоимость. Кроме того, в присоединении к компьютеру были некоторые сложности – использовались трансиверы *AUI (Attachment UNIT Interface)*, присоединенные к сетевой карте с помощью ответвления, понижающего кабель, так называемые «вампирики». За счет более толстого проводника передачу данных можно было осуществлять на расстояние до 500 м со скоростью 10 Мбайт/с. Однако сложность и дороговизна установки не дали этому кабелю такого широкого распространения, как *RG-58*. Исторически фирменный кабель *RG-8* имел желтую окраску, и поэтому иногда можно встретить название «желтый» *Ethernet (Yellow Ethernet)*.

Удельное затухание α коаксиальных кабелей определяется по формуле

$$\alpha = 2,43\sqrt{f} \text{ дБ/км}, \quad (1.15)$$

где f – частота сигнала, МГц.

1.2.3 Волновод

Если частота передачи высока, то электрическая и магнитная составляющие сигнала могут распространяться в свободном пространстве (не требуется сплошной проводник). Для того чтобы сигнал распространялся в нужном направлении с наименьшими помехами и потерями, иногда используют волновод. Обычно волноводы применяют на частотах от 2 до 110 ГГц для соединения сверхвысокочастотных (СВЧ) передатчиков и приемников с антеннами. В волновод под повышенным давлением закачивается сухой воздух или чистый азот с целью снижения влажности, поскольку в СВЧ-диапазоне она существенно увеличивает затухание. Поперечное сечение волновода может быть круглым или прямоугольным.

1.3 Использование высоковольтных линий электропередачи в качестве линий связи

В современных развитых государствах высоковольтные линии электропередач (ЛЭП) покрывают густой сетью большие территории, соединяя не только источники и потребителей электроэнергии, но и объекты, находящиеся в тесной информационной зависимости. Использование ЛЭП в качестве проводной (воздушной) линии связи для систем передачи информации дает большой экономический эффект. Каналы по ЛЭП широко применяются в энергосистемах с целью передачи телемеханических сообщений для управления местными электростанциями, подстанциями и другими объектами.

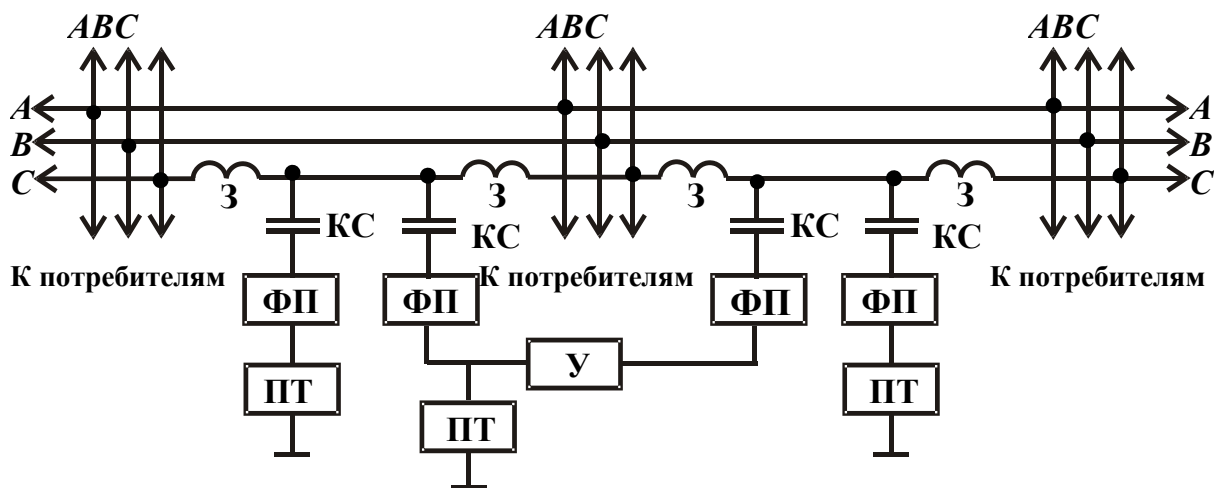
Линии электропередач 35, 110, 220 и 400 кВ имеют высокую электрическую и механическую прочность, поэтому каналы по высоковольтным линиям характеризуются высокой надежностью работы, если применяется также высоконадежная аппаратура каналов. Передача сигналов по ЛЭП высокого напряжения осуществляется токами высокой частоты в диапазоне от 300 до 500 кГц, а на некоторых воздушных линиях и до 1000 кГц. Каналы по ЛЭП высокого напряжения имеют сравнительно высокий уровень помех, поэтому для получения достаточного для нормальной работы отношения сигнал/помеха применяется специальная аппаратура каналов со сравнительно высокой выходной мощностью сигналов и качественные фильтры для разделения сигналов и уменьшения перекрестных помех. Уровень сигнала на линиях 35–220 кВ составляет примерно +4,5 Нп (10 Вт) при входном сопротивлении линии 400–600 Ом.

Удельное затухание α для ЛЭП длиной до 300 км в диапазоне частот 50–300 кГц определяется по формуле

$$\alpha = K\sqrt{f} \text{ дБ/км}, \quad (1.16)$$

где K – коэффициент изоляции ($K = 12,2$ для ЛЭП напряжением 35 кВ; 8,7 – для ЛЭП напряжением 110 кВ; 6,55 – для ЛЭП напряжением 220 кВ и 7,22 – для ЛЭП напряжением 400 кВ).

С целью получения стабильного канала связи применяется высокочастотная обработка линии. Для высокочастотной обработки и присоединения используются промышленные заградители, конденсаторы связи и фильтры присоединения, включаемые по принятой схеме канала: фаза – земля (рисунок 1.6) или фаза – фаза.



З – заградитель; КС – конденсатор связи; ФП – фильтр присоединения; ПТ – пост телемеханики; У – усилитель

Рисунок 1.6 – Схема фаза – земля передачи ВЧ-сигнала по ЛЭП

Присоединение по схеме фаза – земля имеет некоторую аналогию с однопроводной цепью, однако, как показали экспериментальные и теоретические исследования, две другие необработанные фазы играют весьма существенную роль в процессе распространения токов высокой частоты. Из-за емкостной и индуктивной связи между фазами и между каждой из фаз и землей части энергии токов высокой частоты переходят на необработанные фазы. Следовательно, в передаче высокочастотной энергии при однофазном присоединении участвуют все три фазы ЛЭП.

Переходное сопротивление между соседними обработанными линиями ЛЭП сравнительно невелико из-за значительной емкости шин и оборудования подстанций по отношению к земле. По этой причине одинаковые частоты на разных линиях в одной сети не используются, что существенно снижает качество рабочих каналов.

С целью повышения эффективности и помехоустойчивости передачи по ЛЭП применяется аппаратура ВЧ-каналов с системой с одной боковой полосой амплитудной или частотной модуляции (ОАМ или ОЧМ).

1.4 Использование распределительных силовых сетей в качестве линий связи

Распределительные силовые сети (РСС) предназначены для распределения электроэнергии между основными объектами промышленных предприятий и сооружений, таких как крупные металлургические и химические комбинаты, шахты, нефте- и газопромыслы, железнодорожный и городской транспорт, сельское и коммунальное хозяйство и др. По роду тока РСС делятся на линии переменного и постоянного тока. К линиям постоянного тока относятся контактные сети электровозного транспорта (железнодорожного, городского, подземного).

С помощью таких каналов осуществляется централизованное переключение электросчетчиков на дневной и ночной тарифы, включение уличного освещения, передача пожарной тревоги и т. п. Команды управления передаются только в одном направлении из центрального пункта, а ответная команда известительной сигнализации отсутствует.

Каналы по РСС применяются для передачи телемеханической информации в горнодобывающей промышленности, сельском хозяйстве и в некоторых других отраслях народного хозяйства.

При соответствующем построении каналы по РСС обладают высокой надежностью и недороги. Вместе с тем они характеризуются сравнительно высоким уровнем помех, при которых для надежной связи по необработанным разветвленным энергетическим сетям требуется сравнительно высокая мощность сигнала.

Из условия быстродействия системы телемеханики для промышленных объектов часто могут иметь полосу пропускания одного канала, равную 1–10 Гц. Это позволяет реализовать каналы телемеханики по РСС сравнительно простыми техническими средствами с весьма ограниченной обработкой.

Передача телемеханической информации по каналам РСС осуществляется в диапазоне звуковых частот или в диапазоне 10–200 кГц. Соответственно, развивается два направления.

Первое связано с передачей циркулярных команд телеуправления массовым объектам без известительной сигнализации. При этом обычно используется одна или несколько частот в диапазоне 175–3000 Гц. Для передачи широко используются генераторы, мощность которых составляет 0,03–0,5 % мощности силовой сети. Уровень выходного сигнала передатчика на входе канала достигает 4–5 В, а входной уровень в точках приема – 1 В. Для второго направления характерно использование диапазона частот от 10 до 300 кГц. Уровень помех в этом диапазоне значительно меньше, вследствие чего открывается возможность двусторонней передачи сигналов. РСС имеют весьма разветвленную структуру и

большое число изменяющихся во времени нагрузок. Все это затрудняет высокочастотную обработку линии.

Без обработки РСС имеют относительно большое и непостоянное затухание, неравномерное по частоте и по времени. Это вызвано наличием существенных и непостоянных во времени неоднородностей и соизмеримостью длины ответвлений с четвертью длины рабочей волны.

Оптимальный диапазон частот с точки зрения отношения сигнал/помеха зависит от затухания, уровня помех, протяженности РСС, конфигурации линий и характера нагрузок.

Для кабельных линий оптимальный диапазон лежит в области относительно более низких частот порядка 15–50 кГц, а для воздушных линий небольшой протяженности – в области 30–60 кГц. Выбирая РСС для конкретных условий, целесообразно уточнить экспериментально оптимальный диапазон частот.

Разновидностью РСС являются контактные сети для электрического транспорта. Они используются для передачи сообщений ТУ, ТС и ТИ. С целью уменьшения затухания и повышения стабильности параметров концы контактной сети и цепи токосъема обрабатываются. Контактная сеть как канал связи используется в городском транспорте, а также на некоторых электрифицированных дорогах. Диапазон рабочих частот выбирается в области 30–120 кГц. В настоящее время широко применяются для передачи данных линии электропитания жилых домов. По этим линиям передаются показания счетчиков электроэнергии, газа, воды, температуры техносителей, а также производится управление домашними устройствами (например, по стандарту X10). В последние годы появился интерес к высокоскоростной передаче информации по линиям электропитания как внутри дома, так и за его пределами для доступа к Интернету.

На рисунке 1.7 показан пример получения фильма по электропроводам и управления бытовой техникой.

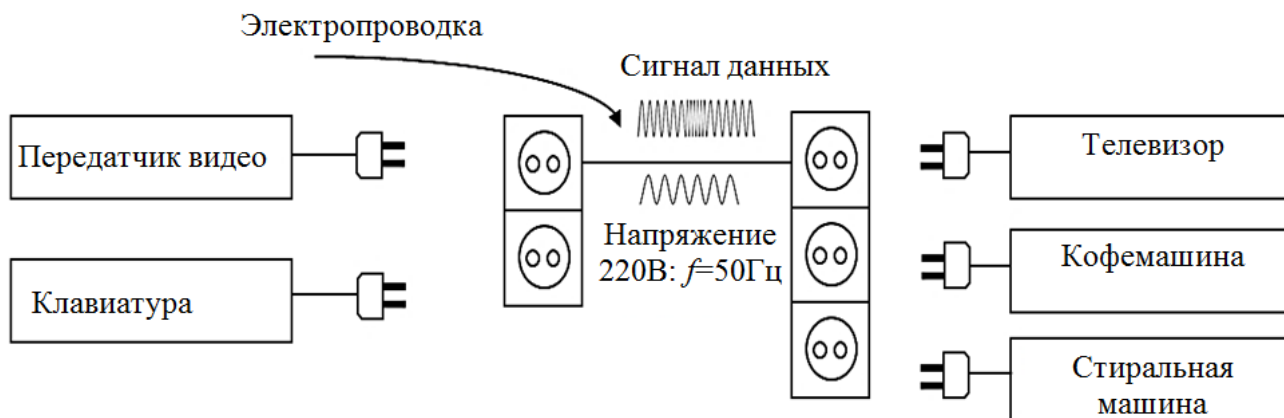


Рисунок 1.7 – Сеть на основе электропроводки дома

Сложность применения домашней электропроводки заключается в том, что в домах используются различные типы проводов (R , L и C), а также при включении и выключении бытовых приборов возникает влияние нагрузки (активная,

емкостная, индуктивная). Кроме того, сама линия представляет антенну, собирая внешние сигналы и излучая собственные.

Несмотря на перечисленные трудности, по обычной домашней электросети можно отправлять данные со скоростью как минимум 100 Мбит/с, используя специальные устройства модуляции (модем).

1.5 Радиолинии

Радиолинии в настоящее время – один из самых распространенных видов линий связи, используемый для передачи сигналов различного назначения и характера. В радиолиниях средой распространения электромагнитных волн в подавляющем большинстве случаев (за исключением случая связи между космическими аппаратами) является атмосфера Земли.

На рисунке 1.8 приведена схема упрощенного строения атмосферы Земли.

Реальное строение атмосферы более сложно, и приведенное деление на тропосферу, стратосферу и ионосферу достаточно условно. Высота (H) слоев приблизительно и различна для разных географических точек Земли. Около 80 % массы атмосферы сосредоточено в тропосфере и около 20 % – в стратосфере. Плотность атмосферы в ионосфере крайне мала, граница между ионосферой и космическим пространством является условным понятием, т. к. следы атмосферы встречаются даже на высотах более 400 км. Считается, что плотные слои атмосферы заканчиваются на высоте 120 км.

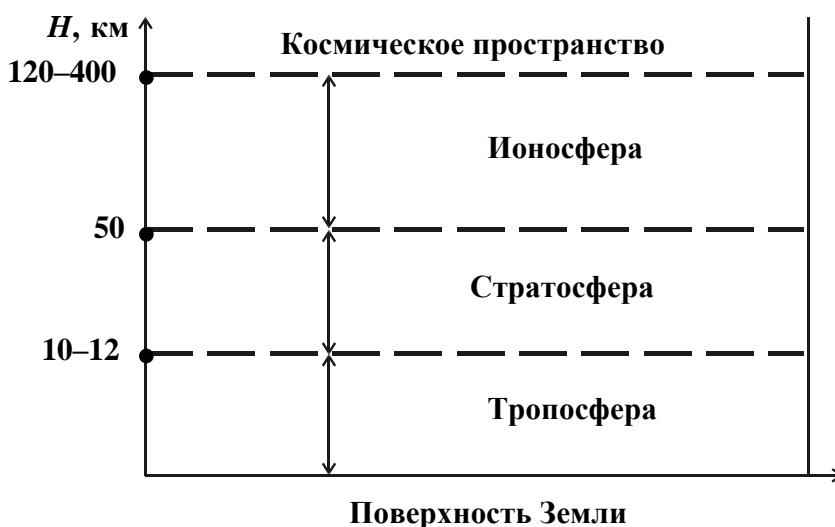


Рисунок 1.8 – Строение атмосферы Земли

Передаваемые по радиолинии сигналы представляют собой электромагнитные волны, излученные антенной передатчика и воспринимаемые антенной приемника. Всякая цепь переменного тока излучает электромагнитные волны, что следует из решения системы уравнений электромагнитного поля. При этом количество энергии излученной волны за некоторый промежуток времени зависит от скорости изменения тока в контуре. При постоянном токе и постоянных

зарядах излучение не имеет места. При токах промышленной частоты 50 Гц излучение ничтожно, его обычно не принимают во внимание. Поэтому для передачи сигналов по радиолинии используются высокие частоты (больше 100 кГц).

Известно, что электрические и магнитные поля не могут существовать без породивших их источников, т. е. зарядов или токов. Возбужденное каким-либо источником переменного тока электромагнитное поле может существовать само по себе в отрыве от источников и после излучения в виде электромагнитных волн в свободное пространство будет распространяться в определенном направлении, при определенном взаимном расположении векторов \vec{E} электрического и \vec{H} магнитного полей. Устройства, осуществляющие преобразование направленных электромагнитных волн в радиоволны с заданной плотностью распределения энергии по пространственным углам и наоборот, называются антеннами.

Антенны характеризуются параметрами [60], рассмотренными ниже.

Характеристиками называются некоторые величины, описывающие свойства антенны и зависящие от угловых координат точки наблюдения в дальней зоне в режиме передачи или от угловых координат источника поля в режиме приема. Параметры антенны не зависят от угловых координат. Основные характеристики антенны: диаграмма направленности (ДН), фазовая диаграмма, поляризационная диаграмма (ПД). Основные параметры: коэффициент направленного действия (КНД), коэффициент усиления, входное сопротивление (Z). Характеристики и параметры по-разному определяются в режиме передачи и приема, но их численные значения в этих двух режимах работы антенны совпадают.

Фазовой диаграммой называется зависимость фазы вектора поля антенны в дальней зоне от угловых координат точки наблюдения. Фазовую диаграмму изображают в прямоугольных или полярных координатах, а значение фазы отсчитывают от значения ее в направлении главного максимума ДН.

Поляризационной диаграммой называется зависимость поляризационных параметров поля антенны в дальней зоне (коэффициента эллиптичности K_e и угла преимущественной поляризации γ) от угловых координат точки наблюдения.

Коэффициент направленного действия – это отношение мощности излучения гипотетической ненаправленной антенны с $F(\theta, \varphi) = 1$ к мощности излучения заданной направленной антенны при условии, что обе антенны создают в точке наблюдения дальней зоны поле одинаковой напряженности. В зависимости от конструкции антенны КНД в направлении главного максимума может иметь значение от нескольких единиц до нескольких миллионов. Чем уже главный лепесток ДН и меньше уровень боковых лепестков, тем больше КНД.

Входное сопротивление антенны определяется соотношением

$$Z_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}},$$

где $U_{\text{вх}}, I_{\text{вх}}$ – комплексные амплитуды напряжения и тока на входе антенны.

Диаграмма направленности антенны в режиме приема – это зависимость напряжения или тока на входе антенны (или напряженности поля в линии передачи, подключенной к антенне) от угловых координат точки источника радиоизлучения.

Коэффициент направленного действия показывает, во сколько раз средняя мощность, излучаемая (принимаемая) направленной антенной, в заданном угле ее диаграммы направленности больше средней мощности в том же угле направленной антенны, работающей от того же источника.

На основании рассмотренных ранее параметров рассмотрим основные типы антенн.

Линейные симметричные вибраторы (рисунок 1.9) используются в диапазоне миллиметровых, сантиметровых, дециметровых, метровых волн и в более длинноволновых диапазонах. Они представляют собой прямолинейные проводники, возбуждаемые в определенных точках. Вибраторные антенны в зависимости от конструкции имеют КНД от нескольких единиц до десятков тысяч и применяются в системах радиосвязи, радионавигации, телевидении, телеметрии и других областях радиотехники [60].

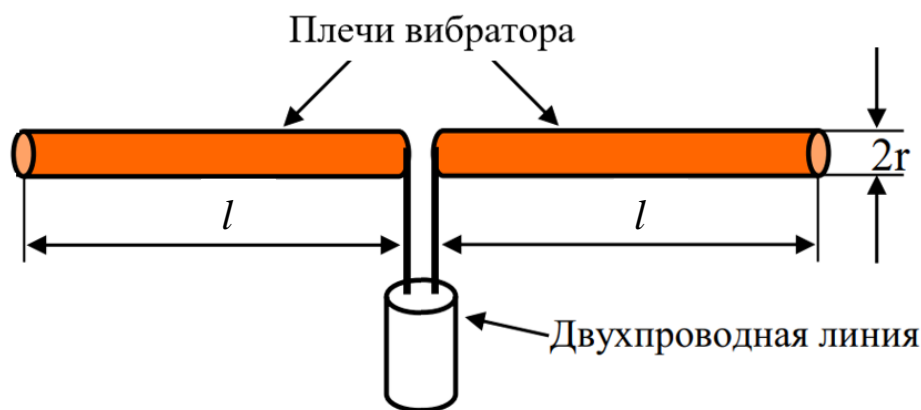


Рисунок 1.9 – Симметричный вибратор

Плечи вибратора выполняются из металлических проводников с поперечными размерами $2r$, значительно меньшими их длины. В середине к плечам вибратора подключается двухпроводная линия, которая в свою очередь подключается к генератору в режиме передачи или к приемнику в режиме приема. В диапазоне УКВ (длина волны меньше 10 м) чаще всего используются вибраторы с длиной каждого плеча l , равной четверти длины волны.

Общая длина вибраторной антенны $2l$ в этом случае близка к половине длины волны $\lambda/2$, и вибратор называется полуволновым.

Распределение тока в плечах полуволнового вибратора приближенно можно определить, сопоставив вибратор и двухпроводную линию, разомкнутую на конце, длиной в четверть длины волны. На рисунке 1.10, а показана двухпроводная линия, а на рисунке 1.10, б – полуволновой вибратор [60].

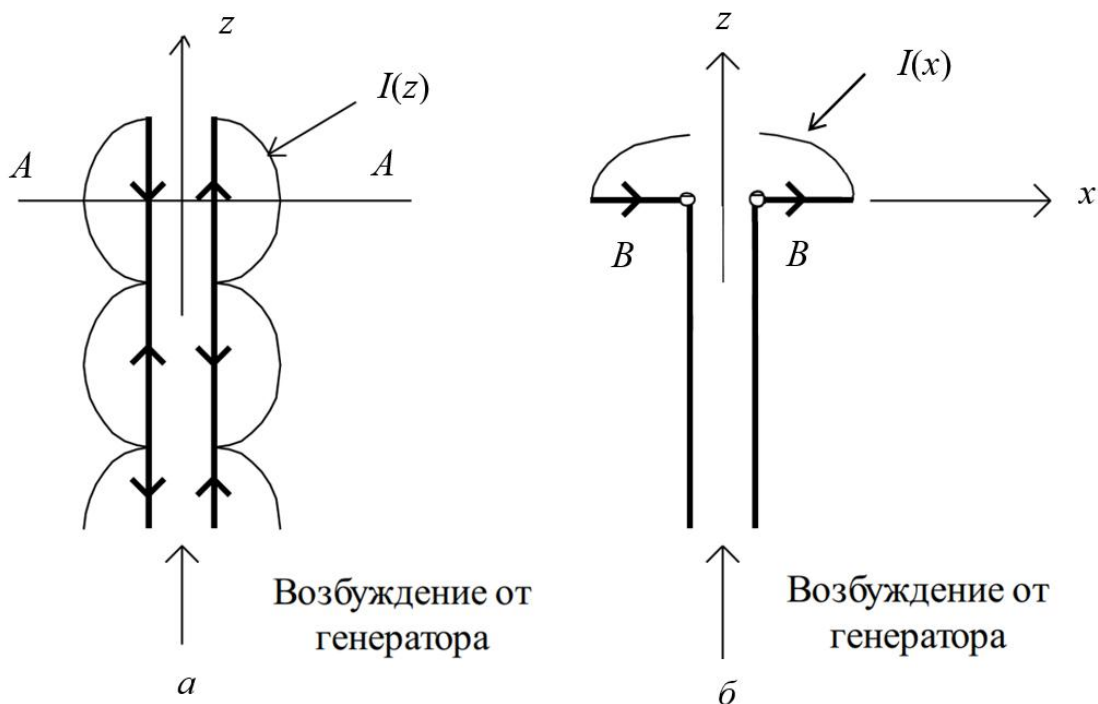


Рисунок 1.10 – Двухпроводная линия (а) и полуволновой вибратор (б)

Линия снизу возбуждается от генератора, сверху разомкнута, поэтому в линии устанавливается режим стоячей волны тока. Так как расстояние между проводниками линии делается значительно меньше длины волны, а направления токов в соседних проводниках противоположны, линия не излучает.

Если в некотором сечении $A-A$, расположенном от разомкнутого конца на расстоянии четверти длины волны, левый проводник повернуть влево, а правый – вправо на 90° , получится полуволновой вибратор, возбуждаемый двухпроводной линией (см. рисунок 1.10, б). При этом распределение тока $I(x)$ в плечах вибратора изменится очень мало – на свободных концах плеч ток будет равен нулю, а в точках подключения двухпроводной линии (на рисунке 1.10, б – это точки B) амплитуда тока будет максимальной. Как видно, в обоих плечах вибратора направление тока одинаково, поэтому вибратор излучает.

Направленные свойства вибратора можно определить, рассматривая вибратор как совокупность элементарных излучателей бесконечно малой длины dx (диполей Герца). Токи во всех диполях имеют одинаковые фазы (одинаковое направление), поэтому их поля складываются в направлении оси z (при $\theta = 0$). В других направлениях поля уже не складываются синфазно, т. к. расстояния от разных диполей до точки наблюдения разные. В направлении оси x вибратор, так же как и диполь Герца, не излучает [60].

Наглядное представление о характере излучения дает диаграмма направленности (ДН). Диаграммой направленности называется зависимость амплитуды вектора поля антенны в дальней зоне от угловых координат точки наблюдения, т. е. зависимость $E(\theta, \varphi)$. Диаграмму направленности нормируют и обозначают символом $F(\theta, \varphi)$. Очевидно, $0 \leq F(\theta, \varphi) \leq 1$.

ДН изображают в прямоугольных или полярных координатах как функцию угла Θ при $\varphi = \text{const}$. Обычно берут два значения угла φ : $\varphi = 0$ и $\varphi = 90^\circ$. На рисунках 1.11 и 1.12 показаны типичные ДН в прямоугольных и полярных координатах, а на рисунке 1.13 представлены диаграммы направленности симметричных вибраторов различной длины в плоскостях E и H .

Как видно, ДН имеет лепестковый характер, что является следствием интерференции полей, излучаемых различными элементами (частями) антенны. Различают главный лепесток (ГЛ) и боковые лепестки (БЛ). Параметры ДН:

- $2\Theta_{0,5}$ – ширина главного лепестка по уровню половинной мощности;
- Θ_m – направление главного максимума в пространстве;
- F_{6m} – максимальный уровень боковых лепестков [60].

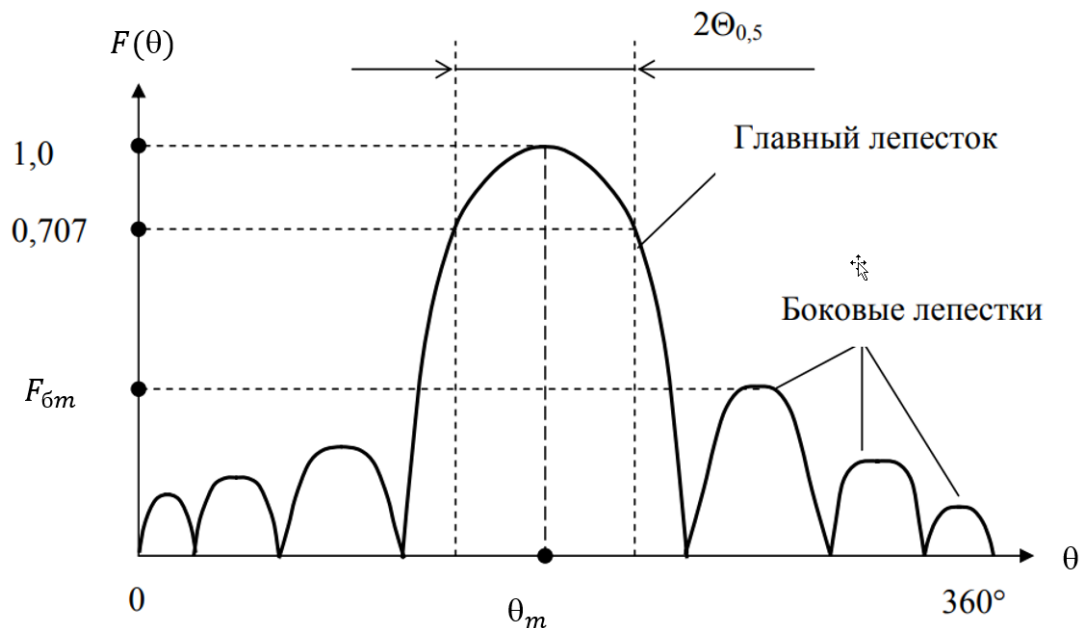


Рисунок 1.11 – Диаграмма направленности в прямоугольных координатах

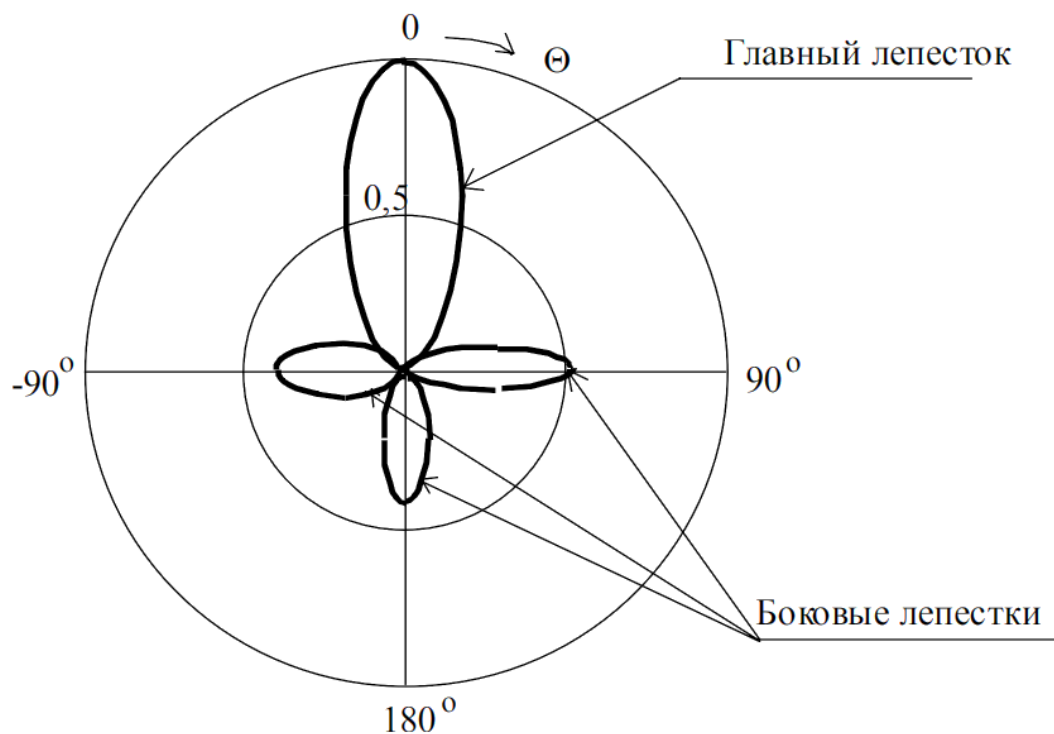


Рисунок 1.12 – Диаграмма направленности в полярных координатах

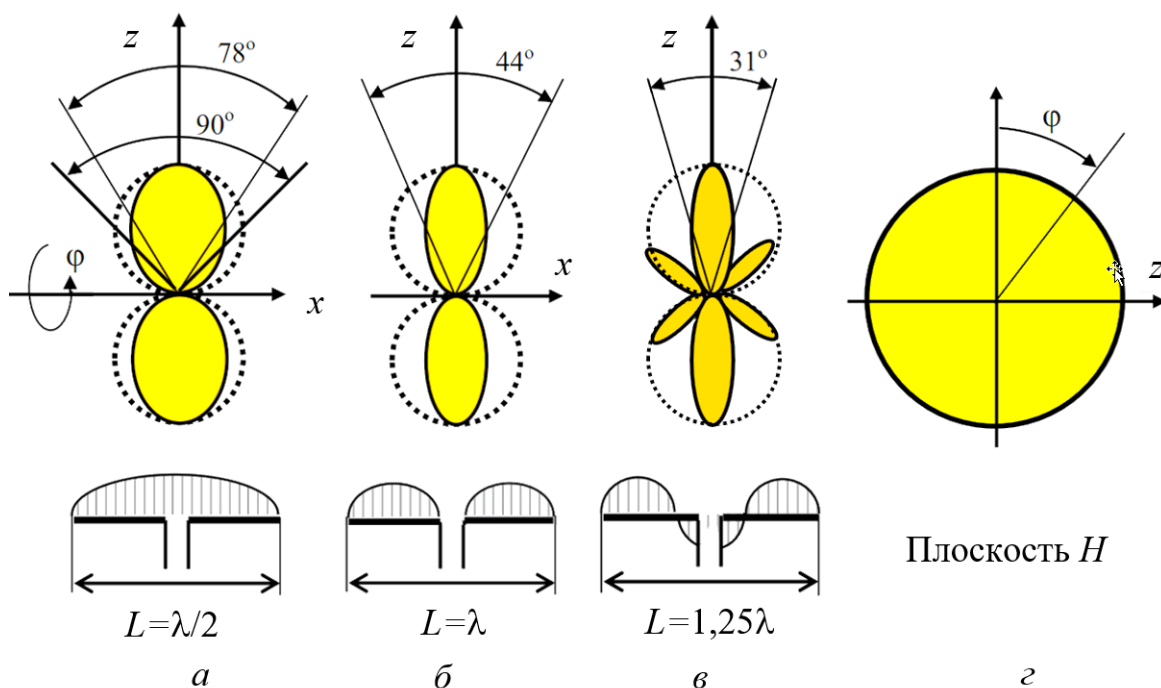
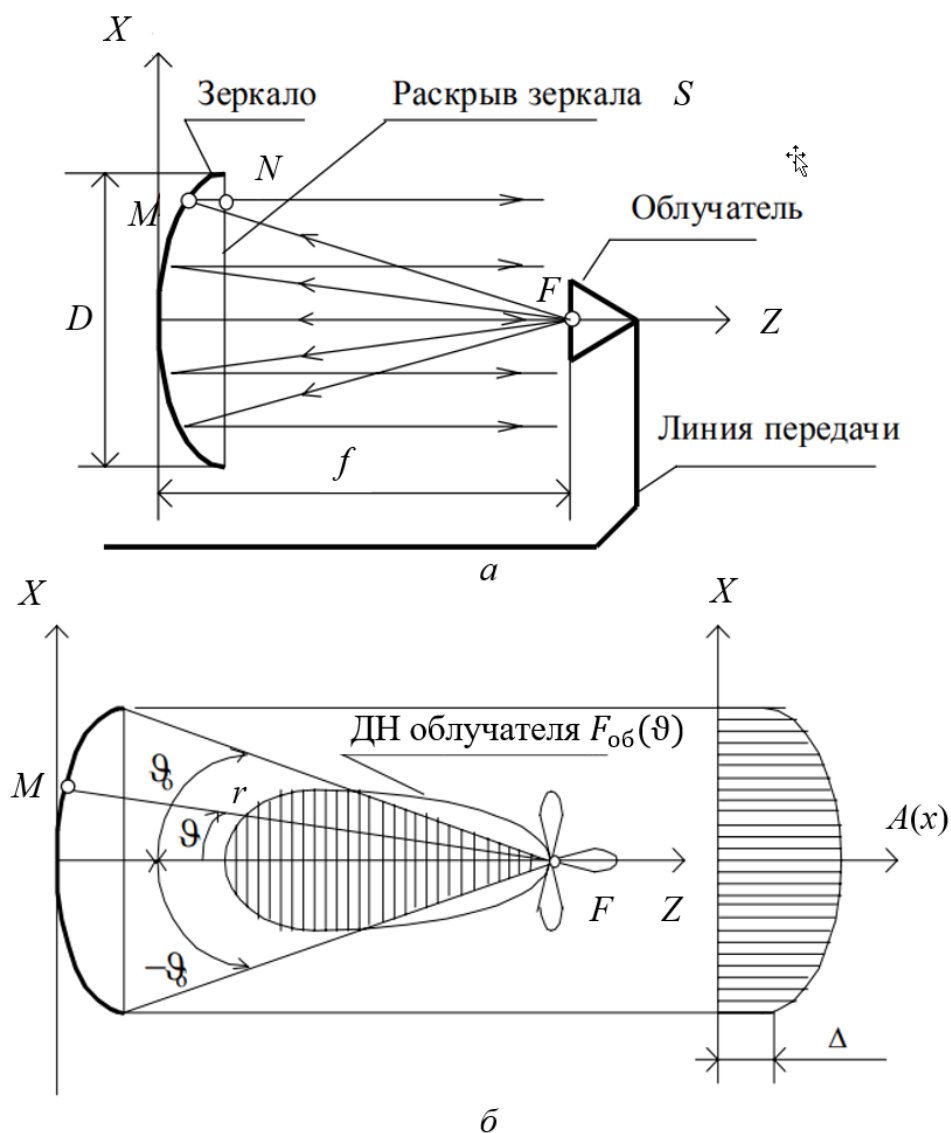


Рисунок 1.13 – Диаграммы направленности линейных симметричных вибраторов с различной длиной в плоскости E ($a, б, в$) и плоскости H ($г$)

Зеркальные антенны относятся к классу апертурных антенн, используются как средне- и высоконаправленные антенны в диапазонах миллиметровых,

сантиметровых, дециметровых волн и в отдельных случаях в диапазоне метровых волн.

Зеркальная антенна состоит из двух основных элементов: облучателя и отражателя. В качестве облучателя используется слабонаправленная антенна (открытый конец прямоугольного или круглого волноводов, рупорные, вибраторные, щелевые антенны, антенны бегущей волны, малоэлементные антенные решетки). Отражатель представляет собой металлическое зеркало плоской или вогнутой формы. Зеркальные антенны могут быть одно-, двух- или многозеркальными. Наиболее простой является однозеркальная антенна с отражателем в виде параболоида полного профиля. Такие антенны находят широкое применение. Однозеркальная антенна схематически показана на рисунке 1.14, *a*.



a – принцип работы зеркальной антенны; *б* – диаграмма направленности облучателя и амплитудное распределение на раскрыве зеркала

Рисунок 1.14 – Зеркальная антенна

Параболическое зеркало образуется вращением параболы вокруг оси Z . На рисунке 1.14, *a* парабола показана жирной линией. Такое зеркало называется параболоидом вращения полного профиля. Более точно можно пояснить принцип действия зеркальной антенны, рассматривая распределение амплитуд и фаз поля на раскрыве зеркала после отражения от его поверхности (рисунок 1.14, *б*).

Основные геометрические параметры параболоида вращения: D – диаметр; f – фокусное расстояние; точка F – фокус параболы. Ось Z , проходящая через фокус F и вершину зеркала, называется фокальной осью.

Свойством параболического зеркала является постоянство суммы расстояний от точки фокуса F до точки M на поверхности зеркала и от точки M до точки N на раскрыве зеркала при любых углах ϑ . В результате во всех точках раскрыва фазы поля оказываются одинаковыми и поля всех элементов раскрыва (элементов Гюйгенса) складываются в фазе в точке дальней зоны, расположенной на оси зеркала. Происходит фокусировка излучения облучателя в узкий луч, ширина которого тем меньше, чем больше диаметр зеркала. Главный максимум ДН зеркала ориентирован перпендикулярно фронту плоской волны, отраженной от поверхности зеркала, т. е. раскрыву зеркала. КНД зеркала возрастает пропорционально площади раскрыва зеркала S [60].

Чем меньше длина волны и больше диаметр зеркала, тем уже диаграмма направленности антенны и больше коэффициент усиления.

Фазированные антенные решетки. В последние годы, и в первую очередь в радиолокационных системах, широко применяются фазированные антенные решетки (ФАР). Такие антенны представляют собой систему определенным образом расположенных в одной плоскости элементарных излучателей, питаемых через индивидуальные фазовращатели одним источником высокочастотных (ВЧ) колебаний (рисунок 1.15) или системой когерентных (сфазированных) источников.

Электромагнитные поля, создаваемые каждым излучателем, суммируясь в пространстве вблизи антенны, образуют единый электромагнитный фронт волны с узкой диаграммой направленности.

К важнейшему свойству ФАР относится возможность электронным способом с помощью компьютера и фазовращателей (Φ) практически безынерционно изменять положение диаграммы направленности антенны в пространстве. Это способствует быстрому нахождению целей в радиолокационном пространстве.

Для создания остронаправленных антенн количество излучателей достигает 10 000. Поэтому фазировка их сложна и осуществляется с помощью компьютера. Стоимость ФАР очень высока. Построение ФАР с помощью фазированных источников позволяет источникам малой мощности получать в пространстве электромагнитный поток большой мощности. Это важно в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн, где создание источников большой мощности затруднено. В настоящее время ФАР применяют в мобильной и спутниковой связи в виде так называемых интеллектуальных антенн.

Распределение частотных и соответствующих им волновых диапазонов, а также общепринятая международная классификация диапазонов радиоволн приведены в таблице 1.4, где приняты следующие условные обозначения: *VLF* (*Very Low Frequency* – очень низкая частота, ОНЧ); *LF* (*Low Frequency* – низкая частота, НЧ); *MF* (*Medium Frequency* – средняя частота, СЧ); *HF* (*High Frequency* – высокая частота, ВЧ); *UHF* (*Ultrahigh Frequency* – ультравысокая частота, УВЧ); *SHF* (*Superhigh Frequency* – сверхвысокая частота, СВЧ); *EHF* (*Extremely High Frequency* – крайне высокая частота, КВЧ); *THF* (*Tremendously High Frequency* – гипервысокая частота, ГВЧ).

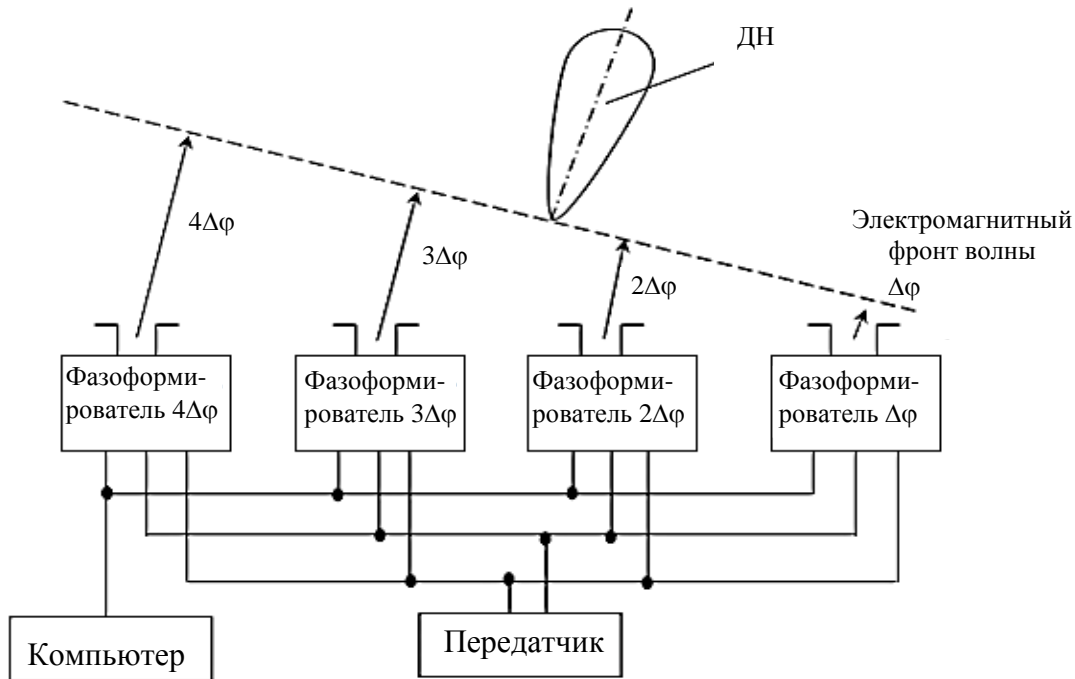


Рисунок 1.15 – Фазированная антенная решетка

Таблица 1.4 – Классификация диапазонов радиоволн

Наименование волн	Условное обозначение	Диапазон волн	Диапазон частот	Устаревшие термины
Декамегаметровые	–	10^5 – 10^4 км	3–30 Гц	–
Мегаметровые	–	10^4 – 10^3 км	30–300 Гц	–
Гектокилометровые	–	10^3 – 10^2 км	300–3000 Гц	–
Мириаметровые	ОНЧ (<i>VLF</i>)	10^2 – 10^1 км	3–30 кГц	Сверхдлинные
Километровые	НЧ (<i>LF</i>)	10–1 км	30–300 кГц	Длинные
Декаметровые	ВЧ (<i>HF</i>)	100–10 м	3–30 МГц	Короткие
Метровые	ОВЧ (<i>VHF</i>)	10–1 м	30–300 МГц	Ультракороткие
Дециметровые	УВЧ (<i>UHF</i>)	100–10 см	300–3000 МГц	Ультракороткие
Сантиметровые	СВЧ (<i>SHF</i>)	10–1 см	3–30 ГГц	Ультракороткие
Миллиметровые	КВЧ (<i>EHF</i>)	10–1 мм	30–300 ГГц	Ультракороткие
Децимиллиметровые	ГВЧ	1–0,1 мм	300–3000 ГГц	Ультракороткие

На выбор диапазона радиоволн для конкретной системы передачи информации влияет ряд факторов, связанных с особенностями излучения и распространения электромагнитных волн, характером имеющихся в заданном диапазоне помех, параметрами сообщений, характеристиками и габаритными размерами передающих и приемных антенн. Распределение частот между различными службами приведено в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Распределение частот согласно международному регламенту радиосвязи в диапазонах ОВЧ и УВЧ

Частота, МГц	Распределение по службам
30,005–30,01	Фиксированная, подвижная, служба космической эксплуатации (СКЭ)
30,01–37,5	Фиксированная, подвижная, служба космических исследований (СКИ)
37,5–38,25	Фиксированная, подвижная, радиоастрономическая
38,25–47,0	Фиксированная, подвижная, СКИ
47,0–68,0	Радиовещательная
68,0–74,8	Фиксированная, подвижная (за исключением воздушной)
74,8–75,2	Воздушная радионавигационная
75,2–87,5	Фиксированная, мобильная (за исключением воздушной)
87,5–108,0	Радиовещательная
108,0–117,975	Воздушная радионавигационная
117,975–137,0	Воздушная и спутниковая подвижная
137,0–138,0	Фиксированная, подвижная (за исключением воздушной), СКИ, СКЭ
138,0–144,0	Воздушная подвижная
144,0–146,0	Любительская, любительская спутниковая
146,0–149,9	Фиксированная, подвижная (за исключением воздушной)
149,9–150,05	Радионавигационная спутниковая
150,05–156,7625	Фиксированная, подвижная (за исключением воздушной), радиоастрономическая
156,7625–156,8375	Морская подвижная (сигналы бедствия)
156,8375–174,0	Фиксированная, подвижная, радиовещательная
174,0–230,0	Радиовещательная, подвижная, фиксированная
230,0–328,6	Фиксированная, подвижная, СКЭ, радиоастрономическая
328,6–335,4	Воздушная радионавигационная
335,4–399,9	Фиксированная, подвижная
399,9–400,05	Радионавигационная спутниковая
400,05–400,15	Спутниковая служба стандартных частот и сигналов точного времени
400,15–406,0	Служба метеорологии, СКИ, СКЭ, фиксированная, подвижная
406,0–406,1	Подвижная спутниковая
406,1–430,0	Фиксированная, подвижная (за исключением воздушной), радиолокационная
430,0–440,0	Любительская, радиолокационная
440,0–470,0	Фиксированная, подвижная (за исключением воздушной)
470,0–790,0	Радиовещательная
790,0–960,0	Фиксированная, подвижная (за исключением воздушной), радиовещательная, радионавигационная

Километровые волны распространяются между двумя концентрическими сферами – поверхностью Земли и поверхностью ионизированного слоя, расположенного на высоте 70–80 км; поглощаются земной поверхностью слабо и огибают встречающиеся препятствия; применяются в системах радионавигации и для связи в морском флоте.

С уменьшением длин волн от 1000 до 100 м (гектометровые волны) увеличивается затухание поверхностного луча (земной волны) и он начинает играть все меньшую роль в радиосвязи. Гектометровый диапазон чаще всего используется для передачи сигналов на подвижные объекты различного назначения.

Характерной особенностью распространения волн декаметрового диапазона является быстрое затухание поверхностной волны. На больших расстояниях от передатчика существуют только пространственные волны, отраженные верхними слоями ионосферы и приходящие в точку приема под некоторыми углами к горизонту. Прохождение декаметровых волн целиком обусловлено состоянием ионосферы. Для устойчивой работы в разное время суток и года требуются разные волны. На декаметровых волнах имеет место многолучевое распространение. В точку приема приходит несколько лучей, в результате их сложения возникают колебания сигнала – замирания. Декаметровые волны находят широкое применение в системах трансконтинентальных и трансокеанских связей, для обмена информацией в различных наземных случаях.

Волны (короче 10 м – метровые, дециметровые, сантиметровые) широко используются в различных областях народного хозяйства, науки и техники. Эти волны используют на радиорелейных линиях, в телевидении, для высококачественного вещания, радиолокации, радионавигации, радиотелемеханики, радиометеорологии, радиоастрономии. Они распространяются прямолинейно, а поэтому дальность их действия ограничена расстоянием прямой видимости:

$$L = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (1.17)$$

где h_1 и h_2 – действующая высота передающей и приемной антенн соответственно.

Важнейшими особенностями волн диапазона от 10 м до 0,1 мм являются:

- значительный частотный диапазон, позволяющий разместить большое количество различных систем и использовать в них широкополосные виды модуляции;

- распространение в пределах геометрической видимости, позволяющее уменьшить взаимное влияние различных систем, расположенных вне зоны видимости;

- малый уровень промышленных атмосферных помех по сравнению с внутренними флуктуационными шумами систем;

- возможность реализации сравнительно малогабаритных антенных устройств с узкой диаграммой направленности. Это позволяет существенно ослабить мешающее влияние сторонних радиосистем, а также уменьшить мощность передатчика, необходимую для нормальной работы системы.

Использование радиосвязи для передачи телемеханических сообщений в первую очередь целесообразно применить для объектов, связь с которыми невозможна при помощи проводов. Сюда следует отнести космические корабли, спутники, ракеты, самолеты, движущиеся промышленные объекты (кран, электровазы, грузовые тележки и т. п.).

Замена проводных линий связи на радиолнии для промышленной телемеханики хотя и привлекает простотой организации, но наталкивается на ряд трудностей, основная из которых заключается в том, что в большинстве диапазонов радиоволн качество радиосвязи в значительной мере зависит от времени года и суток, метеорологических условий, состояния ионосферы и т. п., т. е. факторов, трудно поддающихся учету. Это сильно снижает надежность передачи информации. Характерной чертой радиоканалов является возможность значительного воздействия помех от соседних радиостанций и промышленных источников радиопомех по сравнению с проводными каналами. При этом следует отметить, что системы обычно работают вблизи крупных промышленных объектов с сильными промышленными помехами. Сказанное в первую очередь относится к километровым и декаметровым диапазонам. Эти диапазоны иногда используются для передачи сообщений на расстояние 30–50 км. Более надежной оказывается радиосвязь на ультракоротких волнах в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн, т. е. на частотах от 300 МГц (1 м) до 30 ГГц (1 см).

Некоторое затухание диапазонных волн наблюдается при их распространении в тумане, дожде и снегу. Однако компенсация такого затухания допускается соответствующим увеличением мощности передатчика. Для расстояний, превышающих прямую видимость, используются радиорелейные линии.

1.5.1 Радиорелейные линии связи

Наибольшее распространение для передачи многоканальных сообщений получили наземные радиорелейные станции, работающие на частотах от 30 МГц до 30 ГГц. На этих частотах обеспечивается широкая полоса тракта передачи, малый уровень атмосферных и промышленных помех. Все это обеспечивает высокую помехоустойчивость передачи информации. С учетом того что радиорелейная связь осуществляется на ультракоротких волнах (УКВ), которые распространяются по прямой видимости, дальность передачи зависит от местного рельефа и высоты подвеса передающей и приемной антенн. При высоте антенных опор до 70 м дальность прямой радиосвязи не превышает 40–60 км. Это означает, что связь на большие расстояния возможна лишь при использовании радиолний с ретрансляцией, т. е. так называемых радиорелейных линий.

Таким образом, радиорелейная линия связи представляет собой ряд радиостанций, поочередно принимающих, усиливающих и передающих сигналы. Каждая из таких радиостанций оборудована приемной и передающей направленными антеннами.

На рисунке 1.16 представлена упрощенная схема радиорелейной линии.

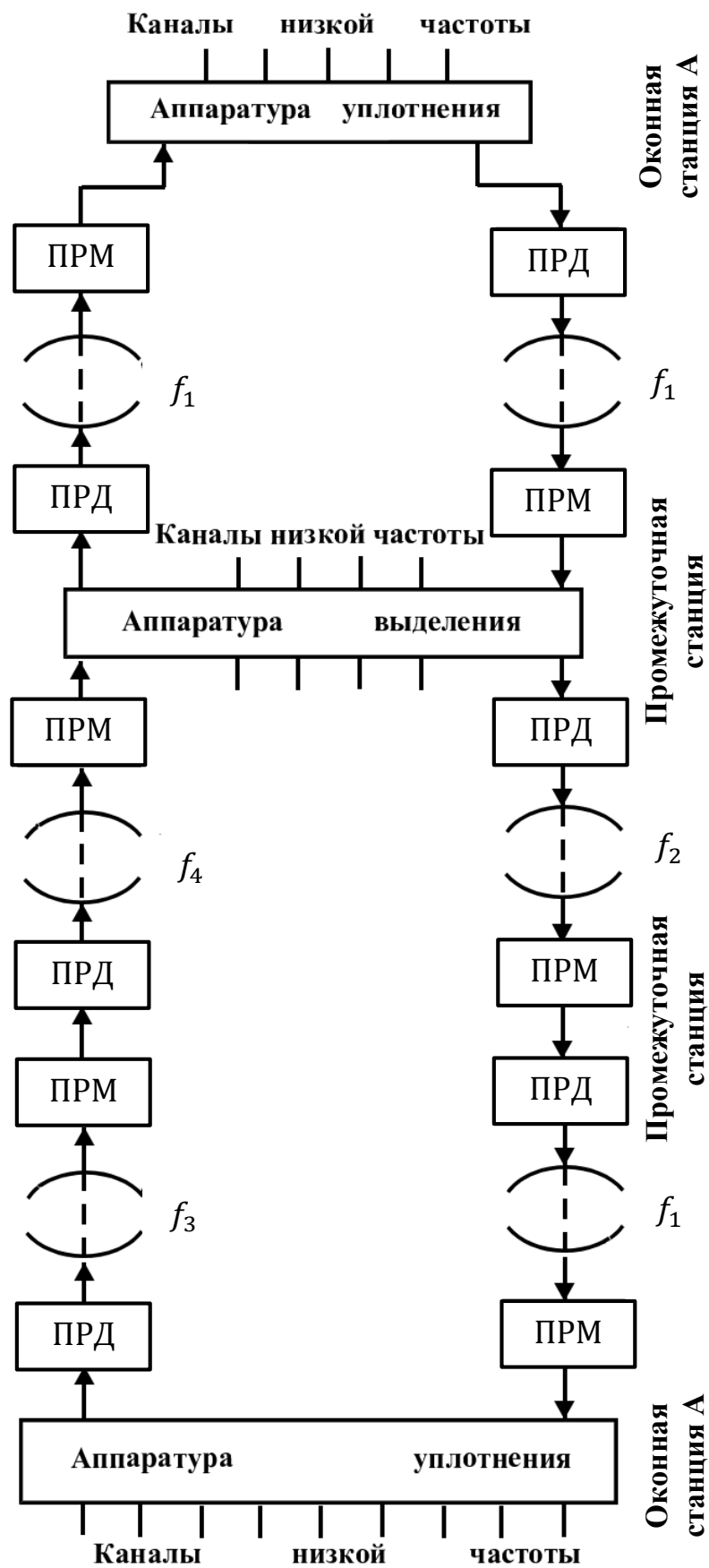


Рисунок 1.16 – Упрощенная схема радиорелейной линии связи

Оконечные станции оборудуются аппаратурой уплотнения, позволяющей при помощи частотного и временного разделения сигналов обеспечить передачу большого числа сообщений.

В случае недостаточной пропускной способности одной радиорелейной линии параллельно строят еще одну или несколько таких же линий. Цифровые радиорелейные системы используются для организации цифровых трактов передачи сигналов со скоростями от 2 до 155 Мбит/с. Разновидностью радиорелейных линий являются тропосферные, ионосферные и метеорные линии. Такие системы связи основаны на использовании сигналов, которые являются результатом ограничения и рассеяния излученных сигналов некоторым объектом неоднородной случайной среды, выполняющей роль пассивного ретранслятора.

1.5.1.1 Тропосферные системы связи. Рассеивающие слои в тропосфере находятся на высотах до 8–12 км, расстояния между соседними станциями могут составлять 150–600 км и более. Механизм образования тропосферных радиоволн показан на рисунке 1.17.

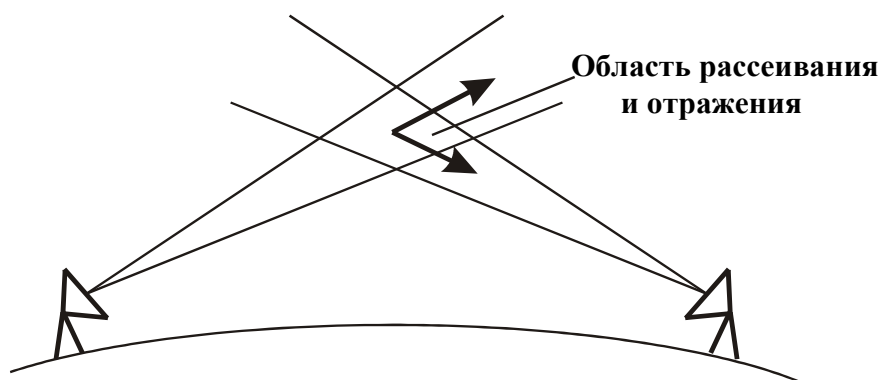


Рисунок 1.17 – Иллюстрация тропосферной связи

При передаче информации на большие расстояния в таких системах приходится использовать промежуточные приемопередающие станции (так же как в радиорелейных).

Значительное ослабление сигналов на интервале распространения и их глубокие замирания приводят к необходимости обеспечить высокий энергетический потенциал системы связи. Энергетическим потенциалом системы называют отношение излучаемой мощности сигнала к минимальной мощности сигнала на входе приемника, при которой обеспечивается нормальное функционирование системы. Это достигается за счет остронаправленных антенн (с коэффициентами направленности до 50–55 дБ), большой мощности передатчиков (до нескольких киловатт), использования малошумящих приемников с эквивалентной шумовой температурой 50–70 К. Обычно тропосферные системы работают на частотах 0,3–5 ГГц.

1.5.1.2 Ионосферные системы передачи. Различают две разновидности ионосферных систем передачи: системы, работающие на декаметровых, и системы, работающие на метровых волнах.

В первых передача происходит на декаметровых (короткие, длина волны – 10–100 м, диапазон частот – 3–30 МГц) волнах. В ионосфере происходит, строго говоря, не отражение радиоволны, а поворот ее траектории из-за неоднородности диэлектрических свойств вертикального профиля ионосферы. Траектория распространения радиоволны от одной точки на поверхности Земли к другой с одним отражением от ионосферы называется ионосферным скачком.

Расстояние между пунктами приема и передачи, измеренное вдоль поверхности Земли, составляет около 2000 км. Траектория распространения радиоволн может быть образована несколькими ионосферными скачками. Качество радиосвязи зависит от состояния ионосферы, определяемого временем года, суток и циклом солнечной активности.

Образование ионосферных волн в метровом диапазоне (ультракороткие, длина волны – 1–10 м, диапазон частот – 30–300 МГц) во многом сходно с образованием тропосферных волн. Разница заключается в том, что рассеяние происходит не в тропосфере, а в ионосфере на высоте 75–95 км. Предельная дальность связи – 2000–3000 км, наиболее подходящие частоты – 40–70 МГц. При ионосферном рассеянии в пункт приема приходит только ничтожная часть излучаемой энергии, что вынуждает использовать мощные радиопередатчики и большие по размеру антенны.

1.5.1.3 Метеорные системы. Принцип их действия основан на использовании отражений радиоволн метрового диапазона от ионизированных следов, оставляемых на высотах 80–120 км огромным количеством сгорающих там метеоров. Протяженность следа составляет 10–25 км, а время существования – от 5 мс до 20 с. Концентрация ионосферных следов имеет нестационарный случайный характер и резко возрастает в некоторые моменты времени. Это приводит к «вспышкам» уровня сигналов, отраженных от следов. Особенностью метеорных систем связи является прерывистый режим их работы, информация передается только во время «вспышек» уровня сигналов. Наличие вспышек устанавливается специальными устройствами, которые входят в состав системы. Скорость передачи информации по **ионосферным и метеорным** линиям связи невелика и составляет 500–1000 бод. Несмотря на это, такие линии связи имеют очень важное значение для организации некоторых видов связи в труднодоступных местах. Радиосистемы работают в диапазоне 30–70 МГц. Время прохождения радиосигналов при метеорной связи составляет 2–4 ч в сутки.

1.5.2 Спутниковые линии связи

Как известно, дальность радиосвязи в диапазонах СВЧ – ГВЧ зависит от высоты антенны. Для уменьшения числа ретрансляционных станций построены радиорелейные линии, ретрансляторы которых находятся на искусственных спутниках Земли. Обычно используются так называемые активные спутники связи, в которых сигнал связи принимается, усиливается и передается направленной антенной. Спутники запускают на эллиптическую и круговую орбиту. Двигаясь по эллиптической орбите, спутники находятся в зоне принимающей радиостанции лишь определенное время.

Если плоскость орбиты спутника совпадает с плоскостью экватора, а направление движения спутника на орбите совпадает с направлением вращения Земли, то спутник сохраняет неизменное положение по отношению к ее поверхности. Такой спутник называется геостационарным. Излучение такого спутника охватывает более 30 % поверхности Земли и обеспечивает круглосуточную связь.

По принципу построения эти системы не сильно отличаются от наземных мобильных систем связи. Отличие состоит в том, что в качестве базовых станций (БС) используются бортовые многоканальные радиостанции (БС_Б) искусственных спутников Земли (рисунок 1.18).

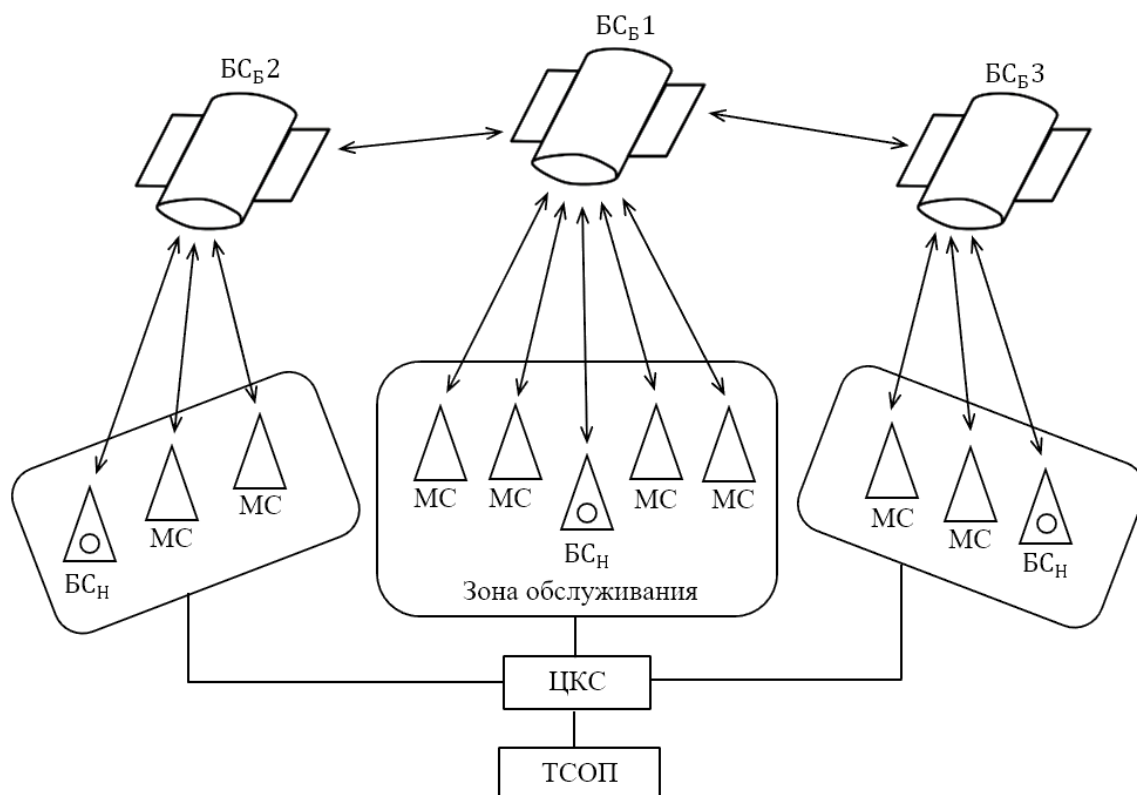


Рисунок 1.18 – Структура спутниковой системы связи

Для связи мобильного абонента с любым мобильным абонентом одной зоны обслуживания используется дуплексный радиоканал с ретрансляцией через бортовую базовую станцию БС_Б. Для связи мобильного абонента с любым абонентом телефонной сети общего пользования (ТСОП) используется специальный радиоканал между БС_Б и наземной базовой станцией БС_Н. БС_Н с помощью магистральной соединительной линии (МСЛ) соединяется с АТС данной зоны.

Для связи мобильного абонента с любым мобильным или стационарным абонентом других зон обслуживания (ЗО) ретрансляция сообщений может осуществляться двумя способами. Первый предусматривает ретрансляцию сообщений по специальным радиоканалам, создаваемым между БС_Б соседних ИСЗ (ретрансляция в космосе).

Второй способ предусматривает ретрансляцию сообщений по каналам наземных магистральных линий связи через центр коммутации связи.

Таким образом, при использовании системы спутников можно организовать глобальную связь между любыми пунктами Земли.

В зависимости от высоты орбиты спутники связи подразделяются на высокоорбитальные (более 35 000 км) *GEO* (*Geostationary Earth Orbit*), среднеорбитальные (6 000–15 000 км) *MEO* (*Medium-Earth Orbit Satellites*) и низкоорбитальные (до 1000 км) *LEO* (*Low-Earth Orbit Satellites*).

Период обращения вокруг Земли спутников с высотой орбиты 35 800 км составляет 24 ч, при этом время передачи составляет 250–300 мс.

Среднеорбитальные спутники делают полный оборот вокруг Земли примерно за 6 ч и используются в основном для поддержания навигационных систем. Время передачи составляет 35–85 мс.

Низкоорбитальные спутники благодаря небольшому расстоянию между наземными передатчиками и спутниками не требуют мощных наземных передатчиков, а время распространения сигнала составляет от 1 до 7 мс. С помощью этой системы передаются речь, данные, факсы и навигационная информация. Основными пользователями являются авиационные и судоходные компании, путешественники и геологоразведчики при отсутствии инфраструктуры электросвязи.

Численные диапазоны частот, выделенные международными институтами связи ИТУ, приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Частотно-диапазонные зоны спутников связи

Диапазон	Нисходящие сигналы, ГГц	Восходящие сигналы, ГГц	Ширина полосы, МГц
<i>L</i>	1,5	1,6	15
<i>S</i>	1,9	2,2	70
<i>C</i>	4,0	6,0	500
<i>Ku</i>	11	14	500
<i>Ka</i>	20	30	3500

Следует отметить, что наряду со спутниками-гигантами для проведения научных исследований студентами вузов запускаются мини-спутники, которые работают с наземными станциями в диапазонах УВЧ (*UHF*) и ОВЧ (*VHE*).

Спутниковые системы связи, особенно с цифровыми методами передачи сигналов, перспективны при использовании стационарных спутников, которые обеспечивают непрерывность связи; упрощают конструкции антенны наземных станций (тогда как у спутников с эллиптической орбитой антенны снабжаются сложными следящими системами); могут располагаться за поясами радиации, разрушительно действующей на электрическую аппаратуру и солнечные батареи; имеют постоянство уровней принимаемых сигналов; исключают искажения сигналов вследствие эффекта Доплера.

Диапазоны рабочих частот систем спутниковой связи регламентированы МСЭ, различны для участков «Земля – ИСЗ» и «ИСЗ – Земля» и лежат в пределах 2–40 ГГц.

В зависимости от назначения системы спутниковой связи и типа земных станций регламентом МСЭ различаются следующие службы:

- фиксированная спутниковая служба для связи между станциями, расположенными в определенных фиксированных пунктах, а также распределения телевизионных программ;

- подвижная спутниковая служба для связи между подвижными станциями, размещенными на транспортных средствах (самолетах, морских судах, автомобилях и пр.);

- радиовещательная спутниковая служба для непосредственной передачи телевизионных программ и радиовещания на терминалы, находящиеся у абонентов.

Следует отметить важность спутниковой связи для военных целей, служб МЧС, регионов с плохо развитой наземной инфраструктурной связью и широко-вещания, т. е. для организации теле- и радиоканалов.

1.5.3 Космические радиолинии

Бурное развитие ракетно-космической техники и непрерывное расширение программы космических исследований поставили перед техникой радиосвязи ряд совершенно новых задач: обеспечение устойчивой и надежной связи на расстояния в сотни миллионов километров; передача с борта космических объектов на пункты приема большого количества разнообразной информации о состоянии и работе систем и агрегатов этих объектов, а также о различных процессах, происходящих в космическом пространстве и на поверхности исследуемых планет; управление режимом работы космических объектов путем передачи командной информации с земли на борт объекта.

Космические радиолинии работают в диапазонах ОВЧ и УВЧ (см. таблицу 1.4) с направленными антеннами. Для космических аварийных радиолиний применяются диапазоны ВЧ – УВЧ и ненаправленные антенны на космическом аппарате.

Космические радиостанции «Земля – Космос» используются для управления траекторией полета и устройствами на космическом аппарате, ретрансляции сигналов и радиосвязи с космонавтами.

Для современных линий связи «Земля – Космос» характерны следующие параметры: мощность наземного передатчика в режиме непрерывного излучения $P_{\text{изл}} = 10^3 \dots 10^5$ Вт; рабочая частота $f_0 = 2110 \dots 2120$ МГц; диаметр передающей наземной антенны $D_3 \approx 25$ м; диаметр бортовой приемной антенны $D_6 = 2,5 \dots 5$ м; допустимая вероятность ошибки принятой команды – 10^{-5} – 10^{-6} и менее; эффективная шумовая температура бортового приемника $T_3 \approx 500 \dots 1000$ К.

Радиолинии «Космос – Земля» используются для передачи телеметрической информации, ретрансляции сигналов и радиосвязи. Для таких линий связи характерны следующие данные: мощность бортового передатчика в режиме непрерывного излучения $P_{\text{изл}} = 25 \dots 50$ Вт; рабочая частота $f_0 = 2290 \dots 2300$ МГц;

диаметр бортовой передающей антенны $D_6 \approx 2,5 \dots 5$ м; диаметр антенны наземной станции $D_3 \approx 25 \dots 70$ м; эффективная шумовая температура наземного приемника $T_3 \approx 25 \dots 50$ К.

Космические радиостанции разделяются на радиолинии ближнего и дальнего космоса. Для ближнего космоса с дальностью линии, не превышающей несколько тысяч или десятков тысяч километров, возможно строить радиолинии с пропускной способностью, превышающей сотни тысяч двоичных единиц в секунду, с соответствующей полосой пропускания приемника. Такие радиолинии работают в основном с цифровыми кодами.

В радиолиниях дальнего космоса, с дальностью не менее нескольких десятков миллионов километров, при допустимой вероятности ошибки единичного символа 10^{-5} трудно обеспечить скорость передачи, превышающую несколько двоичных единиц или десятков единиц в секунду. Полоса пропускания радиолинии имеет соответствующую величину.

В линиях дальней космической связи отношение сигнал/шум на входе приемника меняется в соответствии с изменением расстояния между Землей и космическим аппаратом. Для поддержания постоянства вероятности ошибки необходимо изменять скорость передачи в соответствии с изменением расстояния, т. е. иметь адаптивную линию связи.

В заключение следует отметить, что практическая реализация систем космической связи является весьма сложной технической задачей и связана с созданием малошумящих передающих и приемных устройств, применением эффективных методов передачи и приема сигналов, созданием высокоэффективных приемных антенн и увеличением излучаемой мощности.

1.5.4 Сотовая радиосвязь

Площадь крупного города и его пригородов разбивается на несколько ячеек, называемых сотами, каждая из которых обслуживается базовой станцией с маломощным передатчиком и соответствующим ему приемником.

Радиоканалы поддерживают передачи речи и данных. Количество каналов в каждой соте вполне достаточно для обслуживания прогнозированного числа абонентских станций (АС), находящихся в зоне работы данной соты в любой момент времени. Когда абонент делает звонок, его мобильное устройство автоматически занимает свободный канал в данной соте, а после того как он покидает соту, базовая станция соты автоматически переключает его на канал той соты, в которую он переместился, причем для абонента переключение с одного канала на другой остается совершенно незаметным. Соединение происходит через БС и центр коммутации (ЦК). ЦК соединяет вызывающего абонента через радиоканал с другим мобильным абонентом или через телефонную связь общего пользования (ТСОП) с абонентом, имеющим стационарный телефонный аппарат.

Функциональное построение сотовой связи *GSM* показано на рисунке 1.19. В приведенной схеме условно можно выделить четыре основных компонента: центр управления и обслуживания (ЦУО) и три подсистемы:

- подсистема мобильных станций (ПМС);
- подсистема базовых станций (ПБС);
- подсистема коммутации (ПсК).

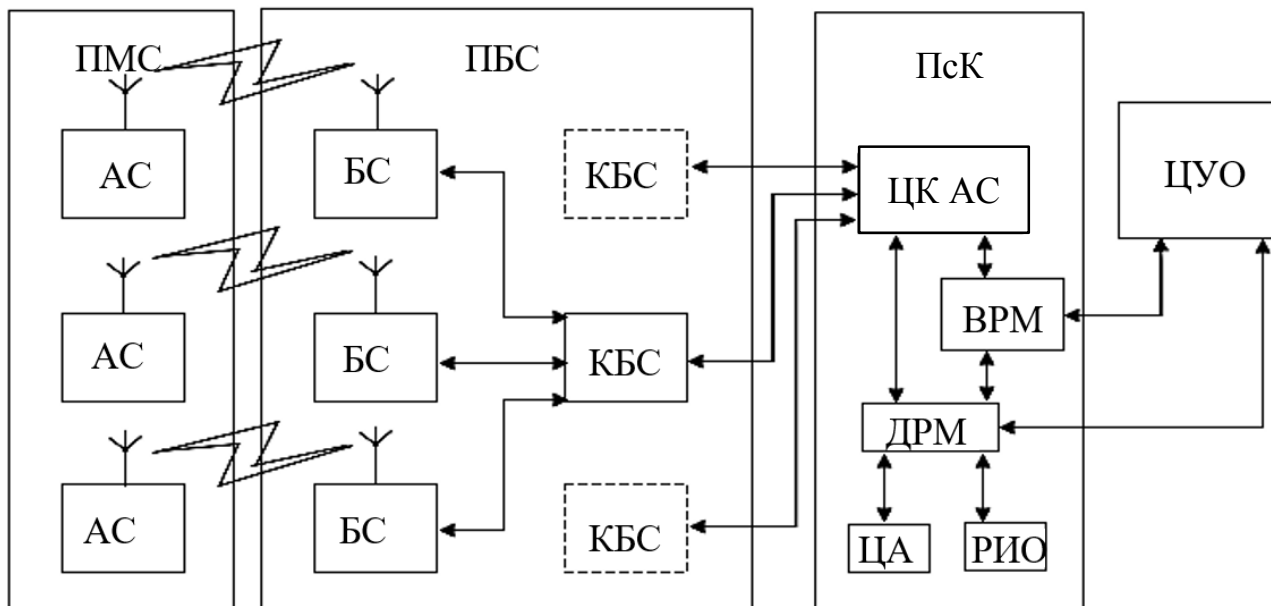


Рисунок 1.19 – Структура сотовой связи GSM

ЦУО является центральным элементом системы сотовой мобильной связи (ССМС), который обеспечивает управление другими компонентами системы, а также контроль качества функционирования. Подсистема мобильных станций объединяет оборудование, обеспечивающее доступ абонентов в систему. Главным элементом в архитектуре ССМС является подсистема коммутации, которая включает в себя центр коммутации (ЦК) мобильной связи, визитный (гостевой) регистр местоположения (ВРМ), домашний регистр местоположения (ДРМ), центр аутентификации (ЦА) и регистр идентификации оборудования (РИО). В подсистему базовых станций (ПБС) входят базовые приемопередающие станции (БС) и контроллеры базовых станций (КБС).

Центр коммутации мобильной связи обслуживает группу сот и обеспечивает все виды соединений, в которых нуждается в процессе работы мобильная станция, т. е. коммутацию мобильных абонентов друг с другом, с абонентами ТСОП и др. На ЦК возлагаются также функции коммутации каналов при передаче обслуживания (эстафетная передача) и их переключения каналов в соте при появлении сильных помех и неисправностей, если это не является обязанностью КБС.

Помимо коммутационных задач ЦК управляет процедурами слежения за мобильными станциями с помощью домашнего и визитного регистров местоположения для обеспечения доставки вызова, а также аутентификации и идентификации абонентов с помощью ЦА и РИО.

ДРМ содержит сведения о постоянно приписанных к данному ЦК АС абонентах и о видах услуг, которые им могут быть оказаны.

ВРМ содержит информацию об абонентах, временно находящихся в зоне обслуживания данного ЦК.

ЦА и РИО предназначены для защиты законных абонентов от попыток обмана со стороны злоумышленников.

В системе связи стандарта *GSM* в РИО имеются три списка: белый, серый и черный. Мобильной станции (МС), занесенной в белый список, разрешено пользоваться сетью. В сером списке хранятся идентификаторы МС, имеющих неисправности и задолженности по оплате. В черный список включены утерянные и украденные МС, а также незаконно размноженные. Для выполнения этих функций идентификатор МС содержит коды изготовителя и места сборки, электронный серийный номер.

В ЦА проверяется подлинность шифрованных передаваемых сообщений, а также подлинность абонента с помощью *pin*-кода.

Контроллер базовых станций осуществляет управление несколькими БС, производит упаковку информации, передаваемой в ЦК МС, и ее распаковку при передаче в обратном направлении, передает обслуживание при переходе МС между сотами того же КБС.

Под управлением КБС осуществляются радиоизмерения в каналах связи, регулируется мощность передатчиков мобильных и базовых станций.

Стандарт *GSM-900* предусматривает работу в двух диапазонах частот: 890–915 МГц – прямой канал от БС к МС, 935–960 МГц – обратный канал от МС к БС. Разнос по частоте прямого и обратного каналов составляет 45 МГц. Разнос частот между соседними каналами составляет 200 кГц. Таким образом, в отведенной полосе частот в 25 МГц размещаются 124 канала связи.

В стандарте *GSM-1800* предусматривается работа в диапазонах 1710–1785 МГц – прямой канал и 1805–1880 МГц – обратный канал, что при том же разnose частот между соседними каналами позволяет разместить 374 канала.

В стандарте *GSM* используется многостанционный доступ с временным разделением. Это позволяет на одном частотном канале разместить 8 физических каналов.

Для контроля легальности пользователя сетью каждая мобильная станция имеет уникальный международный идентификатор мобильного оборудования. Кроме того, каждый абонент получает стандартный сменный модуль подлинности абонента (*sim*-карту), который содержит международный идентификационный номер (*pin – personal identification number*), персональный код разблокировки (*puk – personal unblocking key*), индивидуальный ключ (*Ki*) и алгоритм аутентификации. С помощью этой информации осуществляется полный цикл аутентификации и разрешается доступ абонента к сети. Дополнительно *sim*-карта может хранить данные как электронная записная книжка.

Обработка речи осуществляется на основе прерывистой передачи речи, которая обеспечивает включение передатчика только во время разговора.

Для защиты от ошибок, возникающих в радиоканалах, применяется блочное и сверточное кодирование с перемежением. Эффективность кодирования

увеличивается скачкообразным переключением набора рабочих частот по псевдослучайному закону в процессе сеанса связи (217 скачков в секунду).

Для борьбы с замираниями сигналов, вызванных многолучевым распространением радиоволн, используются эквалайзеры, обеспечивающие выравнивание импульсных сигналов со среднеквадратичным отклонением времени задержки до 16 мкс.

Система синхронизации рассчитана на компенсацию абсолютного времени задержки сигналов до 233 мкс, что соответствует дальности связи (максимальному радиусу соты) 35 км.

Мобильные телефоны имеют максимальную мощность 2 Вт, которая КБС регулируется от 20 мВт до 2 Вт, в зависимости от уровня битовых ошибок. Шаг регулировки мощности составляет 2 дБ.

1.5.5 Линейные системы индивидуальной связи

Организация связи в линейных системах состоит в создании радионаправлений между базовыми телефонными аппаратами, которые подключаются к линии телефонной связи, с мобильными телефонными аппаратами. Такие системы используются в офисах, а на бытовом уровне в квартирных телефонных аппаратах расстояние радиодлинителя составляет десятки – сотни метров.

Другим вариантом использования линейных мобильных систем является организация радиоканала между носимой МС и бортовой МС систем транкинговой, спутниковой связи при выходе абонента из подвижного объекта.

К недостаткам линейной системы относятся ограниченные расстояния радиолинии, а также возможность несанкционированного использования абонентского телефонного аппарата.

1.5.6 Телевизионные радиосистемы

Принцип действия всех телевизионных систем основан на последовательном строчном разложении изображения на мелкие элементы. Процесс строчного разложения яркости и цветности (в цветном телевидении) элементов изображения в электрическое напряжение – видеосигнал – называют *растровой разверткой*. При такой развертке вся площадь одного образца изображения (кадра) просматривается по двум взаимно перпендикулярным направлениям – с достаточно высокой скоростью по горизонтали (строчная развертка) и более медленной по вертикали (кадровая развертка).

Принцип работы телевизионных систем рассмотрим на базе системы цветного телевидения.

Система цветного телевидения совместима с системой черно-белого телевидения. Поэтому передачи цветного телевидения могут приниматься приемником черно-белого телевидения. Для этого одним из сигналов изображения цветного телевидения должен быть сигнал яркости.

Человеческий глаз воспринимает три цвета: красный E_R , зеленый E_G , синий E_B . Остальные цвета являются их смесью в определенных пропорциях. Белый цвет (яркостный сигнал E_Y) получается в пропорциях:

$$E_Y = aE_R + bE_G + cE_B,$$

где $a = 0,3$; $b = 0,59$; $c = 0,11$.

Яркостный сигнал должен иметь такую же ширину спектра, как в черно-белом телевидении. Сигналы цветности сравнительно узкополосные, т. к. глаз человека воспринимает окрашенными в различные цвета только относительно крупные детали. Мелкие детали глаз видит черно-белыми.

Для передачи информации о цвете используют два цветоразностных сигнала $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$, к искажениям тонов которых глаз менее чувствителен. При передаче трех сигналов (E_Y , $E_R - E_Y$, $E_B - E_Y$) в телевизионном приемнике возможно получение всех необходимых сигналов: E_Y , E_R , E_G , E_B . Для этого необходимо выполнение следующих операций:

$$\begin{aligned} E_R &= E_Y + (E_R - E_Y), \\ E_G &= [E_Y - (aE_R + cE_B)]/b, \\ E_B &= E_Y + (E_B - E_Y). \end{aligned}$$

Для передачи цветоразностных сигналов используются две поднесущие частоты, сдвинутые относительно несущей частоты изображения f_0 на $f_{0B} = 4,25$ МГц и на $f_{0R} = 4,406$ МГц соответственно для передачи цветоразностных сигналов $E_B - E_Y$ и $E_R - E_Y$. Обе поднесущие модулируются методом частотной модуляции с частично подавленной верхней боковой полосой частот цветоразностными сигналами. Цветоразностные сигналы передаются поочередно – через строку. В течение передачи одной строки передается один цветоразностный сигнал, в течение передачи следующей строки – другой. Вследствие этого канал связи уплотняется, что экономит полосу частот тракта связи.

Структурная схема передачи цветной телевизионной системы представлена на рисунке 1.20.

Световой поток от изображения, пройдя через объект O , попадает на цветоразделительные зеркала ЦРЗ₁ и ЦРЗ₂, где формируются световые потоки красного R , зеленого G и синего B цветов, которые с помощью зеркал Z_1 и Z_2 направляются на соответствующие телевизионные передающие трубки, объединенные в одной колбе, на выходе которых формируются электрические видеосигналы E_R , E_G , E_B . Видеосигналы через соответствующие усилители поступают на электрическую матрицу, на выходе которой формируются сигналы E_Y , $E_R - E_Y$, $E_B - E_Y$.

Сигнал E_Y поступает на вход амплитудного модулятора (АМ), на другой вход которого подается колебание несущей частоты изображения f_0 . На выходе АМ формируется амплитудно-модулированный сигнал, несущий информацию о яркости отдельных элементов изображения. Цветоразностные сигналы $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$ после ограничения спектра в фильтрах нижних частот (ФНЧ) поступают на частотные модуляторы (ЧМ), на которые также подаются колебания поднесущих частот $f_0 + f_{0R}$ и $f_0 - f_{0B}$. Электронный коммутатор поочередно (через строку) пропускает ЧМ-сигналы. Эти сигналы вместе с амплитудно-модулированным

сигналом яркости после усиления в усилителе мощности поступают на антенну телевизионного передатчика, которая излучает электромагнитные волны (ЭМВ).

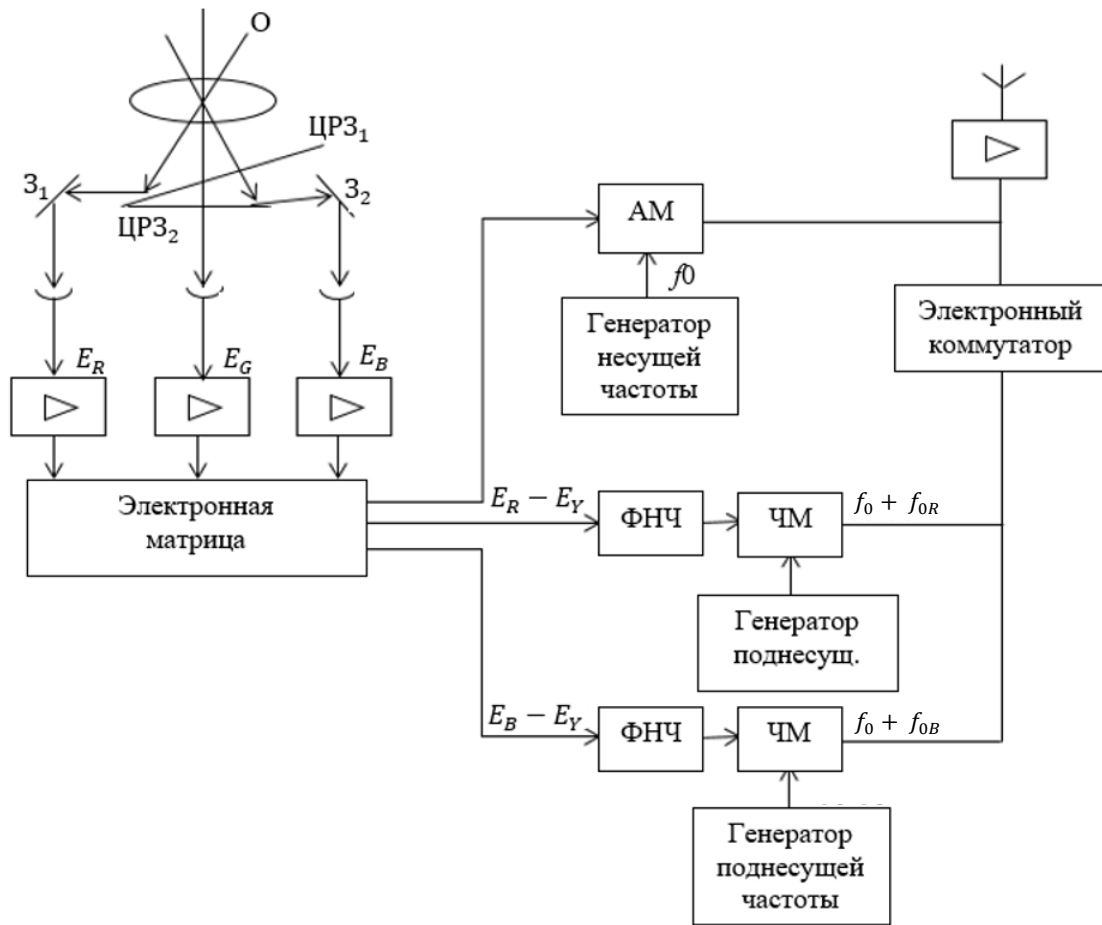


Рисунок 1.20 – Структурная схема передатчика телевизионной системы

В схеме цветного телевизионного передатчика имеются еще генератор синхроимпульсов и генераторы развертки (ГР), которые на схеме не показаны. Передача звука производится так же, как и в черно-белом телевидении.

Структурная схема цветного телевизионного приемника изображена на рисунке 1.21.

Основным отличием цветного телевизионного приемника является наличие блока цветности, формирующего тип сигнала цветности E_R , E_G , E_B , и усилителя промежуточных частот (УПЧ). Фильтр E_Y с полосой частот 6,5 МГц, включенный на выходе видеоусилителя, выделяет сигнал яркости.

Сигнал E_Y с выхода видеоусилителя поступает также на фильтры цветоразностных сигналов (ЦРС), которые выделяют частотно-модулированные (ЧМ) цветоразностные сигналы с несущими частотами f_{0B} и f_{0R} . С помощью электронного коммутатора, управляемого синхроимпульсами строк и получаемого с селектора синхроимпульсов (ССИ), цветоразностные сигналы поступают через ограничитель на частотный детектор (ЧД) и генератор развертки (ГР). С выхода усилителей про-

детектированные цветоразностные видеосигналы $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$ вместе с сигналами яркости E_Y подаются на матрицу, на выходе которой получаются три сигнала цветности E_R, E_G, E_B . Эти сигналы вместе с сигналами яркости E_Y и сигналом с ГР поступают на цветной кинескоп и формируют цветное изображение на экране.

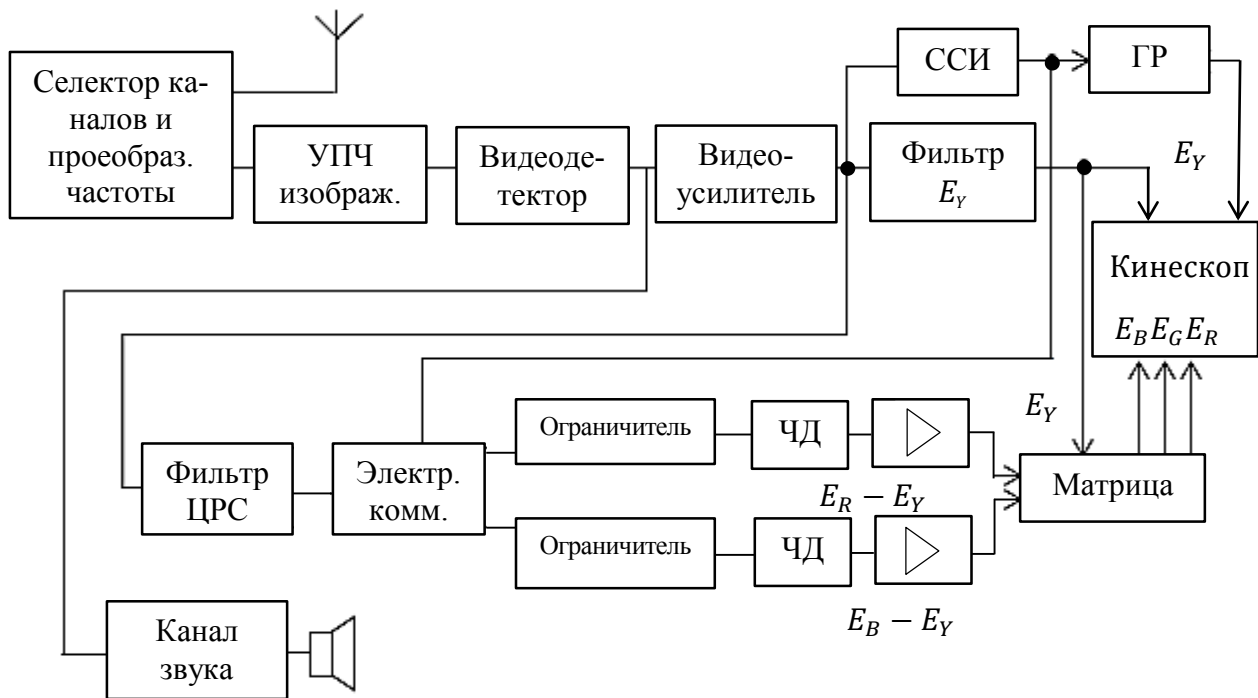


Рисунок 1.21 – Структурная схема цветного телевизионного приемника

1.6 Оптические линии связи

Оптический диапазон перекрывается областью длин волн $\lambda = 0,01 \dots 1000$ мкм, что соответствует частотам $f = 3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{16}$ Гц. При этом участок $\lambda = 0,01 \dots 0,4$ мкм называют ультрафиолетовой областью, $\lambda = 0,4 \dots 0,75$ мкм – областью видимых волн, $\lambda = 0,75 \dots 1000$ мкм – инфракрасной областью оптического диапазона. Участок $\lambda = 700 \dots 1000$ мкм часто относят к диапазону так называемых субмиллиметровых волн. Для оптической связи используется диапазон $\lambda = 0,3 \dots 30$ мкм, т. е. в основном видимые и инфракрасные волны (соответственно $f = 10^{13} \dots 10^{15}$ Гц).

Оптический диапазон обладает рядом важных преимуществ по сравнению с радиодиапазоном. Во-первых, он допускает создание систем с полосой пропускания, превышающей весь радиодиапазон. Во-вторых, обладает возможностью передачи информации с очень высокой скоростью при относительно малой мощности передатчиков и малых габаритных размерах антенн. В настоящее время оптические системы могут обеспечить передачу информации со скоростью 1 Гбит/с и более, используя для этого лазер.

Лазер – источник электромагнитных колебаний, частота которых имеет строго фиксированное значение и мало изменяется под влиянием случайных внешних воздействий.

Преимущество лазерных систем передачи информации заключается в скрытности передачи сообщений от организованных помех, что связано с очень узкими диаграммами направленности передающих и приемных антенн (десятки и единицы угловых секунд). В связи с этим использование оптического диапазона волн является перспективным и для передачи узкополосной информации (командная телеметрия, передача данных, телефония, передача узкополосных изображений).

Однако все оптические системы связи и локации имеют один недостаток, который ограничивает области их эффективного использования, – зависимость их работы от метеоусловий, т. к. оптические сигналы поглощаются в облаках, тумане и воде.

В зависимости от вида канала распространения светового излучения оптические линии связи (ОЛС) можно разделить на атмосферные, космические и световодные. Атмосферные и световодные ОЛС соответствуют наземной связи. Космические ОЛС охватывают связь «Земля – Космос» и «Космос – Космос». В атмосферных и космических ОЛС используется открытый канал распространения света, а в световодных – закрытый, не подверженный влиянию атмосферных осадков. В настоящее время наибольшее применение нашли волоконные световоды.

Все виды оптической связи могут быть охарактеризованы обобщенной структурной схемой, изображенной на рисунке 1.22.

Закодированное сообщение модулируют по одному из параметров поднесущей. Сигнал с выхода электрического модулятора поступает на один из входов оптического модулятора (ОМ), на второй вход которого поступает квазимонохроматическое излучение в виде узкого пучка света от лазера. Проходя ОМ, пучок оказывается промодулированным передаваемым электрическим сигналом по амплитуде, интенсивности, фазе, частоте либо поляризации.

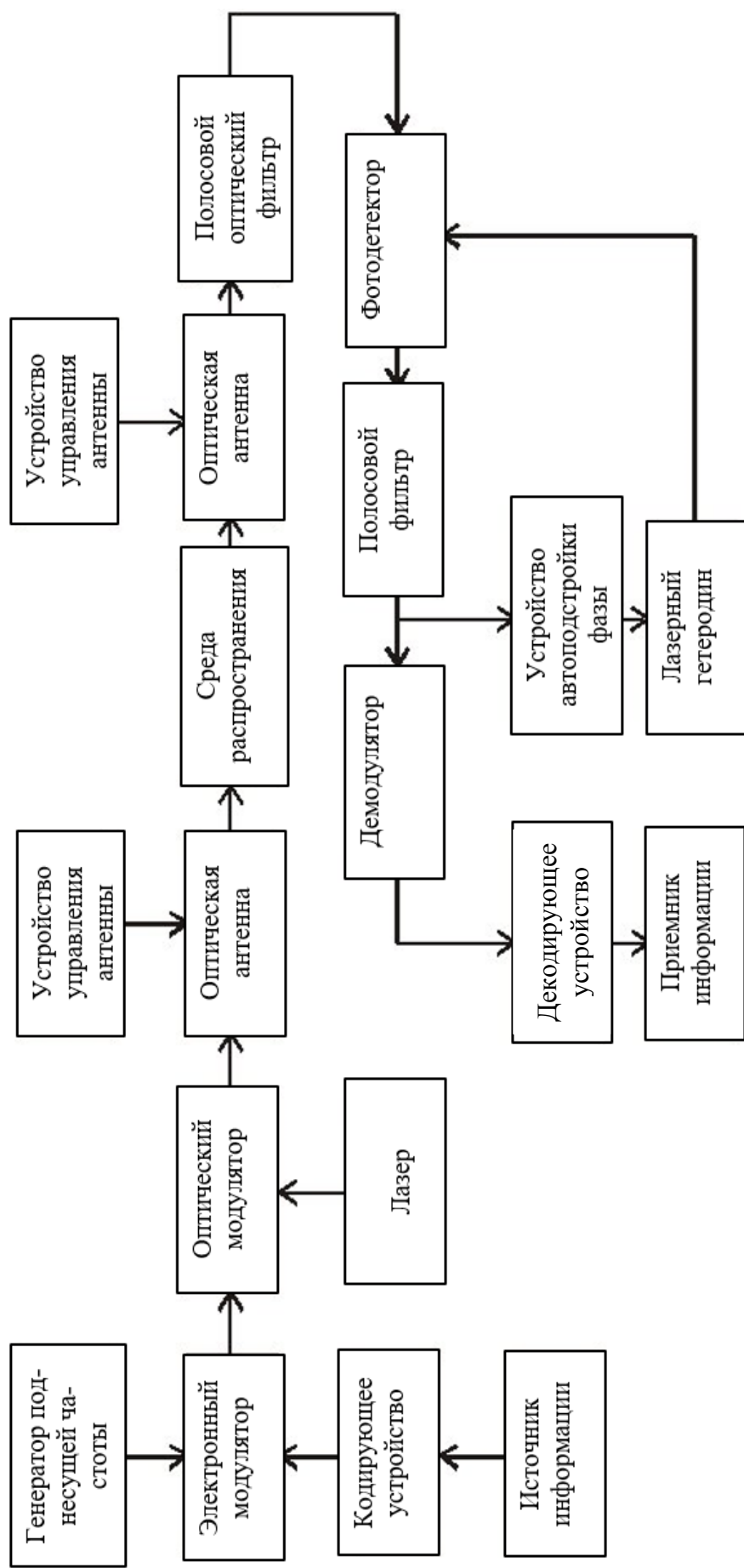


Рисунок 1.22 – Обобщенная структурная схема оптической системы связи

Ввиду простоты реализации наиболее широко используется модуляция по интенсивности. Далее в случае открытого канала распространения света световой пучок расширяется (коллимируется) с помощью оптических антенн. В случае закрытого канала распространения роль оптической антенны несколько иная – она обеспечивает согласование лазерного передатчика со световодом. Приемная оптическая антенна (ОА) направляет световой поток на фотодетектор (ФД), преобразующий световой поток в электрический ток. На входе ФД обычно устанавливается полосовой оптический фильтр, с помощью которого ослабляется мешающий свет, падающий на вход приемной ОА.

В ОЛС может осуществляться не только прямое фотодетектирование оптических сигналов, но и так называемое фотосмещение – гетеродинный или гомодинный (синхронный) прием. В этом случае ФД выполняет роль смесителя оптических сигналов, и на его вход, кроме принимаемого, подается сигнал от местного лазерного гетеродина, имеющего блок автоподстройки фаз. Электрические сигналы с выхода ФД, пройдя фильтр и демодулятор, поступают в декодирующее устройство и далее получателю информации. В ОЛС, как и в других радиосистемах, может применяться аналоговая, импульсная или кодоимпульсная модуляция.

Из рисунка 1.22 следует, что специфической частью ОЛС является лишь часть линии, начинающаяся от входа оптического модулятора и заканчивающаяся входом ФД. Остальная часть аппаратуры соответствует обычным телемеханическим системам.

Ввиду очень острой направленности антенн атмосферных и космических систем в ОЛС предусмотрены устройства управления (юстировки) антенн, с помощью которых осуществляется сопряжение антенн передающей и приемной станций, необходимое для обеспечения нормальной работы.

1.6.1 Атмосферные ОЛС

Главная особенность атмосферных ОЛС – сильное влияние атмосферы на характеристики передаваемых оптических сигналов. Оно проявляется прежде всего в виде замираний сигналов, которые могут в отдельные периоды времени достигать сотен децибел на километр и быть весьма продолжительными (вплоть до нескольких часов). При таких замираниях связь становится практически невозможной из-за затуханий при наличии дождя, тумана, снега или промышленных загрязнений атмосферы.

По экспериментальным данным при густом тумане ослабление света достигает 100 дБ/км и более. При длине трассы 5 км это приводит к уменьшению уровня сигнала на входе приемника на 500 дБ. При выборе рабочих длин волн атмосферных ОЛС необходимо учитывать, что на отдельных волнах (λ равна 1,38; 1,90; 2,7; 4,3; 15,0 мкм и др.) поглощение чрезвычайно сильно возрастает (волны резонансного поглощения). Для достижения высокой надежности связи требуется размещать ретрансляторы на расстояниях, не превышающих 500–1000 м, и применять весьма мощные генераторы света. Ввиду крайне низкой экономической

эффективности такие ОЛС малоперспективны для дальней связи. Атмосферные ОЛС, работающие на малых расстояниях, могут оказаться целесообразнее, чем радиорелейные станции, в тех случаях, когда первостепенную роль играют такие факторы, как компактность аппаратуры, высокая скрытность, очень большая пропускная способность, электрическая совместимость с действующими в данном районе радиоэлектронными средствами.

Для повышения надежности связи на таких линиях целесообразно использовать волны инфракрасного диапазона примерно 10 мкм и более, которые меньше ослабляются в тумане, чем короткие волны.

1.6.2 Космические ОЛС

Предназначены для обеспечения связи с межпланетными космическими станциями (дальний космос), космическими летательными аппаратами, движущимися по околоземным орбитам (ближний космос), а также могут использоваться для связи «ИСЗ – ИСЗ».

Для дальнего космоса характерны очень большие дальности связи (сотни тысяч километров), ограничение энергетических ресурсов, габаритов и массы аппаратуры. Эти системы имеют большие перспективы для передачи информации с высокой скоростью от космических аппаратов, находящихся в дальнем космосе. При этом на земле целесообразно использовать несколько станций, достаточно территориально разнесенных друг от друга, чтобы гарантировать безоблачное состояние атмосферы хотя бы на одной станции. Расчеты показывают, что в такой линии связи реализуема скорость передачи 1 Мбит/с на орбите Марса. Для сравнения напомним, что в существующих телеметрических радиоперелиниях для связи с космическим аппаратом с орбиты Марса скорость передачи информации не превышает 10 бит/с.

Для ближнего космоса и связи через ИСЗ характерны дальность от нескольких сотен километров до нескольких десятков тысяч километров, относительно быстрые угловые перемещения космических аппаратов, прохождение оптического излучения через атмосферу Земли. Сюда, в частности, относится связь между синхронными ИСЗ, синхронными и низколетящими ИСЗ, ИСЗ и Землей. Наиболее сложной проблемой здесь является поиск станций, вхождение в связь и точное слежение. Несмотря на указанные трудности, космические ОЛС представляются весьма перспективными видами связи, особенно на интервале геостационарных «ИСЗ – ИСЗ» при создании глобальной системы связи. Благодаря отсутствию атмосферы здесь в полной мере реализуются преимущества ОЛС (малые габариты и потребляемая мощность, высокая пропускная способность).

В общем случае космические ОЛС целесообразно строить как информационно-измерительные комплексы, совмещая в одной системе выполнение таких операций, как передача информации, локация, измерение параметров движения космического аппарата, вхождение в связь и слежение.

В космических ОЛС могут использоваться как аналоговые, так и дискретные методы передачи информации.

1.6.3 Волоконно-оптические линии связи

В настоящее время волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) представляются наиболее перспективными. Толчком к интенсивному развитию ВОЛС послужило решение ряда технологических проблем, связанных с получением качественного оптического волокна (с малым коэффициентом затухания), и достижения в области полупроводниковых лазеров. Безусловно, одним из моментов, способствующих продвижению ВОЛС, явилось развитие цифровых методов передачи информации. Хочется особо отметить тот факт, что использование оптоволоконной линии является идеальным техническим решением при организации канала связи в системе автоматизации тех производств, где предъявляются повышенные требования к взрывобезопасности. Не секрет, что оптоволокно нашло широкое применение при построении сетей как на гражданском транспорте (например, сетей на базе трансиверов, концентраторов и коммутаторов), так и в военной технике, ввиду существенного снижения веса сетевого оборудования самолетов и кораблей, а также обеспечения высокой устойчивости информационных каналов к сильным электромагнитным импульсам, в том числе и от ядерного взрыва. Кроме того, оптоволокно часто является одним из составных элементов датчиков.

Информационный канал содержит оптический излучатель, приемник и среду передачи информации – оптическое волокно (пластиковая или стеклянная нить) (рисунок 1.23).

Световод представляет собой двухслойное стеклянное волокно, внутренняя часть которого (жила) изготовлена из более плотного стекла, чем внешняя оболочка. Жила обладает большим коэффициентом преломления, чем оболочка, поэтому если направить узкий пучок света на торец жилы, то свет будет распространяться только по ней, испытывая полное внутреннее отражение на границе между жилой и оболочкой, и не будет выходить наружу, хотя оболочка и изготовлена из оптически прозрачного стекла.

Угол полного внутреннего отражения, называемый также критическим, при котором падающее на границу двух сред излучение полностью отражается без проникновения во внешнюю среду, определяется соотношением

$$\Theta_{\text{кр}} = \arccos(n_2/n_1),$$

где n_1 – показатель преломления сердцевины;

n_2 – показатель преломления оболочки, причем $n_1 > n_2$.

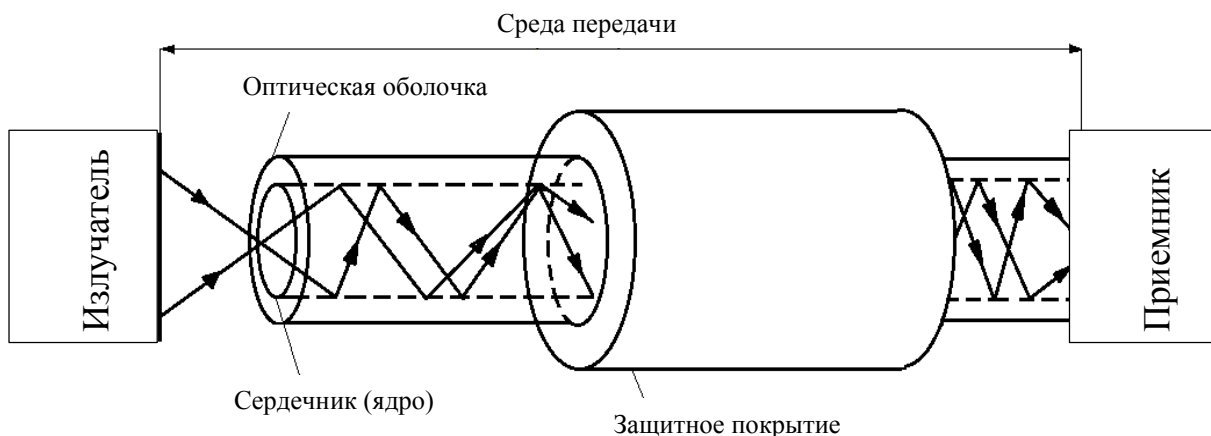


Рисунок 1.23 – Структура оптического информационного канала

По волновой теории света показатель преломления материала (n) выражается через отношение скорости света в вакууме (c) к скорости света в среде данного материала (V):

$$n = c/V \quad (1.18)$$

или оптической длины волны в вакууме (λ_B) к длине волны в материале (λ_M):

$$n = \lambda_B/\lambda_M. \quad (1.19)$$

Поскольку $n > 1$ для всех известных веществ, свет распространяется в материале медленнее, чем в вакууме.

Типичные значения показателей преломления материалов, используемых в оптоволокне, приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Показатели преломления материалов, используемых в оптоволокне

Материал	Длина волны в вакууме, нм	Показатель преломления	Длина волны в материале, нм
Стекло	850	1,4525	585,5
	1300	1,4469	898,5
	1550	1,4440	1073,4
<i>Gaalas</i>	850	3,6	236,1
Пластик	650	1,4–1,5	433–464

Из формул (1.18), (1.19) и значений, приведенных в таблице 1.7, видно, что показатель преломления стекла изменяется в зависимости от его состава.

Основные понятия, используемые при обсуждении механизма преломления, иллюстрирует рисунок 1.24. На всех трех видах рисунка граница раздела проходит между двумя средами с показателями преломления n_1 и n_2 , причем $n_1 > n_2$.

Рассмотрим случай преломления светового луча при переходе из одной среды в другую (см. рисунок 1.24, *a*). Углом падения называется угол между перпендикуляром к границе раздела двух сред и падающим лучом (θ_1). На границе раздела часть света отражается обратно (отражение Френеля). Углом отражения называется угол между перпендикуляром к границе раздела двух сред и отраженным лучом. Оставшаяся часть света пересекает границу раздела, образуя преломленный луч, который распространяется под углом θ_2 . Согласно закону Снеллиуса между углом падения и углом преломления существует следующее соотношение:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.20)$$

Если угол падения θ_1 увеличивается, то при определенном его значении преломленный луч полностью исчезает ($\theta_1 = 90^\circ$). Такой угол называется критическим углом скольжения $\theta_{кр}$, либо углом Брюстера (см. рисунок 1.24, *b*).

При углах, больших критического (см. рисунок 1.24, *в*), свет полностью отражается и во вторую среду не проникает, а интенсивность отраженного луча равна интенсивности падающего. Это явление называется полным внутренним отражением.

При расчете характеристик реального распространения света в оптоволокне используется величина числовой апертуры (NA), которая тесно связана с условием полного внутреннего отражения и волнового распространения света в оптоволокне. Она определяет угловой растр входного конуса (рисунок 1.25), соответствующего максимальному углу ввода света в оптоволокно:

$$NA = \sin \theta, \quad (1.21)$$

где θ – половина угла ввода.

Величина NA – важный технологический параметр, т. к. чем больше значение NA , тем лучше свет вводится в оптоволокно. При малых значениях NA вводится достаточно узконаправленный луч света.

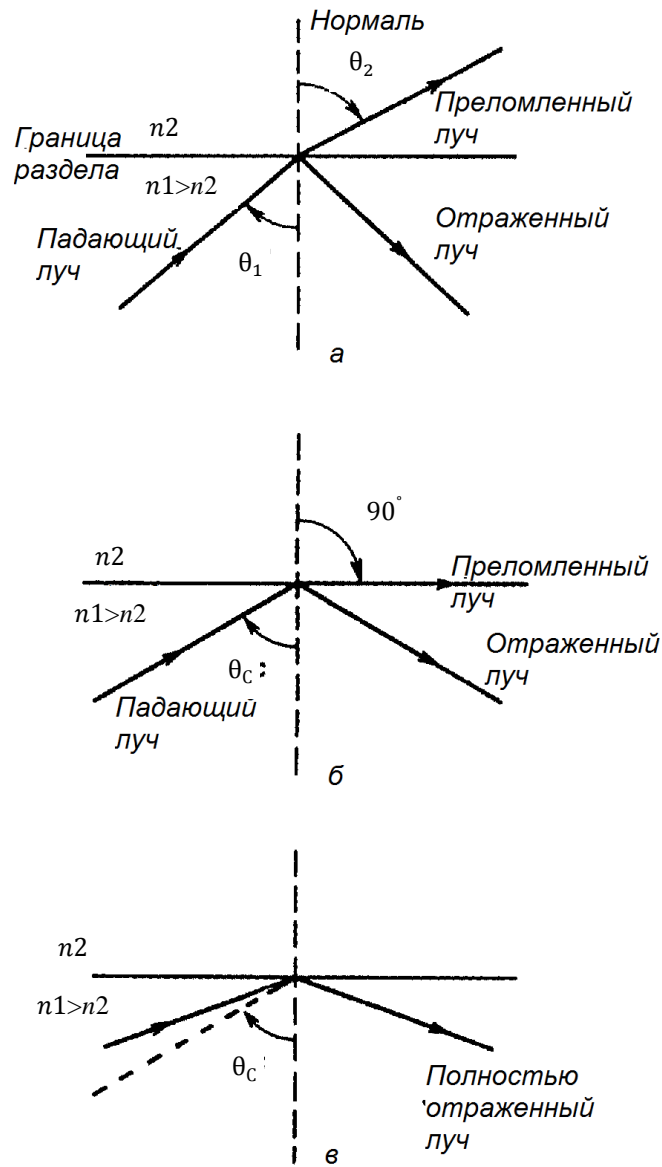


Рисунок 1.24 – Отражение и преломление света на границе двух сред

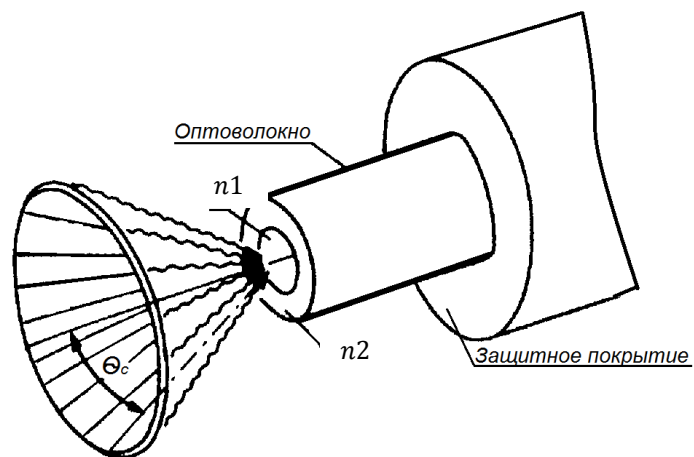


Рисунок 1.25 – Входной конус при вводе света в оптическое волокно

Как указывалось выше, показатель преломления сердечника n_1 больше показателя преломления оптической оболочки n_2 . Численная разница показателей преломления невелика – порядка одного процента. Наиболее распространенные соотношения диаметров сердечника и оптической оболочки приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Наиболее распространенные соотношения диаметров сердечника и оптической оболочки

Сердечник, мкм	Оптическая оболочка, мкм
8	125
50	125
62,5	125
100	140

При вводе света внутрь волокна под углом, большим критического, свет, испытывая полное внутреннее отражение, будет двигаться зигзагообразно вдоль сердечника оптоволокну. Лучи, при движении пересекающие ось световода, называются меридиональными. Отметим, что часть лучей, называемых косыми (асимметричными), будет двигаться по спиралеобразной траектории, не пересекая ось волокна; при анализе волоконно-оптических процессов они, как правило, не учитываются. Используемые материалы, состав и размеры компонентов определяют физические параметры и особенности оптоволокну.

Под основными параметрами оптоволокну понимают профиль показателя преломления, число мод, потери оптической мощности.

Распределение значений показателя преломления вдоль диаметра поперечного сечения оптического волокна называют профилем показателя преломления. Различают оптические волокна со ступенчатым профилем, когда сердечник и оптическая оболочка имеют однородный (но разный!) показатель преломления, и с градиентным профилем, когда показатель преломления сердечника плавно уменьшается от центра к краям. У градиентных волокон отсутствует резкое изменение показателя преломления на границе ядра и оптической оболочки, что характерно для ступенчатого профиля. Чаще всего у градиентных световодов профиль показателя преломления близок к параболе, такие световоды называют параболическими.

Для оптимизации работы на какой-либо одной длине волны используется и более сложная структура профиля.

Строгое рассмотрение уравнений Максвелла, определяющих характер распространения света в оптоволокну, показывает, что в волокне может распространяться ограниченное число типов электромагнитных колебаний, называемых модами. Каждая мода имеет характерные для нее структуру электромагнитного поля, а также фазовую и групповую скорость. Напомним, что под фазовой скоростью понимается скорость перемещения фазы волны, а групповая скорость определяет скорость переноса энергии электромагнитной волной. Для свободно распространяющихся электромагнитных волн обе скорости эквивалентны и равны скорости света, в то время

как для электромагнитных волн, перемещающихся в оптоволокне, величины фазовой и групповой скоростей различны и зависят от частоты колебаний, материала оптоволокна и его геометрических параметров. Следствием влияния этих факторов является дисперсия. Различают следующие виды дисперсии:

- материальную (молекулярную), обусловленную зависимостью показателя преломления материала световода от длины волны излучения;

- волновую, определяемую длиной волны в оптическом волноводе и фактически зависящую от совокупности таких геометрических параметров оптоволокна, как отклонение от круглой формы сечения, непостоянство диаметра, несоосность ядра и оболочки, непостоянство показателя преломления по длине оптоволокна и т. п.;

- межмодовую (модовую), являющуюся результатом различной скорости распространения мод в многомодовом волокне.

Моды характеризуются тем, что после двух последовательных переотражений от границы сердечника и оптической оболочки их электромагнитные волны оказываются в фазе. Если это условие не соблюдается, то волны, интерферируя, гасят друг друга.

Являясь одним из возможных решений уравнения Максвелла, мода выступает в качестве математического понятия, определяющего такую физическую характеристику, как режим работы оптоволокна.

Различают одномодовый и многомодовый режимы работы волоконно-оптических линий связи. Условием одномодового режима, в котором по оптоволокну распространяется одна основная мода, является выполнение неравенства

$$F = (2\pi \cdot NA \cdot r/\lambda_0) < F_{\text{отс}}, \quad (1.22)$$

где λ_0 – рабочая длина волны;

r – радиус сердечника;

F – нормированное значение рабочей частоты;

$F_{\text{отс}}$ – нормированное значение частоты отсечки (частоты, соответствующей предельному значению длины волны данной моды). Для световодов со ступенчатым профилем $F_{\text{отс}} = 2,405$, в случае параболического профиля $F_{\text{отс}} = 3,53$.

Величину NA можно найти из выражения

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1.23)$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления сердечника и оптической оболочки.

Условие, определяемое неравенством (1.22), необходимое, но недостаточное. Кроме него должно выполняться следующее неравенство:

$$2r\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \neq 0,38\lambda_0. \quad (1.24)$$

Если неравенство (1.22) не выполняется, в световоде устанавливается многомодовый режим. В этом случае число мод приблизительно равно $N = F^2/2$ для световода со ступенчатым профилем и $N = F^2/4$ в случае градиентного профиля.

Рассмотрим подробнее характерное для многомодового волокна явление межмодовой дисперсии. При вводе луча в оптическое волокно путь распространения от начала до конца волокна для разных мод различен. Это обуславливает разное время распространения мод, переносящие энергию первичного сигнала, и перераспределение выходной суммарной энергии в заданном отрезке времени. В результате, если импульс света на входе оптоволокна имел ярко выраженные фронт и срез сигнала, то на выходе получаем существенно «размытый» сигнал со сглаженными фронтом и срезом. Это «размывание» сигнала обусловлено межмодовой дисперсией и проявляется тем сильнее, чем длиннее линия связи. Межмодовая дисперсия ограничивает пропускную способность волокна, т. к. при повышении частоты входного сигнала (последовательность коротких импульсов) размытые края среза одного импульса начинают перекрываться размытым фронтом последующего, ведя к потере информативности сигнала (рисунок 1.26).

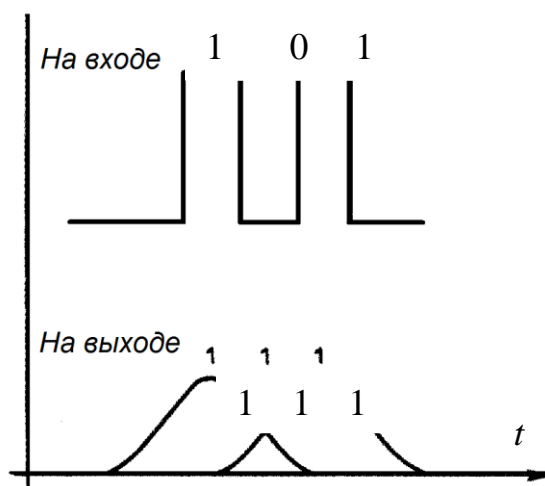


Рисунок 1.26 – Искажение передаваемого сигнала вследствие межмодовой дисперсии

Для одномодового волокна существенным является другой вид дисперсии – материальная дисперсия (или молекулярная). Если вспомнить формулу (1.19), то очевидно, что для разных длин волн (для источников излучения характерна определенная ширина спектра для заданного значения рабочей частоты) показатель преломления также различен. Таким образом, даже в рамках одной моды скорость распространения в оптоволокне для разных значений частот спектра рабочей частоты различна. Этот вид дисперсии присутствует и в многомодовом оптоволокне, но им по сравнению с межмодовой дисперсией можно пренебречь.

Еще один вид дисперсии – волноводная дисперсия – также является существенным для одномодового волокна. По существу этот вид дисперсии связан с тем, что заметная часть оптической мощности (до 20 % от общей мощности) распространяется по оптической оболочке, имеющей отличный от ядра показатель преломления, что делает ее скорость иной, чем при распространении в ядре. Суммарную дисперсию, включающую в себя материальную и волноводную, называют хроматической дисперсией.

Из приведенных выражений (1.22) и (1.24) хорошо видны основные технологические пути решения вопроса получения одномодового режима: уменьшение диаметра сердечника, уменьшение разности показателей преломления сердечника и оптической оболочки, увеличение длины волны источника излучения. Реально компромисс следует искать только между первыми двумя параметрами. С увеличением диаметра улучшаются условия для ввода повышенной мощности и условия сочленения отрезков волокна, одновременно с этим необходимо выбирать малое значение разности показателей преломления ядра и оптической оболочки, что, в свою очередь, приводит к ухудшению распространения основной моды и повышенной чувствительности к внешним воздействиям (например изгибам). При большой разности показателей преломления сердечника и оболочки маленький диаметр сердечника повышает требования к точности стыковки отрезков волокна. В современных одномодовых волокнах диаметр сердечника составляет порядка 6–10 мкм, а разность показателей преломления $n_1 - n_2$ составляет 0,003–0,005. Одномодовый режим работы для заданной длины волны реализуется при диаметре волокна, соизмеримом с длиной волны. Все это приводит к тому, что световой пучок отражается от поверхности сердечника реже, вызывая меньшую дисперсию. В результате одномодовое волокно по сравнению с многомодовым имеет существенно меньший коэффициент затухания и большую пропускную способность (на сегодняшний день по грубой оценке более 10 Гбит/с против 2,5 Гбит/с), но само одномодовое волокно, а также соответствующие приемники и передатчики стоят дороже, чем многомодовые.

Потери оптической мощности (или затухание) являются результатом поглощения света материалом световода, рассеяния в местах микро- и макроизгибов, а также отражения на концах световода. Коэффициент затухания, отражающий потери оптической мощности, обозначается α и изменяется в децибелах на километр.

Величину потерь оптической мощности в оптоволокне можно рассчитать из соотношения (1.25), носящего название Бугера:

$$P_L = P_0 e^{-\alpha L}, \quad (1.25)$$

где P_L – величина потерь мощности на длине L ;

P_0 – величина введенной мощности.

Учитывая, что мощность на выходе оптоволокна меньше, чем на входе, значение потерь, выраженное в децибелах, будет иметь знак минус, который часто опускается в тексте. Для современных типов одномодового оптоволокна величина коэффициента затухания при длине волны 1,3 мкм лежит в диапазоне

0,4–0,45 дБ/км. Для многомодового волокна величина коэффициента затухания при той же длине волны составляет 0,6–1,0 дБ/км. Например, для стандартного многомодового оптоволоконного кабеля фирмы *Siemens*, используемого для построения оптических сетей *PROFIBUS*, коэффициент затухания при длине волны до 1300 нм составляет 0,8–1,0 дБ/км. Или другой пример: для внутренней прокладки, в частности, для организации протяженных сетей внутри зданий, широко применяется оптический кабель *IndoorMini-Breakout* (2, 4, 6, 8, 12, 16 или 24 оптоволоконных) фирмы *Belden*, многомодовые оптические волокна которого при длине волны до 1300 нм имеют коэффициент затухания всего 0,5–0,8 дБ/км (таблица 1.9).

Таблица 1.9 – Основные характеристики многомодового оптического волокна кабеля *IndoorMini-Breakout* фирмы *Belden*

Тип опто-волоконного	Размеры диаметра ядра и оболочки (мкм)	Длина волны (нм)	Коэффициент затухания (средний/максимальный, дБ/км)	Ширина полосы пропускания (МГц · км)	Допустимая длина линии гигабитного Ethernet (м)	Показатель преломления
50/125	50±2,5	850	2,5/2,7	≥600	550	1,481
	125±2	1300	0,5/0,8	≥1200	550	1,476
62,5/125	62,5±2,5	850	3,0/3,2	≥200	220	1,495
	125±2	1300	0,6/0,9	≥600	550	1,490

Следует подчеркнуть фундаментальное отличие между оптическим кабелем и медным (витая пара, коаксиал): в случае медного проводника потери в линии пропорциональны увеличению частоты передаваемого сигнала, в то время как потери в оптическом волокне практически постоянны для широкого диапазона частот (рисунок 1.27).

Отдельно остановимся на вопросах температурной и радиационной стойкости оптоволоконного.

Температурные колебания оказывают влияние на абсолютные значения коэффициентов преломления ядра и оптической оболочки, а следовательно, и на их разность, что может приводить к нарушению условий существования одной моды и появлению дополнительных. При этом перераспределение энергии между модами приведет к потере мощности основного сигнала. Различия коэффициентов теплового расширения стеклянного сердечника и полимерной оптической оболочки увеличивает потери на микроизгибах. Поскольку температурные колебания ухудшают прочностные характеристики оптоволоконного кабеля в целом, диапазон температур, допустимых при прокладке кабеля (–5...+50 °С для кабелей *Belden* и *Siemens*), более узкий по сравнению с диапазоном рабочих температур. Надо подчеркнуть, что перечисленные проблемы, как правило, являются следствием резких перепадов температуры, а не стабильно высоких и низких ее значений, т. к. диапазон рабочих температур оптоволоконных кабелей обычно лежит в границах –40...+70 °С (например, –30...+70 °С для кабелей фирмы *Belden* или –25...+60 °С для кабелей

фирмы *Siemens*), что в большинстве случаев соответствует требуемым условиям эксплуатации.

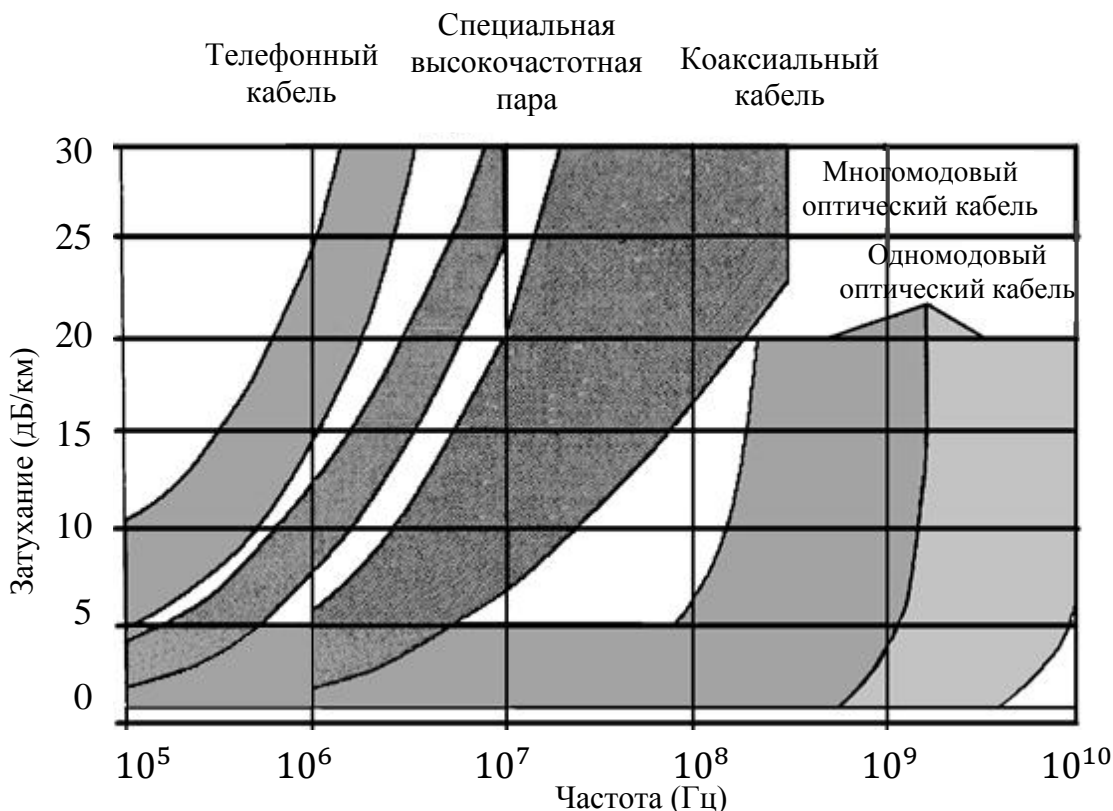


Рисунок 1.27 – Зависимость затухания от частоты передаваемого сигнала для разных типов проводника

Радиационная стойкость – это способность оптоволоконного кабеля противостоять действию ионизирующего излучения (гамма-излучение, потоки нейтронов и т. д.). Под действием ионизирующего излучения, изменяющего структуру стекла, оптоволоконный кабель «темнеет», увеличивая потери мощности за счет появляющейся структурной неоднородности волокна. Величина потерь зависит от типа излучения, дозы облучения и времени экспозиции.

Под действием радиации происходит ионизация молекул SiO_2 , миграция электронов и легирующих примесей, а также образование гидроксильных ионов OH из свободного водорода. Продолжительное экспонирование волокна при низкой интенсивности облучения приводит к более сильному «потемнению», чем та же доза, полученная за более короткое время. После прекращения воздействия облучения наступает постепенное восстановление пропускной способности волокна. Например, при действии радиоактивного излучения 3700 рад в течение 3 нс (условия ядерного взрыва) затухание может достигать 1000 дБ/км, и уже через 10 с величина потерь становится меньше 5 дБ/км. Имеются данные, на основании которых можно сделать следующий вывод: оптоволоконный кабель с ядром из стекла с высоким содержанием гидроксильных ионов OH после воздействия излучения работает лучше, т. к. ионы

OH^- , поглощая энергию ионизирующего излучения, уменьшают вероятность образования дефектов и сокращают время восстановления. В общем случае существенными факторами, влияющими на радиационную стойкость оптоволоконной системы, являются тип легирующей добавки в материале ядра, диаметр ядра и тип оптической оболочки. В качестве легирующего вещества чаще всего выступают окислы германия (GeO_2), фосфора (P_2O_5), бора (B_2O_3), фтор (F), эрбий (Er) и неодим (Nd). В частности, фтор и окись бора уменьшают показатель преломления, а окись германия и окись фосфора его увеличивают.

При передаче информации по ВОЛС используется временное разделение сигналов, которые передаются в цифровой форме. Электрический сигнал подается на схему управления интенсивностью излучения лазера и модулирует световой поток, являющийся переносчиком информации, которая распространяется по световоду. На приеме световой сигнал преобразуется в электрический с помощью фотоэлемента. Так как передача осуществляется импульсами, то вместо усилителей применяют регенераторы, состоящие из порогового устройства и генератора сигналов. Пороговое устройство срабатывает, если сигнал превышает определенную заданную мощность независимо от того, искажен ли он или нет. Принятый сигнал включает регенератор, который посылает в следующий пункт связи стандартный импульс. Между импульсами ничего не передается, что увеличивает помехоустойчивость передачи. Таким образом, сигналы восстанавливаются, а не усиливаются (в том числе не усиливаются помехи).

В качестве основных направлений развития волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) можно указать следующие:

1 Совершенствование оптоэлектронных элементов и приемопередающего оборудования. За счет использования чувствительных фотоприемников и когерентных методов приема достигнута длина регенеративного участка более 400 км при применении стандартного одномодового оптического волокна (ОВ) с коэффициентом затухания 0,22 дБ/км.

2 Разделение по длине волны. Подавляющее большинство ВОСП использует одно ОВ для передачи излучения одной рабочей длины волны. Существенного увеличения суммарной емкости системы можно достичь передачей в одном волокне излучения нескольких рабочих длин волн. Основной сложностью реализации спектрального уплотнения является создание оптического разветвителя на несколько входов/выходов с малыми потерями. В качестве примера можно привести систему, разработанную японскими специалистами, которая имеет 132 оптические несущие, каждая из которых несет цифровой сигнал со скоростью 20 Гбит/с, а следовательно, скорость цифрового потока в одном волокне составляет 2640 Гбит/с.

3 Использование волоконных усилителей. Широко распространены волоконные усилители, выполненные на основе легированного эрбием (редкоземельный элемент) ОВ. При введении излучения с длиной волны 980 нм в легированный эрбием отрезок волокна фотоны меняют состояние и генерируется излучение с длиной волны 1,55 мкм. Это излучение взаимодействует с рабочим излучением на той же длине волны, усиливая его. Высокомощный лазер с длиной волны

980 нм называется лазером накачки. Ввод излучения от лазера накачки в легированный эрбием отрезок волокна осуществляется с помощью специальных оптических разветвителей. Длина усилительного участка достигает 120 м, допускается последовательное соединение трех усилительных участков до регенерации сигналов. Таким образом, длина участка регенерации может составлять 360 км.

Волоконно-оптические линии связи имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с линиями связи на основе металлических кабелей. К ним относятся большая пропускная способность, малое затухание, малые масса и габариты, высокая помехозащищенность, безопасность, практически отсутствующие взаимные влияния, долговечность, малая стоимость.

Конечно, ВОЛС обладают рядом недостатков:

- при создании линий связи требуются высоконадежные активные элементы, преобразующие электрические сигналы в оптическое излучение и обратно, а также оптические соединители (коннекторы) с малым затуханием и большим ресурсом на подключение/отключение; точность изготовления таких элементов линии связи должна быть высокой, поэтому их производство дорогостоящее;

- для монтажа оптических волокон требуется прецизионное, а поэтому дорогое технологическое оборудование;

- при обрыве оптического кабеля затраты на восстановление выше, чем при использовании кабелей с металлическими проводниками.

В заключение рассмотрения ВОЛС следует отметить, что оптическое волокно может быть использовано как датчик для измерения напряжения, температуры, давления и других параметров. Малый размер и фактическое отсутствие необходимости в электрической энергии дают оптоволоконным датчикам преимущество перед традиционными электрическими в определенных областях.

Оптоволоконно используется в гидрофонах в сейсмических или гидролокационных приборах. Созданы системы с гидрофонами, в которых на волоконный кабель приходится более 100 датчиков. Системы с гидрофоночным датчиком используются в нефтедобывающей промышленности, а также во флотах некоторых стран. Немецкая компания *Sennheiser* разработала лазерный микрофон, основными элементами которого являются лазерный излучатель, отражающая мембрана и оптическое волокно.

Оптоволоконные датчики, измеряющие температуру и давление, разработаны для работы в нефтяных скважинах. Они хорошо подходят для такой среды, работая при температурах, слишком высоких для полупроводниковых датчиков. Другое применение оптоволоконна – в качестве датчика в лазерном гироскопе, в некоторых моделях машин для навигации.

Оптоволоконно широко используется для освещения, например, как световод в медицинских и других целях, где яркий свет необходимо доставить в труднодоступную зону. В некоторых зданиях оптические волокна направляют солнечный свет с крыши в какую-нибудь часть здания. Оптоволоконное освещение также используется в декоративных целях, включая коммерческую рекламу, искусство и искусственные рождественские елки.

Оптоволокно также используется для формирования изображения. Пучок света, передаваемый оптическим волокном, иногда используется совместно с линзами, например, в эндоскопе, который используется для просмотра объектов через маленькое отверстие.

1.6.4 Инфракрасное излучение

Инфракрасные беспроводные сети используют для передачи данных инфракрасные лучи. Инфракрасное излучение широко применяется для связи на небольших расстояниях, например, для управления телевизорами, видеомагнитофонами, светильниками и т. д. Основным недостатком является то, что инфракрасное излучение не проходит сквозь твердые объекты. Но этот факт является также и положительным, т. к. инфракрасная система в одной части здания не будет интерферировать с подобной системой в соседней комнате и, кроме того, это повышает защищенность данной системы от прослушивания по сравнению с радиосистемой.

1.6.4.1 Сети на рассеянном инфракрасном излучении. При этой технологии сигналы, отражаясь от стен и потолка, в конце концов достигают приемника. Эффективная область ограничивается примерно 30 м. Скорость передачи невелика, т. к. все сигналы отраженные.

1.6.4.2 Сети на отраженном инфракрасном излучении. В таких сетях оптические трансиверы, расположенные рядом с компьютером, передают сигналы в определенное место, из которого они транслируются соответствующему компьютеру.

1.6.4.3 Широкополосные оптические сети. Эти инфракрасные беспроводные сети предоставляют широкополосные услуги магистрали, соответствуют жестким требованиям мультимедийной среды и практически не уступают кабельным сетям. Хотя скорость сигнала и удобство использования инфракрасных сетей очень притягательны, возникают трудности при передаче сигналов на расстояние более 10 м. К тому же такие сети могут быть подвержены помехам со стороны сильных источников света, которые есть в большинстве помещений.

Рассмотренные в данном разделе физические среды являются основанием для создания промышленных и офисных сетей.

1.7 Структура линий связи

Системы телемеханики разделяются по характеру расположения объектов в пространстве на системы для сосредоточенных объектов и рассредоточенных объектов. Объекты могут быть рассредоточены вдоль общей линии связи, по площади или в пространстве.

Характерным признаком систем телемеханики для сосредоточенных объектов является то, что оператор и объекты управления находятся в двух разделенных пунктах – пункте управления (ПУ) и контролируемом пункте (КП) – и соединены в единую систему управления с помощью аппаратуры телемеханики и канала связи.

Это наиболее простая по своей структуре схема. Расстояние между ПУ и КП в таких системах может быть самым различным. Так, управление Волжской ГЭС производится из Москвы, т. е. с расстояния около тысячи километров, а управление космическим кораблем осуществляется на еще больших расстояниях. К таким системам относятся также и система ТУ строительными кранами.

Системой телемеханики для рассредоточенных объектов называется система, в которой к общему каналу связи подключается по меньшей мере несколько КП.

Все многообразие существующей территориальной разобщенности контролируемых пунктов можно свести к шести основным видам – структурам рассредоточенности.

1.7.1 Конфигурация «точка – точка»

Данная конфигурация представлена на рисунке 1.28. Эта конфигурация связывает между собой две телемеханические станции и является простейшей из всех возможных типов конфигураций.

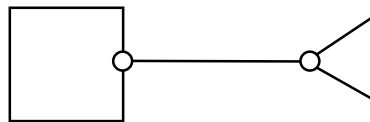


Рисунок 1.28 – Конфигурация «точка – точка»

1.7.2 Конфигурация радиальная «точка – точка»

ПУ связан с каждым КП индивидуальным каналом передачи данных (рисунок 1.29). При этом количество линейных терминалов аппаратуры передачи данных (АПД) на ПУ равно количеству подключенных КП, что позволяет ПУ одновременно и независимо передавать сообщения одному, группе или всем КП, а каждый КП может одновременно и независимо передавать данные на ПУ.

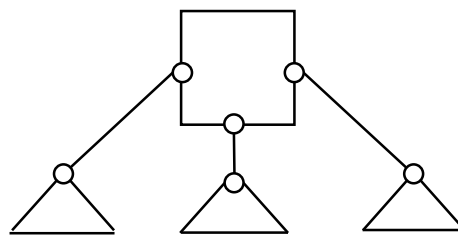


Рисунок 1.29 – Конфигурация радиальная «точка – точка»

1.7.3 Конфигурация радиальная многоточечная

На ПУ установлен один линейный терминал АПД, к которому индивидуальными линиями связи подключены более одного КП (рисунок 1.30). При этом одновременно только один КП может передавать данные на ПУ, а ПУ может передавать данные одному или нескольким КП одновременно.

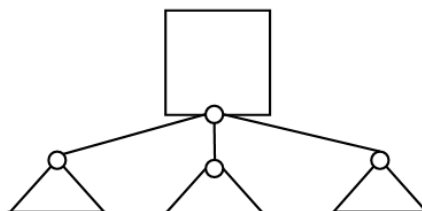


Рисунок 1.30 – Конфигурация радиальная многоточечная

1.7.4 Конфигурация цепочечная

На ПУ установлен один линейный терминал АПД, к которому общей линией подключено более одного КП (рисунок 1.31). При этом одновременно только один КП может передавать данные на ПУ, а ПУ может передавать данные одному или нескольким КП одновременно.

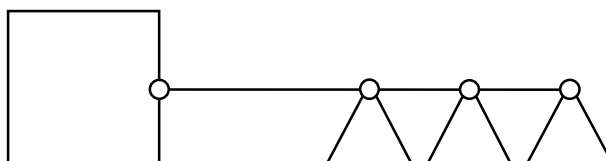


Рисунок 1.31 – Конфигурация цепочечная

1.7.5 Конфигурация многоточечная кольцевая

Линия связи, проходящая через все КП, образует кольцо, по которому информация от ПУ любому КП (и обратно) может быть отправлена в одну или другую сторону, например, при обрыве линии связи (рисунок 1.32).

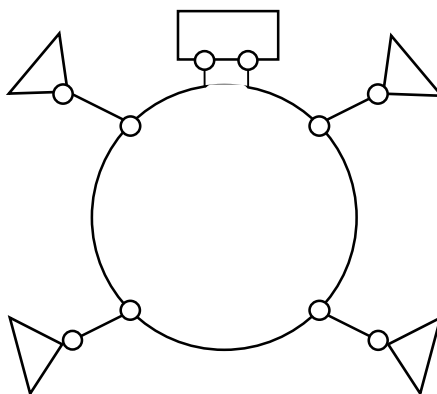


Рисунок 1.32 – Конфигурация многоточечная кольцевая

1.7.6 Конфигурация смешанная

Смешанная конфигурация подразумевает комбинацию различных конфигураций. Наряду с ПУ и КП в структуре систем телемеханики могут использоваться пункты сбора, концентрации информации и обмена ею (рисунок 1.33).

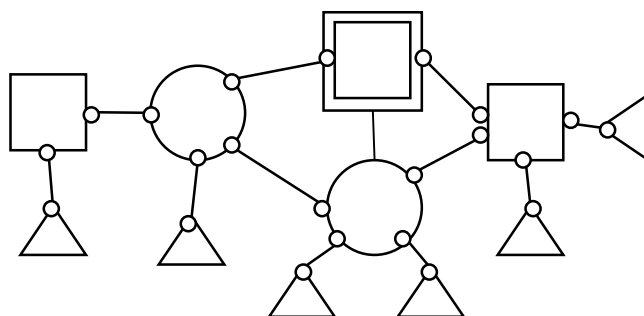


Рисунок 1.33 – Конфигурация смешанная

1.8 Способы передачи дискретных сообщений

Системы передачи дискретных сообщений, в отличие от традиционной техники связи, призваны обслуживать самых различных абонентов. Это могут быть люди, ЭВМ, а также автоматы с фиксированной или изменяемой программой.

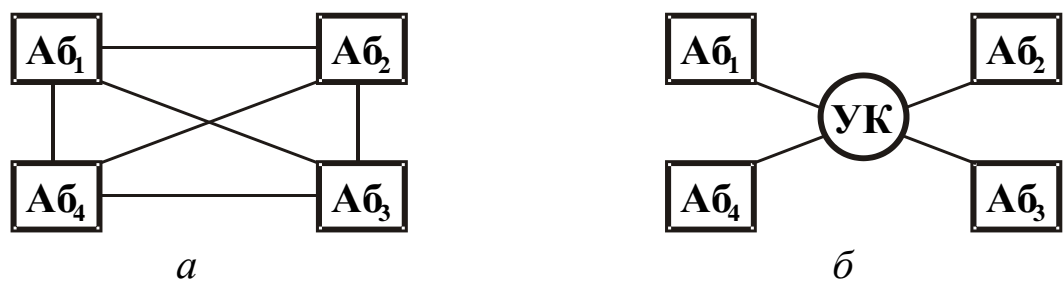
При наличии более чем двух абонентов создаются сети передачи данных.

Сетью передачи дискретных сообщений называется совокупность оконечной аппаратуры передачи дискретных сообщений, каналов связи, узлов коммутации и программного обеспечения.

Все сети передачи дискретных сообщений делятся на некоммутируемые и коммутируемые. Некоммутируемые сети содержат только оконечную аппаратуру и каналы, но не имеют узлов коммутации (рисунок 1.34, а). Поэтому в таких сетях возможна связь между источниками и потребителями информации, соединенными друг с другом постоянно закрепленными «арендованными» каналами.

Коммутируемые сети передачи дискретных сообщений непременно содержат узлы коммутации (УК), с помощью которых и образуется сквозной канал связи между любыми парами абонентов в сети (рисунок 1.34, б).

Использование магистральных каналов связи в коммутируемых сетях, как правило, гораздо выше, чем в некоммутируемых, вследствие чего они и получили более широкое распространение. Некоммутируемые сети обычно организуются только в тех случаях, когда передаваемые объемы информации весьма велики, а также когда требуется очень малое время установления соединения между абонентами, которое не может быть обеспечено существующими коммутируемыми сетями. Кроме того, некоммутируемые каналы тональной частоты имеют существенно лучшие фазочастотные характеристики, что позволяет работать с ними с повышенными скоростями модуляции.



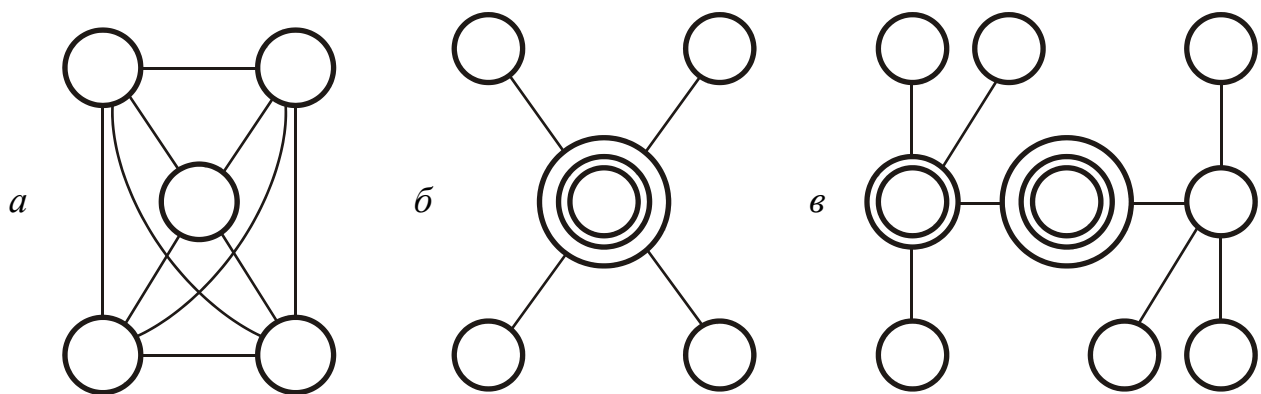
a – некомутируемые; *б* – комутируемые

Рисунок 1.34 – Сети передачи дискретных сообщений

Узлы коммутации в сетях передачи дискретных сообщений могут соединяться между собой разными способами. Наиболее распространенными являются соединения «каждый с каждым», радиальное и радиально-узловое (рисунок 1.35).

Для обеспечения передачи индивидуальных сообщений необходимо связать (соединить) оконечные аппараты абонентов. Электрическая цепь (канал), состоящая из нескольких участков и обеспечивающая передачу сигналов между абонентами, называется *соединительным трактом*.

Процесс поиска и соединения электрических цепей называется *коммутацией каналов*. Сеть, обеспечивающая коммутацию каналов, называется *сетью с коммутацией каналов (СКК)*. Узловые станции сети СКК называются *станциями коммутации*.



a – каждый с каждым; *б* – радиальное; *в* – радиально-узловое

Рисунок 1.35 – Соединения между узлами коммутации

При передаче документальных сообщений кроме организации связи с коммутацией каналов возможно осуществлять поэтапную передачу сообщения от узла к узлу. Такой способ передачи получил название *коммутации сообщений*. Соответственно сеть, обеспечивающая коммутацию сообщений, называется *сетью с коммутацией сообщений (СКС)*.

Разновидностью СКС является *сеть с коммутацией пакетов* (СКП). В этом случае полученное от передающего абонента сообщение разбивается на блоки (*пакеты*) фиксированной длины. Пакеты передаются по сети (необязательно по одному и тому же маршруту) и объединяются в сообщение перед выдачей принимающему абоненту. В свою очередь, СКП подразделяются на *дейтаграммные* (англ. *datagram*) и сети *виртуальных каналов*. В дейтаграммных сетях каждый из пакетов рассматривается как независимый информационный блок, причем пакеты могут проходить через сеть по различным маршрутам. В сетях виртуальных каналов до передачи пакетов через сеть выбирается оптимальный в некотором смысле маршрут, по которому затем передаются пакеты. Последовательность узлов, входящих в выбранный маршрут, образует собственно виртуальный канал.

Узловые станции СКС и СКП называются *центрами коммутации сообщений* (ЦКС) и *пакетов* (ЦКП) соответственно.

На практике метод коммутации сообщений и метод коммутации пакетов применяются наиболее широко.

1.9 Расчет основных характеристик цифровых линий связи

При расчете цифровых линий связи одной из важных задач является установление соотношений между параметрами этих линий и требуемыми показателями качества передачи информации.

Исходными данными для расчета являются:

- достоверность передачи информации, задаваемая допустимой вероятностью ошибки на один информационный символ (или кодовое слово);
- скорость передачи информации;
- дальность действия линии связи;
- вид канала связи, характеризуемый условиями распространения сигналов в канале, статистикой помех, условиями работы.

Далее производится инженерный расчет линии связи [7], основанный на энергетическом подходе к определению необходимых параметров линии.

Рассмотрим расчет относительно линий связи со свободно распространяющимися сигналами и прямой волной в предположении, что способы передачи и приема, вид канала и статистика помех известны.

В соответствии с известным уравнением дальности связи мощность сигнала на входе приемника определяется выражением

$$P_{\text{свх}} = P_{\text{изл}} \gamma_E G S_3 / 4\pi r^2, \quad (1.26)$$

где $P_{\text{изл}}$ – средняя мощность сигнала, излучаемого передатчиком;

G – коэффициент направленного действия антенны передатчика;

S_3 – эффективная площадь приемной антенны;

r – расстояние между передатчиком и приемником;

γ_E – коэффициент, учитывающий потери энергии сигнала в среде за счет поглощения, который обычно принято выразить в виде

$$\gamma_E = 10^{-0,1\alpha r}, \quad (1.27)$$

где α – коэффициент затухания, определяющий потери на поглощение, дБ/км.

В ряде случаев удобнее перейти от десятичного основания к натуральному. Тогда

$$\gamma_E = \exp(-0,23\alpha r). \quad (1.28)$$

Для электромагнитных колебаний с длиной волны $\lambda > 10$ см потери поглощения невелики, и с ними в первом приближении можно не считаться. При $\lambda \approx 5$ см $\alpha \approx 0,002$ – $0,2$ дБ/км, при $\lambda \approx 3$ см $\alpha \approx 0,01$ – $1,0$ дБ/км. Для акустических сигналов

$$\alpha \approx 0,036f^{\frac{3}{2}} \text{ дБ/км}, \quad (1.29)$$

где f – частота, кГц.

Итак, с учетом (1.28) выражение (1.26) принимает следующий вид:

$$P_{c_{\text{вх}}} = P_{\text{изл}} \frac{GS_3}{4\pi r^2} \exp(-0,23\alpha r). \quad (1.30)$$

Если основными помехами в линии связи являются внутренние флуктуационные шумы и другие случайные помехи шумового типа, то, пересчитав все эти помехи ко входу приемника, можно определить результирующую спектральную плотность помех на входе в виде

$$N_{0\Sigma}(f) = \sum_i N_{0i}(f), \quad (1.31)$$

где N_{0i} – спектральная плотность случайной помехи i -го вида, пересчитанная ко входу приемника.

Мощность всех помех на входе приемника, определяемая в полосе частот F_x , занимаемой спектром сигнала, равна

$$P_{\text{ш}_{\text{вх}}} = \int_{f_0 - \Delta f_3/2}^{f_0 + \Delta f_3/2} N_{0\Sigma}(f) df = N_{0\Sigma} \Delta f_3, \quad (1.32)$$

где f_0 – частота несущей.

В простейшем случае, когда основной помехой являются только внутренние флуктуационные шумы приемника с равномерной спектральной плотностью N_0 , мощность помехи на входе равна

$$P_{\text{ш}_{\text{вх}}} = N_0 f_3 = kT_3 f_3, \quad (1.33)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T_3 – эквивалентная шумовая температура входа.

С учетом (1.30) и (1.32) отношение средней мощности сигнала P_x к средней мощности шума $P_{ш}$ на входе приемника определяется формулой

$$\left(\frac{P_x}{P_{ш}}\right)_{вх} = \frac{P_{изл}GS_3}{4\pi r^2 N_{0\Sigma} f_3} \exp(-0,23\alpha r). \quad (1.34)$$

Пусть для обеспечения требуемой вероятности ошибки при передаче одной двоичной единицы информации необходимо иметь следующее энергетическое отношение сигнал/шум:

$$h_{0\text{ тр}}^2 = E_0/N_{0\Sigma} = (P_0/P_{ш})_{вх} \tau_0 F_x. \quad (1.35)$$

Тогда требуемое отношение сигнал/шум на входе приемника имеет вид

$$(P_x/P_{ш})_{тр} = h_{0\text{ тр}}^2 / \tau_0 \Delta f_3. \quad (1.36)$$

При определении требуемого отношения сигнал/шум в соответствии с выражением (1.36) обычно не учитывается ряд причин, снижающих помехоустойчивость приема. Тогда, введя коэффициент запаса $\gamma_{\text{сист}}$, получим

$$(P_c/P_{ш})_{тр} = \gamma_{\text{сист}} \cdot h_{0\text{ тр}}^2 / \tau_0 \Delta f_3, \quad (1.37)$$

где коэффициент запаса $\gamma_{\text{сист}}$ изменяется от 2 до 10 (3–10 дБ).

Для того чтобы линия связи обеспечивала передачу информации с помехоустойчивостью не ниже заданной, необходимо выполнить условие

$$(P_c/P_{ш})_{вх} \geq (P_c/P_{ш})_{тр}. \quad (1.38)$$

Приняв во внимание (1.34) (1.37) и (1.38), имеем

$$\frac{P_{изл}GS_3}{4\pi r^2 N_{0\Sigma}} \exp(-0,23\alpha r) \geq \gamma_{\text{сист}} \frac{h_{0\text{ тр}}^2}{\tau_0}. \quad (1.39)$$

При условии, что требуется малая вероятность ошибки приема ($P_{ош} \ll 1$), выражение пропускной способности симметричного дискретного канала $C = \frac{1}{\tau_0} \left(\log_2 n + P_{ош} \log_2 \frac{P_{ош}}{n-1} + (1 - P_{ош}) \log_2 (1 - P_{ош}) \right)$ можно записать в виде

$$C \approx \log_2 \frac{n}{\tau_0} = \max R_T \log_2 n = \frac{1}{\tau_0}. \quad (1.40)$$

В реальных условиях обеспечить передачу со скоростью, определяемой выражением (1.40), не удастся, т. к. реальная техническая скорость передачи снижается из-за потерь времени на синхронизацию, а также на защитные интервалы между комбинациями. Поэтому можно записать следующее:

$$R_t = \gamma_R \max R_t = \gamma_R / \tau_0, \quad (1.41)$$

где γ_R – коэффициент, учитывающий уменьшение скорости передачи, который может принимать значение порядка 0,6–0,9.

С учетом изложенного реальная информационная скорость передачи в симметричном дискретном канале с $P_0 \ll 1$ определяется величиной

$$R_t = \gamma_R \max R_t \log_2 n = \gamma_R \log_2 n / \tau_0, \quad (1.42)$$

где n – основание первичного кода.

С учетом (1.42) выражение (1.39) принимает вид

$$\frac{P_{\text{изл}} G S_0}{4\pi r^2 N_{0\Sigma}} \exp(-0,23\alpha r) \geq \frac{\gamma_{\text{сист}} \cdot h_{\text{тр}}^2}{\gamma_R \log_2 n} R_t. \quad (1.43)$$

Это выражение является исходным и позволяет решать разнообразные задачи, связанные с расчетом параметров линии связи.

Применение изложенной методики расчета линий связи рассмотрим далее [61].

1.9.1 Энергетический расчет радиолинии «Космос – Земля»

Параметры этой радиолинии приведены в пункте 1.5.3. Допустим, что по такой радиолинии необходимо передать телеметрическую информацию с вероятностью ошибки, равной $P_{\text{ош}}$. Будем полагать, что передача осуществляется двоичными сигналами методом относительной фазовой манипуляции (ОФМП). При высоких требованиях к достоверности приема информации вероятность ошибки приема таких сигналов определяется выражением [7]

$$P_{\text{ош}} = 0,5 \exp(-h^2). \quad (1.44)$$

Отсюда следует

$$h_{\text{тр}}^2 \geq h^2 = \ln \frac{1}{2} P_{\text{ош}}. \quad (1.45)$$

Чтобы выполнить расчеты в соответствии с основным выражением (1.45), нужно найти эффективную площадь приемной антенны и коэффициент направленного действия передающей антенны. Из теории антенн известно, что коэффициент направленного действия антенны определяется выражением

$$G_A = \frac{4\pi \cdot S_A}{\lambda^2} \eta_A = \frac{4\pi \cdot S_3}{\lambda^2}, \quad (1.46)$$

где η_A – коэффициент, учитывающий эффективность использования общей площади раскрыва антенны S_A (апертуры антенны);

S_3 – эффективная площадь раскрыва антенны.

Величина коэффициента η_A зависит от типа и конструкции антенны. Для антенн параболического типа $\eta_A \approx 0,5 \dots 0,7$. При расчетах величину η_A обычно берут равной 0,55. Выразив площадь антенны S_A через диаметр D , нетрудно получить следующее выражение:

$$G = \eta_A \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2, \quad (1.47)$$

$$S_3 = \eta_A \pi D^2 / 4. \quad (1.48)$$

Ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности определяется приближенной формулой

$$\theta \approx 70 \cdot \lambda / D. \quad (1.49)$$

Принимая во внимание (1.45), (1.47) и (1.48) и учитывая, что поглощение энергии сигнала в атмосфере на рабочей частоте незначительно и им можно пренебречь, выражение (1.43) для двоичных сигналов можно представить в виде

$$\left(\frac{\pi \cdot D_6 \cdot D_3 \cdot \eta_A}{2\lambda \cdot r} \right)^2 \cdot \frac{P_{\text{изл}}}{N_{0\Sigma}} \geq \frac{\gamma_{\text{сист}}}{v_R} \ln \left(\frac{1}{2P_{\text{ош}}} \right) R_t, \quad (1.50)$$

где λ – длина волны ($\lambda = C/F_0$);

C – скорость распространения электромагнитных колебаний ($C = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Соотношение (1.50) позволяет определить любой из параметров линии связи при условии, что все остальные параметры известны.

Если учесть, что для рассматриваемой линии связи $\lambda = \frac{C}{F_0} = 3 \cdot \frac{10^8}{2,3} \cdot 10^9 \approx 0,13$ м и $N_{0\Sigma} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 50 \approx 0,7 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц, и принять $\gamma_{\text{сист}} = 4$, $v_R = 0,75$, $\eta_A = 0,55$, $D_6 = 5$ м, $D_3 = 60$ м, $P_{\text{изл}} = 30$ Вт, то для заданных конкретных условий из (1.50) следует соотношение

$$r^2 R_t \ln \left(\frac{1}{2} P_{\text{ош}} \right) \leq 0,8 \cdot 10^{22}. \quad (1.51)$$

Здесь расстояние r берется в километрах. При заданном значении ошибки $P_{\text{ош}}$ выражение (1.51) определяет связь между достижимой дальностью связи и возможной при этом скоростью передачи [61].

1.9.2 Энергетический расчет радиолинии «Земля – Космос»

Технические характеристики данной линии приведены в пункте 1.5.3.

Если принять $P_{\text{изл}} = 10^3$ Вт, $D_6 = 5$ м, $T_3 = 1000$ К, $D_3 = 25$ м, $\gamma_{\text{сист}} = 4$; $\gamma_R = 0,75$; $\eta_A = 0,55$, то в соответствии с выражением (1.51) получим

$$r^2 R_t \ln \left(\frac{1}{2} P_{\text{ош}} \right) \leq 0,2 \cdot 10^{22}. \quad (1.52)$$

Нетрудно убедиться в том, что радиолиния с указанными параметрами может обеспечить передачу команд на весьма значительные расстояния. Так, например, при допустимой вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = 10^{-6}$ и скорости передачи информации G_1 (бит/с) дальность действия радиолинии составит 4,5 млрд км [61].

1.9.3 Энергетический расчет цифровой гидроакустической линии связи

Распространение акустических сигналов в море сопровождается рядом сложных явлений, обусловленных отражениями от поверхности моря и дна, рассеянием на неоднородностях и поглощением энергии сигналов в морской среде.

На прием сигналов в гидроакустических каналах связи могут оказывать существенное влияние различные помехи: собственные шумы моря, шумы обитателей моря и судовых двигателей. Учесть перечисленные факторы не представляется возможным.

Дальнейшее рассмотрение проведем при следующих условиях и допущениях:

- для передачи цифровой информации по гидроканалу применяются простые двоичные сигналы, инвариантные к частотным свойствам морской среды;
- гидроакустический канал узкополосный, т. е. выполняется условие $F_x/F_0 \ll 1$, где F_0 – несущая частота посылки сигнала. Допущение об узкополосности канала позволяет считать, что среда не искажает форму огибающей посылки сигнала, а уменьшение энергии посылки из-за поглощения в морской среде определяется знанием коэффициента затухания на несущей частоте;
- влияние многолучевого эффекта в морской среде незначительно (при дальности связи 2–4 км) и его можно не учитывать;
- из различного вида возможных помех учитываются только принципиально неустраняемые собственные шумы моря.

Последних два допущения позволяют считать, что узкополосный гидроакустический канал связи является гауссовским.

Суть энергетического расчета цифровой гидроакустической линии связи состоит в том, чтобы найти отношение сигнал/помеха на входе приемника, при котором обеспечивается требуемое качество передачи информации.

В соответствии с уравнением дальности связи средняя мощность акустического сигнала на входе приемника, приходящаяся на единицу эффективной площади приемной антенны (средняя интенсивность сигнала), равна

$$J_{x_{\text{вх}}} = \frac{P_{x_{\text{вх}}}}{S_3} = P_{\text{изл}} \frac{G_1}{4\pi r^2} \exp(-0,23\alpha r) \text{ Вт/м}^2, \quad (1.53)$$

где G_1 – коэффициент концентрации излучателя передатчика;
 S_3 – эффективная площадь приемной антенны (гидрофона).

Коэффициент затухания акустических колебаний в морской среде α определяется выражением (1.54). При теоретических исследованиях и расчетах часто удобно аппроксимировать коэффициент затухания линейной или квадратичной функцией частоты. Запишем аппроксимацию коэффициента затухания в виде

$$\alpha = \beta(n)f^n \text{ дБ/км}, \quad (1.54)$$

где n – показатель, величина которого зависит от применяемой аппроксимации и выбирается в пределах $1 \leq n \leq 2$;

$\beta(n)$ – постоянный коэффициент, зависящий от величины выбранного показателя.

В частности, если исходить из аппроксимации вида (1.54), то для линейной и квадратичной аппроксимации имеем соответственно:

$$\beta(1) = \beta \left(\frac{3}{2}\right) \sqrt{f_2} \approx 0,036\sqrt{f_2}, \quad (1.55)$$

$$\beta(2) = \beta \left(\frac{3}{2}\right) \sqrt{f_2} \approx 0,036\sqrt{f_2}, \quad (1.56)$$

где f_2 – верхняя граничная частота используемого диапазона.

Спектральную плотность интенсивности шумов моря от частоты при различных значениях волнения моря (кривые Кнудсена) можно аппроксимировать выражением

$$P_0(f) = (A(b)/F_0^2 + BF_0^2), \quad (1.57)$$

где $A(b)$ – коэффициент, величина которого зависит от состояния поверхности моря b , определяемого в баллах;

B – коэффициент, величина которого зависит от температуры морской среды.

Расчеты показывают, что если частоту выражать в килогерцах, то эти коэффициенты имеют следующие значения:

$$A(b) \approx 2,5 \cdot 10^{-8} \exp(-5,3 \exp(-0,6 \cdot b)), \quad (1.58)$$

$$B \approx 2,2 \cdot 10^{-17} \text{ для } t = 15 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (1.59)$$

Спектральная плотность интенсивности шумов моря при этом имеет размерность Вт/м² · кГц.

Если приемный гидрофон имеет коэффициент направленности G , то шумы, приведенные к входу приемника, ослабляются в G_2 раз. Учитывая сказанное, среднюю интенсивность шумов моря на входе приемника в полосе частот $F_x = f_2 - f_1$, где f_1 – нижняя граничная частота используемого диапазона, можно определить выражением

$$J_{\text{швх}} \approx \frac{F_x}{GG_2} (A(b)/F_0^2 + BF_0^2), \quad (1.60)$$

где $F_0 = 0,5(f_1 + f_2)$.

Приняв во внимание соотношения (1.53), (1.54) и (1.60), можно записать выражение для фактического отношения мощности сигнала к мощности шума на входе приемника гидроакустической линии связи:

$$\left(\frac{P_x}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{вх}} = \left(\frac{J_x}{J_{\text{ш}}}\right)_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{изл}}G_1G_2 \exp(-0,23\beta(n)F_0^n r)}{4\pi r^2 F_x (A(b)/F_0^2 + BF_0^2)}. \quad (1.61)$$

Располагая выражением (1.61), можно записать условие

$$\frac{P_{\text{изл}}G_1G_2 \exp(-0,23\beta(n)F_0^n r)}{4\pi r^2 (A(b)/F_0^2 + BF_0^2)} \geq \gamma_{\text{сист}} \frac{h_{\text{тр}}^2}{\tau_0}. \quad (1.62)$$

При использовании выражения (1.62) необходимо иметь в виду, что длительность посылки τ_0 акустического сигнала не может выбираться произвольно и должна удовлетворять принятому допущению об узкополосности канала связи, т. е.

$$\tau_0 \geq \frac{K_{\Phi}}{F_x} \approx 0,46 \frac{K_{\Phi}\beta(2)F_0 r}{\ln(1/\eta_{F_x})}, \quad 0,5 \leq \eta_{F_x} \leq 1, \quad (1.63)$$

где $F_x \leq 2,2 \frac{\ln(1/\eta_{F_x})}{\beta(2)F_0 r}$ – полоса частот канала связи при квадратичной аппроксимации коэффициента затухания;

K_{Φ} – коэффициент, зависящий от вида следующих манипуляций:

$$K_{\Phi\text{АМП}} = K_{\Phi\text{ФМП}} = 1 \text{ и } K_{\Phi\text{ЧМП}} = 2.$$

Сигнал, длительность посылки которого выбрана в соответствии с условием (1.63), называют инвариантным частотным свойством среды. С учетом условия (1.63) для квадратичной аппроксимации выражение (1.62) принимает вид

$$\frac{P_{\text{изл}}G_1G_2 \exp(-0,23\beta(2)F_0^2 r) K_{\Phi}\beta(2)F_0 r}{8,7\pi r^2 (A(b)/F_0^2 + BF_0^2) \ln(1/\eta_{F_x})} \geq \gamma_{\text{сист}} h_{\text{тр}}^2. \quad (1.64)$$

Величина $h_{\text{тр}}^2$ определяет требуемое энергетическое отношение сигнал/шум с учетом заданного вида манипуляции сигнала и выбранного способа приема. Ее значение можно найти из выражения для вероятности ошибки, найденного с учетом применяемых способов передачи и приема и типа канала. В частности, для простых двоичных сигналов и некогерентного приема в гауссовом канале согласно (4.80) [7] это выражение имеет вид

$$P_{\text{ош}} = 0,5(-\gamma_x^2 h_{\text{тр}}^2/2).$$

Отсюда следует

$$h_{\text{тр}}^2 = (2/\gamma_x^2) \ln(\frac{1}{2} P_{\text{ош}}), \quad (1.65)$$

где γ_x – коэффициент, зависящий от вида манипуляции, в частности, для сигналов с пассивной паузой $\gamma_x = \frac{1}{\sqrt{2}}$, для ортогональных сигналов с активной паузой $\gamma_x = 1$, для противоположных $\gamma_x = \sqrt{2}$ [61].

1.10 Расчет волоконно-оптической линии связи

Качество связи в системе с кодоимпульсной модуляцией характеризуется вероятностью ошибки $P_{\text{ош}}$, которая в первом приближении определяется уровнем флуктуационных шумов на выходах фотоприемников и межсимвольной интерференцией. Для простоты расчета можно считать действие интерференции пренебрежимо малым, если удлинение импульса, прошедшего световод одного участка линии протяженностью $L_{\text{км}}$, не превышает половины длительности тактового интервала. Это условие определяет первое расчетное соотношение для определения допустимой длины участка:

$$LF_T \leq 1/2\delta\tau, \quad (1.66)$$

где F_T – тактовая частота линейного сигнала.

Из приведенного соотношения следует, что при заданном волокне достижимая скорость передачи обратно пропорциональна длине участка. Для типичного волокна со ступенчатым профилем $\delta\tau \approx 10$ нс/км, поэтому для километрового участка ($L = 1$ км) $V_{\text{тmax}}$ (Мбит/с); для волокна с плавным профилем $\delta\tau \approx 1$ нс/км и $V_{\text{тmax}}$ (Мбит/с). Полагая для одномодового волокна $\delta\tau \approx 0,2$ нс/км, имеем наибольшую скорость $V_{\text{тmax}}$ (Гбит/с).

Второе расчетное соотношение можно получить, потребовав, чтобы мощность полезного сигнала на входе фотодетектора P_x превышала заданную минимально допустимую мощность $P_{\text{прmin}}$, определяемую уровнем шума, видом линейного сигнала, числом промежуточных пунктов линии и вероятностью ошибки. Мощность сигнала на входе фотодетектора:

$$P_x = P_{\text{изл}} K_B K_{\text{р.с}}^2 K_{\text{н.с}}^n \cdot 10^{-\sigma_x L}, \quad (1.67)$$

где $P_{\text{изл}}$ – мощность, излучаемая генератором света, мВт;

K_B – коэффициент потерь на ввод и вывод излучения в волокно, зависящий от числовой апертуры волокна, угловой расходимости излучения, согласующего устройства и др.;

$K_{p.c}$ – коэффициент передачи одного разъемного соединения кабеля;

$K_{н.с}$ – коэффициент передачи одного неразъемного соединения кабеля;

n – число неразъемных соединений на длине участка L .

Вводя вместо коэффициентов K_B , $K_{p.c}$ и $K_{н.с}$ соответствующие коэффициенты ослабления, дБ,

$$\eta_B = 10 \cdot \lg \frac{1}{K_B}; \quad \eta_{p.c} = 10 \cdot \lg \frac{1}{K_{p.c}}; \quad \eta_{н.с} = 10 \cdot \lg \frac{1}{K_{н.с}} \quad (1.68)$$

и учитывая (1.67), получим второе расчетное соотношение:

$$P_{изл} - \eta_B - 2\eta_{p.c} - n\eta_{н.с} - \sigma_x L \geq P_{x_{min}}. \quad (1.69)$$

Здесь $P_{изл}$ и $P_{x_{min}}$ должны быть выражены в децибелах относительно одного милливатта. Соотношение (1.69) удобно представить в эквивалентной форме:

$$\sigma_x L + n\eta_{н.с} \leq \Pi - 2\eta_{p.c}, \quad (1.70)$$

где Π – энергетический потенциал аппаратуры ($\Pi = P_{изл} - \eta_B - P_{x_{min}}$).

При использовании (1.70) следует учитывать, что величина n зависит от длины участка L и строительных длин отрезков кабеля ($n = L/L_{стр}$).

Целью расчета является определение максимальной длины участка L_{max} при условии одновременного выполнения неравенств (1.66) и (1.70). Для определения L_{max} можно поступить следующим образом. L_{max} в первом приближении определяют исходя из неравенства (1.66), полагая в нем знак равенства $L_{max}^{(1)} = 0,5/F_T \delta \tau$. При этом полное число участков будет примерно равно $m^{(1)} = (L_L/L_{max}^{(1)})$, где L_L – полная длина участка. Определив при данном $m^{(1)} = P_{x_{min}} m^{(1)}$, следует проверить неравенство (1.70). Если оно выполняется, то найденное L_{max} является оптимальным, а если не выполняется, то следует уменьшать L_{max} до тех пор, пока неравенство (1.70) не будет выполнено. Таким образом, возможна ситуация, когда одно из неравенств (1.66) или (1.70) будет выполняться с запасом. Это означает, что при заданных требованиях к линии ($P_{ош}$, F_T и L_L) можно ослабить требования к аппаратуре или кабелю, удешевив тем самым систему связи [61].

2 ПОМЕХИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1 Общие сведения о помехах

На вход приемного устройства телеуправления, телеизмерения или теле-сигнализации одновременно с полезным сигналом поступают помехи, наводимые от источника помех в различных частях тракта «передатчик – приемник сообщений», и главным образом в канале связи.

Помехой называется стороннее возмущение, мешающее правильному приему. Помехи вызывают дополнительную погрешность телеизмерения или искажения при передаче сигналов телеуправления и телесигнализации.

По характеру взаимодействия с сигналом помехи подразделяются на аддитивные и мультипликативные. В общем виде влияние помехи ε на передаваемый сигнал x может быть выражено оператором

$$y = \hat{v}(x, \varepsilon). \quad (2.1)$$

В том случае, когда этот оператор вырождается в сумму

$$y = x + \varepsilon, \quad (2.2)$$

помеха называется аддитивной. Аддитивную помеху часто называют шумом. Если же оператор \hat{v} может быть представлен в виде

$$y = x\varepsilon, \quad (2.3)$$

где случайный процесс $v(t)$ неотрицателен, то помеху $v(t)$ называют мультипликативной. Если $v(t)$ – медленный (по сравнению с x) процесс, то явление, вызываемое мультипликативной помехой, носит название замирания.

Оператор \hat{v} не всегда может быть приведен к основным формулам (2.2) и (2.3). При одновременном наличии шума и мультипликативной помехи удобно ввести два случайных процесса, выражающих оба вида помехи, т. е. записать

$$y = vx + \varepsilon. \quad (2.4)$$

Природа мультипликативной помехи состоит в случайном изменении параметров канала передачи. Мультипликативную помеху всегда можно свести к эквивалентной аддитивной. Это обстоятельство во многом упрощает исследование действия мультипликативной помехи. Выражение (2.3) можно представить в виде

$$y = vx = v_0x + \varepsilon_3, \quad (2.5)$$

где v_0 – среднее значение стационарного случайного процесса v ;
 ε_3 – эквивалентная аддитивная помеха ($\varepsilon_3 = x(v - v_0)$).

Общая классификация помех и их источников приведена на рисунке 2.1.

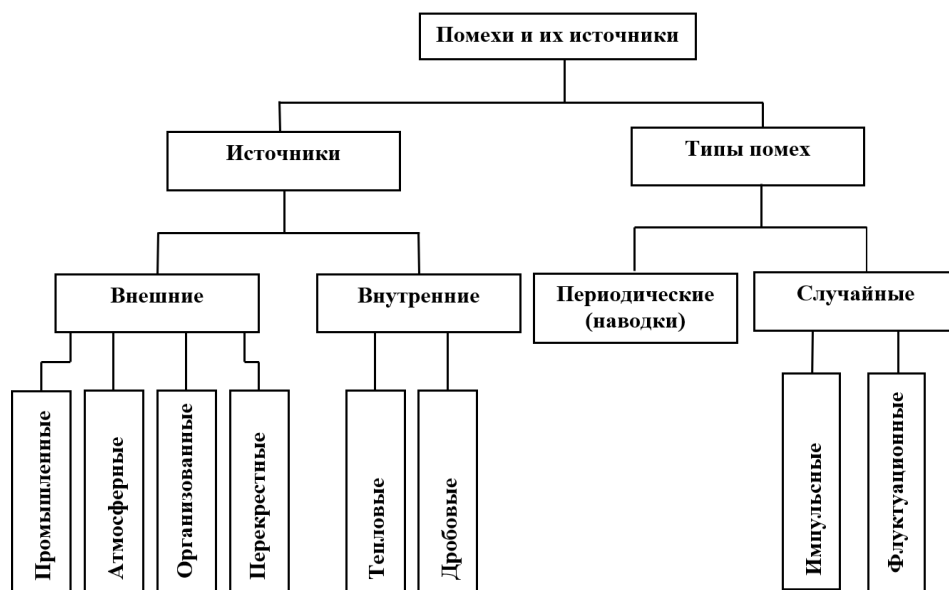


Рисунок 2.1 – Классификация помех и их источников

Источниками помех являются внешние воздействия и внутренние шумы, возникающие в цепях и аппаратуре.

К внутренним шумам относятся: тепловые шумы, возникающие из-за беспорядочного (случайного) движения свободных электронов в проводах и любых активных элементах; дробовые шумы в полупроводниковых приборах, возникающие благодаря случайной диффузии неосновных носителей и случайному возникновению и рекомбинации пар электрон – дырка.

В результате дробового шума ток, образованный эмиттируемыми электронами, не является постоянным и флуктуирует относительно среднего значения.

Внутренние шумы можно отнести к флуктуационным помехам с нормальным законом распределения амплитуд.

Наибольшее влияние на канал связи оказывают внешние помехи, основными из которых являются промышленные установки высокой частоты, медицинское электрооборудование.

Промышленные помехи создаются различными электронными устройствами (электрический транспорт, электрическая сварка, системы зажигания в автомобилях, промышленные установки высокой частоты, медицинское оборудование). Основной причиной этих помех является искрообразование.

К промышленным также относятся помехи, возникающие при коронном и других электрических разрядах на линиях электропередачи высокого напряжения. Эти помехи наиболее существенны для высокочастотных каналов по ЛЭП.

Атмосферные помехи обусловлены перемещением электрических зарядов в атмосфере. Кроме того, в метровом диапазоне радиоволн и на более высоких частотах существенное значение имеет космический шум, возникающий в ре-

зультате излучения электромагнитных волн солнцем, звездами и другими космическими объектами. На декаметровых, гектометровых и километровых волнах атмосферные помехи возникают главным образом из-за разрядов молний. К источникам атмосферных помех относятся также небольшие разряды, возникающие при трении наэлектризованных частиц в атмосфере (снег, пыль).

Подводя итоги вышесказанному, можно отметить, что источниками и причинами помех могут быть молния, статическое электричество, электромагнитное излучение, шумящее оборудование, сеть питания 220 В 50 Гц, переключаемые сетевые нагрузки, гальванические пары, термоэлектрический эффект, электролитические процессы, движение проводника в магнитном поле и др.

Все помехи воздействуют на кабели, датчики, исполнительные механизмы, контроллеры, шкафы телемеханики и в большинстве случаев протекают в виде тока по заземляющим проводникам, создавая вокруг них паразитное электромагнитное поле и вызывая падение напряжения помехи на проводниках.

Рассмотрим более подробно некоторые типы помех и меры по снижению уровня их влияния на достоверность устройств автоматики и телемеханики.

2.1.1 Сетевые помехи

Причинами и источниками сетевых помех могут быть разряды молнии при попадании в линию электропередачи, включение и выключение электроприборов, тиристорные регуляторы мощности, электромагнитные клапаны, электродвигатели, электросварочные работы и др.

Для уменьшения напряжения помехи применяют заземление корпусов приборов.

2.1.2 Молнии и атмосферное электричество

Молнии являются одной из причин перенапряжений, сбоев и отказов в системах телемеханики. Заряд, накопленный в облаках, имеет потенциал около нескольких миллионов вольт относительно поверхности земли, и в 90 % случаев бывает отрицательным. Длительность разряда в среднем составляет 0,2 с, редко 1–1,5 с, величина тока – до 100 кА, появляется мощное магнитное излучение и радиоволны [17]. Молнии могут образовываться также при пылевых бурях, метелях, извержениях вулканов.

Для защиты от прямого удара молнии используют молниеотводы. Для защиты линий электропередач используют экранирующий провод, который размещают над фазовыми проводами, однако на фазовых проводах возникает электродвижущая сила вследствие явления электромагнитной индукции.

Вторым природным явлением, связанным с грозой, является атмосферное электричество. Электрический потенциал грозового облака во время дождя может достигать 1 млрд вольт. Когда напряженность электрического поля между облаком и поверхностью земли достигает 500–1000 В/м начинается электрический разряд с высоких предметов (мачты, трубы, деревья и т. п.).

Для защиты от атмосферного электричества гальванически изолированные цепи, не имеющие низкоомного пути на землю, должны быть помещены в заземленный электрический экран или соединены через резистор 0,1–1 МОм с землей.

Для защиты промышленных сетей применяются экранированные кабели, экран которых необходимо заземлять только в одной точке.

2.1.3 Статическое электричество

Статическое электричество возникает на диэлектрических материалах. Величина заряда зависит от скорости трущихся тел, их материала, величины поверхности соприкосновения и влажности. Например, человек, идущий по синтетическому ковру, может приобрести на теле потенциал 15 кВ относительно земли и окружающих предметов.

Для защиты системы телемеханики от сбоев используют электростатические экраны, соединенные с экранным заземлением, преобразователи интерфейсов с защитой от статического электричества

2.1.4 Помехи через кондуктивные связи

Это связи через электропроводную среду, например, через общую шину заземления или по влажной поверхности диэлектрика, источниками которых являются соседние электрические цепи.

2.1.5 Электромагнитные помехи

Электромагнитные помехи создаются проводниками, по которым течет переменный электрический ток или между которыми имеется переменное напряжение.

Источником электромагнитной помехи может быть и сама система телемеханики, содержащая компьютер, реле, тиристор, мощные выходы дискретных модулей, радиомодели, а также сотовый телефон, радиоретранслятор, сотовый передатчик на крыше здания и др.

Основным методом борьбы с электромагнитными наводками является уменьшение площади контура, принимающего помеху, и применение дифференциального способа передачи сигнала в сочетании с витыми парами проводов.

2.1.6 Другие типы помех

В измерительных цепях, находящихся в состоянии движения (вибрации), источником помех может быть трибоэлектричество, возникающее при трении тел из различных материалов, а также пьезоэлектричество и эффект электростатического или электромагнитного микрофона.

Методы борьбы с помехами такого типа сводятся к закреплению и механическому демпфированию движущихся частей электрической схемы.

В системах с очень высокой чувствительностью могут наблюдаться паразитные напряжения, вызванные термоэлектрическим эффектом в контактах разнородных металлов (например, медь и оловянно-свинцовый припой). Эти источники помех опасны тем, что встречаются редко, поэтому о них часто забывают.

В многоканальных системах возникают специфические перекрестные помехи, обусловленные взаимными влияниями каналов из-за несовершенства аппаратуры.

Все помехи независимо от происхождения разделяются по форме на импульсные, флуктуационные и помехи в виде синусоидальных колебаний.

Помеха называется импульсной, если она состоит из коротких импульсов, следующих друг за другом через промежутки времени, при которых нестационарные процессы от одного импульса успевают заканчиваться до появления следующего импульса помехи.

Простейшей типичной формой элементарных импульсных помех является аperiodическая помеха (рисунок 2.2), описываемая выражением

$$\begin{cases} U(t) = 0 & \text{при } t < 0, \\ U(t) = U_0 e^{-\alpha t} & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (2.6)$$

и полупериодическая помеха (рисунок 2.3), для которой

$$\begin{cases} U(t) = 0 & \text{при } t < 0, \\ U(t) = U_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

Реальные импульсные помехи являются суммой многих различных простейших (периодических и аperiodических) помех и обычно имеют случайные амплитуду, длительность и моменты возникновения импульсов.

Флуктуационная помеха в отличие от импульсной имеет форму хаотически изменяющегося непрерывного колебания (рисунок 2.4).

$$\tau = 1/\Delta f.$$

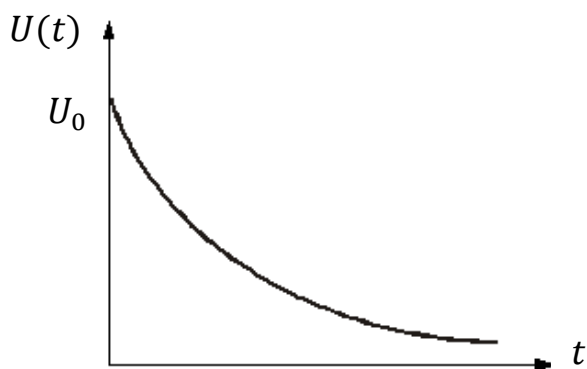


Рисунок 2.2 – Аperiodическая помеха

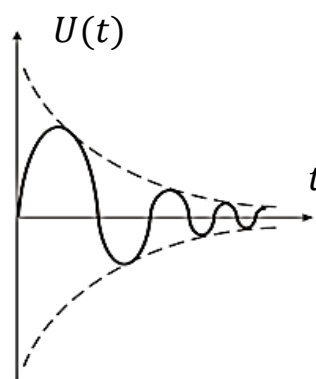


Рисунок 2.3 – Полупериодическая помеха

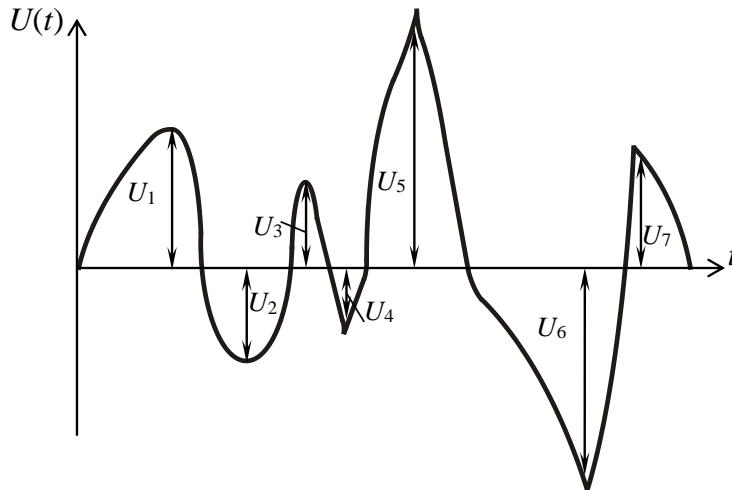


Рисунок 2.4 – Флуктуационная помеха

Для флуктуационных помех характерно отсутствие выбросов, отличающихся от среднего уровня в 3–4 и более раз. Характер помех зависит не только от источников помех, но и от длительности нестационарного процесса системы.

При одних и тех же импульсных источниках помехи на выходе устройства могут быть импульсными или флуктуационными в зависимости от длительности нестационарного процесса τ , которая обратно пропорциональна полосе пропускания Δf данного устройства.

Выходной уровень флуктуационных помех U_{Φ} пропорционален квадратному корню из полосы пропускания:

$$U_{\Phi} = \sigma_0 \sqrt{\Delta f}, \quad (2.8)$$

где σ_0 – удельное напряжение помехи в полосе $\Delta f = 1$ Гц.

Согласно выражению (14.7) из [59]

$$\sigma_0 = \frac{U_{\text{п.ск}}}{\Delta F},$$

где $U_{\text{п.ск}}$ – среднеквадратичное напряжение помехи;

ΔF – полоса пропускания приемника.

Выходная мощность помехи пропорциональна Δf , т. е. $P_{\text{ш}} = \sigma_0^2 \Delta f$.

Помехи, воздействующие на системы автоматизации, имеют спектр от постоянного тока до единиц гигагерцев. Помехи, лежащие в полосе пропускания аналоговых систем телемеханики, имеют частоты до десятков килогерцев. На цифровые цепи воздействуют помехи в полосе до сотен мегагерцев. Помехи гигагерцевого диапазона непосредственного влияния на системы автоматизации не оказывают, однако

после преобразования в нелинейных элементах они могут порождать низкочастотные помехи, лежащие в границах воспринимаемого спектра.

Интенсивность и характер помех зависит от типа линии связи, диапазона частот и условий передачи. Сильные помехи наводятся в воздушной линии связи, которая как антенна улавливает помехи, создаваемые грозowymi разрядами, промышленными установками, радиостанциями, высоковольтными линиями передач и т. п.

Такого же рода помехи и от тех же источников имеют место при передаче по радиотракту. Кроме того, здесь возникают искажения сигнала от затухания радиоволн и многократных отражений сигналов.

Кабельные линии связи хорошо экранированы, и на них наводки практически не возникают.

В реальных каналах на передаваемый сигнал действует сложная помеха, а поэтому математическое описание принимаемого сигнала имеет большое практическое значение.

2.2 Математическое описание помехи

Помеха представляется случайной функцией времени. Случайную функцию дискретного времени называют обычно случайной последовательностью, случайную функцию непрерывного времени – случайным процессом. Обычно рассматривают стационарные случайные процессы.

Случайный процесс считается стационарным, если его статические свойства не зависят от времени, т. е. не зависят от положения начала отсчета времени. Для стационарности в широком смысле достаточно независимости от времени среднего значения и дисперсии и зависимости функции корреляции между процессами $E(t)$ и $E(t + \tau)$ только от величины τ .

Многие случайные процессы, встречающиеся в практике, обладают свойством эргодичности. Свойство это состоит в том, что среднее по множеству (математические ожидания, вычисленные по распределениям) с вероятностью единицы совпадает со средним по времени, найденным по одной реализации процесса. Случайные функции характеризуются своими распределениями. Применяются также числовые характеристики в виде моментов распределения. Момент первого порядка (подсчитывается относительно начала координат) выражает среднее значение случайной величины:

$$M(E) = \int_{-\infty}^{+\infty} xw(x)dx = a. \quad (2.9)$$

Центральный момент второго порядка (подсчитывается относительно среднего значения), или второй момент, называется дисперсией:

$$D(E) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - a)^2 w(x)dx = \sigma^2. \quad (2.10)$$

В большинстве случаев $M(E) = 0$, так что дисперсия совпадает со средним квадратом.

Смешанный второй момент называется функцией автокорреляции процесса $E(t)$:

$$M(E(t)E(t + \tau)) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 w(x_1, x_2) dx_1, dx_2 = B(\tau).$$

Величина $B(0)$ есть мощность процесса:

$$B(0) = M[E^2] = P. \quad (2.11)$$

Для эргодических процессов:

$$\begin{aligned} a &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \cdot \int_{-T}^T E(t) dt, & P &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \cdot \int_{-T}^T E^2(t) dt, \\ D(E) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \cdot \int_{-T}^T (E(t) - a)^2 dt, & B(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \cdot \int_{-T}^T E(t)E(t + \tau) dt. \end{aligned}$$

Коэффициент корреляции $R(\tau) = B(\tau)/B(0)$.

При исследовании помех и их взаимодействия с сигналами часто используют спектральные характеристики. В этих условиях можно записать следующее. Спектральная плотность мощности $S(\omega)$ связана с функцией автокорреляции парой преобразований Фурье:

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\tau) \cos \omega \tau \cdot d\tau, \\ B(\tau) &= \int_0^{\infty} S(\omega) \cos \omega \tau \cdot d\omega. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Помеху, представляющую собой случайный процесс с равномерным спектром, называют белым шумом.

Среди всех случайных процессов особое место занимает процесс с нормальным распределением (гауссов процесс), плотность вероятности которого

$$w(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.13)$$

Всякое нелинейное преобразование изменяет распределение. Таким образом, гауссов процесс на входе нелинейного устройства дает негауссов процесс на выходе. Из числа часто встречающихся распределений упомянем о рэлеевом распределении:

$$w(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0. \quad (2.14)$$

Такому процессу подчинен процесс на выходе линейного детектора, на вход которого подан гауссов процесс.

При помехах в виде случайной последовательности (импульсные помехи) их распределение чаще всего подчинено таким законам, как биномиальный и закон Пуассона. По закону Пуассона вероятность появления k импульсов помехи на интервале времени τ определяется формулой

$$P(k) = \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} e^{-\lambda\tau}, \quad (2.15)$$

где λ – среднее число импульсов помехи в единицу времени.

Если импульс помехи появляется с вероятностью P на каждом временном интервале, то в соответствии с биномиальным законом вероятность того, что импульс помехи появится ровно k раз, выражается формулой

$$P_{k,l} = C_l^k P^k (1 - P)^{l-k}, \quad (2.16)$$

где C_l^k – биномиальный коэффициент, определяющий число рассматриваемых вариантов;

l – число временных (тактовых) интервалов.

Результат взаимодействия помехи с сигналом (элементами сигнала) в основном определяется такими характеристиками, как амплитудное распределение выбросов помехи, превышающих некоторую величину $U_{\text{пор}}$, называемую пороговым уровнем, распределение длительностей выбросов и интервалов между ними на уровне $U_{\text{пор}}$. На рисунке 2.5 представлены диаграммы взаимодействия помехи и сигнала.

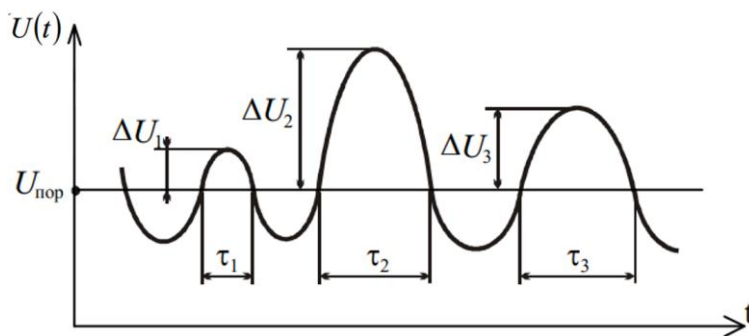


Рисунок 2.5 – Взаимодействие помехи и сигнала

Плотность амплитудного распределения вероятностей напряжения нормальной флуктуационной помехи в произвольный момент времени подчинена закону Гаусса:

$$w(U_{\text{ш}}) = \frac{1}{U_{\text{ш.э}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(U_{\text{ш}}-a)^2}{(U_{\text{ш}})^2}}, \quad (2.17)$$

где $U_{\text{ш.э}}$ – эффективное значение величины напряжения шума;

a – среднее значение напряжения шума.

Как правило, $a = 0$. Вероятность, что в произвольный момент времени напряжение помехи превысит пороговый уровень, равна

$$P(U_{ш} > U_{пор}) = \int_{U_{пор}}^{\infty} \omega(U_{ш}) dU_{ш} = \frac{1}{U_{ш.э} \sqrt{2\pi}} \int_{U_{пор}}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{U_{ш}}{U_{ш.э}}\right)^2\right) dU_{ш} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{U_{пор}/U_{ш.э}}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = V\left(\frac{U_{пор}}{U_{ш.э}}\right) = V(\beta), \quad (2.18)$$

где $V(\beta)$ – вероятностный интеграл.

Для исследования помехоустойчивости телемеханических систем наряду с распределением амплитуд необходимо также использовать плотность распределения длительностей выбросов после входного фильтра. Для любого фильтра справедливо соотношение

$$\tau_{в.ср} = \frac{P(U_{ш} > U_{пор})}{\lambda}, \quad (2.19)$$

где λ – среднее число выбросов помехи, превышающих в единицу времени $U_{пор}$ при $\beta = \frac{U_{пор}}{U_{ш.э}}$.

Распределение длительностей выбросов в общем случае имеет достаточно сложное математическое описание. Для приближенных расчетов можно при $\beta \gg 1$ воспользоваться рэлеевой аппроксимацией, т. е. считать, что плотность распределения

$$w_{\beta}(\tau_{в}) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\tau_{в}}{(\tau_{в.ср})^2} e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{\tau_{в}}{\tau_{в.ср}}\right)^2}, \quad (2.20)$$

где $\tau_{в.ср}$ – средняя длительность выброса на уровне β .

Вероятность появления выбросов импульсных помех, а также выбросов флуктуационного шума (при $\beta \gg 1$) чаще все определяется законом Пуассона (2.15). Для некоторых типов фильтров среднее число выбросов λ помехи в 1 с и средняя длительность выбросов могут быть найдены по следующим формулам [1]:

- идеальный фильтр нижних частот ($0 - \Delta F$):

$$\lambda = \frac{\Delta F}{\sqrt{3}} e^{-\frac{\beta^2}{2}}, \quad \tau_{в.ср} = \frac{\sqrt{3} \cdot U(\beta)}{\Delta F e^{-\frac{\beta^2}{2}}}$$

- идеальный полосовой фильтр $\left(-\frac{\Delta F}{2} \dots + \frac{\Delta F}{2}\right)$:

$$\lambda = 0,7 \Delta F \beta e^{-\frac{\beta^2}{2}}, \quad \tau_{в.ср} = \frac{1,4}{\Delta F \beta}$$

- гауссов фильтр нижних частот (ΔF_3 – эффективная полоса, равная примерно полосе на уровне 0,7):

$$\lambda = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \Delta F_3 \beta e^{-\frac{\beta^2}{2}}, \quad \tau_{в.ср} = \frac{1}{2} \sqrt{2\pi} \frac{U(\beta)}{\Delta F_3} e^{-\frac{\beta^2}{2}};$$

- гауссов полосовой фильтр (ΔF_3 – общая эффективная полоса):

$$\lambda = \Delta F_3 \beta e^{-\frac{\beta^2}{2}}, \quad \tau_{в.ср} = \frac{1}{\Delta F_3 \beta};$$

- RC-фильтр нижних частот:

$$\lambda = \frac{1}{RC\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\beta^2}{2}}, \quad \tau_{в.ср} = \frac{\sqrt{2} \cdot U(\beta)}{e^{-\frac{\beta^2}{2}}} RC.$$

2.3 Виды искажений

Потеря информации может происходить по следующим причинам:

- несовершенство методов преобразования сообщения в сигнал и технического их осуществления;
- несовершенство методов преобразования принимаемого сигнала в сообщение и технической реализации этих методов;
- несовершенство методов передачи и приема сигналов и технической реализации этих методов;
- особенности распространения сигнала по линии связи;
- недостаточная помехозащищенность сигнала.

Все эти причины приводят к трем видам искажений: линейным, нелинейным и случайным.

Линейные искажения – это искажения сигнала, не сопровождающиеся появлением новых частотных составляющих в его спектре. Линейные искажения разделяются на частотные (амплитудно-частотные) и фазовые.

Частотные искажения возникают из-за наличия в цепях сосредоточенных и распределенных реактивностей, общее сопротивление которых зависит от частоты, что приводит к неравномерным воспроизведениям амплитуд отдельных гармонических составляющих сигнала.

Фазовые искажения вызываются неодинаковым сдвигом во времени отдельных гармонических составляющих, что приводит к сдвигу начала импульса и искажению его формы.

К нелинейным искажениям следует отнести искажения из-за ограничения полосы пропускания.

Нелинейные искажения – искажения сигнала, сопровождающиеся появлением в его спектре новых гармонических составляющих. Они возникают из-за наличия нелинейных сопротивлений в аппаратуре телемеханики и связи. Эти искажения также изменяют форму сигнала.

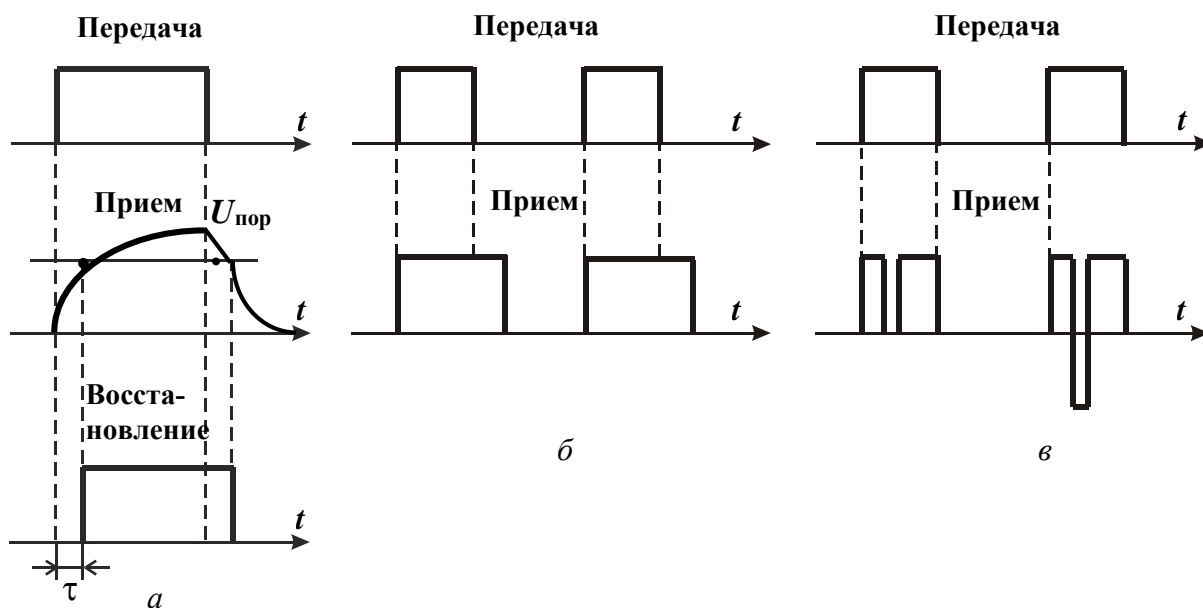
Случайные искажения вызываются помехами в канале и аппаратуре связи. Помехи могут вызвать подавление сигнала или создать ложный сигнал.

В результате искажений, если сигнал окажется неполностью подавленным, может возникнуть изменение его длительности, формы либо амплитуды или фазы (месторасположения). В видеоимпульсах изменения приводят к так называемым краевым искажениям и искажениям дроблениям.

Краевые искажения выражаются в искажении формы импульса, что приводит к изменению его месторасположения. Переданный импульс, будучи искаженным при передаче, восстанавливается по форме на приеме, например, путем подачи его на триггер. Однако после восстановления остается сдвиг переднего фронта импульса (края, отсюда название «краевые искажения») на t_1 (см. рисунок 2.6, а).

Краевые искажения подразделяются на искажения *преобладания*, *характеристические* искажения и *смещения фронтов импульсов*.

Искажения преобладания – вид искажений, при которых импульсы одной полярности удлиняются за счет укорочения импульсов другой полярности. Если передаются импульсы и паузы, то преобладания выражаются в том, что импульсы имеют большую (или меньшую) длительность по сравнению с паузой (рисунок 2.6, б).



а – краевые; б – преобладания; в – дробления

Рисунок 2.6 – Виды искажения импульсов

Характеристические искажения проявляются в виде выбросов, обусловленных характером переходного процесса, искажений формы импульсов и смещений их фронтов под воздействием переходного процесса от предыдущей посылки, который не успевает закончиться. Характеристические искажения зависят от длительности импульсов, характера их последовательности (отсюда название «характеристические»), а также формы амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ) канала связи.

Дробление. Эти искажения выражаются в дроблении импульса и изменении его полярности как на части импульса, так и на всей его длительности (рисунок 2.6, в).

Искажения по соседнему каналу (переходные искажения) вызываются влиянием смежного канала. Они обуславливаются неидеальностью АЧХ фильтров.

Перекрестные искажения. Этот вид искажений вызывается нелинейностью характеристик элементов и узлов общих для всех каналов (усилители, модуляторы и т. д.).

В [59] приведена методика расчета помехоустойчивости дискретных сигналов, кодовых сообщений, непрерывных и импульсных видов модуляции при воздействии флуктуационных помех, функцией распределения для которых является нормальный закон.

2.4 Методы повышения помехоустойчивости

2.4.1 Методы повышения помехоустойчивости передачи дискретных сообщений

Все методы удобно разделить на три большие группы (рисунок 2.7). Первая группа методов основана на выборе способа передачи, т. е. способа кодирования и модуляции. Высокая помехоустойчивость ортогональных сигналов была показана В. А. Котельниковым. Систему ортогональных сигналов можно рассматривать как код, в котором буквы передаются ортогональными сигналами. Два сигнала $A_1(t)$ и $A_2(t)$ считаются ортогональными, если интеграл от их произведения равен нулю, т. е.

$$\int_{-\infty}^{\infty} A_1(t)A_2(t)dt = 0.$$

Переходя к многобуквенным словам, получим коды с ортогональными признаками. Такие коды также обладают высокой помехоустойчивостью при большом числе букв. Среди этого класса кодов на практике широкое применение находят коды с большим числом частотных признаков.

Идея построения кодов с повышенной энергией элемента сигнала в классе двоичных кодов состоит в пассивной передаче нулей и использовании для передачи комбинации с малым числом единиц. В этих условиях заданная энергия кодовой комбинации распределяется между малым числом элементарных сигналов, соответствующих единицам, и энергия одного такого элементарного сигнала получается большей, а вероятность ошибки меньше. Примером такого кода может служить код C_n^m при $m < n/2$.

Общим для корректирующих кодов, кодов с ортогональными признаками и кодов с повышенной энергией элемента является то, что все они обеспечивают повышение помехоустойчивости за счет увеличения широкополосности сигнала.

Методы обратного канала и их помехоустойчивость рассмотрены в [59].

Особое место занимают адаптивные методы приема и передачи, идея которых состоит в автоматическом изменении параметров или способов передачи и приема при изменении условий передачи. К этим методам относится метод автоматического изменения скорости передачи путем увеличения длительности посылок в зависимо-

сти от уровня помех и изменения параметров самого канала связи, метод автоматического изменения корректирующих свойств кода. В условиях нестационарных помех метод обратного канала можно также рассматривать как адаптивный метод, т. к. в системах с обратным каналом при возникновении обнаруженных ошибок автоматически замедляется скорость передачи сообщений. К адаптивным методам относятся также методы автоматического изменения параметров или схем приемника, например, изменение порога приемника, полосы пропускания и т. п.

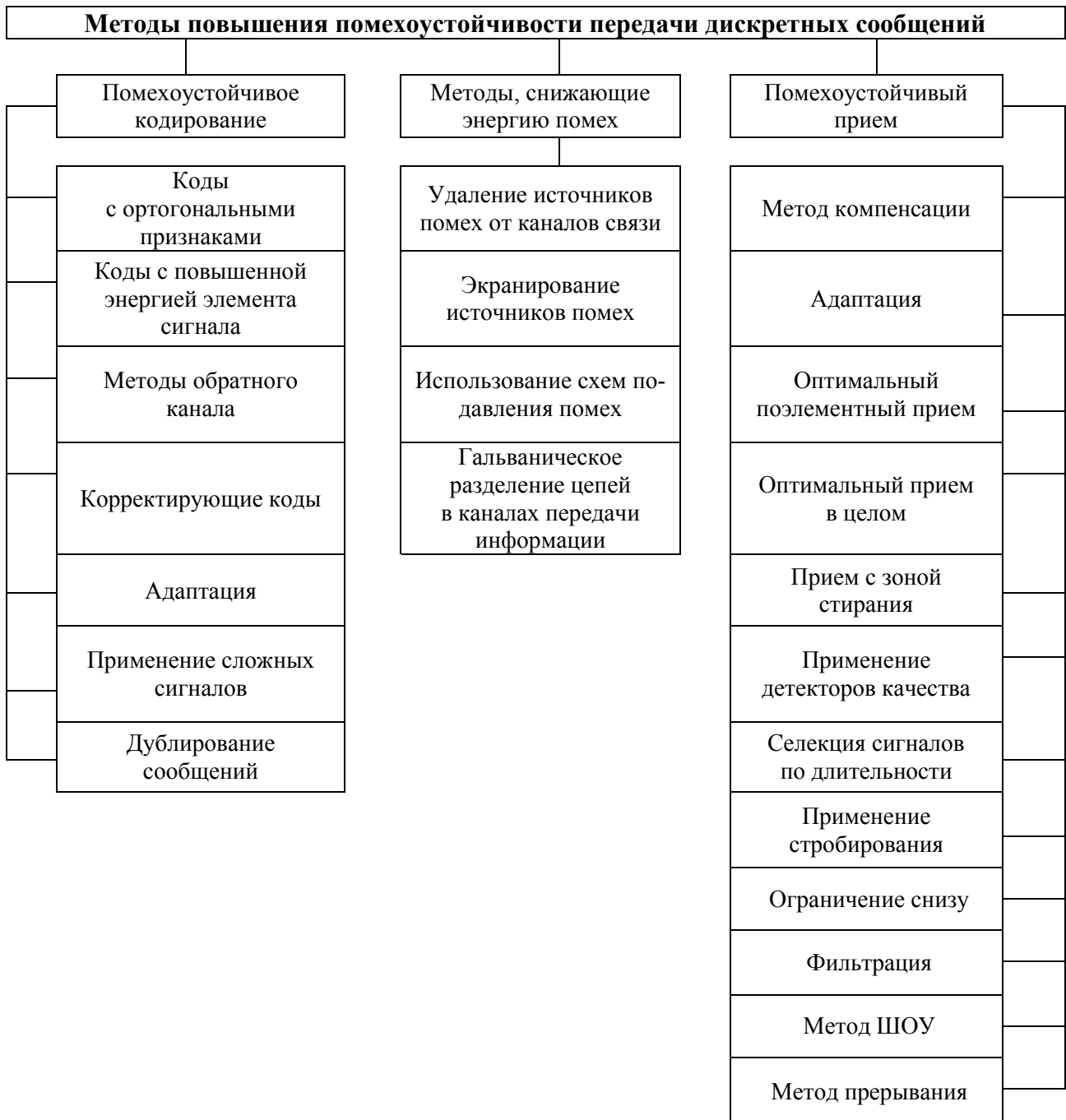


Рисунок 2.7 – Методы повышения помехоустойчивости передачи дискретных сообщений

Дублирование сообщений основано на многократном повторении кодовых неизбыточных сообщений. Помехоустойчивость систем с дублированием сообщений рассмотрена в [59].

Применение сложных сигналов позволяет реализовывать информационные системы, с помощью которых успешно решают следующие задачи:

- получение высокой достоверности передачи информации в условиях многолучевого распространения сигналов;
- обеспечение высокой помехоустойчивости к организованным помехам и возможность криптостойкой (от англ. *kryptos* – тайный, скрытый) и имитостойкой (от англ. *imitatio* – повторение, подделка) передачи особо важной информации;
- эффективное использование выделенного диапазона частот при одновременной работе в этом диапазоне многих систем, т. е. обеспечение электромагнитной совместимости различных систем, использующих один и тот же диапазон частот.

В настоящее время в цифровых системах передачи информации нашли применение сложные сигналы, полученные с помощью псевдослучайных бинарных последовательностей (*M*-последовательностей) и с помощью частотно-временного кодирования.

Вторая группа методов повышения помехоустойчивости включает методы, которые заключаются в определении источников помех, их месторасположения и в уменьшении мощности излучения. Для уменьшения влияния источников помех не следует прокладывать рядом силовые и информационные кабели. Если этого полностью избежать не удастся, то прокладку необходимо производить не параллельно, а под углом, близким к 90°, экранирование ослабляет электростатические и электромагнитные поля источников помех. Для подавления помех необходимо применять фильтры, искрогасящие цепочки и резистивные шунты. Гальваническое разделение цепей в каналах передачи информации исключает проникновение помех в цепь. Для гальванической развязки применяют оптроны.

Третья группа методов основана на приеме дискретных сигналов с избыточностью. В процессе декодирования производится преобразование принятых сигналов в комбинации кодовых символов. Это преобразование может осуществляться двумя методами.

При первом методе анализируется целиком весь принятый сигнал и на основании используемых оценок принимается решение о соответствующей ему кодовой комбинации. Такой подход характерен для метода приема дискретных сигналов, называемым **приемом в целом**.

При **поэлементном** методе приема декодирование производится в два этапа. Вначале принятый сигнал анализируется по элементам, соответствующим кодовым символам, затем устанавливаются принятые кодовые символы (единицы и нули), а следовательно, и состоящая из них кодовая комбинация.

В симметричных каналах прием с зоной стирания осуществляется с помощью двухпорогового детектора. Сигнал $X(t)$ отождествляется с «1», если превосходит некоторый установленный порог β_1 , если же он окажется меньше порога $-\beta_2$, то вырабатывается сигнал «0». Если $\beta_1 \geq X(t) \geq -\beta_2$, то возникает сложность с определением символа и вырабатывается специальный сигнал стирания, а это означает, что в случае необходимости восстановление информации должно производиться по специальным правилам.

Принцип работы детекторов качества основан на анализе амплитуды, фазы и других параметров принимаемого сигнала. Если эти параметры сильно отклоняются от своих номинальных значений, то это говорит о наличии помехи, которая может вызвать появление ошибки. Этот метод не требует внесения избыточности в передаваемый сигнал и, следовательно, не снижает скорости передачи.

При селекции сигналов по длительности бракуются все сигналы, длительность которых меньше некоторого значения τ_{\min} . Но имеются и такие селекторы, которые бракуют все сигналы, длительность которых меньше τ_{\min} и больше τ_{\max} , т. е. на выход пропускают сигналы с длительностью $\tau_{\min} \leq [\tau] \leq \tau_{\max}$.

При стробировании подаются стробирующие импульсы на схему восстановления сигнала, пришедшего из линии связи, как правило, в середине наиболее вероятного интервала появления полезного сигнала.

Методы ограничения снизу, фильтрации и ШОУ (широкая – ограничение – узкая) применяются для борьбы с импульсными помехами, соответственно, если амплитуда помехи меньше, соизмерима и превышает амплитуду сигнала.

При методе прерывания входной сигнал анализируется схемой быстродействующей автоматической регулировки усиления (БАРУ), которая закрывает приемник на время воздействия импульсов помех.

При компенсационном методе каким-либо способом создаются синхронные реализации импульсных помех, которые затем вычитаются из суммы полезных сигналов и помехи.

2.4.2 Методы повышения помехоустойчивости передачи непрерывных сообщений

Классификация методов повышения помехоустойчивости представлена на рисунке 2.8.

При выборе вида модуляции и ее параметров необходимо учитывать требования по помехоустойчивости и точности, предъявляемые к аналоговым системам.

Анализ выражений для помехоустойчивости известных методов модуляции, кроме амплитудной, показывает, что помехоустойчивость повышается при увеличении широкополосности этих методов.

Однако с расширением полосы растет уровень помех, и, начиная с некоторого значения полосы, их уже нельзя считать слабыми. При сильных же флукту-

ационных помехах расширение полосы влечет за собой ухудшение помехоустойчивости. Данные свойства приводят к широкополосности, причем эта широкополосность оказывается зависящей от требуемой точности передачи.

Методы повышения помехоустойчивости, основанные на использовании избыточности непрерывных сообщений, весьма разнообразны. Избыточность может выражаться в неравномерности передачи отдельных значений телеизмеряемого параметра. Эта избыточность используется при выборе способа передачи. Так, в системах с адаптивной дискретизацией передача отсчетов производится в моменты времени, когда погрешность по данному каналу достигает максимально допустимого значения.



Рисунок 2.8 – Методы повышения помехоустойчивости передачи непрерывных сообщений

Принцип действия систем с адаптивной коммутацией заключается в определении канала с наибольшей погрешностью, значения измеряемой величины которого и передаются на пункт управления.

В системах с автоматически регулируемой частотой опроса датчиков частота устанавливается по наиболее активному каналу или по суммарной погрешности всех каналов.

Важной характеристикой указанных выше систем является уменьшение информационной избыточности. Но уменьшение избыточной измерительной информации приводит к уменьшению помехоустойчивости этих систем, т. к. при искажении или пропаже из-за помехи одной или нескольких координат сообщений могут возникнуть большие погрешности при восстановлении непрерывной функции по отдельным дискретным значениям. Однако эффекты, достигаемые вследствие сжатия данных, – сжатие по полосе частот в канале связи и уменьшение мощности источника питания на передающей стороне – позволяют использовать их для повышения помехоустойчивости адаптивных систем и получить более высокую помехоустойчивость в системах этого класса, чем в системах с равномерной временной дискретизацией. Выигрыш объясняется тем, что может быть повышено отношение сигнал/шум в канале связи и частично расширена полоса частот за счет применения помехоустойчивого кодирования.

Идея повышения помехоустойчивости путем нелинейного преобразования состоит в передаче с большей точностью более важных или более вероятных значений измеряемого параметра.

Другой тип избыточности связан со сравнительно медленными изменениями параметра. Это свойство используется для повышения помехоустойчивости систем с ЧМ путем слежения за частотой сигнала и в системах с фазово-импульсной модуляцией (ФИМ) путем слежения за положением импульса во времени с помощью строба. В системах с разностно-дискретной модуляцией избыточность этого типа позволяет существенно уменьшить среднюю мощность сигнала, что эквивалентно повышению помехоустойчивости при той же средней мощности сигнала.

Методы адаптации для непрерывных сообщений во многом совпадают с аналогичными методами для дискретных сообщений.

Идея метода обмена точности на быстродействие состоит в том, что в момент быстрых изменений информативного параметра его можно передавать менее точно, чем в периоды медленных изменений. Данный метод является частным случаем системы с адаптивной дискретизацией, работающей в режиме циклической передачи.

Вычитание помехи из входящего сигнала может быть произведено, если известна частота помехи. Она выделяется резонансным усилителем, а затем вычитается из полезного сигнала и помехи. Очевидно, этот метод неприменим, если частота помехи изменяется во времени.

При медленно изменяющемся передаваемом сигнале можно заранее предсказать, каким должно быть его значение в пределах ближайшего интервала времени. Если принятый сигнал значительно отличается от предсказуемого, то он бракуется, т. к. считается помехой.

Метод интегрирования применим в случае, когда на медленно изменяющийся полезный сигнал наложена гармоническая помеха, но при интегрировании в течение промежутка времени, равного или кратного периоду помехи, влияние последней полностью исключается, т. к. среднее значение синусоидального напряжения за один или несколько полных периодов равно нулю.

В заключение этого подраздела следует сказать, что методы, направленные на уменьшение энергии помех и рассмотренные для дискретных сообщений, остаются справедливыми и для непрерывных сообщений.

2.5 Некоторые практические советы по обеспечению помехоустойчивости систем телемеханики

К проблеме помехозащищенности систем промышленной телемеханики следует относиться с особым вниманием, поскольку неправильный выбор схемы подключения или разводки кабелей, системы заземления и экранирования могут обесценить оплаченные достоинства интеллектуальной части системы. В то же время правильное понимание описанных проблем позволит в ряде случаев достичь хороших результатов с применением недорогого оборудования.

На практике решение проблемы помех следует начинать с поиска их источника. Для этого в первую очередь следует измерять уровень помех в приемнике сигнала, источнике и соединительном кабеле.

Нельзя оставлять часть входов многоканальной системы незаземленными. На выходе при этом будут видны собственные шумы приемника сигнала. Нужно убедиться, что уровень шумов соответствует спецификации на изделие. Если имеются расхождения, то вероятной причиной могут быть источники помех, воздействующие непосредственно на плату системы или неправильное подключение цепей питания и заземления. Для их обнаружения можно попробовать изменить местоположение измерительной части системы.

Для измерения уровня помех, наведенных в кабеле, нужно подключить его к системе сбора данных и закоротить кабель со стороны источника сигнала, т. е. имитировать нулевое внутреннее сопротивление источника. Если уровень помехи будет сильно отличаться от случая, когда источник сигнала подключен, то причина может быть в недостаточно низком сопротивлении источника. Для его уменьшения следует использовать подходящий согласующий усилитель или выбрать более помехоустойчивый способ передачи сигнала.

Для оценки уровня собственных помех источника сигнала его нужно соединить максимально коротким проводом со входом приемника.

Если источник помех заранее неизвестен, его поиску может помочь спектральный анализ помехи.

Для увеличения точности передачи каждый сигнал должен передаваться витой парой в индивидуальном экране. При изготовлении витых пар для промышленных применений особое значение уделяется симметрии импедансов проводов в паре и равномерности их частотных характеристик в полосе рабочих частот. Равномерность характеристики позволяет выполнять компенсацию асимметрии линий и тем самым уменьшать влияние паразитных наводок. Для уменьшения паразитных наводок, создаваемых на кабеле магнитной составляющей электромагнитного излучения, необходимо обеспечить минимально возможный шаг скрутки проводников в витой паре и минимальную площадь петель, образующихся при подключении витой пары к источнику и приемнику сигнала.

При невысоких требованиях к точности могут быть использованы витые или невитые сигнальные провода в общем экране. Однако в этом случае появляются индуктивные и емкостные взаимовлияния проводников в кабеле, а также кондуктивные связи через общий провод заземления экрана.

Если полоса частот сигнала меньше, чем полоса приемника, или если некоторые параметры сигнала известны заранее, для уменьшения помех можно использовать аналоговые фильтры на входе системы. Для ослабления помех с частотой 50 или 60 Гц обычно используют фильтры третьего порядка, имеющие наклон АЧХ в полосе заграждения 60 дБ на декаду или режекторные *sinc*-фильтры. Если измерения проводятся на частотах, близких к граничной частоте фильтра, следует учитывать динамическую погрешность коэффициента передачи фильтра.

При разработке и эксплуатации систем телемеханики полезными будут следующие советы:

- 1 Используйте модули ввода-вывода только с гальванической развязкой.
- 2 Не применяйте длинных проводов от аналоговых датчиков. Располагайте модули ввода в непосредственной близости к датчику, а сигнал передавайте в цифровой форме. Используйте датчики с цифровым интерфейсом.
- 3 На открытой местности и при больших дистанциях используйте оптический кабель вместо медного.
- 4 Используйте только дифференциальные (не одиночные) входы модулей аналогового ввода.
- 5 Используйте в пределах вашей системы отдельную землю из медной шины, соединив ее с шиной защитного заземления здания только в одной точке.
- 6 Аналоговую, цифровую и силовую землю системы соединяйте только в одной точке. Если этого сделать невозможно, используйте медную шину с большой площадью поперечного сечения для уменьшения сопротивления между разными точками подключения земель.
- 7 Следите, чтобы при монтаже системы заземления случайно не образовался замкнутый контур.
- 8 Не используйте по возможности землю как уровень отсчета напряжения при передаче сигнала.

9 Если провод заземления не может быть коротким или если по конструктивным соображениям необходимо заземлить две части гальванически связанной системы в разных точках, то эти системы нужно разделить с помощью гальванической развязки.

10 Цепи, изолированные гальванически, нужно заземлять через большое сопротивление, чтобы избежать накопления статических зарядов.

11 Заземляющие проводники с большим током должны проходить отдельно от чувствительных проводников с малым измерительным сигналом.

12 Не делайте полосу пропускания приемника сигнала шире, чем это надо из соображений точности измерений.

13 Используйте экранированные кабели, экран заземляйте в одной точке со стороны источника сигнала на частотах ниже 1 МГц и в нескольких точках на более высоких частотах.

3 ПРОМЫШЛЕННЫЕ СЕТИ, ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

3.1 Общие сведения и основные определения

Обмен информацией между устройствами, входящими в состав автоматизированной системы (компьютерами, контроллерами, датчиками, исполнительными устройствами), происходит в общем случае через промышленную сеть (*Fieldbus*, «полевую шину»).

Промышленные сети отличаются от офисных следующими свойствами:

- специальным конструктивным исполнением, обеспечивающим защиту от пыли, влаги, вибрации, ударов;
- широким температурным диапазоном (обычно от -40 до $+70$ °С);
- повышенной прочностью кабеля, изоляции, разъемов, элементов крепления;
- возможностью резервирования для повышения надежности;
- повышенной надежностью передачи данных;
- возможностью самовосстановления после сбоя;
- детерминированностью (определенностью) времени доставки сообщений;
- возможностью работы в реальном времени (с малой, постоянной и известной величиной задержки);
- работой с длинными линиями связи (от сотен метров до нескольких километров).

Промышленные сети обычно не выходят за пределы одного предприятия. Однако с появлением *Ethernet* и *Internet* для промышленных сетей стали применять ту же классификацию, что и для офисных:

- *LAN (Local Area Network)* – сети, расположенные на ограниченной территории (в цехе, офисе, в пределах завода);
- *MAN (Metropolitan Area Networks)* – сети городов;
- *WAN (Wide Area Network)* – глобальная сеть, охватывающая несколько городов или континентов. Обычно для этого используют интернет-технологии.

Промышленной сетью называют комплекс оборудования и программного обеспечения, который обеспечивает обмен информацией (коммуникацию) между несколькими устройствами. Промышленная сеть является основой для построения распределенных систем сбора данных и управления.

Поскольку в промышленной автоматизации сетевые интерфейсы могут быть неотъемлемой частью соединяемых устройств, а сетевое программное обеспечение прикладного уровня модели *OSI* выполняется на основном процессоре промышленного контроллера, то отделить сетевую часть от устройств, объединяемых в сеть, иногда физически невозможно. С другой стороны, смену одной сети на другую часто можно выполнить с помощью замены сетевого ПО и сетевого адаптера или введением преобразователя интерфейса, поэтому часто один и тот же тип ПЛК может использоваться в сетях различных типов.

Соединение промышленной сети с ее компонентами (устройствами, узлами сети) выполняется с помощью интерфейсов. Сетевым интерфейсом называют логическую и (или) физическую границу между устройством и средой передачи информации. Обычно этой границей является набор электронных компонентов и связанного с ними программного обеспечения. При существенных модификациях внутренней структуры устройства или программного обеспечения интерфейс остается без изменений, что является одним из признаков, позволяющих выделить интерфейс в составе оборудования.

Наиболее важными параметрами интерфейса являются пропускная способность и максимальная длина подключаемого кабеля. Промышленные интерфейсы обычно обеспечивают гальваническую развязку между соединяемыми устройствами. Наиболее распространены в промышленной автоматизации последовательные интерфейсы *RS-485*, *RS-232*, *RS-422*, *Ethernet*, *CAN*, *HART*, *AS* (приложение А).

Для обмена информацией взаимодействующие устройства должны иметь одинаковый протокол обмена. В простейшей форме протокол – это набор правил, которые управляют обменом информацией. Он определяет синтаксис и семантику сообщений, операции управления, синхронизацию и состояния при коммуникации. Протокол может быть реализован аппаратно, программно или программно-аппаратно. Название сети обычно совпадает с названием протокола, что объясняется его определяющей ролью при ее создании. Обычно сеть использует несколько протоколов, образующих стек протоколов – набор связанных коммуникационных протоколов, которые функционируют совместно и используют некоторые или все семь уровней модели *OSI*. Для большинства сетей стек протоколов реализован с помощью специализированных сетевых микросхем или встроены в универсальный микропроцессор.

Передача информации в сети выполняется через канал между передающим и приемным устройством. Канал является понятием теории информации и включает в себя линию связи и приемопередающие устройства. В общем случае вместо термина «линия связи» используют термин «среда передачи», в качестве которой может выступать, например, оптоволокно, эфир или витая пара проводов.

В распределенных системах на основе промышленных сетей может быть пять типов данных: сигналы, команды, состояния, события, запросы.

Сигналы – это результаты измерений, получаемые от датчиков и измерительных преобразователей. Их «время жизни» очень короткое, поэтому часто требуется получить только последние данные и в максимально короткий срок.

Команды – это сообщения, которые вызывают некоторые действия, например закрытие клапана или включение пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора. Большинство систем должны обрабатывать потоки команд, которые передаются адресату с высокой надежностью, и их нельзя передать повторно.

Состояние показывает текущее или будущее состояние системы, в которое она должна перейти. Требование ко времени его доставки может быть не таким жестким, как для команд; неприятое состояние может быть послано повторно.

Событие наступает обычно при достижении текущим параметром граничного значения. Например, событием может быть выход температуры за технологически допустимую границу. За появлением события должны следовать ответные действия, поэтому для событий особенно важно требование гарантированного времени доставки.

Запрос – это команда, посылаемая для того, чтобы получить ответ. Примером может быть запрос серверу, который выдает на него ответ.

Ниже при описании сетей будет использоваться понятие фрейма. Под фреймом понимают набор данных, передаваемых по сети и имеющих строго оговоренную структуру (формат). Термины «кадр», «дейтаграмма», «сегмент», используемые в стандартах на различные промышленные сети, ниже будут использованы как синонимы фрейма.

Сети могут иметь топологию звезды, кольца, шины или смешанную. Звезда в промышленной автоматизации используется редко. Кольцо используется в основном для передачи маркера в многомастерных сетях. Шинная топология является общепринятой, что является одной из причин применения термина «промышленная шина» вместо «промышленная сеть». К общей шине в разных местах может быть подключено произвольное количество устройств.

Для организации сетевого обмена в промышленности используются следующие физические каналы: коаксиальный кабель, витая пара, оптоволокно, радио, инфракрасный.

Основными параметрами промышленных сетей являются производительность и надежность. Производительность сети характеризуется временем реакции и пропускной способностью.

Время реакции сети определяется как интервал времени между запросом ведущего устройства и ответом ведомого при условии, что ведомое устройство имеет пренебрежимо малую задержку выработки ответа на запрос.

Пропускная способность сети определяет количество информации, переносимой сетью в единицу времени. Измеряется в битах за секунду и зависит от быстродействия сетевых приемопередатчиков и среды передачи.

Важной характеристикой промышленных сетей является надежность доставки данных. Надежность характеризуется коэффициентом готовности, вероятностью доставки данных, предсказуемостью времени доставки, безопасностью, отказоустойчивостью.

Коэффициент готовности равен отношению времени наработки до отказа к сумме времени наработки до отказа и времени восстановления после отказа.

Вероятность доставки данных определяется помехоустойчивостью канала передачи и детерминированностью доступа к каналу. В беспроводных сетях вероятность потери пакетов при передаче гораздо выше, чем в проводных. В сетях со случайным методом доступа к каналу существует вероятность того, что данные никогда не будут доставлены абоненту.

Время доставки данных в офисных сетях *Ethernet* является случайной величиной, однако в промышленном *Ethernet* эта проблема решена применением коммутаторов.

Безопасность – это способность сети защитить передаваемые данные от несанкционированного доступа.

Отказоустойчивость – это способность сети продолжать функционирование при отказе некоторых элементов. При этом характеристики системы могут ухудшиться, но она не теряет работоспособности.

В последнее время появился термин «**качество обслуживания**» (*QoS – Quality of Service*). *QoS* определяет вероятность того, что сеть будет передавать заданный поток данных между двумя узлами в соответствии с потребностями приложения.

3.2 Методы организации доступа к линии связи

Метод доступа – это набор правил, позволяющий пользователям работать с локальной сетью, не мешая друг другу. Метод доступа реализуется на физическом уровне. Если несколько устройств коммутируются между собой через общую линию связи (шину), то должен быть определен ясный и понятный протокол доступа к ней.

Существуют два метода упорядоченного доступа: централизованный и децентрализованный.

Метод MASTER-SLAVE (централизованный метод) находит свое применение в промышленных сетях как на контроллерном уровне (*fieldlevel*), так и на уровне датчиков и исполнительных механизмов (*sensor/actuatorlevel*). Право инициировать циклы чтения/записи на шине имеет только *MASTER*-узел. Он адресует каждого из пассивных участников (*SLAVE*-узлы) и обменивается с ними данными. В рамках протокола решаются такие задачи, как защита данных, обнаружение ошибок при передаче, восстановление данных. На скорость и объем передаваемой информации естественным образом влияет среда передачи.

Если на *MASTER* произошла авария, то и циклы обмена на шине останавливаются. Именно по этой причине децентрализованный контроль с переходящими функциями мастера от одного участника (узла сети) к другому получил наибольшее распространение. Здесь права *MASTER* назначаются группе устройств сети.

Приняты и широко используются две модели децентрализованного доступа: модель *CSMA/CD* и модель с передачей маркера.

Модель CSMA/CD (Ethernet, стандарт IEEE 802.3). Наиболее известным механизмом управления локальной сетью шинной конфигурации является метод множественного доступа с контролем несущей и обнаружением конфликтов (*CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect*). Наиболее широко известная реализация этого метода – спецификация *Ethernet*. Все станции на шине имеют право передачи данных. Каждая из них постоянно прослушивает шину. Если шина свободна, любая из станций сети может занять шину под свой цикл передач. В том случае когда несколько станций претендуют на шину одно-

временно, это приводит к так называемому конфликту (коллизии), и тогда станции снимают свою заявку на случайный промежуток времени, задаваемый случайным генератором, и затем через удвоенный промежуток времени вновь выходят в сеть.

Одним из реальных способов определения наличия коллизий при передаче, например, по коаксиальному кабелю, является способ определения коллизий по повышенному уровню постоянной составляющей сигнала. Детектор коллизий определяет превышение уровнем сигналов определенного порога (около 1,5 В), что означает, что на кабель работает более одного передатчика. Метод *CSMA/CD* получил широкое распространение и наиболее эффективен в условиях относительно низкой общей загрузки канала (менее 30 %). В условиях большей загрузки канала выгоднее использовать сети, реализующие модель с передачей маркера.

Модель с передачей маркера (Token Passing Model, стандарт IEEE 802.4). Сети с передачей маркера относятся к детерминированным сетям с предсказанием времени передачи. Наиболее известными сетями являются *TokenRing* и *FDDI (Fiber Distributed Data Interface)*. Право на доступ к шине передается в цикле от устройства к устройству. Порядок передачи зависит от прикладной задачи и определяется на стадии планирования системы. Этот метод предлагает каждому участнику сети «справедливое» разделение шинных ресурсов в соответствии с их запросами. Принцип передачи маркера используется в системах, где реакция на события, возникающие в распределенной системе, должна проявляться за определенное время.

3.3 Технические характеристики промышленных сетей

Открытые промышленные сети – это сети, на которые распространяются международные стандарты промышленных сетей. Только при использовании принципов открытых систем интеграция изделий разных производителей в одну сеть может быть решена без особых проблем. Предпочтительность того или иного сетевого решения как средства транспортировки данных можно оценить по следующей группе критериев:

- объем передаваемых полезных данных;
- время передачи фиксированного объема данных;
- удовлетворение требованиям задач реального времени;
- максимальная длина шины;
- допустимое число узлов на шине;
- помехозащищенность;
- денежные затраты в расчете на узел.

В зависимости от области применения весь спектр промышленных сетей можно разделить на два уровня: контроллерные сети (*Fieldlevel*) – промышленные сети, решающие задачи по управлению процессом производства, сбором и обработкой данных на уровне промышленных контроллеров; сенсорные сети (*Sensor/actuatorlevel*) или сети низовой автоматике, решающие задачи опроса датчиков и управления работой различных исполнительных механизмов.

Промышленные сети контроллерного уровня: *PROFIBUS (Process Field Bus)*: -DP, -PA, -FMS; *BITBUS*; *Control Net*; *CAN (Controller Area Network)*.

Сенсорные сети (сети низовой автоматики): *ASI (Actuator/Sensor Interface)*; *HART*; *SDS*; *Modbus*; *Modbus Plus*; *Interbus*; *Device Net*.

Универсальные сети: *LON (Local Operating Network)*; *FIP (Factory Instrumentation Protocol)*, *Foundation Fidelis*, *Ethernet*.

Технические характеристики наиболее часто применяемых сетей в распределенных системах управления приведены в таблице 3.1. Более подробно с ними можно ознакомиться в [17, 41].

Таблица 3.1 – Характеристика промышленных сетей

Сеть (протокол)	Топология сети	Физическая линия связи	Максимальное число устройств	Максимальная длина соединения	Скорость обмена
Сети низовой автоматики					
<i>ASI</i>	Общая шина, кольцо, древовидная, звездообразная и др.	Витая пара	31 подчиненное устройство	100 м, с ретрансляторами – 300 м	156 кбит/с
<i>Hart</i>	Точка – точка, шина	Экранированная витая пара	15 (топология – шина)	3 км (стандарт), 100 м (многоточечный режим)	1,2 кбит/с
<i>Modbus RTU/ASCII</i>	Общая шина, звездообразная, древовидная сеть с сегментами	Экранированная витая пара	247 узлов на сегмент	350–1200 м	19 200 бит/с
<i>Modbus Plus</i>	Общая шина	Витая пара	32 узла на сегмент, не более 64 узлов	450 м на сегмент, общая длина – 1,8 км	До 2 Мбит/с
<i>Interbus</i>	Сегментированная с Т-образными отводами	Витая пара, волоконно-оптический кабель	512 узлов	400 м на сегмент, общая протяженность – не более 12,8 км	500 кбит/с, 2 Мбит/с
<i>SDS</i>	Общая шина с короткими отводами	4-проводный кабель	32–64 узла	22,8–457 м	100–125 кбит/с
<i>Device Net</i>	Магистральная линия с ответвлениями (6 м)	Витая пара (4-проводная) для передачи сигнала и напряжения питания	64 узла (32 устройства на один узел)	Зависит от скорости передачи. С ретрансляторами до 6 км	125, 250 или 500 кбит/с

Продолжение таблицы 3.1

Сеть (протокол)	Топология сети	Физическая линия связи	Максимальное число устройств	Максимальная длина соединения	Скорость обмена
Контроллерные сети					
<i>PROFIBUS DP</i>	Линейная, звездообразная, кольцевая	Витая пара, волоконно-оптический кабель	127 узлов (124 <i>Slave</i> , 4 <i>Master</i>), 4 сегмента	До 24 км (ВОК)	12 Мбит/с (100 м), 9,6 кбит/с
<i>PROFIBUS PA</i>	Линейная, звездообразная, кольцевая	Витая пара, волоконно-оптический кабель	127 узлов (124 подчиненных – 4 сегмента, 3 ретранслятора) и 3 главных устройства	1900 м (длина ответвлений 120 м)	31,25 кбит/с
<i>BITBUS</i>	Звезда, кольцо	Экранированная витая пара	240 абонентов (28 в сегменте)	От 1,2 до 13,2 км	500, 2400 кбит/с
<i>CONTROL NET</i>	Линейная, древовидная, звездообразная и их комбинации	Коаксиальный кабель, волоконно-оптический кабель	99 узлов (с ответвлениями)	1000 м (КК) 2 узла; 250 м с 48 узлами; 3 км (ВОК), 30 км (ВОК с ретрансляторами)	До 5 Мбит/с
<i>CAN</i>	Магистральная с ответвлениями	Оптоволокно, радиоканал	127 узлов	25–1000м (зависит от скорости передачи)	125, 250, 500 и 1000 кбит/с
Универсальные сети					
<i>Foundation Fieldbus H1</i>	Звездообразная или общая шина	Витая пара, волоконно-оптический кабель	240 на сегмент, 65 000 сегментов	1900 м	31, 25 кбит/с
<i>Foundation Fieldbus (HSE)</i>	Звездообразная	Витая пара, волоконно-оптический кабель	IP-адресация; число узлов неограничено	ВП – 100 м, ВОК – 2 км	100 Мбит/с
<i>WorldFIP</i>	Общая шина	Витая пара, волоконно-оптический кабель	256 узлов	До 40 км	31 кбит/с, 1; 2,5; 5 Мбит/с

Продолжение таблицы 3.1

Сеть (протокол)	Топология сети	Физическая линия связи	Максимальное число устройств	Максимальная длина соединения	Скорость обмена
<i>LonWorks</i>	Общая шина, кольцо, петля, звездообразная	Витая пара, волоконно-оптический кабель, силовой кабель	32 000 узлов	2 км	78 кбит/с, 1,25 Мбит/с
<i>Ethernet</i>	Общая шина, звездообразная	Тонкий или толстый коаксиальный кабель, витая пара, волоконно-оптический кабель	1024 узла, больше при установке маршрутизаторов	ВП – 100 м, тонкий КК – 185 м, толстый КК – 500 м, одномодовый ВОК – 10 км, многомодовый ВОК – 2 км	10 Мбит/с, 100 Мбит/с, 1000 Мбит/с, 10 Гбит/с
Сети верхнего уровня					
<i>Tokenring</i>	Кольцевая, звездообразная, кольцевая топологии	IBM-кабель, витая пара	260 станций (IBM-кабель), 72 станции (витая пара)	60 км (IBM-кабель), 18 км (ВП)	4–10 Мбит/с
<i>ARCNET</i>	Звездообразная	Витая пара	8 станций на концентраторе	До 600 м до концентратора	2,5 Мбит/с

3.3.1 Сенсорные сети

3.3.1.1 AS – Interface (ASI). Основная задача ASI-интерфейса нижнего уровня – связать в единую информационную структуру устройства нижнего уровня, а именно, датчики и разнообразные исполнительные механизмы, имеющие соответствующий сетевой интерфейс. Название описываемой сети раскрывает ее назначение: *Actuators Sensors Interface (ASI)* – интерфейс исполнительных устройств и датчиков.

С помощью ASI можно строить системы, в которых датчики и контроллеры связаны одной сетью, причем ASI имеет шлюзы в другие промышленные сети: *ModBus, Profibus, Interbus, DeviceNet* и др.

ASI-интерфейс позволяет передавать как данные, так и питание к узлам сети по одной паре проводов.

Максимальное время цикла составляет 5–10 мс. MASTER-узел ASI-сети контролирует работу сети, организует обмен данными с PLC. Зачастую ASI-MASTER оформляется в виде отдельной платы контроллера или компьютера.

3.3.1.2 HART. Традиционно для измерения различных физических величин предлагается множество приборов с токовым выходом 4–20 мА. Однако при создании нового поколения интеллектуальных датчиков и приборов наряду с передачей аналоговой информации потребовалось передавать и цифровые данные,

что привело к разработке протокола *HART* (*Highway Addressable Remote Transducer*). Данный протокол основан на методе передачи данных с помощью частотной модуляции. Цифровая информация передается частотами 1200 Гц (логическая «1») и 2200 Гц (логический «0»), которые накладываются на аналоговый токовый сигнал, и суммарный сигнал передается с помощью источника тока 4–20 мА по линии связи. При этом аналоговый токовый сигнал передается от ведомого прибора к ведущему устройству, а цифровые сигналы могут передаваться в обоих направлениях.

HART-протокол реализует уровни 1, 2 и 7 эталонной модели *ISO/OSI*-стандарта. При реализации уровня 1 *HART*-протокол ориентирован на так называемые *Bell*- и *HART*-модемы. На втором уровне реализуется протокол передачи данных, который использует принцип «ведущий – ведомый». Ведущим может быть портативный *HART*-терминал или ПЛК. Передача данных происходит асинхронно побайтно в полудуплексном режиме. Внутри уровня 7 протокол *HART* использует команды, которые подразделяются на три основных класса: универсальные (считывание первичных значений, диапазона измерений, граничных величин); стандартные (считывание и запись стандартных и приборных параметров, например, установить фиксированное значение выходного тока); специфические (команды, связанные с настройкой, вводом в эксплуатацию, например, калибровка ультразвукового датчика).

Со средствами описания, параметрирования и подключения *HART*-устройств можно ознакомиться в [43].

3.3.1.3 Modbus. Существует два типа запросов:

- запрос/ответ (адресуется только один из *SLAVE*-узлов);
- широковещательная передача (*broadcastmessage*); *MASTER* через выставление адреса «0» обращается ко всем *SLAVE*-узлам сети одновременно без квитирования.

Для кодирования передаваемых данных используются форматы *ASCII* (*American Standard Code for Information Interchange*) и *RTU* (*Remote Terminal Unit*).

Модель *OSI* протокола *Modbus* содержит три уровня: физический, канальный и прикладной. Разновидностями *Modbus* являются протокол *Modbus Plus* – многомастерный протокол с кольцевой передачей маркера и *Modbus TCP*, рассчитанный на использование в сетях *Ethernet*.

Modbus Plus. Спецификация *Modbus Plus* является модификацией протокола *Modbus*. В отличие от сети *Modbus* сеть *Modbus Plus* является одноранговой, т. е. любое устройство может инициировать транзакцию, являясь как ведущим, так и ведомым.

Передача данных внутри сети использует механизм передачи маркера. В каждый момент передачу запросов осуществляет только один узел. Узел, получивший запрос, сразу отправляет подтверждение его получения. После завершения сеанса опроса узлов активный узел передает маркер следующему узлу с большим адресом и т. д. Протокол *Modbus Plus* реализует функцию маршрутизации до шести сетей.

Литературу по протоколу *Modbus* можно найти на сайте *Modbus-IDA* <http://www.modbus.org>.

3.3.1.4 Interbus. Сеть *Interbus* – одна из первых промышленных шин, получивших широкое распространение. Физический уровень *Interbus* основан на стандарте *RS-485* и напоминает обычную сеть с многоотводными соединениями, однако в действительности представляет собой последовательное кольцо на базе сдвиговых регистров. Каждый подчиненный узел имеет два коннектора: через один коннектор данные принимаются, через другой передаются в следующий узел. Информация об адресе в протоколе отсутствует, данные в сети пересылаются по кругу, и главное устройство всегда способно определить, из какого узла считывается или в какой узел передается информация по положению этого узла в кольце.

Благодаря необычной сетевой топологии *Interbus* имеет два дополнительных преимущества. Во-первых, кольцевая топология дает главному устройству возможность самому себя конфигурировать, причем в некоторых случаях данный процесс не требует вмешательства со стороны пользователя. Во-вторых, точность сведений о сетевых отказах и месте их возникновения значительно упрощает процесс их поиска и устранения.

3.3.1.5 Device Net – недорогое и эффективное решение для объединения в единую систему разнообразных устройств промышленной автоматики (фото-, термодатчики; стартеры; считыватели штриховых кодов; элементы человеко-машинного интерфейса: клавиатуры, дисплейные панели; управляющие устройства: *PLC*, компьютеры и т. д. (рисунок 3.1))

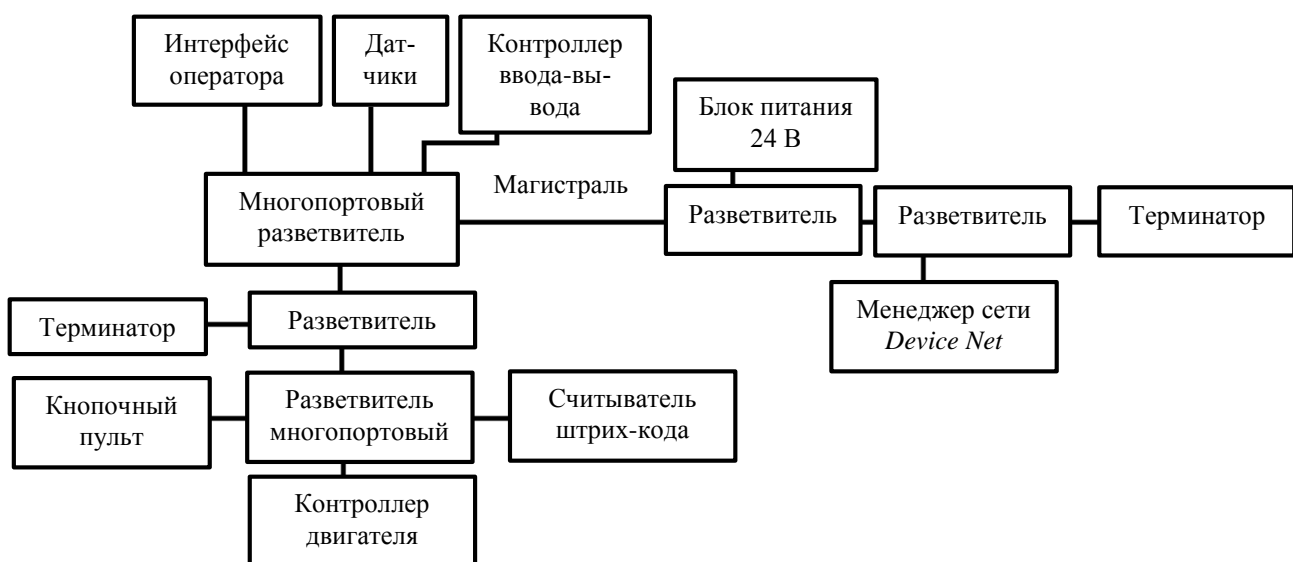


Рисунок 3.1 – Пример сети *Device Net*

Сеть *Device Net* имеет шинную топологию с отводами. Физической средой передачи является 4-проводный кабель, причем возможны две его разновидности: толстый (внешний диаметр 12,2 мм) и тонкий (6,9 мм). Максимальные

длины центральной магистрали и отводов в зависимости от скорости передачи и типа кабеля приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Соотношения длины и скорости передачи данных в сети *Device Net*

Скорость передачи, кбит/с	Длина магистрали, м		Длина отводов, м	
	толстый кабель	тонкий кабель	одиночных	суммарных
125	500	100	6	156
250	250	100	6	78
500	100	100	6	39

Особенностью сети является возможность питания модулей непосредственно от сетевого кабеля, причем стандартизованы как напряжение питания (24 В), так и максимальная токовая нагрузка (8 А на толстом кабеле, 3 А на тонком), а также допускается применение нескольких источников питания с целью резервирования.

3.3.1.6 Сеть SDS (*Smart Distributed System*). SDS наряду со стандартом *Device Net* представляет собой законченное решение для сетевого управления интеллектуальными датчиками и актуаторами от центрального контроллера (*PLC*, компьютера) в системах промышленной автоматике.

Архитектура протокола SDS включает в себя три уровня модели OSI/ISO – физический, канальный и прикладной. Шинная топология представляет собой линейную шину (магистраль или транк) с короткими отводами (рисунок 3.2).

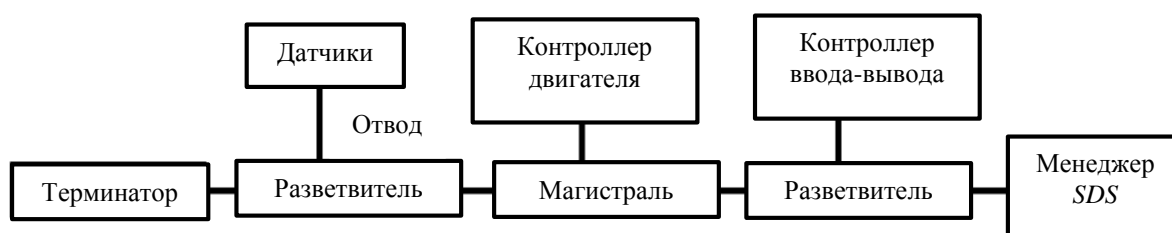


Рисунок 3.2 – Пример сети SDS

Физический канал: *Mini*-4-проводный кабель с максимальной токовой нагрузкой 8 А и *Micro*-4-проводный кабель с токовой нагрузкой до 3 А. Всеми типами кабелей и соединителей, так же как и в сети *Device Net*, предусмотрено подведение питающего напряжения 11–25 В к узлам. Предельные значения длин магистрали и отводов сети SDS в зависимости от скорости передачи приведены в таблице 3.3.

В процессе работы сети допускается наличие нескольких *MASTER* на шине, но они должны функционировать в пределах своих адресных доменов, а при включении сети только один из них может брать на себя функцию сетевого менеджера для автонастройки скорости устройств. Модули с внешним питанием (не от SDS-шины) должны иметь механизм обнаружения пропадания питания шины.

Таблица 3.3 – Предельные значения длин магистрали сети *SDS*

Максимальная длина магистрали, м	Скорость передачи, кбит/с	Максимальная длина отводов, м	Максимальное количество узлов
22,8	1000	0,3	32
91,4	500	0,9	64
182,8	250	1,8	64
457,2	125	3,6	64

3.3.2 Контроллерные сети

3.3.2.1 Сеть *VITBUS*. Протокол *VITBUS* разработан для построения распределенных систем, в которых должны быть обеспечены высокая скорость передачи и надежность. Сеть использует принцип *MASTER/SLAVE*. Физический интерфейс основан на стандарте *RS-485* и представляет собой экранированную витую пару.

Протокол *VITBUS* определяет два режима передачи данных по шине:

1 Синхронный режим. Используется при необходимости работы на большой скорости, но на ограниченных расстояниях. В этом случае топология сети включает до 28 узлов, длина шины составляет до 30 м, скорость передачи – от 500 до 2400 кбит/с. Синхронный режим передачи предполагает использование двух дифференциальных сигнальных пар – одной для данных, другой для синхронизации.

2 Режим с самосинхронизацией. Использование этого режима позволяет значительно удлинить шину. Стандартом определены две скорости передачи: 375 кбит/с (до 300 м) и 62,5 кбит/с (до 1200 м). Используя шинные репитеры, можно последовательно объединять несколько шинных сегментов (до 28 узлов на сегмент). В этом случае общее число узлов составит до 240, длина общей шины – 13,2 км.

3.3.2.2 Сеть *PROFIBUS*. Протокол *PROFIBUS (Process Field Bus)*, что приблизительно переводится как промышленная шина для технологических процессов, разработан для решения следующих основных задач:

- организации связи с устройствами, гарантирующими быстрый ответ;
- создания простой и экономичной системы передачи данных, основанной на открытых стандартах.

Сеть *PROFIBUS* использует только первый и второй уровни модели *OSI*. Один из вариантов сети – *PROFIBUS FMS*, также использует уровень 7.

В *PROFIBUS* используется гибридный метод доступа в структуре *MASTER/SLAVE* и децентрализованная процедура передачи маркера.

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. Настройка всех основных временных параметров определяется пользователем. Говоря о *PROFIBUS*, необходимо иметь в виду, что под этим общим названием

понимается совокупность трех различных, но совместимых протоколов: *PROFIBUS DP*, *PROFIBUS FMS* и *PROFIBUS PA*. Следует отметить, что *PROFIBUS* является многомастерной сетью (с несколькими ведущими устройствами). В качестве ведомых устройств выступают обычно устройства ввода-вывода, клапаны, измерительные преобразователи. Они не могут самостоятельно получать доступ к шине и только отвечают на запросы ведущего устройства.

Сеть *PROFIBUS DP* применяется на нижнем уровне для высокоскоростного обмена данными с оконечными устройствами. Протокол физического уровня базируется на стандарте *RS-485*. Длительность цикла опроса зависит от числа узлов в сети и для скорости обмена 1,5 Мбит/с и числа станций 32 составляет не более 6 мс. Физическая среда – витая пара (*RS-485*) или оптоволоконный кабель. На шине может быть до 124 ведомых устройств. *DP*-протокол представляет функциональное подмножество 2-го уровня протокола *PROFIBUS FMS*. Уровень 7 в *PROFIBUS DP* не описан.

Сеть *PROFIBUS PA*. Этот протокол используется в устройствах, работающих в опасных производствах, и позволяет подключать к одной шине датчики и преобразователи изолированно друг от друга. В основе протокола *PA* (*Process Automation*) лежит протокол *ISP* (*Interoperable Systems Project*). Физический уровень (уровень 1 *OSI*-модели) реализует стандарт *IEC 61158-2* (с внутренней защитой данных). Данные передаются с помощью уровней тока +9 мА и –9 мА (токовая петля). Используется манчестерский код. Уровень 2 – это функциональное подмножество стандарта *DIN 19245*. Структура протокола *PROFIBUS PA* сравнима с *PROFIBUS DP* (формат данных одинаковый). За счет идентичности коммуникационных протоколов возможно объединение сетей *PROFIBUS DP* и *PROFIBUS PA*. Для этого используется интерфейс *DP/PA*, позволяющий объединять до пяти шин *PROFIBUS PA*. Для *PROFIBUS* разработана модификация интерфейса *RS-485* для взрывоопасных сред, которая получила название *RS-485-IS* (*Intrinsically Safe* – внутренне безопасный).

Сеть *PROFIBUS FMS*. Этот протокол общего назначения разработан для связи контроллеров и интеллектуальных устройств. Он описывает уровни 1, 2 и 7 *OSI*-модели. Основное назначение *PROFIBUS FMS* – передача больших объемов данных. Распределенная система управления может состоять из устройств, реализующих все три типа стандарта, однако *PA*-устройства необходимо подключать к *PROFIBUS PA* через разделительные мосты.

3.3.2.3 Сеть *CONTROL NET* основана на топологии общей шины, однако ее можно сконфигурировать как в виде звезды, так и в виде древовидной структуры.

Сеть *CONTROL NET* – управляющая сеть, удовлетворяющая требованиям приложений реального времени с высокой пропускной способностью. Сеть объединяет функции сети ввода-вывода и сети обмена «точка – точка», обеспечивая высокую производительность для обеих функций. Все устройства *CONTROL NET* имеют прямой доступ к данным в сети *Foundation Fieldbus*. Сеть *CONTROL NET* обеспечивает избыточность носителя, что позволяет поддерживать функционирование системы при повреждении кабеля и взрывобезопасность при использовании оптоволоконного канала передачи.

3.3.2.4 Сеть CAN (от англ. *Controller Area Network* – область, охваченная сетью контроллеров) представляет собой комплекс стандартов для построения распределенных промышленных сетей, который использует последовательную передачу данных в реальном времени с очень высокой степенью надежности и защищенности. Центральное место в *CAN* занимает протокол канального уровня модели *OSI*. Первоначально *CAN* был разработан для автомобильной промышленности, но в настоящее время активно применяется в различных устройствах и механизмах, начиная от стиральных машин и заканчивая томографами и ракетами. *CAN* охватывает два уровня модели *OSI*: физический и канальный. Стандарт не предусматривает никакого протокола прикладного (7-го) уровня модели *OSI*. Поэтому для его воплощения в жизнь различные фирмы разработали несколько протоколов: *CANopen*, *SDS*, *CANKingdom*, *Device Net*, ставший европейским стандартом в 2002 г., и ряд других. *CAN* характеризуется следующими основными свойствами:

- каждому сообщению (а не устройству) устанавливается свой приоритет;
- гарантированная величина паузы между двумя актами обмена;
- гибкость конфигурирования и возможность модернизации системы;
- широковещательный прием сообщений с синхронизацией времени;
- непротиворечивость данных на уровне всей системы;
- допустимость нескольких ведущих устройств в сети («многомастерная сеть»);
- способность к обнаружению ошибок и сигнализации об их наличии;
- автоматический повтор передачи сообщений, доставленных с ошибкой, сразу как только сеть станет свободной;
- автоматическое различение сбоев и отказов с возможностью автоматического отключения отказавших модулей.

Физический уровень модели *OSI* обеспечивает надежную передачу битов, игнорируя содержание передаваемой информации. Основными понятиями физического уровня являются линии передачи (в большинстве случаев это витая пара, хотя допускается использовать плоский кабель или один провод и «корпусную землю», оптоволокно, радиоканал), временные диаграммы, система синхронизации, формат данных, обеспечение достоверности передачи (контрольная сумма, методы кодирования, обнаружение и восстановление ошибок). Характеристики передатчика и приемника стандартом не устанавливаются, поскольку они могут быть выбраны для каждого конкретного случая исходя из требований применения.

CAN использует *NRZ*-кодирование (от англ. *Non Return to Zero* – без возврата к нулю). В сети *CAN* ни один из узлов не имеет адреса. Вместо этого сообщения посылаются «всем», но содержат идентификатор, который описывает смысл посылаемых данных. В соответствии с этим смыслом любой узел сети может принять это сообщение, если оно необходимо устройству для функционирования. Сообщение принимается узлом, если его идентификатор проходит через фильтр сообщений, имеющийся в каждом узле. Когда сеть свободна, любой узел может начать передачу сообщения. Но каждое сообщение имеет свой приоритет

при получении доступа к шине. Поэтому передачу может осуществить только одно устройство – то, которое содержит сообщение с наивысшим приоритетом.

Для достижения максимальной надежности (достоверности) передачи данных протокол предусматривает специальные методы обнаружения ошибок, сигнализации об ошибках и самоконтроля, которые воплощены в каждом узле сети. Для обнаружения ошибок приняты следующие меры:

- передатчик сравнивает каждый бит на шине с переданным битом для подтверждения правильности передачи на уровне битов;
- выполняется контроль циклическим избыточным кодом (*CRC – Cyclic Redundancy Check*);
- используется битстаффинг;
- используется проверка каждого переданного фрейма.

Сообщения с обнаруженными ошибками помечаются флагом в том узле, где они были обнаружены. Такие сообщения отклоняются и автоматически передаются повторно. Время от момента обнаружения ошибки до начала повторной передачи равно длительности 31-го бита, если не возникают новые ошибки.

CAN способен различать сбои и отказы. Если произошел отказ, то отказавшее устройство отключается от сети.

Сообщения в *CAN* передаются с помощью фреймов (блоков данных). Используется два разных формата фреймов, которые различаются длиной поля идентификатора: стандартный фрейм с идентификатором длиной 11 бит и расширенный фрейм с длиной идентификатора 29 бит.

3.3.3 Универсальные сети

3.3.3.1 Сеть *WorldFIP*. Протокол организован посредством централизованного/децентрализованного доступа к шине и для передачи данных использует режим широкого вещания (*broadcast*) путем отправки *broadcast*-пакетов. При помощи широкополосного канала связи могут быть соединены до 256 станций, расположенных на расстоянии до 2 км. Контроль передачи осуществляется центральным узлом сети – «арбитром».

Сеть *WorldFIP* применяется в нефтехимической, электротехнической, газовой, металлургической и ряде других отраслей промышленности.

3.3.3.2 Сеть *LonWorks*. Протокол *Lon* был разработан для построения систем с большим числом каналов данных, получаемых на основе коротких сообщений.

Lon-сеть может состоять из сегментов, имеющих различные физические среды передачи: витая пара, коаксиальный и оптический кабели, радиочастотный и инфракрасный каналы. Для каждого типа физического канала существуют трансиверы, обеспечивающие работу сети на различных по длине каналах, скоростях передачи и сетевых топологиях. При разрешении коллизий используется предсказывающий алгоритм их предупреждения, т. е. доступ к каналу упорядочивается на основе знания о предполагаемой нагрузке канала.

3.3.3.3 Сеть *Foundation Fieldbus* представляет собой двухуровневый сетевой протокол, сочетающий черты мощной информационной магистрали для

объединения компьютеров верхнего уровня и управляющей сети, объединяющей контроллеры, датчики и исполнительные механизмы [41, 45].

Стандарт определяет два уровня сети. На нижнем уровне (*H1*) в качестве физической среды передачи данных за основу взята модифицированная версия стандарта *IEC 61158-2*. Уровень *H1* предназначен для объединения устройств, функционирующих во взрывоопасных газовых средах.

На верхнем уровне (протокол *H2*) в настоящее время используется *Foundation Fieldbus HSE (High Speed Ethernet)*, основанный на сети *Fast Ethernet* со скоростью передачи 100 Мбит/с (стандарт *IEC 61158*).

Особенностью стандарта *Foundation Fieldbus* является то, что в нем определен дополнительный пользовательский уровень (*User Level*), позволяющий строить промышленные сети с распределенным интеллектом.

Элементами пользовательского уровня являются функциональные блоки, которые представляют собой стандартизированные объекты управления, например, аналоговый вход, аналоговый выход, ПИД-регулятор. В пользовательский уровень включена возможность описания устройств на языке описания устройств, которое можно рассматривать как своеобразные драйверы.

Методы обмена сообщениями: клиент – сервер (*Client – Server*), издатель – подписчик (*Publisher – Subscriber*), уведомление о событиях (*Event Notification*).

Сеть *Foundation Fieldbus* может быть использована в качестве полной замены аналогового стандарта токовой петли 4–20 мА.

Основная область применения этой сети – нижний уровень распределенной системы автоматизации с объединением устройств, работающих во взрывоопасных средах и использующих сеть как для информационного обмена, так и для питания датчиков.

3.3.3.4 Сеть *Ethernet*. В силу широкого применения на разных уровнях иерархии систем управления ее можно отнести к универсальным сетям [41].

Протокол *Ethernet* – открытый промышленный сетевой стандарт, который поддерживает неявный обмен сообщениями (обмен сообщениями ввода-вывода в реальном времени), явный обмен (обмен сообщениями). Использование *Ethernet* обеспечивает доступ ко всем устройствам уровня данных из *Internet* [44].

Сеть *Ethernet* использует двухуровневый протокол стандарта *Ethernet TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)* – протокол управления и передачи данных.

IP-протокол – это протокол сетевого уровня, который отвечает за передачу информации по сети, т. е. за правильность доставки сообщения (*message*) по указанному адресу (таблица 3.4). Информация передается блоками, которые называются дейтаграммами. Протокол *IP* не исключает потерь данных или доставки дейтаграмм с ошибками.

Протокол *TCP* является основным транспортным протоколом стека *TCP/IP* (см. таблицу 3.4), располагается над межсетевым протоколом *IP* и обеспечивает передачу пакета данных.

Таблица 3.4 – Типовая модель *OSI* для сети *LAN*

Уровень	<i>OSI</i> -модель	Сеть <i>Ethernet</i>	Варианты реализации	
7 6	Прикладной уровень представления.	Прикладной	<i>HTTP, FTP, SMTP, DNS</i>	<i>NFS, XDR, RPC</i>
5	Сеансовый	–	–	–
4	Транспортный	Транспортный	<i>TCP</i>	<i>UDP</i>
3	Сетевой	Интернет-протокол	<i>IP</i>	
2	Канальный (передачи данных)	<i>LLC</i> или другие клиенты <i>MAC</i>	<i>Ethernet IEEE 802.3</i>	
1	Физический	<i>PHY</i>	Витая пара, коаксиальный кабель, оптический кабель	

Протокол *TCP* предоставляет возможность передачи непрерывного потока октетов, упакованных в сегменты.

В таблице 3.4 приведена типовая модель *OSI* для локальной сети *LAN*, в которой *Ethernet* как стандарт *IEEE 802.3* охватывает только физический и канальный уровень. На других уровнях в качестве примера представлены протоколы сети *Internet*. Здесь *LLC* (от англ. *Logical Link Control* – управление логическими связями) – клиент подуровня *MAC*: *MAC (Medium Access Control)* – подуровень управления доступом к линии передачи; *PHY (PHYSical)* – физический уровень (линия передачи). Уровни 1 и 2 *Ethernet*-протокола обычно воплощаются аппаратно, остальные – программно [17].

В структуре отсутствует сеансовый уровень, а прикладной и представительный уровни объединены. Таким образом, протоколы *TCP/IP* охватывают верхние уровни модели *OSI*, начиная с 3-го. На сетевом уровне, помимо протокола *IP*, используются протоколы *ARP, RARP, ICMP* и др. На транспортном уровне используются протоколы *UDP* и *TCP*. На объединенном и прикладном уровнях представления данных используются протоколы *TELNET, FTP, SMTP, SNMP, OSPF* и другие протоколы сети *Internet*.

Важным протоколом канального уровня по стандарту *ISO* является протокол *HDLC (Highlevel Data Link Control)* – протокол управления каналом передачи данных). Протокол *HDLC* применяется для выделенных линий связи (каналы могут быть выделенными или коммутируемыми). Основные функции протокола – присвоение и управление *IP*-адресами, формирование пакета данных, восстановление искаженных и утерянных кадров, управление потоком кадров. Типичные устройства, обменивающиеся данными по сети *Ethernet*, – ПЛК, персональные компьютеры, роботы, устройства человеко-машинного интерфейса, адаптеры входов/выходов, устройства ввода-вывода.

Сеть *Ethernet* использует различные физические среды: витые пары, волоконно-оптический кабель, реже коаксиальный кабель. Основная топология – звездообразная с центральным узлом (*hub* или *switch*).

Существуют четыре стандартные скорости передачи данных в сетях *Ethernet* по оптоволоконному кабелю и витой паре проводов: 10 и 100 Мбит/с, 1 и 10 Гбит/с. *Ethernet* имеет несколько модификаций, структура наименований которых имеет следующий вид: <скорость передачи>*BASE*<дополнительные обозначения>. Скорость указывается цифрой в мегабитах в секунду или в гигабитах в секунду, в последнем случае к цифре добавляется буква *G*. Буквы после «*BASE*» означают тип кабеля: *T* (*Twistedpair*) – витая пара, *F* (*Fiberoptic*) – оптоволоконный, *S* (*Shortwavelengthoptic*) – оптический коротковолновый, *L* (*Longwavelength*) – длинноволновый, *C* (*shortCoppercable*) – короткий медный кабель. Символ «*X*» означает наличие блока кодирования на физическом уровне. Например, *10BASE-T* означает спецификацию физического уровня для скорости 10 Мбит/с с методом доступа *CSMA/CD* и с использованием двух витых пар проводов; *100BASE-FX* – для скорости 100 Мбит/с, *CSMA/CD* с применением двух многомодовых оптических кабелей.

В промышленной автоматизации наибольшее распространение получили стандарты *10BASE-T* и *100BASE-TX*, а также *100BASE-FX*.

3.3.3.5 Сеть *IndustrialEthernet*. Наметившаяся тенденция интеграции систем управления на базе единой широко распространенной сети *Ethernet* привела к необходимости разработки специального программного и аппаратного обеспечения, способного работать в жестких условиях эксплуатации, характерных для нижних уровней систем управления, т. е. появления промышленного *IndustrialEthernet*.

Промышленный *Ethernet* должен функционировать в тяжелых промышленных условиях, допускать резервирование, интегрироваться с программно-техническими комплексами разных производителей, а также с другими промышленными сетями, интегрироваться с системами верхнего уровня, функционировать в режиме реального времени, иметь защиту от электромагнитных помех и обеспечивать устойчивость к вибрациям.

IndustrialEthernet использует технологию множественного доступа к шине с прослушиванием несущей и обнаружением коллизий. Пересылка данных ведется кадрами.

Для работы в режиме *PB* (технология *RTPS* – *Real Time Publisher Subscriber*) в жестких промышленных условиях разработаны и предлагаются следующие сети *IndustrialEthernet*: *EtherCAT*, *PROFINET*, *Ethernet/IP* (*ODVA*), *ModbusTCP*.

Сеть *EtherCAT* (*Ether for Control Automation Technology*) – сеть стандарта *Ethernet*; топология сети – кольцо; структура сети – ведущий – ведомый. Пакет с данными (фрейм) обходит последовательно по кольцу ведомые устройства, которые дополняют пакет своими данными. Собранные от всех ведомых устройств данные возвращаются к ведущему контроллеру, связанному с компьютером, где осуществляется их обработка, архивирование и визуализация. За счет задержки всего в несколько наносекунд реализуется поддержка режима реального времени.

Сеть *PROFINET*, разработанная на основе сетей *PROFIBUS* и *Ethernet*, представляет собой промышленный вариант сети *Ethernet 100 BaseTX*. Существуют три модификации сети: *PROFINET NRT* (*Non Real time*), *PROFINET RT* (*Real time*), *PROFINET IRT* (*Isochronous Realtime*). Сеть *Profinet* позволяет интегрировать полевые сети (*PROFIBUS*, *Interbus*, *Device Net* и др.) в открытую сеть на базе *Industrial*

Ethernet. Физический канал – экранированная витая пара категории 5; длина сети – 100 м; скорость передачи – 100 Мбит/с. Используются также сети распределенного ввода-вывода *PROFINET 10* и модульные системы управления *PROFINET CBA (Component Based Automation)*.

Ethernet/IP (Industrial Ethernet Protocol) базируется на протоколах *TCP, UDP, IP* 3-го и 4-го уровней модели *OSI*. Протокол *Ethernet/IP* совместим с протоколом *Device Net*.

Помимо этих протоколов на уровнях 5–7 модели *OSI* используются протоколы *FTP, HTTP, SNMP, SMTP* и др.

Повышение скорости передачи в сетях *IndustrialEthernet* достигается применением стандарта сетей *FastEthernet*. *IndustrialFastEthernet* базируется на стандарте *Ethernet* для витой пары со скоростью до 100 Мбит/с.

Все большее применение в системах промышленной автоматизации находят сети *GigabitEthernet (10GE)* со скоростью передачи данных до 10 Гбит/с в дуплексном режиме. Максимальное расстояние при применении витой пары составляет 100 м. В ряде случаев возникает ситуация, когда расстояние между сегментами может быть большим. Для увеличения расстояния следует применить технологию *VDSL* (от англ. *Very-highdataarate Digital Subscriber Line* – сверхвысокоскоростная цифровая абонентская линия), которая позволяет передавать данные со скоростью 100 Мбит/с на расстояние 300 м.

3.3.4 Сети верхнего уровня

3.3.4.1 Сеть *Tokenring*. В сети используется метод передачи маркера по кольцу (кольцевая топология сети). Перемещаясь по кольцу, маркер предоставляет последовательно каждой рабочей станции право на передачу сообщения. Станция, получив пустой маркер, может его заполнить сообщением любой длины (*frame*-кадр), но в течение определенного времени, определяемого специальным таймером. Кадр перемещается по кольцу и каждая станция регенерирует его.

Станция, которой предназначено сообщение, копирует его, отмечая как принятый, но не выводит сам кадр из кольца. Эту функцию выполняет передающая станция, когда кадр возвращается к ней обратно.

Достоинством сети является возможность проверки достоверности кадра и работоспособности принимающей станции. Кроме того, сеть имеет механизм приоритета, когда отдельные станции могут получать маркер быстрее других и дольше его удерживать.

3.3.4.2 Сеть *ARCNET*. В сети используется метод доступа с эстафетной передачей для сетей со звездообразной топологией. Каждая станция подключается к концентратору. Концентраторы соединяются между собой шиной. Станция может передавать сообщение только тогда, когда получит маркер (*token*). При получении маркера станция формирует пакет данных объемом до 512 байт путем добавления к маркеру адреса станции назначения, собственного адреса и до 508 байт информации. Сформированный таким образом пакет переходит от станции к станции, пока не достигнет адресата, где данные выводятся из пакета,

а маркер переходит к следующей станции. Для передачи большего объема информации, чем 508 байт, может потребоваться несколько проходов маркера по сети.

3.4 Беспроводные сети систем управления

Существует много объектов автоматизации, где сложно обойтись без беспроводных сетей, или где их применение явно желательно [17]:

- датчики и исполнительные устройства на подвижных частях механизмов;
- объекты, в которых нежелательно портить дизайн;
- эпизодическое программирование и диагностика ПЛК, дистанционное считывание показаний счетчиков, самописцев;
- объекты с агрессивными средами, вибрацией;
- отслеживание траектории движения транспорта, охрана государственных границ, мониторинг напряженности автомобильного трафика, леса, моря, сельскохозяйственных культур, вредных выбросов;
- любые объекты, для которых монтаж и обслуживание существенно превышает стоимость заменяющей беспроводной системы, при условии отсутствия жестких требований к надежности доставки сообщений в реальном времени;
- объекты во взрывоопасных зонах.

Беспроводные сети делятся на следующие классы:

- сотовые сети *WWAN (Wireless Wide Area Network)*;
- беспроводные *LAN (WLAN – Wireless LAN)*;
- беспроводные сети датчиков.

В промышленной автоматизации наибольшее распространение получили три типа беспроводных сетей: *Bluetooth* на основе стандарта *IEEE 802.15.1*, *ZigBee* на основе *IEEE 802.15.4* и *Wi-Fi* на основе *IEEE 802.11*. Все три сети используют нелицензируемый *ISM (Industrial, Scientific, and Medical)* диапазоном 2,4 ГГц.

3.4.1 Проблемы беспроводных сетей и пути их решения

Беспроводные сети подкупают простотой, но при этом имеют ряд трудностей по сравнению с проводными, а именно:

- используемый механизм случайного доступа к каналу *CSMA/CA* не гарантирует доставку в заранее известное время, снижает помехозащищенность;
- влияние электромагнитных помех;
- падает надежность связи из-за появления объектов, вносящих затухание, отражение, преломление или рассеяние радиоволн;
- ограничивается дальность связи без использования ретрансляторов (обычно не более 100 м внутри помещений);
- падение пропускной способности сети при увеличении количества одновременно работающих станций;
- возможность утечки информации, а следовательно, возможность незаметного управления технологическим процессом враждебными лицами.

Основными путями решения указанных проблем являются:

- применение широкополосной передачи сообщений;
- применение цифровых методов модуляции;
- замена батарей на альтернативные источники энергии;
- кодирование информации высокоизбыточными кодами;
- повторение пакетов и применение мажоритарного декодирования;
- использование чередования (перемещения, перестановку) передаваемых битов;
- применение скремблирования;
- использование обратных связей;
- использование пространственно разнесенных антенн;
- применение поточных и блочных методов шифрования данных;
- установление подлинности личности с помощью идентификации имени пользователя и пароля.

Далее рассмотрим некоторые особенности функционирования сетей *Bluetooth*, *ZigBee* и *Wi-Fi*.

3.4.2 *Bluetooth*

Bluetooth (www.bluetooth.com) был спроектирован на базе стандарта *IEEE* 802.15.1 специально для замены при соединении различных устройств офисной и бытовой техники с использованием частотного диапазона 2,4 ГГц [17]. В системах автоматизации *Bluetooth* удобен для записи программ в ПЛК, дистанционного считывания показателей с накопителей информации. Он организован в виде пикосетей (*piconet*), в которых одно ведущее устройство осуществляет взаимодействие не более чем с семью ведомыми. Ведомые устройства могут взаимодействовать друг с другом только через ведущее.

В *Bluetooth* используется широкополосная модуляция с программной перестройкой несущей частоты типа *FHSS*. Если пикосети расположены близко одна от другой, то они могут влиять друг на друга, поскольку между ними нет никакой синхронизации. Чтобы уменьшить вероятность взаимовлияния, используется адаптивный метод скачкообразного изменения частоты.

На канальном уровне используются два типа пакетов данных: *ACL* (*Asynchronous Connection Less* – асинхронный без прямого соединения каналов) и *SCO* (*Synchronous Connection-Oriented* – синхронный с прямым соединением). *ACL*-пакеты используются совместно с проверкой контрольной суммы (*CRC*). Если контрольные суммы приемника и передатчика не совпадают, запрашивается повторная передача пакета.

Пакеты *SCO* поддерживают трафик реального времени путем резервирования временных слотов.

Основные характеристики *Bluetooth*:

- класс 1 – до 100 мВт (максимальная дальность на открытом пространстве составляет до 100 м);
- класс 2 – до 2,5 мВт (максимальная дальность на открытом пространстве составляет до 100 м);

- класс 3 – до 1мВт (максимальная дальность на открытом пространстве составляет до 100 м).

Можно выделить следующие достоинства технологии *Bluetooth*: малые размеры оборудования, простота использования, безопасность передачи информации (благодаря аутентификации и кодированию), хорошая поддержка стандартов. К недостаткам можно отнести невозможность построения сетей сложной конфигурации.

3.4.3 ZigBee и IEEE 802.15.4

Основной областью применения *ZigBee* и *IEEE 802.15.4* является передача информации от движущихся и вращающихся частей механизмов (конвейеров, роботов), промышленные системы управления и мониторинга, беспроводные сети датчиков, отслеживание маршрутов движения и местоположения имущества и инвентаря, «интеллектуальное» сельское хозяйство, системы охраны [26].

Устройства *ZigBee* используются в условиях, когда *Bluetooth* оказывается слишком дорогим и не требуется высокая скорость передачи.

ZigBee, как и *Bluetooth*, использует нелицензируемый диапазон 2,4 ГГц, который разделен на 11–26 каналов шириной по 5 МГц каждый.

Модель *OSI* сети *ZigBee* представлена в таблице 3.5. Она включает в себя следующие уровни: физический (*PHY*); канальный, состоящий из подуровня доступа к среде передачи *MAC* и *LLC*, которые определяются стандартом *IEEE 802.15.4*; сетевой *NWK (NetWork)*; уровень *APL*, состоящий из подуровня поддержки приложений (*Application Support sub-layer, APS*), подуровня объектов устройств *ZigBee (ZigBee Device Object, ZDO)* и объектов *Application Objects*, определяемых изготовителем *ZigBee*-устройств.

Подуровень *MAC* управляет доступом к радиоканалу, используя метод *CSMA/CA*. Он также отвечает за передачу маячковых фреймов, синхронизацию и обеспечение надежных методов передачи информации. Подуровень *SSCS* (от англ. *Service Specific Convergence Sublayer* – подуровень сближения специфических сервисов) выполняет роль интерфейса между подуровнями *LLC* и *MAC*. Подуровень *LLC* выполняет связь сетевого уровня с уровнем *MAC*.

Уровень *NWK* использует методы, обеспечивающие:

- регистрацию в сети нового устройства и исключение его из сети;
- обеспечение безопасности при передаче фреймов;
- указание маршрута фрейма к месту назначения;
- прокладку маршрутов между устройствами в сети;
- обнаружение в сети ближайших соседей;
- запоминание необходимой информации о соседних узлах.

Таблица 3.5 – Модель *OSI* сети *ZigBee*

Уровень	<i>OSI</i> -модель	Сеть	Функции
7	Прикладной	<i>APL (APS, ZDO и Application Objects), ZigBee</i>	Передача сообщений, обнаружение устройств, определение роли устройств
6	Уровень представления	–	–
5	Сеансовый	–	–
4	Транспортный	–	–
3	Сетевой	<i>NWK ZigBee</i>	Безопасность, маршрутизация
2	Канальный (передачи данных)	<i>LLC IEEE 802.15.4 SSCS IEEE 802.15.4 MAC IEEE 802.15.4</i>	<i>CSMA/CA</i> , передача маячков, синхронизация
1	Физический	<i>PHY IEEE 802.15.4</i>	Радиоканал 2,4 ГГц

В *ZigBee* имеются три типа устройств:

- координатор – формирует топологию сети и может устанавливать мосты с сетями (в каждой сети *ZigBee* имеется только один координатор);
- маршрутизатор – работает как промежуточное звено, передавая в нужном направлении данные других устройств;
- устройство – передает данные координатору или маршрутизатору и не может связываться с аналогичными ему устройствами.

Уровень *NWK* координатора отвечает за организацию новой сети, когда это нужно и назначение адресов новым устройствам, подключаемым к сети.

Подуровень *APS* уровня приложений обеспечивает:

- обслуживание таблиц для связывания устройств сети на основе информации о необходимости и возможности связывания;
- передачу сообщений между связанными устройствами;
- определение группового адреса устройств, удаление и фильтрацию сообщений с групповыми адресами;
- отображение 64-битного адреса в 16-битный;
- фрагментацию, перекомпоновку и транспортировку данных.

Подуровень *ZDO* обеспечивает:

- определение роли устройств в сети (координатор, маршрутизатор или оконечное устройство);
- инициирование или ответ на запрос соединения;
- защиту информации;
- обнаружение устройств в сети и определение, какой сервис они предоставляют.

Топология *ZigBee*-сети поддерживается уровнем *NWK* и может иметь форму звезды, дерева или ячеистой сети.

Более подробное описание физического, сетевого и уровня приложений можно найти в [26].

3.4.4 Wi-Fi и IEEE 802.11

Основное назначение технологии *Wi-Fi* (от англ. *Wireless Fidelity* – беспроводная точность) – беспроводное расширение сетей *Ethernet* [17]. Она используется также там, где нежелательно или невозможно использовать проводные сети.

Модель *OSI* для стандартов *Wi-Fi* и *IEEE 802.11* показана в таблице 3.6. Основное назначение физических уровней – обеспечение интерфейса с беспроводной средой передачи (с эфиром), а также оценка состояния эфира и взаимодействие с уровнем *MAC*.

Физический уровень состоит из двух подуровней:

- *PLCP* (*Physical Layer Convergence Protocol*) выполняет процедуру отображения *PDU* уровня *MAC* фрейм-формата *FHSS* или *PSSS*. Эта процедура выполняет передачу, обнаружение скачкообразного изменения несущей частоты или широкополосной модуляции с прямым расширением спектра и прием сигнала;

- *PMD* (*Physical Medium Dependent*) – подуровень, зависящий от среды передачи. Этот уровень будет различным для разных скоростей передачи и разных стандартов из серии 802.11. Подуровень *PMD* обеспечивает данные и сервис для подуровня *PLCP* и функции радиопередачи и приема, результатом которых является поток данных, информация о времени, параметры приема.

Таблица 3.6 – Уровни модели *OSI* для *Wi-Fi* и *IEEE 802.11*

Уровень	<i>OSI</i> -модель	Сеть	Функции
7	Прикладной	–	–
6	Уровень представления	–	–
5	Сеансовый	–	–
4	Транспортный	–	–
3	Сетевой	–	–
2	Канальный (передачи данных)	Подуровень <i>LLC</i>	–
		Подуровень <i>MAC</i>	–
1	Физический	Подуровень <i>PLCD</i>	Беспроводная передача, оценка состояния эфира
		Подуровень <i>PMD</i>	

Основным рабочим состоянием подуровня *PLCP* является обнаружение несущей и оценка занятости канала. Для выполнения передачи *PLCP* переключает *PMB* из режима «прием» в режим «передача» и посылает элемент данных *PPDU* (*PLCP Data Unit*).

Физический уровень выполняет скремблирование, кодирование и чередование.

Передача сигналов по радиоканалу выполняется двумя методами: *UHSS* – скачкообразным изменением несущей частоты и *DSSS* – прямым расширением спектра сигнала. При этом используется относительная фазовая модуляция с применением кодов Баркера (логическая «1» кодируется последовательностью 11100010010, а «0» – инверсией «1»), комплементарных кодов и технологии двойного сверхточного кодирования.

Wi-Fi 802.11g на скорости 1 и 2 Мбит/с использует относительную фазовую модуляцию *DBPSK*. При скорости передачи 2 Мбит/с используются те же методы, что и при скорости 1 Мбит/с, однако для увеличения пропускной способности канала используется четыре разных значения фазы (0, $\pi/2$, $3\pi/4$, π) для фазовой модуляции несущей.

Протокол 802.11b использует дополнительно скорости передачи 5,5 и 11 Мбит/с. На этих скоростях передачи вместо кодов Баркера используются комбинаторные коды.

Wi-Fi использует метод случайного доступа к сети *CSMA/CA*, в котором для снижения вероятности коллизий использованы следующие принципы:

- прежде чем станция начнет передачу, она сообщает, как долго она будет занимать канал связи;

- следующая станция не может начать передачу, пока не истечет зарезервированное ранее время;

- участники сети не знают, принят ли их сигнал, пока не получают подтверждение об этом;

- если две станции начали работать одновременно, они смогут узнать об этом только по тому факту, что не получают подтверждение о приеме;

- если подтверждение не получено, участники сети выжидают случайный промежуток времени, чтобы начать повторную передачу.

Дальность связи средствами *Wi-Fi* сильно зависит от условий распространения электромагнитных волн, типа антенны и мощности передатчика. Типовые значения, указываемые изготовителями *Wi-Fi*-оборудования, составляют 100–200 м в помещении и до нескольких километров на открытой местности с применением внешней антенны и при мощности передатчика 50–100 мВт.

Стандарт *IEEE* 802.11 устанавливает три варианта топологии сетей: независимые базовые зоны обслуживания (*Independent Basic Service Sets, IBSS*); базовые зоны обслуживания (*Basic Service Sets, BSS*); расширенные зоны обслуживания (*Extended Service Sets, ESS*).

Под зоной обслуживания здесь понимается набор логически сгруппированных устройств. Каждая зона обслуживания имеет свой идентификатор (*Service Set Identifier, SSID*). Станция-приемник использует *SSID* для определения того, из какой зоны обслуживания приходит сигнал.

В архитектуре *IBSS* станции связываются непосредственно одна с другой без использования точки доступа и без возможности подсоединения к проводной локальной сети. Зона обслуживания *SSID* используется обычно для объединения в сеть малого количества станций, поскольку в ней не предусмотрена возможность ретрансляции сигнала для увеличения дальности связи и механизмы для решения проблемы скрытого узла.

При использовании *BSS* станции общаются друг с другом через общий центральный узел связи, называемый точкой доступа. Точка доступа обычно подключается к проводной локальной сети *Ethernet*. Расширенная зона обслужи-

вания получается при объединении нескольких *BSS* в единую систему посредством распределительной системы, в качестве которой может выступать проводная сеть *Ethernet*.

3.4.5 Сравнение беспроводных сетей

В таблице 3.7 сведены основные параметры трех рассмотренных беспроводных технологий. В ней отсутствуют данные о стандартах *WiMAX*, *EDGE*, *UWB* и многих других, которые не нашли широкого применения в промышленности автоматизации.

Таблица 3.7 – Сравнение трех ведущих беспроводных технологий

Параметр	<i>Bluetooth</i> и <i>IEEE</i> 802.15.4	<i>ZigBee</i> и <i>IEEE</i> 802.15.4	<i>Wi-Fi</i> и <i>IEEE</i> 802.15.4
Дальность, м	~10 (50–100 при применении антенн специальной конструкции)	10	~100–200
Скорость передачи, Мбит/с	0,723	0,250	1–2 до 54
Максимальное число участников сети	8	245	Не ограничено
Потребляемая мощность, мВт	10	1	50–100
Диапазон частот, ГГц	2,4	2,4	2,4
Повторная передача	Есть	Есть	<i>DCF</i> – нет, <i>PCF</i> и <i>HCF</i> – есть
Основное обозначение	Связь периферии с компьютером	Беспроводные сети датчиков	Беспроводное расширение <i>Ethernet</i>
Топология сети	Пикосеть	Звездообразная, древовидная, ячеистая	Базовые зоны
Вид модуляции	Программная перестройка частоты	Квадратурная фазовая	Относительная фазовая
Метод формирования широкополосного сигнала	Программная перестройка частоты	–	Программная перестройка частоты, прямое расширение спектра

3.4.6 Инфракрасный канал

Инфракрасная связь *IR (Infrared) Connection* (стандарт *IrDA* 1.1) позволяет осуществить беспроводную связь между двумя устройствами, находящимися друг от друга на расстоянии до нескольких метров (см. пункт 1.6.4).

В отличие от радиоканала инфракрасный (ИК) канал нечувствителен к электромагнитным помехам и может использоваться в производственных условиях. Различные ИК-системы позволяют обмениваться данными со скоростями от 115,2 кбит/с до 5 Мбит/с.

В качестве передатчика используется светодиод с эффективной длиной волны $\lambda = 880$ нм, в качестве приемника – *PIN*-диод. Наиболее часто используется топология «шина».

Недостатком ИК-канала является трудность обеспечения секретности передаваемой информации.

3.5 Технологии высокоэффективного использования линий связи

Для высокоэффективного использования линий связи и надежности функционирования систем телемеханики применяют цифровые линии, параллельную передачу данных и синхросигналов, а также резервирование устройств, построенных на современной элементной базе. Рассмотрим более подробно указанные выше технологии и функциональные блоки систем.

3.5.1 Технологии высокоскоростной передачи данных по локальным линиям связи

Поскольку в ближайшем будущем в подавляющем большинстве линий, служащих для соединения модемов пользователей с телефонной сетью, будет по-прежнему использоваться металлическая витая пара, основные усилия разработчиков направлены на создание методов, позволяющих осуществлять высокоскоростную передачу данных по локальным линиям связи. Результатом этих усилий стало появление семейства технологий, которые получили название *DSL* (от англ. *Digital Subscriber Lines* – цифровые абонентские линии). Как известно, полоса пропускания речевого канала равна приблизительно 3000 Гц. Однако в действительности диапазон частот, поддерживаемый витой парой, с помощью которой обычно соединяется модем пользователя с АТС, значительно шире: в некоторых линиях доступа его размер достигает 1 МГц. Данной особенностью и решили воспользоваться разработчики технологий *DSL*. При передаче сигналов речевого диапазона на АТС применяются фильтры, поэтому можно использовать более широкий диапазон частот, которые поддерживаются линиями связи, а перед поступлением сигнала в телефонную сеть эти частоты отфильтровывать. Такая технология для передачи речи по-прежнему позволяет задействовать канал речевого диапазона.

При использовании технологий *DSL* скорость передачи данных зависит от таких факторов, как расстояние между модемом пользователя и АТС, категория витой пары (диаметр провода), а также метод модуляции, лежащий в основе работы *DSL*-модемов. Характеристики различных видов кабелей для высокоскоростной передачи приведены в приложении А.

С начала 1997 года была разработана целая серия технологий *DSL*, которые можно разбить на шесть основных категорий (таблица 3.8).

При использовании асимметричной *DSL* (*ADSL*) для передачи сигналов по направлению от модема пользователя к АТС выделяется полоса частот, которая несимметрична по отношению к полосе частот, предназначенной для передачи данных в противоположном направлении.

Технология *G.Lite* представляет собой более низкоскоростную версию асимметричной *DSL*. В ее основе лежит та же схема модуляции, что и в *ADSL*. Теоретически нет необходимости в установке пользователем разделителя, поскольку данной технологией предусмотрена поддержка низких значений скорости. Но в связи с тем что соединение модема пользователя с АТС иногда все еще производится посредством устаревших медных проводов, для применения этой технологии обычно требуется наличие у пользователя разделителя.

Таблица 3.8 – Основные категории *DSL*

Название категории	Скорость передачи данных от модема	Скорость передачи данных к модему
Асимметричная <i>DSL</i> (<i>Asymmetrical Digital Subscriber Line, ADSL</i>)	1 Мбит/с	8 Мбит/с
Высокоскоростная <i>DSL</i> (<i>High Bit Rate Digital Subscriber Line, HDSL</i>)	1,544/2,048 Мбит/с	1,544/2,048 Мбит/с
<i>G.Lite</i>	512 кбит/с	1,4 Мбит/с
<i>DSL</i> с настраиваемой скоростью передачи (<i>Rate Adaptive Digital Subscriber Line, RDSL</i>)	784 кбит/с	4 Мбит/с
Симметричная <i>DSL</i> (<i>Symmetric Digital Subscriber Line, SDSL</i>)	2 Мбит/с	2 Мбит/с
Сверхскоростная <i>DSL</i> (<i>Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line, VDSL</i>)	1,5 Мбит/с	52 Мбит/с

Высокоскоростную *DSL* (*HDSL*) можно рассматривать как эквивалент четырехпроводных каналов *T1* и *E1*. В ней полоса пропускания, выделенная для передачи данных в одном направлении, симметрична полосе пропускания, которая выделяется для передачи данных в другом направлении. При использовании технологии *HDSL* модемы пользователей могут находиться на большом расстоянии от АТС, причем наличия повторителей для этого не требуется. Поэтому данная технология быстро получила признание у телефонных компаний, которые ранее в локальных линиях связи были вынуждены использовать повторители, за счет чего повышалась стоимость предоставляемых услуг.

DSL с настраиваемой скоростью передачи (*RDSL*) является одной из последних версий *DSL* и позволяет модемам не только автоматически настраиваться на максимально допустимую для имеющейся локальной линии связи скорость передачи, но и работать с фиксированной скоростью.

В симметричной *DSL* (*SDSL*), так же как и в *HDSL*, полоса пропускания, выделенная для передачи данных в одном направлении, симметрична полосе пропускания, выделенной для передачи данных в другом направлении. Однако в

отличие от *HDSL*, где используется четыре пары проводов, в *SDSL* данные передаются по одной паре проводов.

При использовании сверхскоростной *DSL* (*VDSL*) достигается наивысшая скорость передачи данных по направлению от АТС к модему пользователя – 52 Мбит/с. Однако эта технология применима только в тех случаях, когда данные передаются на небольшие расстояния – меньше трехсот метров.

Из шести перечисленных выше технологий наибольшее распространение получила *ADSL*, т. к. она идеально подходит и для использования в глобальной сети, и для работы с асимметричными приложениями (приложениями, при функционировании которых используется асимметричная передача). В настоящее время большинство телефонных компаний предлагают абонентам именно эту технологию, поэтому рассмотрим ее более детально.

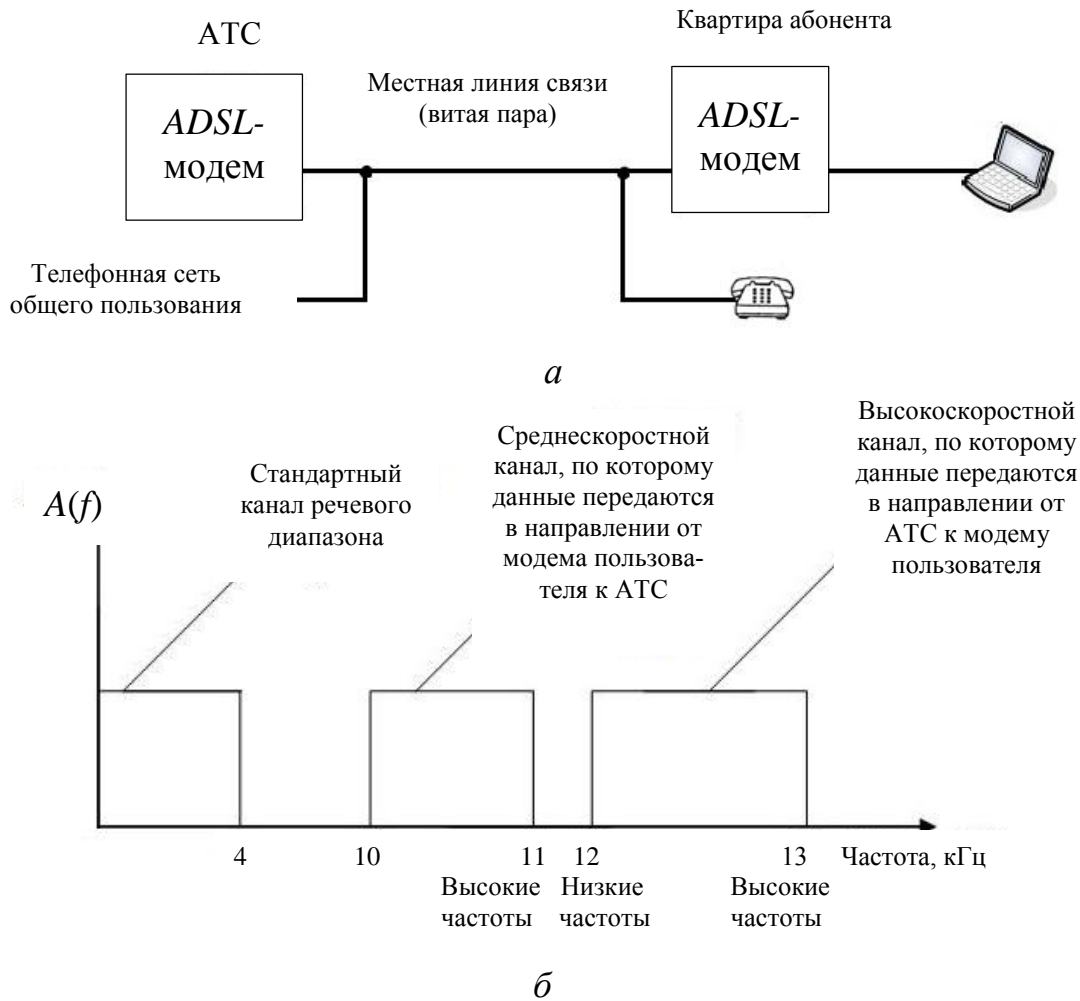
Для использования *ADSL*, равно как и для применения других технологий *DSL*, требуется наличие двух модемов, соединенных локальной линией связи, – модема пользователя и модема, расположенного на АТС. В настоящее время на рынке имеется несколько моделей модемов, поддерживающих технологию *ADSL*. Основное различие между ними состоит в применяемых методах модуляции, а также в том, что для использования некоторых модемов требуется установить специальные фильтры, с помощью которых устраняется негативное влияние на речевой сигнал частот, предназначенных для передачи данных.

Схема соединения через местную линию связи модемов, работающих на основе технологии *ADSL*, изображена на рисунке 3.3, *a*. Ниже показаны полосы частот, выделенные из диапазона, поддерживаемого локальной линией связи. При этом местную линию связи можно разделить на три канала: высокоскоростной, посредством которого данные передаются в направлении к модему пользователя (для него выделена большая часть полосы пропускания); среднескоростной, по которому данные пересылаются в обратном направлении; стандартный канал речевого диапазона (с полосой пропускания 4 кГц).

Фактическая скорость передачи данных, которую можно достичь в местной телефонной линии (см. рисунок 3.3, *a*), зависит от длины абонентской линии, диаметра используемого в ней провода, наличия или отсутствия отводов, а также от уровня помех. Поскольку коэффициент затухания сигнала прямо пропорционален длине абонентской линии и частоте и обратно пропорционален диаметру используемого провода, при сравнении производительности двух абонентских линий следует учитывать эти параметры. В таблице 3.9 перечислены значения скорости, с которой могут обмениваться данными модемы, поддерживающие технологию *ADSL*, и параметры, необходимые для достижения этих значений.

На рисунке 3.3, *a* в качестве оборудования АТС изображен только один модем, поддерживающий технологию *ADSL*, на самом деле для обеспечения максимальной эффективности работы используется несколько модемов, смонтированных в стойке. Кроме того, на узле связи с помощью устройства, которое получило название мультиплексор доступа через цифровые абонентские линии (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer, DSLAM*), выполняется объединение трафика, поступающего от группы модемов. Большинство устройств *DSLAM*

поддерживается сразу несколько категорий *DSL*, таких как *ADSL*, *HDSL*, *G.Lite* и *SDSL*, что дает этим устройствам возможность работать с трафиком, поступающим от модемов абонентов всех перечисленных служб. Во многих устройствах *DSLAM* используется протокол *ATM*, но в отдельных из них для передачи данных применяется протокол *IP*. Однако независимо от используемого протокола основной функцией устройства *DSLAM* является объединение потоков данных, которые поступают из нескольких абонентских линий, и передача их в виде одного потока Всемирной сети, к которой устройство *DSLAM* последовательно подключено через высокоскоростной канал.



a – схема соединения модемов; *б* – используемые полосы частот

Рисунок 3.3 – Технология *ADSL*

Таблица 3.9 – Параметры передачи данных, поддерживаемые технологией *ADSL*

Скорость передачи данных		Тип провода	Длина абонентской линии, футы (метры)
от модема к АТС, кбит/с	от АТС к модему, Мбит/с		
64–384	2,0	24 AWG	18 000 (6000)
64–384	2,0	26 AWG	15 000 (4500)
64–384	8,0	24 AWG	12 000 (3600)
64–384	8,0	26 AWG	9000 (2700)

В *ADSL*-модемах применяются две конкурирующие технологии модуляции: дискретная многотональная модуляция (*Discrete Multitone, DMT*) и амплитудно-фазовая модуляция без несущей (*Carrierless Amplitude Phase, CAP*). Модуляция *DMT* является стандартом *ANSI*, в то время как модуляция *CAP* представляет собой запатентованную технологию, разработанную корпорацией *Paradyne*. Применение каждой из этих технологий позволяет вести высокоскоростную передачу данных, используя мультиплексирование с разделением частот (*FDM*), посредством которого диапазон частот, поддерживаемый местной линией связи, подразделяется по частотам на независимые каналы. Каналы, полученные при таком разделении, показаны на рисунке 3.3, б. При использовании *FDM* создается три канала: первый – для передачи данных в направлении от АТС к модему пользователя, второй – для передачи информации в обратном направлении, третий – для передачи речевой информации. В свою очередь, оба канала, предназначенные для пересылки данных, могут дополнительно подразделяться на подканалы с помощью мультиплексирования с разделением времени. Эти подканалы можно использовать для одновременной передачи данных нескольким цифровым устройствам, например, компьютеру и системе видеоконференций.

3.5.2 Параллельная передача данных и синхросигнала по группе витых пар проводов

Сигналы можно передавать по нескольким витым парам, выделив для каждого одну витую пару. В схеме, приведенной на рисунке 3.4, трехразрядный параллельный код *DIN* и сопровождающий его синхросигнал *CIN* передаются по четырем витым парам проводов к удаленному абоненту. Выходной код *DOUT* и принятый синхросигнал *COUT* совпадают с входными с точностью до задержки передачи.

При увеличении разрядности кода *DIN* такое решение становится слишком неэкономичным. Для уменьшения числа витых пар проводов можно воспользоваться схемой, приведенной на рисунке 3.5 [20].

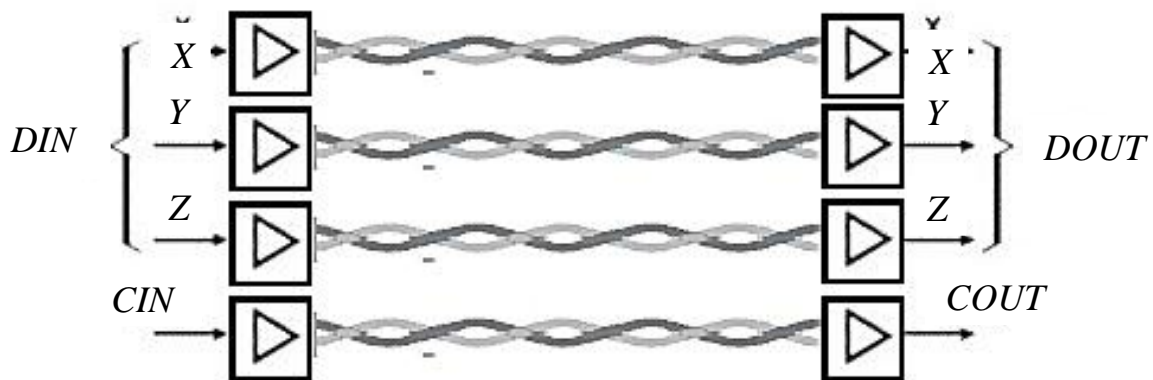


Рисунок 3.4 – Схема параллельной передачи данных и синхросигнала по витым парам проводов без применения кодирования

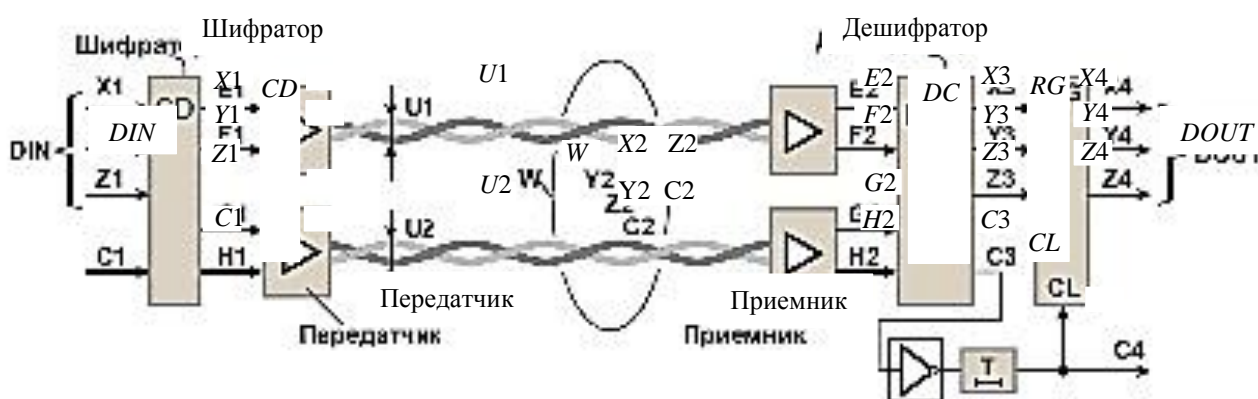


Рисунок 3.5 – Схема параллельной передачи кодированных данных и синхросигнала по витым парам проводов

В этой схеме применено трехуровневое кодирование сигнала в линии. Напряжение U_1 (U_2) между проводами витой пары может быть отрицательным, нулевым или положительным (сокращенно: $-$, 0 , $+$). Это напряжение формируется передатчиком в зависимости от сочетания битов $E_1 F_1$ ($G_1 H_1$) на его входах следующим образом. При $E_1 = F_1 = 0$ ($G_1 = H_1 = 0$) напряжение U_1 (U_2) нулевое, при $E_1 = 0, F_1 = 1$ ($G_1 = 0, H_1 = 1$) – отрицательное, при $E_1 = 1, F_1 = 0$ ($G_1 = 1, H_1 = 0$) – положительное. Код $E_1 F_1 G_1 H_1$ формируется шифратором из входного кода $X_1 Y_1 C_1$ (данные, синхросигнал), как показано в левой части таблицы 3.10.

Приемники и дешифратор осуществляют обратное преобразование сигналов, представленных напряжениями U_1 и U_2 в линии. В этом можно убедиться сопоставлением левой и правой частей таблицы – они симметричны. В центральной части таблицы показаны девять возможных комбинаций сигналов в линии. Первая комбинация ($0 0$) выбрана для отображения единичного состояния синхросигнала. Символы «X» в таблице 3.10 означают, что при $C_1 = 1$ входные сигналы DIN не воспринимаются шифратором (символ соответствует произвольному значению бита). Эти же символы в правой части таблицы показывают, что при

выдаче синхросигнала $C3$ выходные данные $X3$ $Y3$ $Z3$ не определены и не могут использоваться для выдачи абоненту. Остальные восемь комбинаций сигналов в линии распределены для отображения восьми состояний трехразрядного кода $X1$ $Y1$ $Z1$ при условии, что $C1 = 0$. Шифратор и дешифратор могут быть выполнены на основе ПЗУ, программируемой логики или построены из обычных логических элементов.

Таблица 3.10 – Состояния шифратора, линии связи и дешифратора при параллельной передаче трех бит данных и синхросигнала

Коды на входах и выходах шифратора								Сигналы в линии		Коды на входах и выходах дешифратора							
$C1$	$X1$	$Y1$	$Z1$	$E1$	$F1$	$G1$	$H1$	$U1$	$U2$	$H2$	$G2$	$F2$	$E2$	$Z3$	$Y3$	$X3$	$C3$
1	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0	–	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	0	0	+	0	1	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	0	–	0	0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	1	0	1	–	–	1	0	1	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	1	1	0	–	+	0	1	1	0	0	0	1	0
0	1	0	1	1	0	0	0	+	0	0	0	0	1	1	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1	+	–	1	0	0	1	0	1	1	0
0	1	1	1	1	0	1	0	+	+	0	1	0	1	1	1	1	0

Как следует из временных диаграмм, показанных на рисунке 3.6, сигналы, передаваемые по линии, поочередно отображают синхросигнал и данные. Пробразами этих зашифрованных тремя уровнями напряжения сигналов ($C2$, $X2$, $Y2$, $Z2$) в группе W являются сигналы на входах шифратора. Как уже отмечалось, группа выходных сигналов дешифратора не определена при наличии синхросигнала. Этот факт отмечен затемненными областями на временной диаграмме группы Q сигналов $X3$, $Y3$, $Z3$ на выходе шифратора.

Для устранения областей неопределенности этих сигналов применен параллельный регистр RG . Данные принимаются в него по положительному фронту сигнала $C4$, который формируется из сигнала $C3$ после его инвертирования и задержки на четверть периода. В результате сигналы $DOUT$ и $C4$ с некоторой задержкой повторяют сигналы DIN и $C1$.

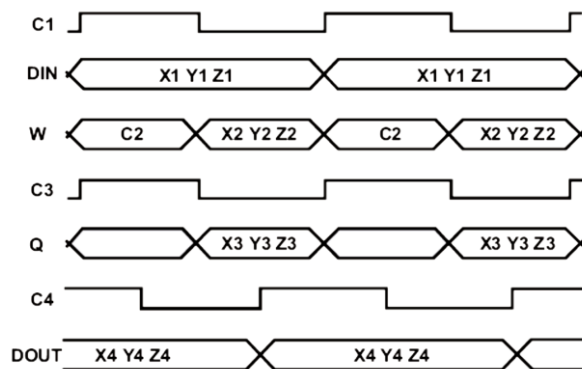


Рисунок 3.6 – Временные диаграммы передачи данных и синхросигнала

Описанный способ уменьшения числа витых пар проводов линии применим и к схемам с большей разрядностью. В общем случае при трехуровневом кодировании число состояний линии, содержащей N витых пар проводов, равно $3N$. С помощью этих состояний можно передать M -разрядный двоичный код DIN (см. рисунок 3.6), где $M = \lfloor \log_2 3N \rfloor$, квадратные прямые скобки обозначают целую часть заключенного в них числа. Так, при $N = 2, 3, 4, \dots, 10$ разрядность M передаваемого двоичного кода составляет 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 14, 15 (таблица 3.11). Напомним, что одно из избыточных состояний линии в приведенном ранее примере использовалось для кодирования единичного состояния синхросигнала.

Таблица 3.11 – Параметры перехода от троичного к двоичному представлению кодов

Число витых пар проводов N	Число состояний линии 3^N	Допустимая разрядность двоичного кода M	Число состояний двоичного кода 2^M	Избыточность троичного представления двоичного кода	
				абсолютная $3^N - 2^M$	относительная $((3^N - 2^M) / 3^N) 100\%$
2	9	3	8	1	11,1
3	27	4	16	11	40,7
4	81	6	64	17	21,0
5	243	7	128	115	47,3
6	729	9	512	217	29,8
7	2187	11	2048	139	6,3
8	6561	12	4096	2465	37,5
9	19683	14	16384	3299	16,8
10	59049	15	32768	26281	44,5

Из таблицы 3.11 следует, что при $N > 2$ в троичном представлении двоичного кода имеется избыточность, в основном значительная. Ее можно использовать для повышения информационной нагрузки на линию связи при передаче потока данных.

На рисунке 3.7 показан вариант схемы, который предусматривает использование избыточных состояний линии для построения дополнительного канала связи. Телекоммуникационная система, в которую включена схема передачи данных, содержит четыре оконечных устройства $DTE1-DTE4$, например, четыре компьютера. В процессе работы системы данные передаются из устройства $DTE1$ в устройство $DTE3$ по основному (первому) каналу. Одновременно с этим по дополнительному (второму) каналу данные передаются из устройства $DTE2$ в устройство $DTE4$. Для передачи данных в обратном направлении необходима вторая схема передачи данных, включенная встречно.

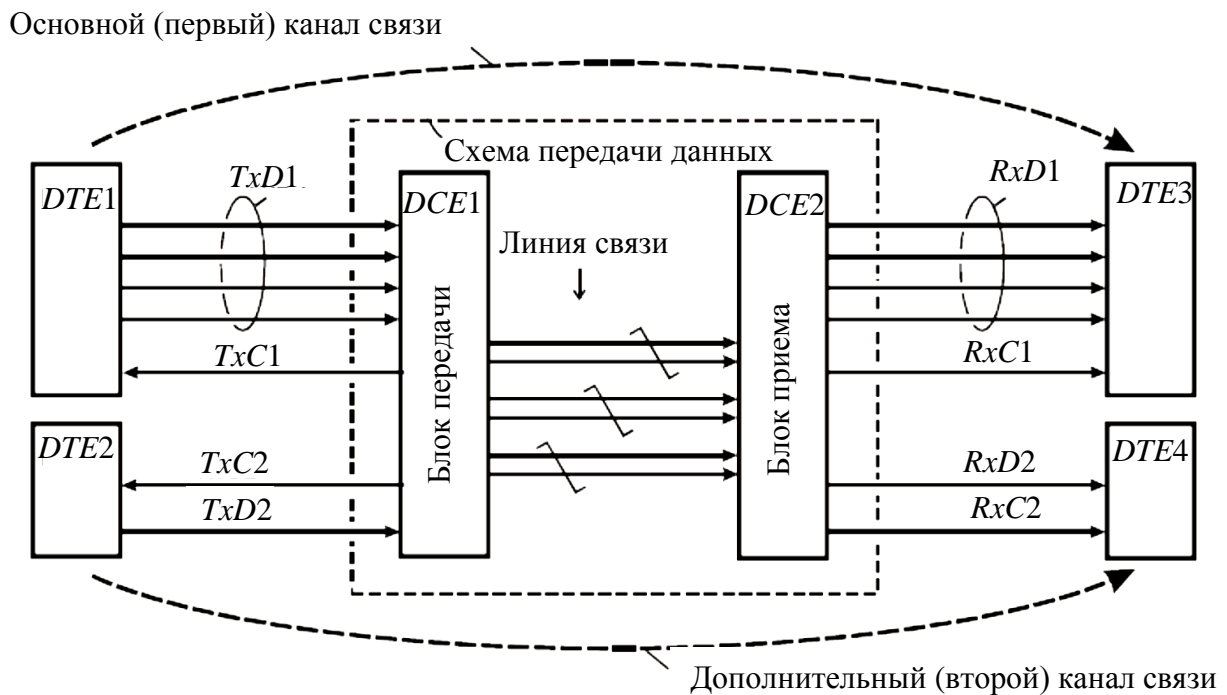


Рисунок 3.7 – Пример использования избыточных состояний линии для построения дополнительного канала связи

Сигнал $TxC1$ обеспечивает синхронное поступление данных $TxD1$ первого канала из устройства $DTE1$ в блок передачи данных $DCE1$. Сигнал $TxC2$ синхронизирует поступление данных $TxD2$ второго канала из устройства $DTE2$ в блок $DCE1$. Положительные фронты сигнала $TxC1$ задают границы битовых интервалов для каждого входного сигнала из группы $TxD1$. Положительные фронты сигнала $TxC2$ задают границы битовых интервалов сигнала $TxD2$. Отрицательные фронты сигналов $TxC1$ и $TxC2$ гарантируют истинность соответствующих данных $TxD1$ и $TxD2$. Аналогичные функции выполняют синхросигналы $RxC1$ и $RxC2$ сопровождения данных $RxD1$ и $RxD2$. Таким образом, поток данных по первому каналу связи имеет постоянную скорость в отличие от потока данных по второму каналу. Скорость передачи

битов по второму каналу зависит от кодов в первом канале и при случайном равномерном распределении этих кодов составляет 62,5 % скорости передачи четырехрядных слов данных по первому каналу.

3.5.3 Аппаратное резервирование

Резервирование в настоящий момент является единственным методом повышения надежного функционирования систем телемеханики. Здесь остановимся на основных понятиях резервирования, которые определены в ГОСТ 27.002–89 и ГОСТ Р МЭК 61508.

Резервирование – способ обеспечения надежности объекта за счет дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций.

Резерв – совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования.

Основной элемент – элемент объекта, необходимый для выполнения требуемых функций без использования резерва.

Резервный элемент – элемент, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего.

Резервируемый элемент – основной элемент, на случай отказа которого в объекте предусмотрены один или несколько резервных элементов.

Кратность резерва – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими элементов, выраженное несокращенной дробью. Например, $3/2$, где 3 – число резервных элементов, а 2 – число резервируемых элементов.

Дублирование – резервирование с кратностью резерва один к одному.

Нагруженный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента.

Облегченный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент.

Ненагруженный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента.

Основное отличие между нагруженным, облегченным и ненагруженным резервами состоит в длительности периода перехода на резерв.

Общее резервирование – резервирование, при котором резервируется объект в целом.

Существует два класса резервированных систем: системы с голосованием и системы с замещением.

Система с голосованием. Рассмотрим принцип работы данной системы на примере резервирования датчиков измерения параметров контролируемого технологического процесса (рисунок 3.8).

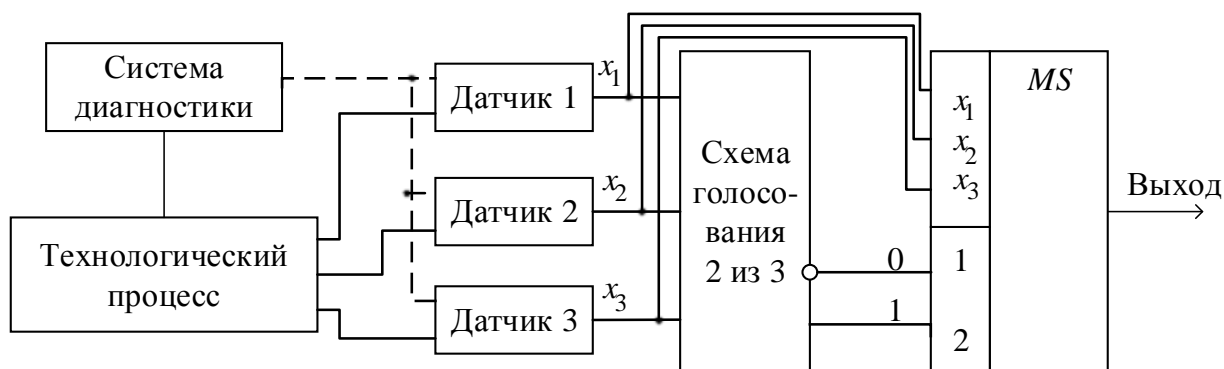


Рисунок 3.8 – Система с голосованием два из трех

В данной телеметрической системе вместо одного датчика используют три, которые контролируют один и тот же параметр в одной и той же области технологического процесса. В схему голосования поступают результаты измерений от трех датчиков, допустим $x_1 = 71,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $x_2 = 60,9 \text{ }^\circ\text{C}$, $x_3 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$. Схема голосования определяет датчик с номером, показания которого находятся между минимальным и максимальными значениями (в данном случае – датчик 1, где $x_1 = 71,8 \text{ }^\circ\text{C}$) и через мультиплексор показание этого датчика выдается потребителю.

Таким образом, при резервировании с голосованием нет основных и резервных элементов, т. к. они равноправны, работают одновременно и выполняют одну и ту же функцию, а выбор одного сигнала из нескольких осуществляется схемой голосования.

В системах с голосованием не требуется контроль работоспособности элементов для своего функционирования, но необходимо иметь подсистему диагностики для сокращения времени восстановления отказавших элементов [29].

Система с замещением. В данных системах содержатся как основные устройства, блоки, элементы, так и резервные. Переход с основного устройства на резервное осуществляется по результатам подсистемного контроля работоспособности как основного, так и резервного устройств. На рисунке 3.9 показан пример нагруженного резерва устройства телемеханики.

Схема контроля работоспособности контролирует такие параметры и события, как, например, обрыв линии связи, короткое замыкание, величину напряжения и тока питания, температуру выходных каскадов, выход сигналов за границы динамического диапазона, срабатывания блокировок и защит, целостность линий связи с модулями ввода-вывода, ошибки контрольной суммы, зависание вычислительных устройств и т. п. Перечень процедур контроля программируемых логических контроллеров приведен в ГОСТ Р 51841.

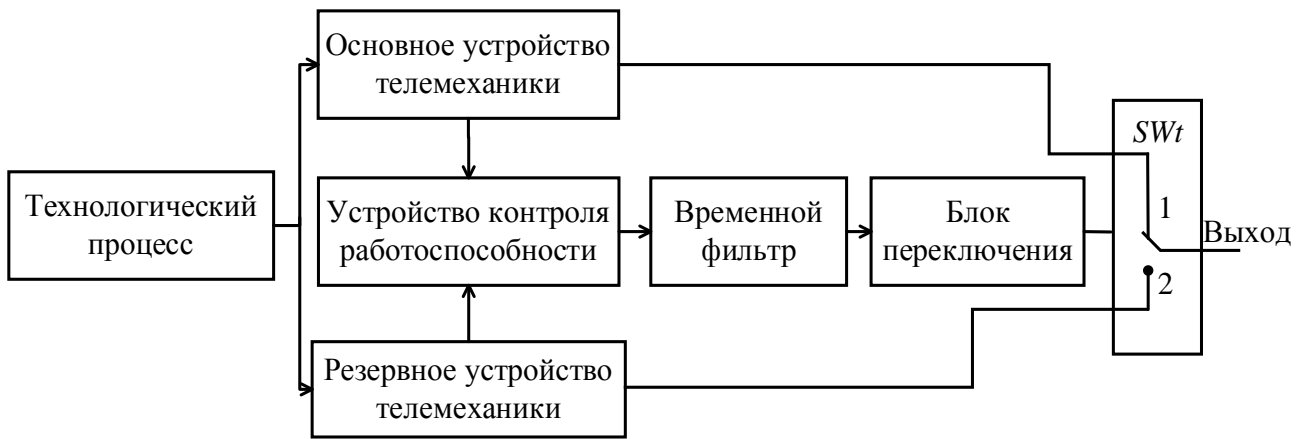


Рисунок 3.9 – Пример нагруженного резерва устройства телемеханики

И если хотя бы один из параметров выходит за пределы установленного, устройство контроля работоспособности формирует управляющий сигнал, который через блок переключения переводит ключ SW_t из положения 1 в положение 2, тем самым отключается основное устройство телемеханики и подключается резервное.

Следует отметить, что диагностическая информация должна выводиться на пульт диспетчера и одновременно поступать в журнал ошибок о вышедшем из строя устройстве. Для исключения ошибочного перехода на резерв по причине сбоя в устройстве контроля используют временной фильтр, который разрешает переключение только при условии, что состояние неисправности длится не менее установленного времени.

3.6 Устройства защиты от ошибок

3.6.1 Основные типы

Наибольшей эффективностью в симплексных системах передачи обладает способ защиты от ошибок, основанный на использовании кодов с исправлением ошибок. В таких системах передаваемый блок кроме информационных единичных элементов, полученных от источника информации, содержит и проверочные биты, которые формируются кодирующим устройством на основании информационных разрядов по определенным правилам. На приемной стороне декодером по тем же правилам осуществляются аналогичные проверки, при которых учитываются и проверочные элементы. В результате проверки определяется номер позиции в принятом блоке, значение которой необходимо в процессе исправления проинвертировать. Вероятность ошибочного приема символа зависит не только от вероятности ошибки в дискретном канале, но и от применяемого кода.

В односторонних системах передачи при выборе корректирующего кода для устройств защиты от ошибок (УЗО) приходится рассчитывать на худшее состояние канала, т. е. избыточность в таких системах является постоянной, независимо от того, имеются ошибки в канале или нет, и пропускная способность канала используется неэффективно. Вторым недостатком систем с исправлением ошибок является резкое возрастание сложности аппаратуры с увеличением числа исправляемых ошибок. Существенное снижение аппаратурных затрат достигается применением в качестве кодирующих и декодирующих устройств микропроцессоров.

К дуплексным УЗО относятся устройства, в которых повышение верности принимаемой информации достигается за счет введения обратной связи. Они, в свою очередь, делятся на системы с решающей (РОС), информационной (ИОС) и комбинированной (КОС) обратной связью. Механизм повышения верности в этих системах состоит в том, что при обнаружении искажений в принятом сообщении происходит запрос блока, в котором есть один или несколько неправильно принятых знаков. В системах с РОС передаваемые данные кодируются избыточными кодами, позволяющими обнаруживать одиночные ошибки или пачки (группы) ошибок. Решение о необходимости повторения передачи блока информации, в котором обнаружена ошибка, принимается приемником на основании анализа поступившей последовательности. В случае обнаружения в принятом блоке ошибок он стирается, и по каналу обратной связи (ОС) приемная станция посылает сигнал «Запрос», на основании которого передатчик высылает этот же блок. При безошибочном приеме блока данные поступают потребителю, а по каналу ОС передается сигнал «Подтверждение».

В УЗО с ИОС нет необходимости вводить избыточность в передаваемые данные. Двоичная последовательность, зафиксированная приемником, запоминается и затем по каналу ОС передается (вся или в виде укороченной кодовой комбинации, содержащей определенные признаки всей последовательности) на передающую сторону. Полученная по каналу ОС информация анализируется передающей станцией, которая по результатам анализа принимает решение о передаче следующего блока либо о повторении ошибочно принятого. Это решение сообщается на приемную сторону, и на его основании полученная информация выдается потребителю или стирается.

УЗО с КОС представляют собой сочетание информационной и решающей ОС. В них решения о необходимости повторной передачи могут приниматься как на передающей, так и на приемной сторонах, а по каналу обратной связи передаются информационные элементы или сигналы «Запрос» и «Подтверждение».

3.6.2 Алгоритм функционирования УЗО

Если реализация УЗО предполагается аппаратно, то разработку алгоритма функционирования целесообразно производить параллельно с разработкой структурной схемы УЗО. Алгоритм определяет основные функции устройства и

последовательность их выполнения, а структурная схема представляет собой его техническую реализацию. Если УЗО реализовано на контроллерах, то блоки структурной схемы определяют, какие программы должны быть разработаны. Основные функции УЗО определяются сначала в общем виде. Приведем перечень основных функций, которые являются типовыми для всех видов УЗО:

- начальная установка блоков УЗО;
- прием, преобразование и контроль информации на передающей стороне, поступающей от источника, и выдача ее потребителю на приемной;
- обмен управляющими сигналами между отправителем и потребителем;
- генерирование тактовых импульсов и синхронизация (в случае работы без УПС);
- групповое фазирование (по циклам);
- формирование служебных символов начала и конца блока, номера блока, сигналов «Подтверждение», «Запрос», «Стирание» и др.;
- подсчет числа бит в блоке;
- формирование номеров блоков при передаче и проверка соответствия очередности их поступления на приемной стороне;
- кодирование и декодирование сообщений;
- формирование информационных блоков и хранение их в буферных накопителях передатчика и приемника до принятия решения о приеме их с заданной верностью;
- подсчет числа переданных подряд одних и тех же блоков;
- формирование сигналов аварийной ситуации и их индикация;
- индикация состояния аппаратуры.

В зависимости от конкретного типа устройства перечень функций может быть дополнен и расширен, а также возможно исключение части функций. Очевидно, что для реализации этих функций в УЗО с «жесткой логикой» должны находиться соответствующие блоки, а в программируемом – соответствующие подпрограммы.

Первую функцию реализует, например, блок начальной установки устройства, который формирует импульс установки всех остальных блоков в исходное состояние. Начальная установка аппаратуры производится после включения питания или при переключении режимов работы. Вторую функцию реализует блок приема и преобразования вводимого сообщения, который обеспечивает кратковременное хранение поступающих кодовых комбинаций (байт) и преобразование их в соответствующую форму (чаще всего в последовательный код). В этом блоке может происходить также согласование уровней сигналов, поступающих с ООД, с уровнями УЗО.

Устройство защиты от ошибок состоит из передающей и приемной частей, которые будут рассмотрены далее.

3.6.3 Структурная схема передающей части УЗО

Передающая часть содержит следующие устройства (рисунок 3.10): блок проверки преобразования информации (БППИ), буферный накопитель (БН), датчик номера блока (ДНБ), датчик служебных комбинаций (ДСК), кодер, форми-

рователи сигналов обмена с ООД и УПС (ФСО1 и ФСО2), блок начальной установки (БНУ), устройство управления (УУ), формирователь тактовых импульсов (ФТИ), блок аварийной сигнализации и индикации (БАСИ), счетчик числа повторных запросов (СПЗ), анализатор обратного канала связи (АОКС).

Основным блоком УЗО является УУ, которое управляет работой всех остальных блоков. Управляющие воздействия на выходе УУ вырабатываются на основе анализа входящих сигналов и зависят от режима работы УЗО и временной позиции в пределах синхронизирующего или информационного блока. Оно представляет собой управляющий автомат, выполненный на основе жесткой или программируемой логики.

УУ с жесткой логикой обычно строится на основе распределителей импульсов, а программируемые – на основе микропроцессорной техники. Переключение УУ происходит под действием тактовых импульсов, формируемых ФТИ, которые могут быть использованы для синхронизации УПС. В ФТИ также предусматривается возможность синхронизации от тактовых импульсов устройства преобразования сигналов (УПС).

Устройство защиты от ошибок с решающей обратной связью и безмаркерным способом группового фазирования работает следующим образом. В исходном состоянии обе части УЗО находятся в состоянии ожидания вызова. При поступлении запроса на передачу от источника информации УЗО обменивается управляющими сигналами с ООД и УПС в соответствии с техническими требованиями на стандартный стык. Для выработки необходимых сигналов обмена используются соответствующие формирователи ФСО1 и ФСО2. С помощью УПС передающей части в канал связи посылается сигнал вызова, после приема которого линия связи удаленной аппаратуры передачи данных (АПД) переключается с устройства автоматического выхода на вход УПС. Если АПД или ООД не готовы к процессу передачи данных, то включается сигнализация «Авария АПД» или «Авария ООД», а аппаратура переключается снова в режим ожидания вызова.

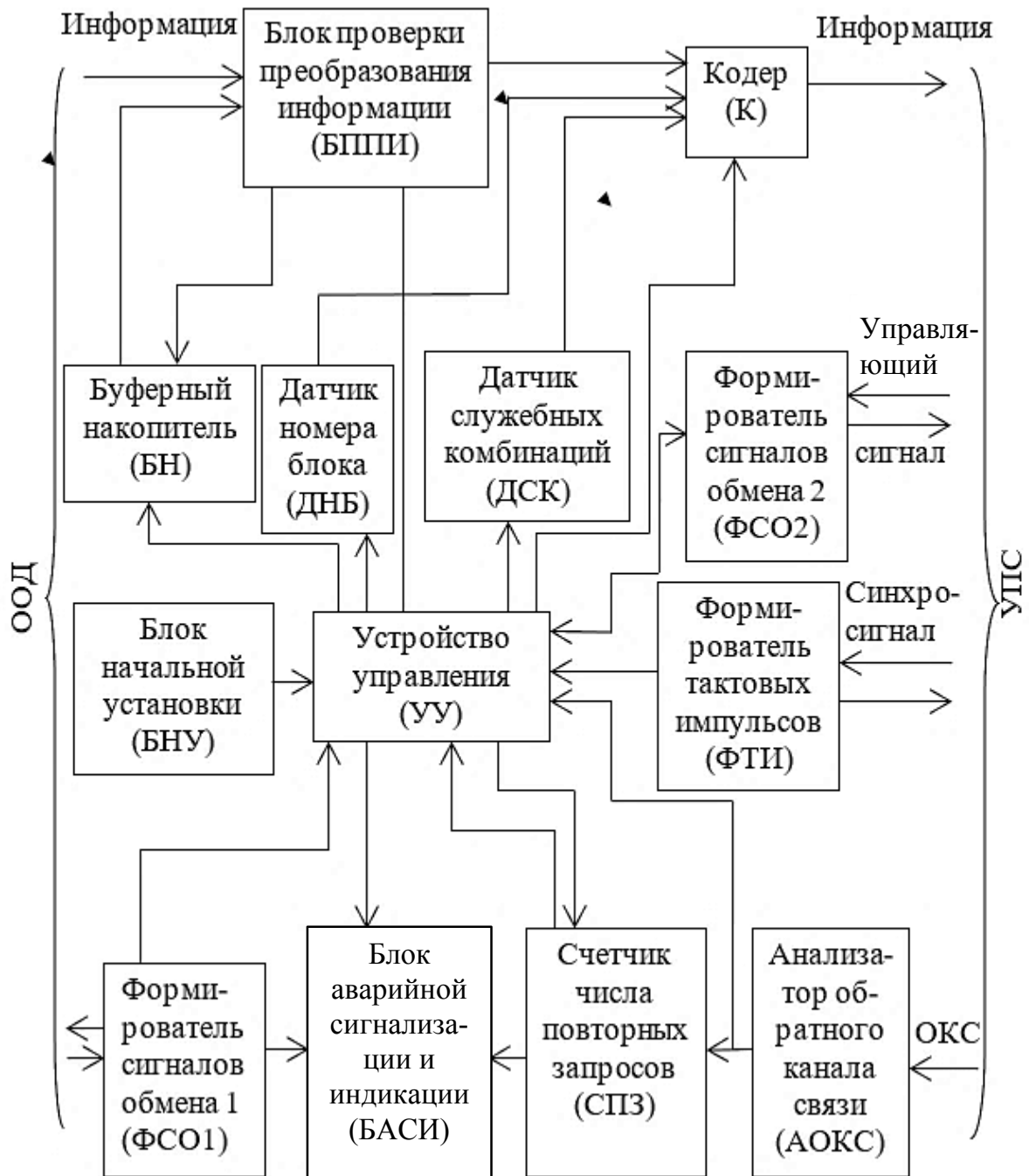


Рисунок 3.10 – Структурная схема передающей части устройства защиты от ошибок

При готовности АПД и ООД передатчик УЗО посылает в канал синхросигналы, которые используются для фазирований по циклу УУ приемника. Фазирующая последовательность формируется в передатчике датчиком ДСК, затем передается в канал связи и после приема фиксируется в РгСК. Сигнал регистрации обнаружения фазирующей (маркерной) комбинации вырабатывается ДшСК, по-

ступает в БЦФ, который формирует соответствующие управляющие воздействия, смещающие по фазе УУ приемника до тех пор, пока оно не будет переключаться синфазно с УУ передатчика. Этот момент фиксируется ДшСК, который запрещает дальнейшее смещение фазы УУ приемника, а также вырабатывает сигнал подтверждения приема синхроблока и с помощью ФСОС передает его в канал ОС. В конце каждого цикла работы УУ передатчика опрашивает АОКС и в случае обнаружения сигнала подтверждения переключает АПД из режима фазирования в режим передачи данных. Если в течение заданного числа циклов (например, пяти) фазирование не достигнуто, то включается аварийная сигнализация «Нет фазы» и АПД переключается в режим ожидания вызова.

Под действием управляющих сигналов УУ передатчика и информационной последовательности, поступающей с ООД и преобразуемой в последовательный код в БППИ, на соответствующих временных позициях добавляются кодовые комбинации номера блока, формируемые датчиком ДНБ, а также другие служебные символы (например, начало и конец блока), считываемые с ДСК. Данные, передаваемые в дискретный канал, кодируются помехоустойчивым кодом. Сформированные кодером проверочные элементы добавляются к информационным и служебным символам в конце блока. Поступившая от ООД информационная последовательность одновременно с передачей в канал записывается в буферный накопитель (БН), объем которого зависит от типа и алгоритма работы УЗО, а также от времени распространения сигналов по каналу связи. Аналогичным образом формируются последующие блоки. В конце каждого блока УУ передатчика спрашивает о состоянии анализатора обратного канала связи и в случае наличия сигнала «Подтверждение» осуществляет дальнейшую передачу последующих блоков либо при наличии сигнала «Запрос» прекращает ввод информации и повторно выдает из БН блок информации, в котором обнаружена ошибка. СПЗ контролирует число повторных запросов одного и того же блока и при достижении значения больше установленного числа переключает УЗО в режим циклового фазирования.

3.6.4 Структурная схема приемной части УЗО

В состав приемной части входят следующие блоки (рисунок 3.11): регистр служебных комбинаций (РгСК), декодер (ДК), входной регистр (ВхРг), формирователь сигналов обратной связи (ФСОС), дешифратор служебных комбинаций (ДшСК), буферный накопитель (БН), блок преобразования и выдачи информации (БПВИ), формирователь тактовых импульсов (ФТИ), устройство управления (УУ), блок начальной установки (БНУ), формирователи сигналов обмена с оконечным оборудованием данных (ООД) и УПС (ФСО1 и ФСО2), блок циклового фазирования (БЦФ), блок аварийной сигнализации и индикации (БАСИ).

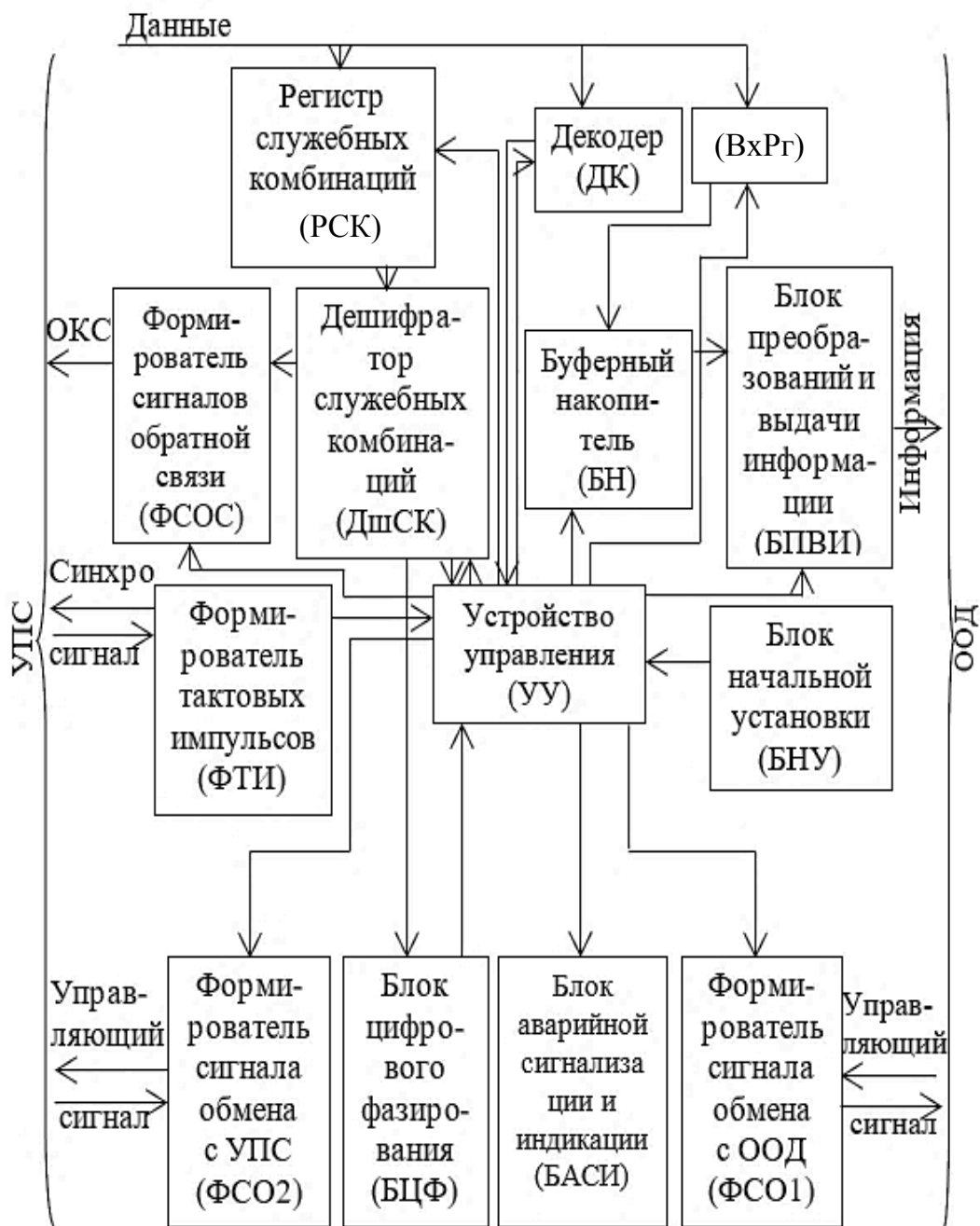


Рисунок 3.11 – Структурная схема приемной части устройства защиты от ошибок

На приемной стороне с помощью УУ приемника происходит разделение служебных и информационных элементов. Первые записываются в РСК, а вторые – во входной регистр ВхРг. ДШСК проверяет очередность и правильность поступления служебных комбинаций и информирует об этом УУ приемника. Одновременно ДК осуществляет декодирование принимаемого сообщения. Информационные элементы по мере заполнения ВхРг переписываются в БН. По завершении приема блока информации УУ приемника на основании данных о правильности приема служебных символов и отсутствии ошибок в принятом блоке,

а также при наличии разрешающего сигнала с детектора уровня несущей (поступающего от УПС) разрешает выдачу информации ООД получателю. В блоке БПВИ осуществляются преобразование принятой последовательности в требуемый формат и согласование по уровню с уровнями ООД. Одновременно УУ приемника вырабатывает сигнал «Подтверждение», который формируется ФСОС и поступает в обратный канал связи. Если же при приеме блока информации нарушено хотя бы одно из принятых условий (искажены комбинации начала и конца блока или номер принятого блока не соответствует установленной очередности) либо в процессе декодирования обнаружена ошибка, происходит стирание принятого блока, а в обратный канал связи передается сигнал «Запрос».

Блоки аварийной сигнализации и индикации УЗО обеспечивают сигнализацию предусмотренных аварийных ситуаций и их индикацию, а также индикацию режимов работы УЗО. Выходные сигналы этого блока используются для информирования оператора или ЭВМ.

3.7 Модемы

3.7.1 Общие сведения

Термин «модем» образован из двух слов: «модулятор» и «демодулятор». Модем изменяет не сами данные, а форму электромагнитного сигнала, приспособив его для передачи данных в соответствующей среде.

Строгой классификации модемов не существует и, вероятно, не может существовать по причине большого разнообразия как самих модемов, так и сфер применения и режимов их работы. Тем не менее выделяют ряд признаков, по которым можно провести условную классификацию. К таким признакам или критериям классификации можно отнести следующие:

- область применения;
- функциональное назначение;
- тип используемого канала;
- конструктивное исполнение;
- реализация протоколов модуляции, исправления ошибок и сжатия данных.

Можно выделить еще множество более детальных технических признаков, таких как применяемый способ модуляции, интерфейс сопряжения с оконечным оборудованием данных (ООД) и т. д. На некоторых из них мы остановимся подробнее.

3.7.1.1 Область применения. Современные модемы можно разделить на несколько групп:

- для коммутируемых телефонных каналов;
- выделенных (арендуемых) телефонных каналов;
- физических соединительных абонентских линий (*xDSL*-модемы);
- цифровых систем передачи;
- сотовых систем связи;
- пакетных радиосетей;

- спутниковых каналов связи;
- локальных радиосетей;
- телевизионных кабельных сетей.

подавляющее большинство выпускаемых модемов предназначено для использования на коммутируемых телефонных каналах. Такие модемы должны уметь работать с автоматическими телефонными станциями, различать их сигналы и передавать свои сигналы набора номера.

Основное отличие модемов для физических линий от других типов модемов состоит в том, что полоса пропускания физических линий не ограничена значением 3,1 кГц, характерным для телефонных каналов. Однако полоса пропускания физической линии также является ограниченной и зависит в основном от типа физической среды (экранированная и неэкранированная витая пара, коаксиальный кабель и др.) и ее длины. С точки зрения используемых для подачи сигналов модемы для физических линий могут быть разделены на модемы низкого уровня (линейные драйверы), использующие цифровые сигналы, и модемы «основной полосы», в которых применяются методы модуляции, аналогичные применяемым в модемах для телефонных каналов.

В модемах первой группы обычно используются цифровые методы биимпульсной передачи, позволяющие формировать импульсные сигналы без постоянной составляющей и часто занимающие более узкую полосу частот, чем исходная цифровая последовательность.

В модемах второй группы часто используются различные виды квадратурной амплитудной модуляции, позволяющие радикально сократить требуемую для передачи полосу частот. В результате на одинаковых физических линиях такими модемами может достигаться скорость передачи до 100 кбит/с, в то время как модемы низкого уровня обеспечивают только 19,2 кбит/с.

Модемы для цифровых систем передачи напоминают модемы низкого уровня. Однако в отличие от них обеспечивают подключение к стандартным цифровым каналам и поддерживают функции соответствующих канальных интерфейсов.

Модемы для сотовых систем связи отличаются компактностью исполнения и поддержкой специальных протоколов модуляции и исправления ошибок, позволяющих эффективно передавать данные в условиях сотовых каналов с высоким уровнем помех и постоянно изменяющимися параметрами.

Пакетные радиомодемы предназначены для передачи данных по радиоканалу между мобильными пользователями. При этом несколько радиомодемов используют один и тот же радиоканал в режиме множественного доступа. Радиоканал по своим характеристикам близок к телефонному и организуется с использованием типовых радиостанций, настроенных на одну и ту же частоту в ОВЧ-, КВЧ- либо ВЧ-диапазонах. Пакетный радиомодем реализует методы модуляции и множественного доступа.

Локальные радиосети являются быстроразвивающейся перспективной сетевой технологией, дополняющей обыкновенные локальные сети. Ключевым их элементом являются специализированные радиомодемы (адаптеры локальных

радиосетей). В отличие от ранее упомянутых пакетных радиомодемов, такие модемы обеспечивают передачу данных на небольшие расстояния (до 300 м) с высокой скоростью (2–10 Мбит/с), сопоставимой со скоростью передачи в проводных локальных вычислительных сетях (ЛВС). Кроме того, радиомодемы локальных радиосетей работают в определенном диапазоне частот с применением сигналов сложной формы, таких как сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

Модемы для телевизионных кабельных сетей получают все большее распространение благодаря развитию кабельных ТВ-сетей и высоким скоростям передачи. Такие модемы используют свободные телевизионные каналы с полосой пропускания в 6 МГц в диапазоне от 50 до 450 МГц для передачи своих сигналов. Большие полосы пропускания ТВ-каналов обуславливают и высокие скорости передачи, которые достигают порядка 36 Мбит/с.

3.7.1.2 Метод передачи. По методу передачи модемы делятся на синхронные и асинхронные. Понятие синхронности модема в общем случае может рассматриваться применительно к режиму передачи как по интерфейсу ООД – АКД (стыку, не зависящему от среды), так и по каналу связи (стыку, зависящему от среды). Коренной критерий синхронности метода передачи заключается в работе тактовых генераторов отправителя и получателя: независимой друг от друга (асинхронной) или согласованной (синхронной). Каждый полученный от ООД бит синхронный модем отправляет с той же скоростью и в том же виде, что и получил. Такой режим широко используется в синхронных сетях (X.25 и др.), а также совместно с различными контроллерами промышленной автоматики и т. п.

Напротив, модем считается асинхронным, если по интерфейсу ООД – АКД он работает в асинхронном режиме. В этом случае данные формируются в старто-стопные символы (несколько информационных бит, обрамленные стартовым и стоповым битами) и затем передаются по интерфейсу.

Как уже было отмечено, понятие синхронности модемов значительно реже относят к режиму передачи по каналу (стыку $C1$, зависящему от среды передачи). В этом случае «синхронность» модема необходимо рассматривать как «синхронность» конкретного используемого способа модуляции. В простых способах модуляции, таких как амплитудная и частотная, для осуществления процесса демодуляции необязательно знать опорную или тактовую частоту передачи. Демодуляция практически сводится к селекции по амплитуде или частоте амплитудным или частотным детектором. Поэтому данные способы модуляции и модемы, их реализующие, иногда называют асинхронными.

Напротив, осуществление демодуляции (амплитудно-) фазомодулированного сигнала просто невозможно без знания опорной частоты с точностью до фазы. Опорная частота в этом случае, как правило, выделяется из самого принимаемого сигнала и далее используется для осуществления процесса демодуляции. Чтобы принимающее устройство могло обеспечить надежное восстановление опорной частоты, передаваемая последовательность бит не должна содержать длинных последовательностей нулей или единиц.

3.7.1.3 Интеллектуальные возможности. По интеллектуальным возможностям можно выделить модемы:

- без системы управления;
- поддерживающие набор *AT*-команд;
- с поддержкой команд *V.25bis*;
- с фирменной системой команд;
- поддерживающие протоколы сетевого управления.

3.7.1.4 Конструктивное исполнение. По конструкции различают модемы:

- внешние;
- внутренние;
- портативные;
- групповые.

Внешние модемы представляют собой автономные устройства, подключаемые к компьютеру или другому ООД посредством одного из стандартных интерфейсов ООД – АКД.

Внутренний модем – это плата расширения, вставляемая в соответствующий слот компьютера. Каждый из вариантов конструктивного исполнения имеет свои преимущества и недостатки.

Портативные модемы предназначены для использования пользователями совместно с компьютерами *Notebook*. Они отличаются малыми габаритами и высокой ценой. Их функциональные возможности, как правило, не уступают возможностям полнофункциональных модемов.

Групповыми модемами называют совокупность отдельных модемов, объединенных в общий блок и имеющих общие блок питания, устройства управления и отображения. Отдельный модем группового модема представляет собой плату с разъемом, устанавливаемую в блок, и рассчитан на один или небольшое число каналов.

3.7.1.5 Поддержка международных и фирменных протоколов. Модемы также можно классифицировать в соответствии с реализованными в них протоколами. Все протоколы, регламентирующие те или иные аспекты функционирования модемов, могут быть отнесены к двум большим группам: международным и фирменным.

Протоколы международного уровня разрабатываются под эгидой *ITU-T* и принимаются им в качестве рекомендаций (ранее *ITU-T* назывался Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии – МККТТ, международная аббревиатура – *ССИТТ*). Все рекомендации *ITU-T* относительно ТСОП модемов относятся к серии *V*. Фирменные протоколы разрабатываются отдельными компаниями – производителями модемов, с целью преуспеть в конкурентной борьбе. Классификация модемных протоколов представлена на рисунке 3.12.

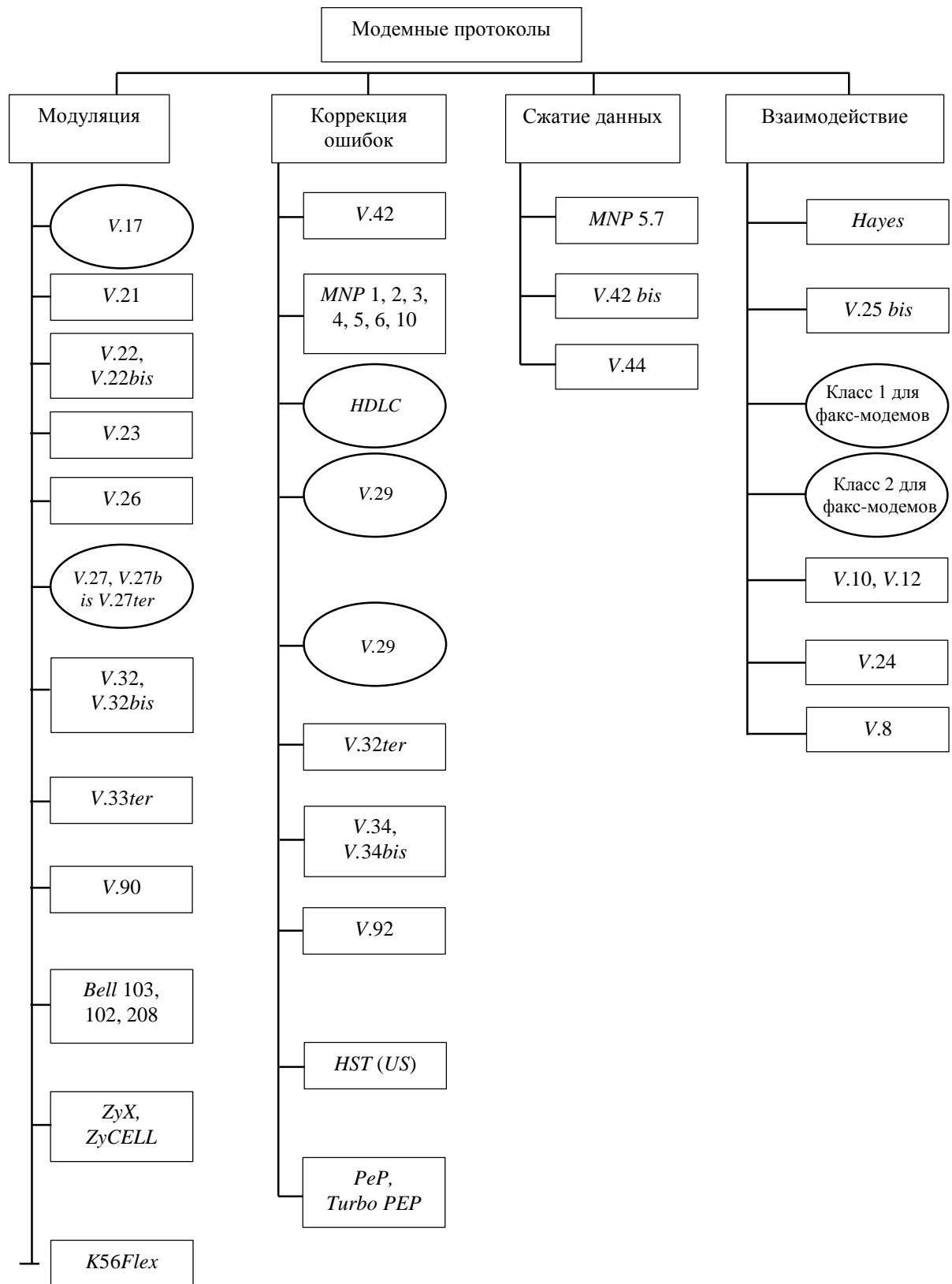


Рисунок 3.12 – Классификация модемных протоколов

3.7.2 Структурная схема модема

Обобщенный вариант конструкции современного модема представлен на рисунке 3.13.

Модем состоит из адаптеров портов канального и *DTE – DCE* интерфейсов; универсального (*PU*), цифрового сигнального (*DSP*) и модемного процессоров; постоянного (ПЗУ, *ROM*), постоянного энергонезависимого перепрограммируемого (ППЗУ, *EPROM*), оперативного (ОЗУ, *RAM*) запоминающих устройств и схемы индикаторов состояния модема.

Порт интерфейсов *DTE – DCE* обеспечивает взаимодействие с *DTE*. Если модем внутренний, вместо интерфейсов *DTE – DCE* могут применяться интерфейсы внутренней шины компьютера *ISA* или *PCI*. Порт канального интерфейса обеспечивает согласование электрических параметров с используемым каналом связи. Канал может быть аналоговым или цифровым, с двух- или четырехпроводным окончанием.

Универсальный процессор *PU* выполняет функции управления взаимодействием с *DTE* и схемами состояния модема. Именно он выполняет посылаемые *DTE AT*-команды и управляет режимами работы остальных составных частей модема. Также универсальный процессор может реализовывать операции компрессии/декомпрессии передаваемых данных.



Рисунок 3.13 – Обобщенная структурная схема современного модема

Интеллектуальные возможности модема определяются в основном типом используемого *PU* и микропрограммой управления модемом, хранящейся в *ROM*. Путем замены или перепрограммирования *ROM* иногда можно достичь существенного улучшения свойств модема, т. е. произвести его модернизацию, или апгрейд (*upgrade*). Такого рода модернизация некоторых моделей модемов может обеспечить поддержку новых протоколов или сервисных функций, таких как автоматическое определение номера (АОН) вызывающего абонента. Для облегчения такой модернизации в последнее время вместо микросхем *ROM* стали широко применяться микросхемы флеш-памяти (*FlashROM*).

Схема *ERPROМ* позволяет сохранять установки модема в так называемых профайлах или профилях модема на время его выключения. Память *RAM* интенсивно используется для временного хранения данных и выполнения промежуточных вычислений как универсальным, так и цифровым сигнальным процессорами.

На сигнальный процессор, как правило, возлагаются задачи по реализации основных функций протоколов модуляции (кодирование сверточным кодом, относительное кодирование, скремблирование и т. д.), за исключением операций модуляции/демодуляции. Последние обычно выполняются специализированным модемным процессором.

Описанное распределение функций между составными частями модема может быть и скорее всего будет совсем не таким, как реализованное в конкретном модеме. Однако внутренняя начинка современного модема все эти функции в той или иной мере должна выполнять.

Ниже подробнее остановимся на устройстве аналоговых (для телефонных каналов) и цифровых модемов, а также их основных функциях, связанных с обработкой сигналов.

Рассмотрим элементы синхронного модема для телефонной сети общего пользования. Несмотря на приведенную на рисунке 3.14 почти схемотехническую реализацию современного модема, принципы работы его составных частей удобнее рассмотреть, опираясь на их функциональную интерпретацию, не зависящую от конкретной реализации.

С позиции исполняемых функций, связанных с преобразованием передаваемых сигналов, современный синхронный модем содержит приемник, передатчик, компенсатор электрического эха, схему управления и источник питания. Основные функции приемника и передатчика физически исполняются *DSP*. Схема управления, как правило, исполняется в виде микропроцессора универсального назначения (*PU* на рисунке 3.14) и предназначена для обеспечения интеллектуального интерфейса с *DTE* и управления работой приемника, передатчика и эхо-конденсатора.

Эхо-конденсатор предназначен для ослабления вредного влияния помехи в виде электрического эха (собственного отраженного сигнала) на прием сигнала от удаленного модема. Работа эхо-конденсатора будет подробнее рассмотрена ниже.

Передаваемые *DTE* данные поступают в передатчик модема, который выполняет операции скремблирования, относительного кодирования, синхронизации и иногда вносит предискажения, частично компенсирующие нелинейность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик (*АЧХ* и *ФЧХ*) используемого телефонного канала.

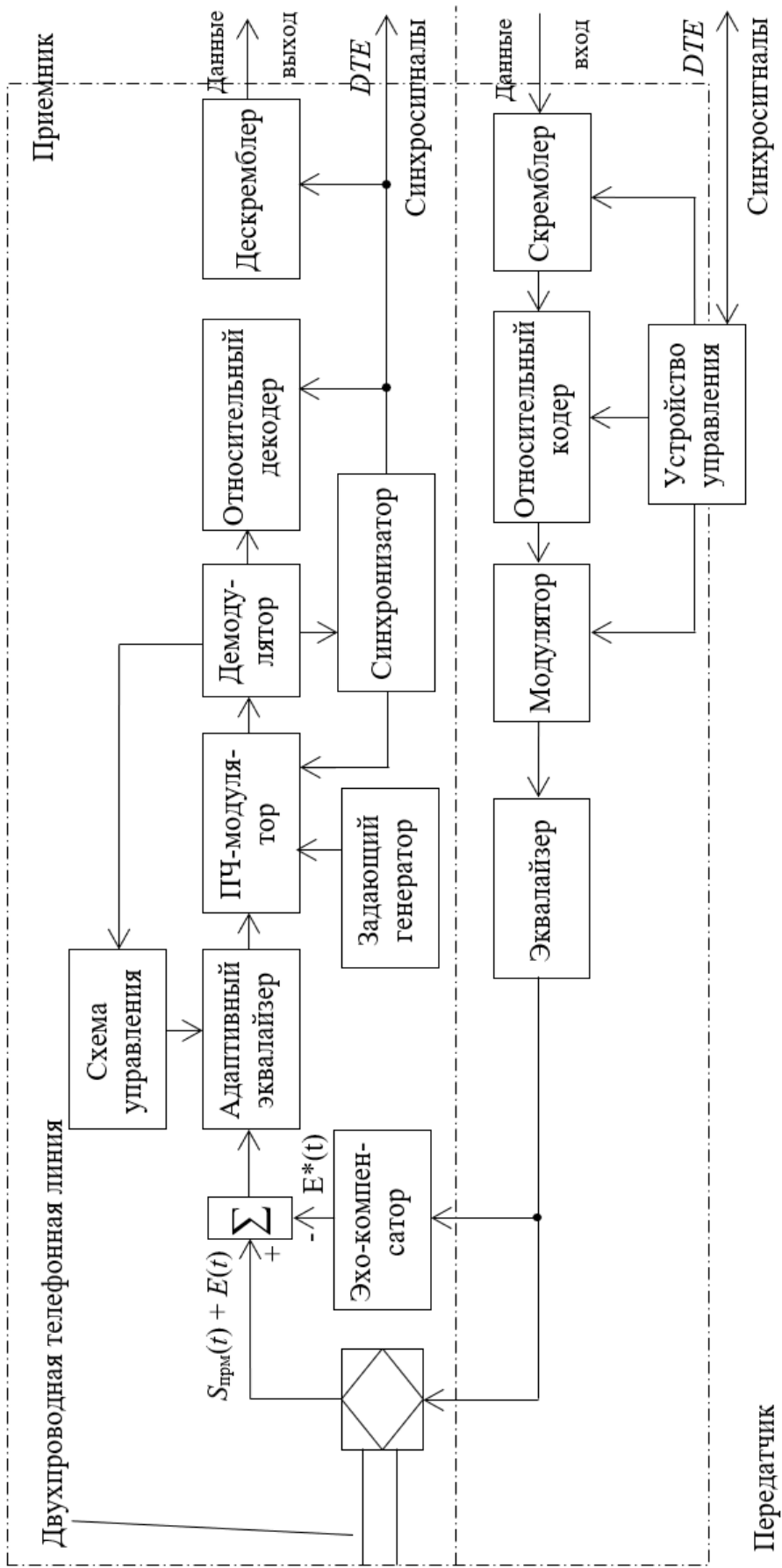


Рисунок 3.14 – Структурная схема синхронного модема

Схема синхронизации передатчика получает сигнал опорной частоты от внутреннего генератора или от *DTE*, например, через 24-й контакт разъема *DB-25* интерфейса *RS-232*. В последнем случае модем обязан поддерживать синхронный режим работы не только по каналу с удаленным модемом, но и по интерфейсу *DTE – DCE*. Скремблер предназначен для придания свойств случайности (рандомизации) передаваемой последовательности данных для облегчения выделения тактовой частоты приемником удаленного модема. При использовании сигналов фазовой манипуляции (ФМ) и производных от них применение относительного кодирования позволяет решить проблему неоднозначности фазы, восстановленной на приеме несущей.

Приемник модема, в свою очередь, содержит адаптивный эквалайзер со схемой управления, модулятор с задающим генератором, демодулятор, относительный декодер, дескремблер, схему синхронизации (см. рисунок 3.14). Модулятор приемника и задающий генератор позволяют перенести спектр принимаемого сигнала (300–3400 Гц) в область более высоких частот для облегчения операций фильтрации и демодуляции. Относительный декодер и дескремблер выполняют операции, обратные выполняемым в передатчике. Схема синхронизации выделяет тактовую частоту из принимаемого сигнала и подает его на другие узлы приемника.

Адаптивный эквалайзер приемника, как и эквалайзер передатчика, позволяет компенсировать нелинейные искажения, вносимые каналом передачи. Адаптивность эквалайзера заключается в его способности подстраиваться под изменяющиеся параметры канала в течение сеанса связи. Для этого сигнал ошибки фазы с демодулятора поступает на схему управления, которая вырабатывает управляющие сигналы для эквалайзера. Сам эквалайзер состоит из линии задержки с отводами и набора управляемых усилителей с изменяемым коэффициентом усиления.

Эхо-подавление. Организация дуплексной высокоскоростной передачи является не простой задачей при использовании коммутируемых каналов с двухпроводным окончанием. В отличие от выделенных четырехпроводных каналов (рисунок 3.15, *а*) характерной особенностью телефонной сети общего пользования (ТСОП) является наличие участков перехода двухпроводной части канала в четырехпроводную. Переход осуществляется при помощи *дифференциальных систем* (ДС), обеспечивающих необходимое затухание по встречным направлениям передачи. Если эти затухания очень велики, то схему связи можно практически считать четырехпроводной, представляющей собой электрически разомкнутую систему. Однако идеальных дифференциальных систем не существует. В результате, как и во всякой электрически замкнутой системе, в двухпроводном телефонном канале присутствуют токи обратной связи, вызывающие искажения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик прямого и обратного каналов. В качестве примера на рисунке 3.15, *б* приведена типичная схема модемного канала с тремя дифференциальными системами и, соответственно, тремя путями прохождения эхо-сигналов. Собственный отраженный и задержанный

сигнал поступает на вход демодулятора, являясь для него помехой. Чем большей задержкой обладает эхо-сигнал, тем труднее с ним бороться.

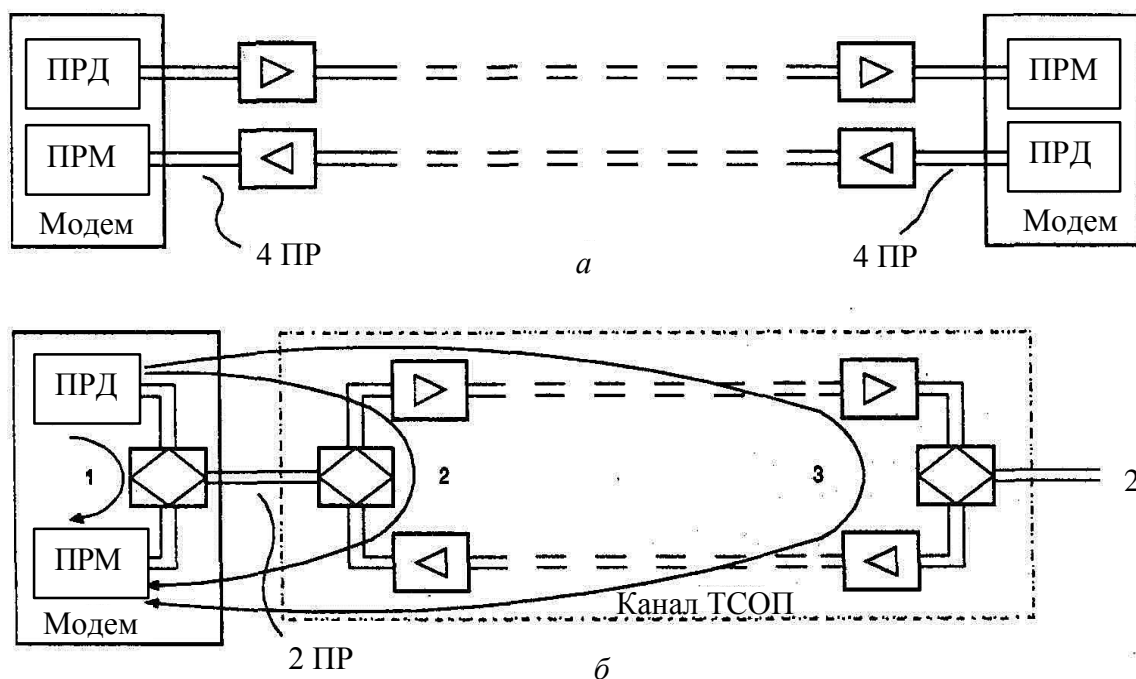


Рисунок 3.15 – Схема телефонных каналов с четырехпроводным (а) и двухпроводным окончанием (б) с путями прохождения эхо-сигналов (1, 2, 3)

Наибольшее распространение получил компенсационный метод борьбы с эхо-сигналом. Суть метода заключается в том, что модем, обладая информацией о своем собственном передаваемом сигнале $S_{\text{ПРД}}(t)$, может использовать ее для фильтрации принимаемого сигнала $S_{\text{ПРМ}}(t)$ от эхо-помехи. Отраженный эхо-сигнал $E(t)$ претерпевает существенные изменения вследствие амплитудных и фазовых искажений. На этапе установления соединения каждый модем посылает определенный зондирующий сигнал и определяет параметры эхо-отражения: время запаздывания, амплитудные и фазовые искажения, мощность отраженного сигнала. В процессе сеанса связи эхо-компенсатор модема вычитает из принимаемого входного сигнала свой собственный выходной $E^*(t)$, скорректированный в соответствии с полученными параметрами эхо-отражения. Функцию создания копии эхо-сигнала выполняет линия задержки с отводами.

Технология эхо-компенсации позволяет отвести для дуплексной передачи всю ширину полосы пропускания телефонного канала, однако требует немалых вычислительных ресурсов для обработки сигнала.

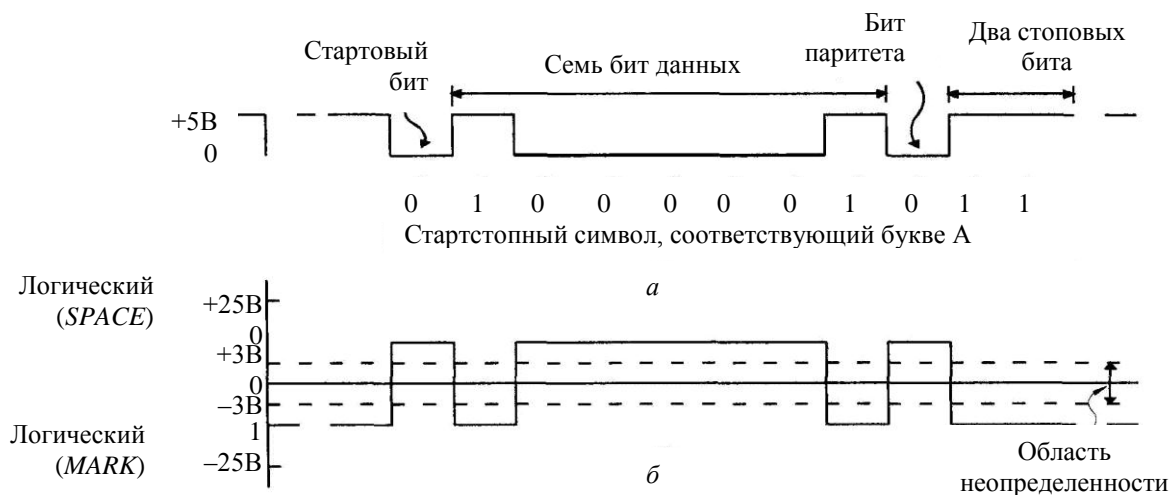
3.7.3 Интерфейсы модемов

В данном пункте приведены краткие характеристики наиболее часто применяемых интерфейсов: RS-232(V.24/V.28), RS-422A (V.11 и X.27), RS-423A (V.10 и X.25) и RS-449(V.36), используемых для обмена сигналами между DTE и DCE.

Интерфейс RS-232. Интерфейс RS-232 является последовательным асинхронным интерфейсом. Последовательная передача означает, что данные передаются по единственной линии. Для синхронизации битам данных предшествует специальный стартовый бит, после бит данных следует бит паритета и один или два стоповых бита. Такая группа битов совместно со стартовым и стоповым битом, а также битом паритета носит название стартстопного символа. Начало асинхронного символа всегда отмечается низким уровнем стартового бита. Последними передаются два стоповых бита, представленных высоким уровнем напряжения.

Часто используются национальные расширения кода ASCII, который полностью включает в себя 128 стандартных ASCII-символов и дополнительно содержит еще 128 символов с единицей в старшем бите. Среди дополнительных символов используются буквы ряда европейских алфавитов, буквы греческого алфавита, математические символы и символы псевдографики. В Беларуси наибольшее распространение получила альтернативная кодировка ASCII. Число всех символов расширенного кода ASCII равно 256 и, следовательно, каждый такой символ кодируется восьмью битами ($2^8 = 256$). Удобнее передавать каждый символ расширенной кодировки в виде отдельного стартстопного символа. Поэтому часто используется формат, состоящий из одного стартового бита, восьми информационных и одного стопового бита. При этом бит паритета не используется.

Таким образом, полный асинхронно передаваемый символ данных состоит из 10–11 бит, при том что собственно пользовательские данные состоят из 7–8 бит. Для приведенного примера (рисунок 3.16) стартстопный символ, соответствующий букве А, состоит из 11 бит и записывается в виде 01000001011. Здесь используется четный паритет, поэтому девятый бит содержит 0.



a – уровнями ТТЛ; *б* – на сигнальных линиях интерфейса RS-232

Рисунок 3.16 – Представление кода буквы А

Используемые в интерфейсе RS-232 уровни сигналов отличаются от уровней сигналов, действующих в модеме или компьютере. Логический нуль (SPACE) представляется положительным напряжением в диапазоне от +3 до +25 В, а логическая

единица (*MARK*) – отрицательным напряжением в диапазоне от –3 до –25 В. На рисунке 3.16, б показан асинхронный сигнал для буквы А в том виде, в каком он присутствует на линиях *TxD* или *RxD* интерфейса *RS-232*.

Вследствие воздействия помех, активного и реактивного сопротивления соединительного кабеля между устройствами *DTE* и *DCE* существуют ограничения на его длину. Официальное ограничение по длине для соединительного кабеля по стандарту *RS-232* составляет порядка 15 м при скорости передачи около 20 кбит/с. Однако на практике это расстояние может быть значительно больше и зависит от скорости передачи данных. В таблице 3.12 приведены значения длины соединительного кабеля с соответствующей скоростью передачи.

Соотношение между скоростью передачи и длиной кабеля также зависит от качества используемого кабеля. Если используется кабель с низкой емкостью, то расстояние между *DTE* и *DCE* может быть больше. Интерфейсы, рассматриваемые ниже, такие как *RS-449*, *RS-422A* и *RS-423A*, позволяют работать с большими скоростями передачи и на большем удалении, чем интерфейс *RS-232*.

Таблица 3.12 – Длина соединительного кабеля между устройствами *DTE* и *DCE*

Скорость передачи, бит/с	Максимальная длина для экранированного кабеля, м	Максимальная длина для неэкранированного кабеля, м
110	1525	915
300	1525	915
1200	915	915
2400	305	152
4800	305	76
9600	76	76

Интерфейсы *RS-422A*, *RS-423A* и *RS-449* (V.36). Более новыми стандартами по сравнению с *RS-232*, позволяющими обеспечить высокоскоростную работу на больших расстояниях, являются стандарты *EIA RS-422A*, *RS-423A* и *RS-449*. Соответствующими рекомендациями *ITU-T* для этих стандартов являются *V.10* и *X.26* – для *RS-423*, *V.11* и *X.27* – для *RS-422*. В таблице 3.13 приведены соотношения скорости передачи и допустимой длины кабеля для этих стандартов.

Таблица 3.13 – Соотношение скорости передачи и допустимой длины кабеля для стандартов *RS-422A* и *RS-423A*

Скорость передачи, кбит/с		Длина кабеля, м
<i>RS-423A</i> (<i>V.10</i> и <i>X.26</i>)	<i>RS-422A</i> (<i>V.11</i> и <i>X.27</i>)	
1	100	1000
10	1000	100
100	10000	10

Стандарт *RS-423A* определяет электрические характеристики несимметричного цифрового интерфейса. «Несимметричность» означает, что данный стандарт подобно *RS-232* для каждой линии интерфейса использует только один провод. При этом для всех линий используется единый общий провод.

Как и *RS-422A*, этот стандарт не определяет сигналы, конфигурацию выводов или типы разъемов. Он содержит только описание электрических характеристик интерфейса. Стандарт *RS-422A* предусматривает максимальную скорость передачи 100 кбит/с.

Стандарт *RS-422A* определяет электрические характеристики симметричного цифрового интерфейса. Он предусматривает работу на более высоких скоростях (до 10 Мбит/с) и больших расстояниях (до 1000 м) в интерфейсе *DTE – DCE*. Для его практической реализации, в отличие от *RS-232*, требуется два физических провода на каждый сигнал. Реализация симметричных цепей обеспечивает наилучшие выходные характеристики.

Подобно *V.28* данный стандарт является простым описанием электрических характеристик интерфейса и не определяет параметры сигналов, типы разъемов и протоколы управления передачей данных. Для линий интерфейсов *RS-422A* и *RS-423A* могут быть использованы различные проводники (или пары проводников) одного и того же кабеля.

Стандарт *RS-422A* был разработан совместно с *RS-423A* и позволяет размещать линии этих интерфейсов в одном кабеле. Он не совместим с *RS-232*, и взаимодействие между *RS-422A* и *RS-232* может быть обеспечено только при помощи специального интерфейсного конвертера.

Стандарт *RS-449*, в отличие от *RS-422A* и *RS-423A*, содержит информацию о параметрах сигналов, типах разъемов, расположении контактов и т. п. В этом отношении *RS-449* является дополнением к стандартам *RS-422A* и *RS-423A*. Стандарту *RS-449* соответствует международный стандарт *V.36*.

3.8 Устройства сопряжения с линиями и каналами

Для гальванической развязки линейных и местных цепей применяют оптроны. Рассмотрим принципы работы входных и выходных устройств.

3.8.1 Выходное устройство

Упрощенная схема выходного устройства, работающего в двух- и однополюсном режимах, приведена на рисунке 3.17. При работе в двухполюсном режиме (перемычки 1–2, 5–6 и 7–8 узла коммутации УК) используются две линейные батареи ЛБ1 и ЛБ2. Сигналы от входного триггера поступают поочередно (в противофазе) на *Vx1* и *Vx2*. При подаче сигнала логической единицы на *Vx1* открывается транзистор *VT1* и через светодиод оптронной пары ОП1 течет ток. Включается фотодиод ОП1 и открывается составной транзисторный ключ *VT3–VT4*. В результате в линейной цепи протекает ток от +ЛБ1 через устройство защиты

от короткого замыкания в линии УЗ, диод $VD1$, транзистор $VT4$, диод $VD2$, переключку 1–2, линию ЛБ1. Аналогично работает нижнее плечо выходного устройства при подаче сигнала логической единицы на $Vx2$. В линии течет ток от батареи ЛБ2 через транзисторный ключ $VT6$.

При работе в однополюсном режиме (переключку 3–4 на УК) сигнал логической единицы поступает одновременно на $Vx1$ и $Vx2$. В линии течет ток только от ЛБ1. При передаче бестоковой посылки ключи $VT4$ и $VT6$ закрыты.

Стабистор $VD5$ служит для предохранения выходных транзисторных ключей от пробоя при работе на линию с большой индуктивностью.

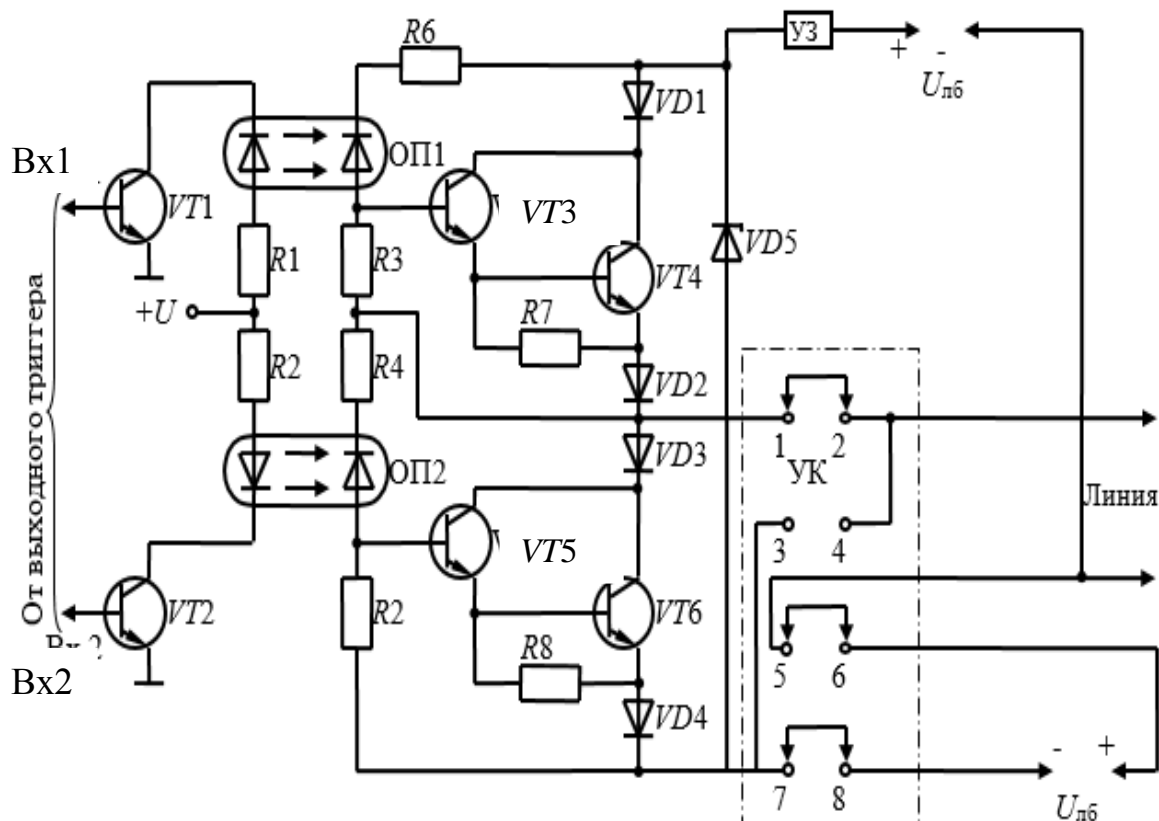


Рисунок 3.17 – Схема выходного устройства

3.8.2 Входное устройство

Входное устройство, как и выходное, входит в состав устройства сопряжения с линией (УСЛ) и обеспечивает согласование электрических характеристик канала связи и электронного телеграфного аппарата [49]. Упрощенная схема входного устройства, работающего в однополюсном режиме, приведена на рисунке 3.18. Оно содержит следующие основные элементы: линейный фильтр (дроссели $L1$ и $L2$, конденсаторы $C1$ и $C2$), необходимые для ограничения спектра принимаемого сигнала; стабилитроны $VD1$, $VD2$ для защиты от токовых перегрузок; диодный мост $VD3$ – $VD6$, предназначенный для приема токового сигнала любой полярности; оптрон ОП1, обеспечивающий гальваническую развязку; оптрон ОП2 для установки уровня регистрации; ключевой $VT1$ и выходной $VT2$ транзисторы.

При отсутствии тока на входе по цепи «+27 В, резисторы $R8$, $R3$, $R4$, светодиод ОП2, резистор $R5$, провод общ.» течет постоянный ток, который задает уровень регистрации. Этот уровень можно менять резистором $R4$. Через сопротивление фотодиода оптрона ОП2 на базу транзистора $VT2$ подается запирающий потенциал. На вход инвертора НЕ1 поступает потенциал (логическая единица), а на выходе электронного устройства появляется сигнал логического нуля.

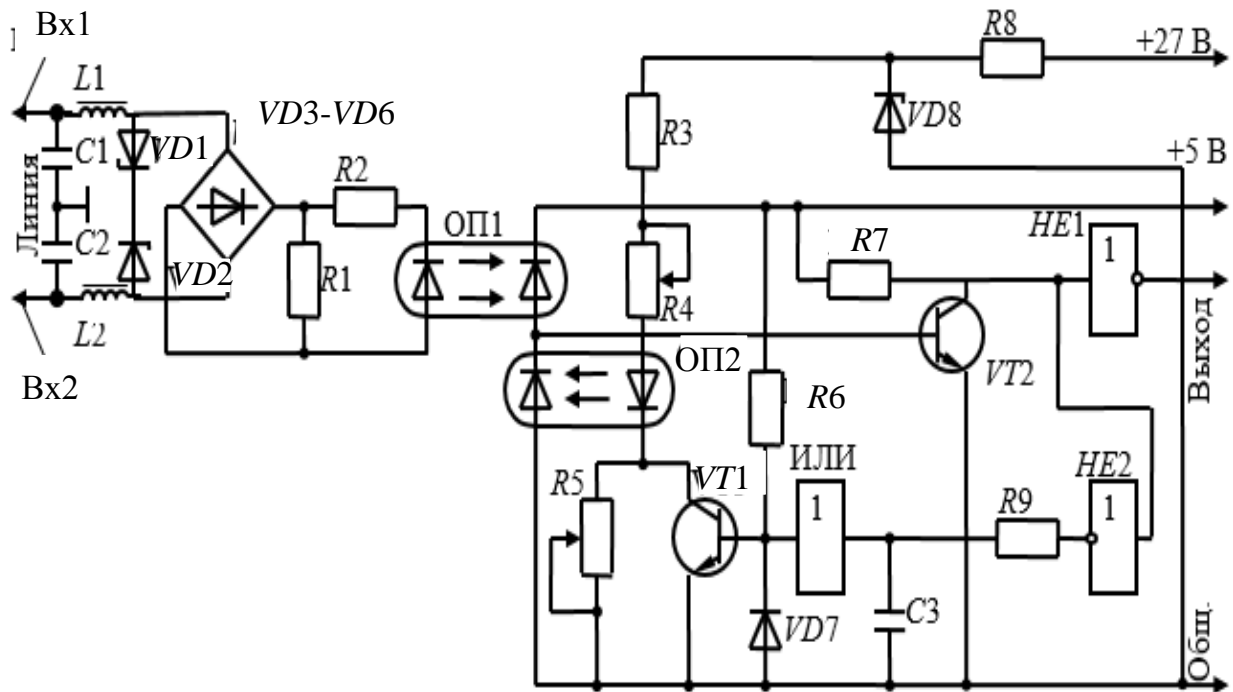
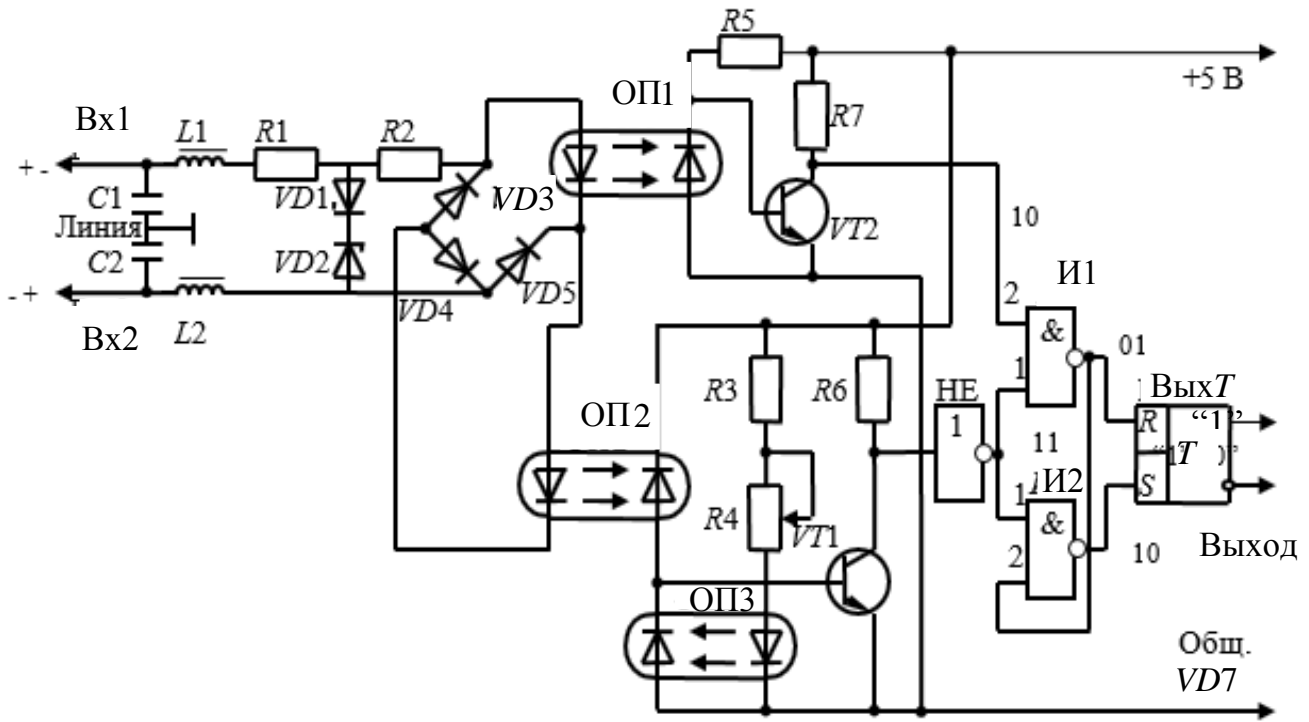


Рисунок 3.18 – Схема входного устройства

При протекании тока через светодиод оптронной пары ОП1 уменьшается сопротивление фотодиода этой пары. В результате изменяется соотношение плечей делителя напряжения, образованного сопротивлениями фотодиодов оптронов ОП1 и ОП2. На базе транзистора $VT2$ появляется отпирающий потенциал. Сигнал логического нуля через инвертор НЕ2, линию задержки $R9$, $C3$, схему ИЛИ поступает на базу $VT1$, который открывается и шунтирует резистор $R5$. В результате уровень порога срабатывания автоматически увеличивается до значения, равного половине амплитуды входного сигнала. На выходе инвертора НЕ1 появляется сигнал логической единицы. Элементы $R8$, $VD8$ служат для параметрической стабилизации уровня регистрации.

Упрощенная схема входного устройства, работающего в двухполюсном режиме, приведена на рисунке 3.19. При появлении в линии положительного импульса начинает протекать ток по цепи «Вх1, дроссель $L1$, $R1$, $R2$, светодиоды оптронных пар ОП1 и ОП2, диод $VD4$, дроссель $L2$, Вх2». Изменяются сопротивления фотодиодов ОП1 и ОП2, в результате чего транзистор $VT2$ закрывается, а транзистор $VT1$ открывается. На входе инвертора НЕ появляется сигнал логиче-

ского нуля. В результате на первые входы схем И1, И2 поступают сигналы логической единицы. На второй вход И1 подается также сигнал логической единицы с коллектора $VT2$. В результате на выходе И1 сигналом логического нуля выходной триггер $ВыхT$ устанавливается в положение «0» и с его инверсного выхода снимается сигнал логической единицы.



Рисунке 3.19 – Схема входного устройства, работающего в двухполюсном режиме

При появлении в линии отрицательного импульса начинает протекать ток по цепи « $Vx2$, дроссель $L2$, диод $VD5$, светодиод оптрона ОП2, диод $VD3$, резисторы $R2$, $R1$, дроссель $L1$, $Vx1$ ». Так как ток через светодиод оптронной пары ОП1 не протекает, то транзистор $VT2$ оказывается открытым и на второй вход схемы И1 поступает сигнал логического нуля. На выходе этой схемы появляется сигнал логической единицы и устанавливается выходной триггер $ВыхT$ в положение «1».

С инверсного выхода триггера снимается сигнал логического нуля. Резистором $R4$ определяется оптимальный уровень фиксации двухполюсных сигналов.

4 ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

4.1 Требования к элементной базе

Исходя из функций, выполняемых современными системами телемеханики, их элементная база должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- обеспечивать создание пространственно-распределенной системы сбора данных;
- обеспечивать магистрально-модульный принцип построения системы, облегчающей ее адаптацию и модификацию в случае необходимости коррекции структуры системы;
- отвечать требованиям *OPC*-стандарта;
- обеспечивать высокую надежность и оптимальность по критерию «эффективность – стоимость»;
- обеспечивать функционирование в заданном диапазоне измеряемых и контролируемых параметров (температура, давление, уровни, электрические параметры и т. п.);
- обеспечивать функционирование в диапазоне заданных внешних условий эксплуатации, в т. ч. в режиме внештатных ситуаций;
- обладать достаточной помехозащищенностью, исключающей получение ложной информации и помех, влияющих на работу других частей объектов и на качество питающей электрической сети.

Пространственная распределенность системы требует использования полевых промышленных шин (*Ethernet*, *Fieldbus*, *RS-485*, *Hart* или *AS*-интерфейс) для соединения базовых блоков, что обеспечивает существенное сокращение кабельной сети и оптимальное пространственное распределение базовых блоков.

Магистрально-модульный принцип обеспечивает построение телемеханической системы с использованием сменных электронных модулей, подключаемых к стандартной межмодульной магистрали в базовом объединительном блоке. При широкой номенклатуре модулей представляется возможность создания телемеханической системы, оптимальным образом соответствующей критерию «эффективность – стоимость» и обладающей способностью к расширению и модернизации.

Необходимость удовлетворения требованиям *OPC*-стандарта обусловлена следующим. *OPC* (*OLE for Process Control* – механизм связывания и внедрения объектов для сбора данных и управления в системах промышленной автоматизации) является наиболее общим способом взаимодействия между различными источниками и приемниками данных, такими как устройства, базы данных и системы визуализации информации о контролируемом объекте. *OPC*-стандарт

обеспечивает интерфейс между приложениями-клиентами и серверами путем реализации стандартного механизма связи между источниками данных (серверами) и получателями данных (клиентами).

Поскольку аппаратные средства разных производителей имеют различные и притом фиксированные протоколы обмена, архитектура приложений-клиентов также является уникальной в каждом конкретном случае. Это приводит к увеличению времени разработки и стоимости системы телемеханики, а любое изменение, внесенное производителем в устройство или протокол обмена, требует внесения изменений в функционирующую систему.

Архитектура «клиент – сервер», основанная на технологии *OPC*, позволяет решить эту проблему.

В данном случае устройство каждого производителя может иметь единственный стандартный драйвер, совместимый с *OPC* (*OPC*-сервер). При этом приложения, соответствующие спецификации, выработанной для клиента *OPC* (*OPC*-клиенты), могут обмениваться с устройствами любого производителя.

Существенным при выборе элементной базы телемеханической системы, отвечающей приведенным выше требованиям, является выбор фирмы-производителя, чья продукция реализуется в Республике Беларусь. Анализ продукции как отечественных, так и зарубежных фирм призывает, что в наибольшей степени требованиям построения телемеханической системы практически любого технологического процесса и промышленного объекта отвечает аппаратура зарубежных фирм, таких как *WAGO I/O*, *Grayhill*, *Advantech*, *Pepperl + Fuchs* и *Siemens*.

Аппаратура указанных фирм, отвечающая требованиям *OPC*-стандарта, отличается конструктивными, информационными и стоимостными характеристиками, а также возможностью работы с той или иной полевой шиной.

К настоящему времени наиболее широкое распространение в пространственно-распределенных системах сбора и обработки данных с использованием вычислительной и микропроцессорной техники получила последовательная шина на базе интерфейса *RS-485*. Поэтому при выборе и обосновании элементной базы системы телемеханики некоего обобщенного технологического процесса и соответствующего объекта будем исходить прежде всего из возможности работы аппаратуры с указанным интерфейсом.

С этой точки зрения большой выбор оборудования для построения системы телемеханики предоставляет фирма *Advantech*, которая выпускает широкую гамму электронной аппаратуры. В нее входят как различного вида промышленные рабочие станции и встраиваемые компьютеры, так и устройства для создания пространственно-распределенных систем сбора данных и управления. Среди последних для построения системы телемеханики интерес представляют модули серии *ADAM* (*Advantech Data Acquisition Modules* – модули фирмы *Advantech* для сбора данных).

В настоящее время выпускается несколько серий таких модулей. Анализ технических и стоимостных характеристик показал, что оптимальными характеристиками для построения системы телеметрии некоего обобщенного технологического процесса и соответствующего ПО обладают модули серии *ADAM-3000–ADAM-8000*, отвечающие требованиям *OPC*-стандарта.

Очевидно, что со временем будут появляться более совершенные серии, которые могут быть также использованы при разработке и создании систем телемеханики.

4.2 Технические характеристики модулей серии ADAM

Независимо от выполняемых функций неотъемлемой частью систем телемеханики являются устройства связи с объектом (УСО), назначение которых заключается в сопряжении датчиковой аппаратуры и исполнительных механизмов контролируемого объекта и/или технологического процесса с вычислительными средствами системы. Как правило, на УСО возлагаются следующие функции:

- нормализация аналогового сигнала – приведение границ шкалы первичного непрерывного сигнала к одному из стандартных диапазонов входного сигнала аналого-цифрового преобразователя измерительного канала. Наиболее распространены следующие диапазоны: от 0 до 5 В; от –5 до +5 В; от 0 до 10 В;

- предварительная низкочастотная фильтрация аналогового сигнала – ограничение полосы частот первичного непрерывного сигнала с целью снижения влияния на результат измерения помех различного происхождения. На промышленных объектах наиболее распространены помехи с частотой сети переменного тока, а также хаотические импульсные помехи, вызванные влиянием на технические средства измерительного канала переходных процессов и наводок при коммутации исполнительных механизмов повышенной мощности;

- обеспечение гальванической изоляции между источником аналогового или дискретного сигнала и измерительными каналами системы. В равной степени это относится к изоляции между каналами дискретного вывода системы и управляемым силовым оборудованием. Помимо собственно защиты выходных и входных цепей гальваническая изоляция позволяет снизить влияние на систему помех по цепям заземления. Отсутствие гальванической изоляции допускается только в технически обоснованных случаях.

Помимо перечисленных функций, ряд устройств связи с объектом может выполнять более сложные задачи за счет наличия в их составе подсистемы аналого-цифрового преобразования и дискретного ввода-вывода, микропроцессора и средств организации одного из интерфейсов последовательной передачи данных.

В настоящее время многими производителями электронной техники выпускается большое разнообразие УСО. На основании анализа можно сказать, что наиболее подходящими по своим техническим параметрам являются модули фирмы *Advantech*, которые предназначены для построения нижнего уровня АСУ ТП, в том числе территориально распределенных. Данные технические средства в ряде случаев могут рассматриваться в качестве альтернативы традиционным УСО и программируемым логическим контроллерам известных производителей.

Все модули можно разделить на следующие группы: нормализации, удаленного сбора данных и управления, коммуникации.

4.2.1 Модули нормализации и гальванической развязки серии

Рассмотрим модули *ADAM-3000*. Как следует из названия, модули серии *ADAM-3000* предназначены для нормализации аналоговых сигналов датчиков и гальванической изоляции каналов аналогового ввода-вывода информационно-измерительных систем и систем управления. Каждый модуль представляет собой функционально законченное устройство, заключенное в пластмассовый корпус и оснащенное клеммными соединителями с винтовой фиксацией для подключения входных и выходных цепей.

Модули серии *ADAM-3000* имеют ряд отличий от изделий аналогичного назначения других производителей:

- для установки модулей не требуется специальных объединительных плат;
- тип и диапазон входного сигнала задаются при помощи миниатюрных переключателей, расположенных под монтажным кронштейном;
- модули имеют относительно невысокую стоимость в сравнении с изделиями подобного назначения других производителей.

Модули серии *ADAM-3000* предназначены для ввода сигнала термопар (*ADAM-3011*), аналогового ввода (*ADAM-3012*), ввода сигнала термометра сопротивления (*ADAM-3013*), ввода сигнала датчика силы (*ADAM-3016*) и аналогового вывода (*ADAM-3021*).

Принципы работы модулей данной серии хорошо иллюстрирует структурная схема модуля нормализации аналогового сигнала *ADAM-3012*, которая приведена на рисунке 4.1

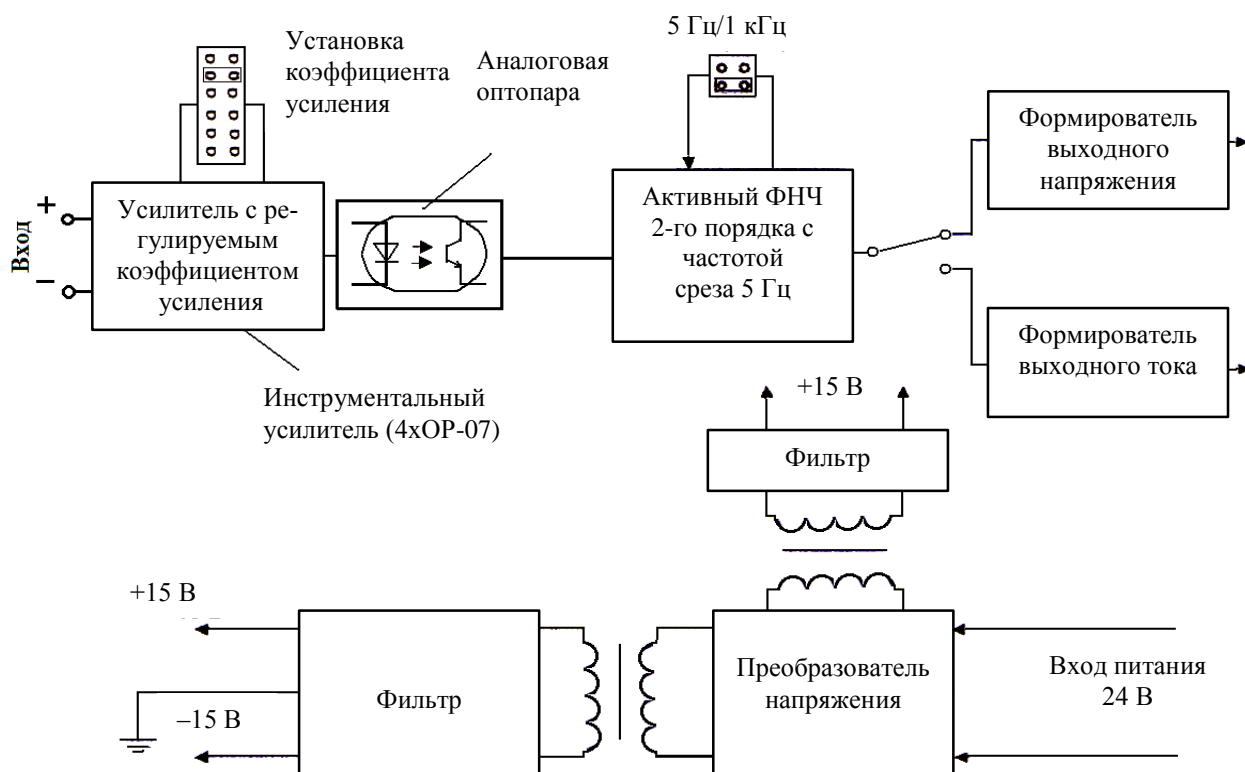


Рисунок 4.1 – Структурная схема модуля *ADAM-3012*

4.2.2 Устройства удаленного сбора данных и управления ADAM-4000

Модули серии ADAM-4000 предназначены для организации взаимодействия между вычислительной системой и датчиками непрерывных и дискретных параметров, а также для выдачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы. Каждый модуль представляет собой функционально законченное устройство, заключенное в пластмассовый корпус. Модули обеспечивают выполнение следующих основных функций:

- прием и дешифрацию команд по каналу RS-485;
- ввод и нормализацию аналоговых сигналов (ток, напряжение);
- опрос состояния дискретных входных сигналов;
- фильтрацию аналоговых и дискретных входных сигналов;
- вывод аналоговых (ток, напряжение) и дискретных сигналов;
- аналого-цифровое (для модулей аналогового ввода) преобразование (далее – АЦ-преобразование);
- цифроаналоговое (для модуля аналогового вывода) преобразование (далее – ЦА-преобразование);
- преобразование шкалы значений непрерывных параметров в предварительно заданные единицы измерения;
- формирование и передачу в адрес основной вычислительной системы информации, содержащей результат измерения или состояние дискретных входов, после получения соответствующего запроса по каналу RS-485.

Модули аналогового ввода и вывода имеют гальваническую изоляцию между цепями, реализующими функции нормализации, низкочастотной фильтрации и АЦ/ЦА-преобразования, и встроенным микропроцессором.

Настройка и калибровка модулей осуществляется программным способом путем передачи в их адрес соответствующих команд по информационной сети на основе интерфейса RS-485. Параметры конфигурации модулей, такие как скорость обмена по последовательному каналу связи, наличие проверки контрольной суммы в принятом сообщении, диапазон изменения входного сигнала и его размерность, вид представления измеренных значений при передаче в адрес основной вычислительной системы, верхнее и нижнее предельные значения входного сигнала, по которым производится автоматическое управление дискретными выходами, сохраняются во встроенном репрограммируемом ПЗУ с электрической записью/электрическим стиранием. Электрическое питание модулей осуществляется напряжением 10–30 В постоянного тока. Допускаемый размах пульсаций напряжения питания составляет ± 5 В при условии пребывания его значения в указанных пределах.

Общие технические характеристики модулей серии ADAM-4000 приведены в таблице 4.1.

Основная вычислительная система для простоты изложения далее будет называться контроллером сети (КнС). Взаимодействие между КнС и модулями, объединенными в сеть, осуществляется путем последовательной передачи КнС в адрес каждого модуля запроса, содержащего префикс типа команды, символ-

ное представление сетевого адреса запрашиваемого модуля, число, соответствующее подтипу команды, и символ «возврат каретки». Для программного обеспечения КнС выдача запроса означает вывод строки символов в последовательный порт. При получении команды встроенное программное обеспечение модуля *ADAM* производит проверку ее корректности и идентификацию, после чего посылает в адрес КнС запрашиваемую информацию в виде строки символов.

Таблица 4.1 – Технические характеристики модулей *ADAM-4000*

Параметр	Значение
Протокол физического уровня	<i>EAI RS-485</i>
Линия передачи	Симметричная экранированная витая пара. Волновое сопротивление – 100–120 Ом, погонная емкость – 20–40 пФ/м
Скорость передачи, бит/с	1200, 2400, 4800, 9600, 19 200
Длина сегмента сети, м	1200
Количество модулей в пределах сегмента	32
Максимальное количество модулей в сети	255
Протокол канального уровня	Символьный <i>ASCII</i> с непосредственной адресацией абонентов
Достоверность	Контрольная сумма длиной 2 байта
Режим обмена данными	Асинхронный, полудуплексный, 1 старт-бит, 8 бит данных, без контроля четности
Протокол прикладного уровня	Символьный <i>ASCII</i>
Условия эксплуатации: диапазон рабочих температур диапазон температур хранения относительная влажность воздуха	–10...+70 °С –25...+85 °С 5–95 % при 25 °С без конденсации влаги

Как указывалось ранее, информационная сеть модулей серии *ADAM-4000* строится на базе интерфейса *RS-485*.

Возможные варианты объединения модулей *ADAM-4000* в информационно-измерительную сеть показаны на рисунке 4.2

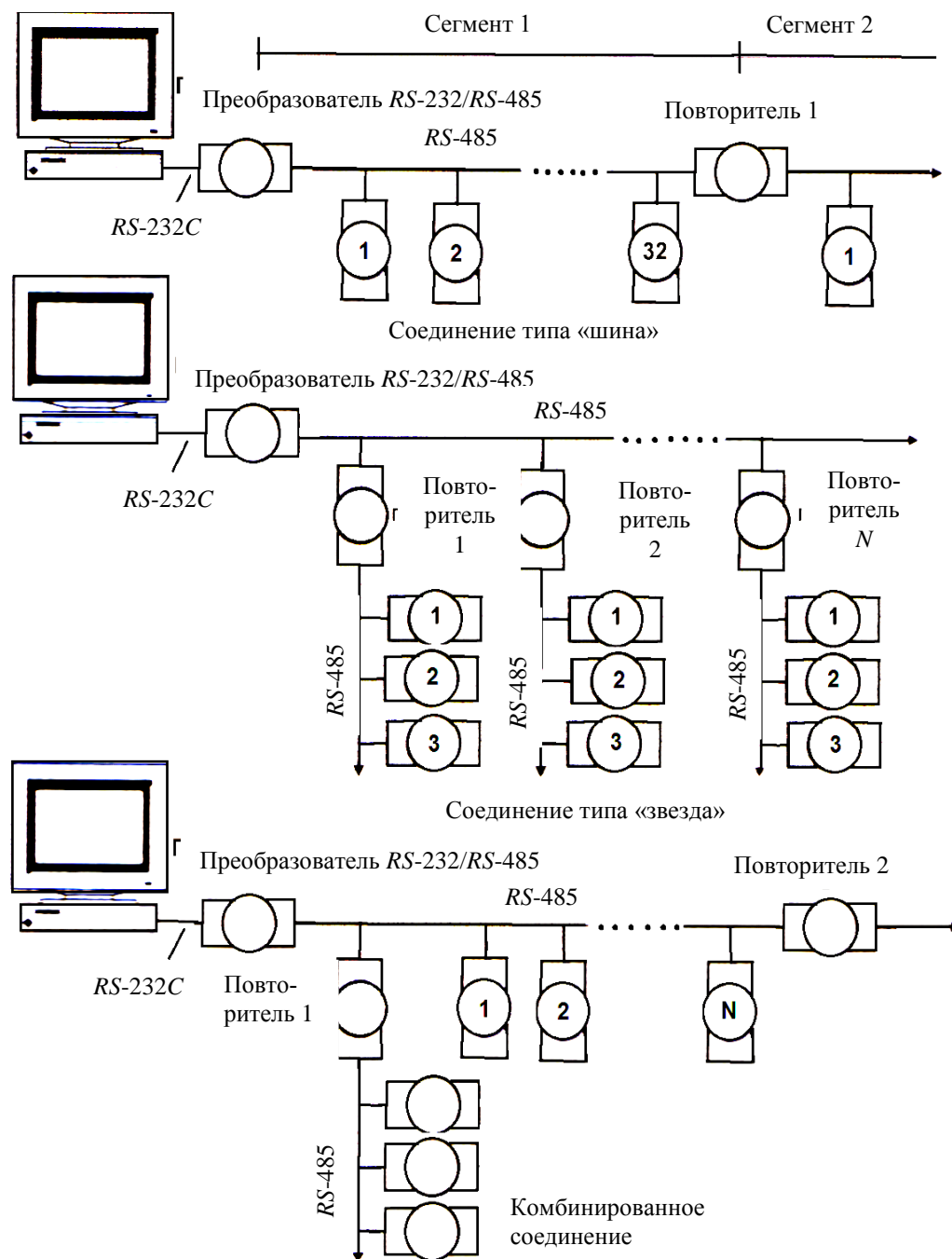


Рисунок 4.2 – Варианты объединения модулей серии ADAM-4000 в измерительную сеть

Принцип функционирования модулей аналогового ввода будет рассмотрен на примере модуля ADAM-4012, который имеет один дифференциальный аналоговый вход, один дискретный вход счетчика внешних событий и два дискретных выхода, позволяющих осуществлять управление (включение, отключение) исполнительными механизмами при выходе значения измеряемого параметра за пределы предварительно установленного диапазона.

Структурная схема модуля аналогового ввода ADAM-4012 приведена на рисунке 4.3

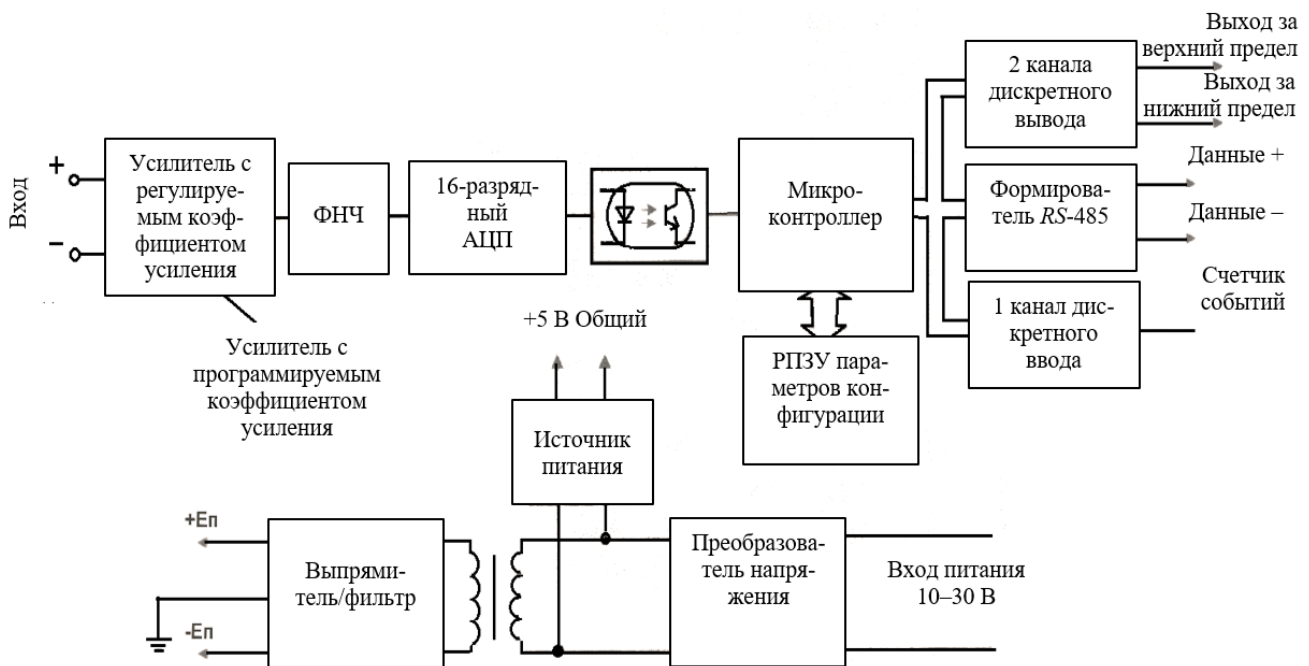


Рисунок 4.3 – Структурная схема модуля аналогового ввода ADAM-4012

Входной сигнал, присутствующий на дифференциальном входе модуля, поступает на малошумящий инструментальный усилитель с программируемым коэффициентом усиления, который может принимать значение от 1 до 128. Далее сигнал, напряжение которого лежит в диапазоне от $-2,5$ до $+2,5$ В, подвергается низкочастотной фильтрации в фильтре низких частот с граничной частотой равной 10 Гц, и поступает на вход сигма-дельта АЦП. Результат АЦ-преобразования через цепи оптоизоляции поступает во временный микропроцессор. Программное обеспечение микропроцессора выполняет следующие функции:

- сравнение значения входного сигнала с предварительно заданными верхним и нижним предельными значениями и управление (включение и отключение) соответствующими дискретными выходами в случае достижения входным сигналом уровня, выходящего за пределы заданного диапазона;

- при получении запроса по последовательному каналу связи преобразование цифрового отсчета в символьную строку предварительно заданного формата и ее передачу в адрес КнС.

Кроме того, программное обеспечение позволяет осуществлять:

- линеаризацию сигнала от термопары (для модуля ADAM-4011);
- калибровку шкалы подсистемы аналогового ввода;
- подсчет импульсов на дискретном входе;
- анализ команд, поступающих по последовательному каналу связи.

В серии ADAM-4000 имеется модуль аналогового вывода ADAM-4021, структурная схема которого приведена на рисунке 4.4.

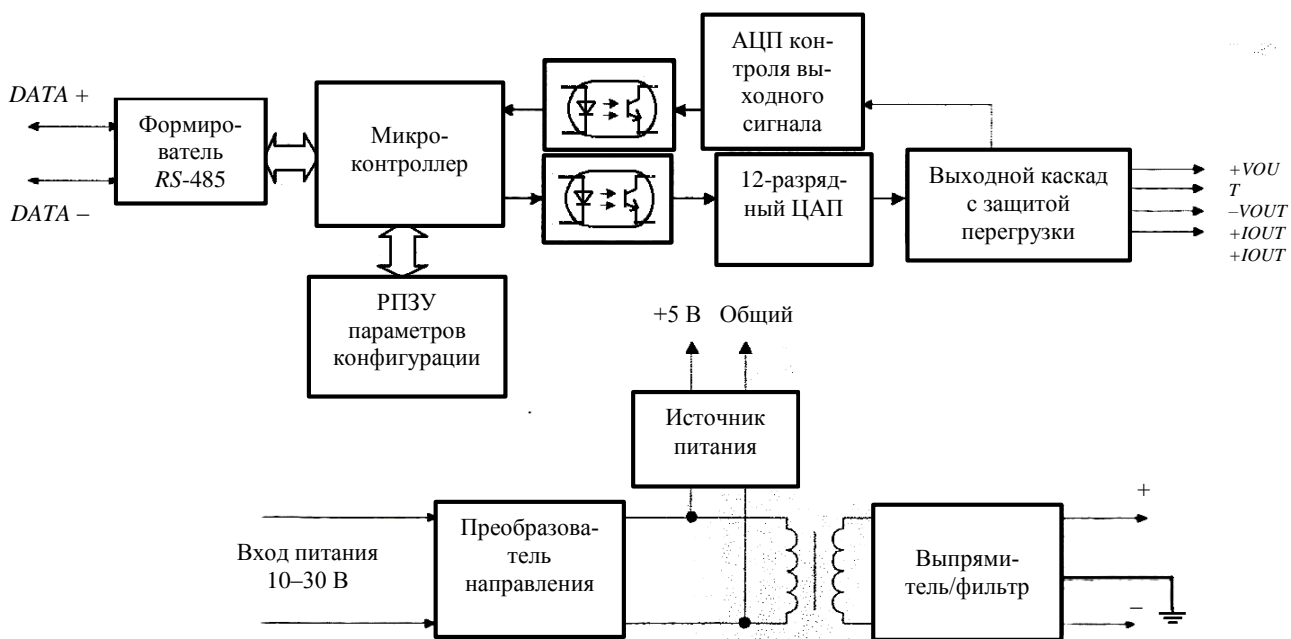


Рисунок 4.4 – Структурная схема аналогового вывода *ADAM-4021*

Модуль *ADAM-4021* позволяет формировать сигнал в виде напряжения или тока с заданными уровнем и скоростью изменения.

Принцип функционирования модуля *ADAM-4021* аналогичен описанному ранее.

Модули дискретного ввода-вывода, входящие в серию *ADAM-4000*, предназначены для осуществления контроля положения и управления коммутационными аппаратами, а также для организации взаимодействия с устройствами, уровни входных и выходных дискретных сигналов которых совместимы с транзисторно-транзисторной логикой (ТТЛ).

Структурная схема модуля гальванически изолированного дискретного ввода *ADAM-4052* приведена на рисунке 4.5

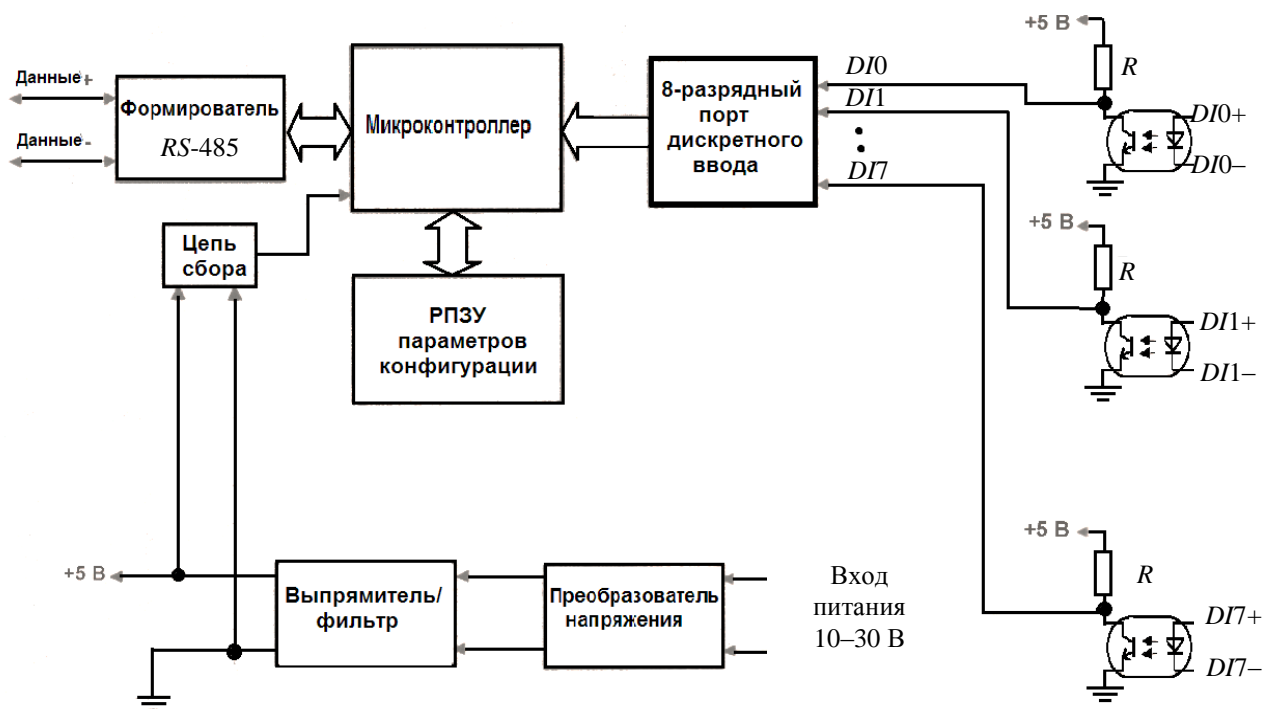


Рисунок 4.5 – Структурная схема модуля дискретного вывода с гальванической изоляцией *ADAM-4052*

4.2.3 Коммуникационные модули

Для создания информационно-измерительных сетей с использованием модулей *ADAM* в серию включен ряд устройств в аналогичном конструктивном исполнении, предназначенных для организации сетевого взаимодействия по различным каналам связи.

Модуль *ADAM-4510* является двунаправленным повторителем общего назначения, который служит для увеличения протяженности линии связи в сети на основе интерфейса *RS-485* или для организации ее очередного сегмента, объединяющего до 32 абонентов. Термин «общего назначения» подчеркивает тот факт, что устройство может быть применено практически в любых системах связи, использующих протокол *RS-485*. Это, как правило, приводит к большим трудностям при установлении связи между устройствами различных производителей, объединенными в сеть на основе данного физического протокола.

В качестве преобразователя интерфейса *RS-232/RS-485* может быть использовано любое устройство подобного назначения, хотя весьма желательно применять преобразователь того же производителя, что и оконечное оборудование сети. В серию *ADAM-4000* входит преобразователь интерфейса *RS-232/RS-422/RS-485 ADAM-4520* с автоматическим определением направления потока передаваемых данных и гальванической изоляцией. Структурная схема модуля *ADAM-4520* приведена на рисунке 4.6.

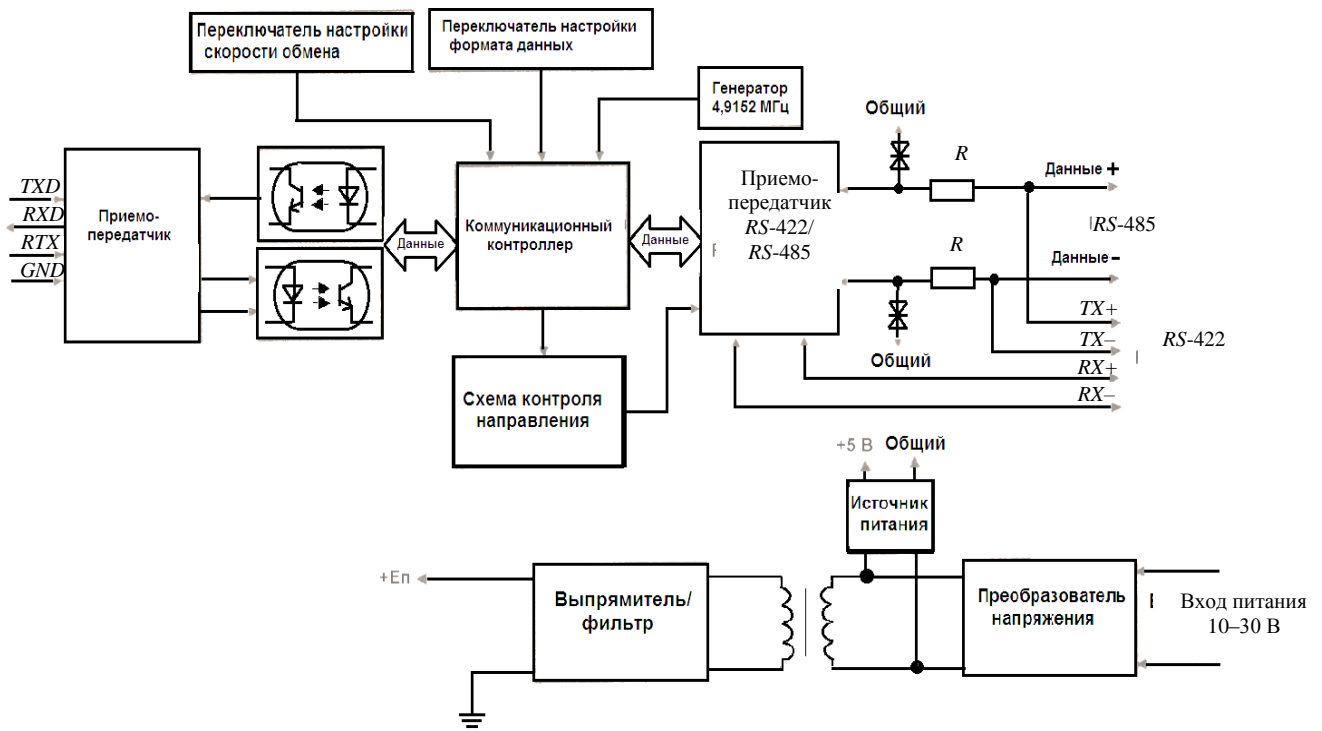


Рисунок 4.6 – Структурная схема модуля ADAM-4520

Кроме того, в качестве формирователя интерфейса RS-485 в составе совместимого персонального компьютера IBM PC может быть применен один из модулей фирмы Advantech, предназначенный для непосредственной установки в соединитель магистрали ISA. Перечень модулей и их основные технические характеристики приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики формирователей интерфейса RS-485

Параметр	Модули				
	PCL-740	PCL-743B	PCL-745B	PCL-746+	PCM-3610*
Количество портов	1	2	2	4	2
Интерфейс	RS-232-C/ RS-422-A/ RS-485/ токовая петля	RS-422-A/ RS-485	RS-422-A/ RS-485	RS-232-C/ RS-422-A/ RS-485	RS-232-C/ RS-422-A
УАПП	16C550				
Скорость обмена, бит/с	до 115 200	до 115 200	до 115 200	до 115 200	до 57 600

В современных АСУ ТП широко применяются датчики, представляющие собой интеллектуальные устройства, которые помимо первичного измерительного преобразователя содержат микропроцессор, выполняющий вторичную обработку измерительной информации. Такие датчики, как правило, наряду с аналоговым выходом оснащены интерфейсом вывода RS-232. Для организации

связи с подобными устройствами в составе измерительной сети на основе интерфейса *RS-485* возможно использовать модуль *ADAM-4521*, который представляет собой адресуемый преобразователь интерфейса *RS-232/RS-485*.

Модуль *ADAM-4521* содержит микропроцессор, обеспечивающий управление двумя универсальными асинхронными приемопередатчиками (УАПП), что позволяет осуществлять двунаправленный обмен данными с обслуживаемым устройством, в том числе при различных скоростях передачи для каждого УАПП. Типовая конфигурация системы с использованием модулей *ADAM-4521* показана на рисунке 4.7.

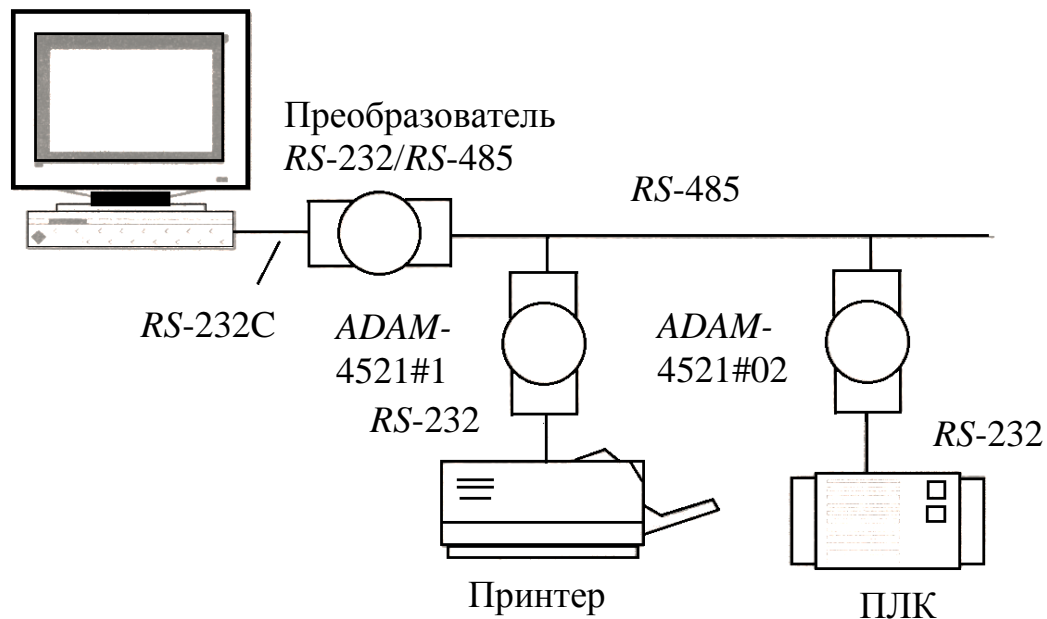


Рисунок 4.7 – Вариант применения модуля *ADAM-4521*

Настройка параметров обмена выполняется при помощи программного обеспечения, входящего в комплект поставки модуля.

При автоматизации предприятий с территориально распределенными производственными участками в качестве физической среды обмена информацией довольно часто используется радиоканал. Фирма *Advantech* предлагает два изделия серии *ADAM-4000*, которые могут применяться в ситуациях, когда невозможно обеспечить связь с объектами автоматизации по проводным каналам из-за следующих ограничений:

- чрезмерная требуемая протяженность кабельных линий связи;
- отсутствие возможности прокладки кабеля до контролируемого объекта (например, в условиях «вечной» мерзлоты при высоких затратах на построение кабельных эстакад);
- отсутствие возможности обеспечения единой «земли» для всех абонентов сети.

Вряд ли можно поспорить с утверждением о более высокой стоимости кабельных линий связи по сравнению с беспроводными. В самом деле в общей стоимости кабельной сети помимо стоимости собственно кабельной продукции весьма существенную долю составляют затраты на ее монтаж и прокладку в соответствии со строительными нормами и правилами. Кроме того, для большинства типов кабелей отечественного производства допускается выполнять прокладку на открытом воздухе при температуре не ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако справедливости ради необходимо отметить неизбежные, а зачастую и непреодолимые трудности организационного характера, связанные с получением официального разрешения на использование радиочастотных каналов. В любом случае техническое решение упомянутых проблем может быть найдено путем применения тех или иных стандартных аппаратных средств, поставляемых фирмой *Advantech*, в зависимости от конкретных условий на объекте автоматизации.

Модуль *ADAM-4530* является адресуемым двунаправленным преобразователем интерфейсов *RS-232/RS-485*. В состав модуля входит микропроцессор, который обеспечивает синхронизацию обмена данными между удаленной сетью на основе интерфейса *RS-485* и контроллером сети в радиоканале. Пример применения модуля *ADAM-4530* приведен на рисунке 4.8.

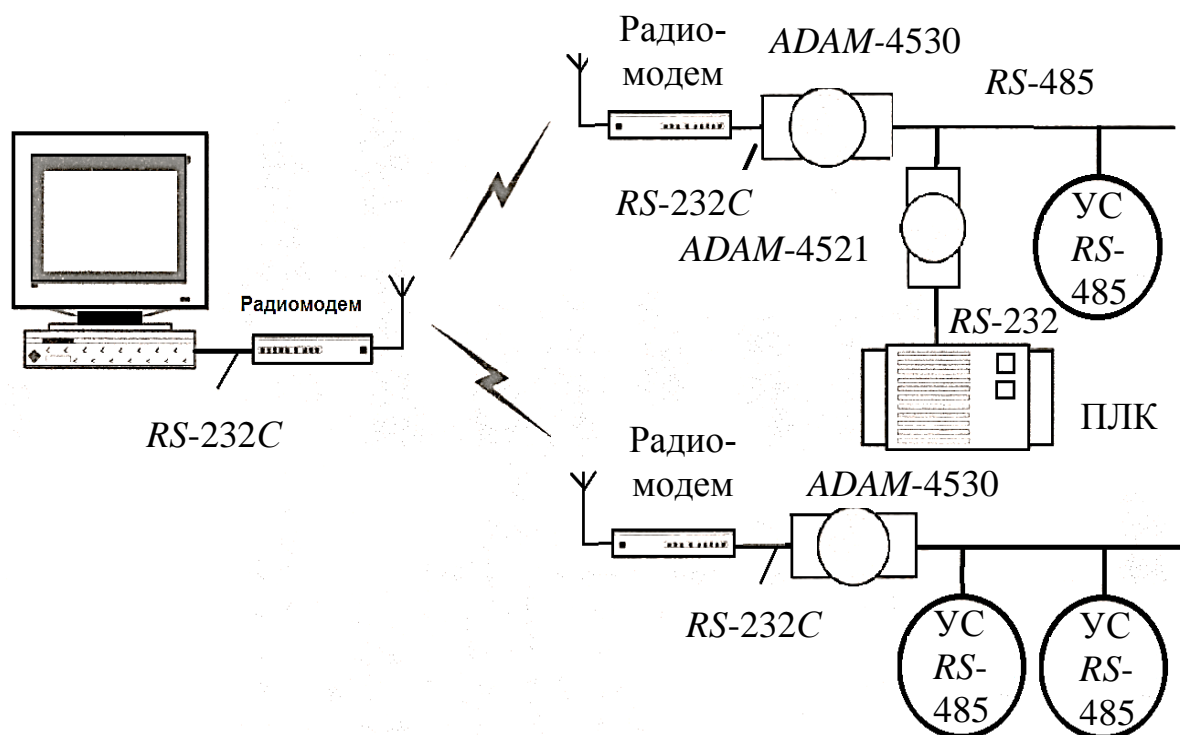


Рисунок 4.8 – Вариант применения модуля *ADAM-4530*

Модуль *ADAM-4550* представляет собой радиомодем, в котором применена технология шумоподобного сигнала (ШПС). Модуль имеет интерфейсы *RS-232* и *RS-485* и обладает следующими характеристиками:

- скорость передачи данных по каналу интерфейса *RS-232/RS-485*: 1200, 2400, 4800, 9600, 19 200, 38 400, 57 600, 115 200 бит/с;

- соединители интерфейса *RS-422/RS-485*: разъемные, клеммные колодки с винтовым присоединением проводников;
- соединитель интерфейса *RS-232*: розетка типа *DB-9*;
- скорость передачи данных по радиоканалу – 1 Мбит/с;
- несущая частота – 2,45 ГГц;
- номинальная излучаемая мощность передатчика – 100 мВт;
- вид модуляции: непосредственная фазовая манипуляция *M*-последовательностью;
- адрес в радиосети устанавливается программным способом; размер поля адреса – 14 бит;
- диапазон рабочих температур от –10 до +70 °С;
- питание модуля осуществляется напряжением от 10 до 30 В.

В комплект поставки модуля *ADAM-4550* входит малогабаритная антенна с круговой диаграммой направленности, подключаемая непосредственно к модулю и обеспечивающая дальность связи при условии наличия прямой видимости между абонентами радиосети не менее 150 м. В случае применения направленных антенн дальность связи может быть увеличена до 10 км (в пределах прямой видимости). Один из вариантов применения модуля *ADAM-4550* показан на рисунке 4.9.

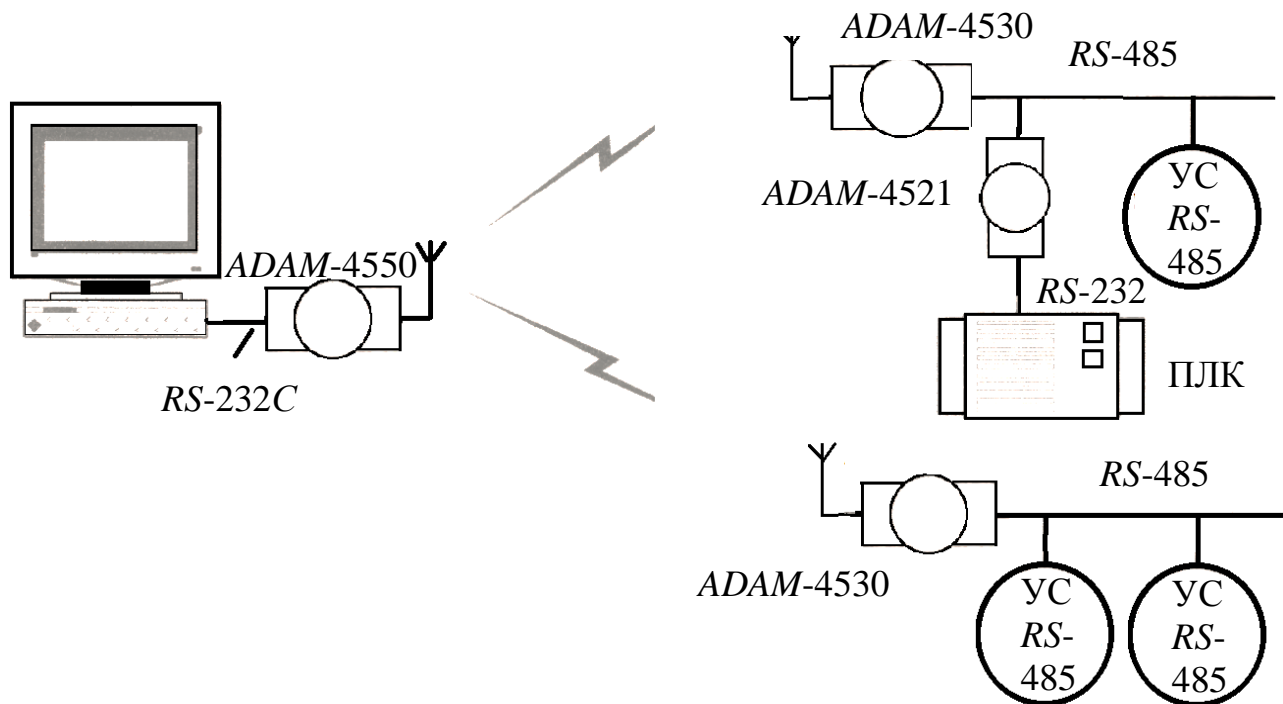


Рисунок 4.9 – Применение модуля *ADAM-4550*

Ранее отмечалось одно из ограничений, присущих системам на основе проводных каналов связи (КС), а именно, наличие повышенных, а иногда и непреодолимых трудностей обеспечения единого нулевого потенциала для абонентов информационно-измерительной сети на территориально распределенных про-

мышленных объектах. Для решения данной проблемы помимо беспроводных используются каналы связи на основе волоконно-оптических линий (ВОЛС). В серию интерфейсных преобразователей *ADAM-4000* входит модуль *ADAM-4550*, который является преобразователем интерфейса *RS-232* в интерфейс ВОЛС. Применение данного модуля для организации связи на основе ВОЛС наиболее целесообразно в условиях наличия интенсивных электромагнитных помех и атмосферных разрядов, препятствующих устойчивому функционированию систем на базе проводных каналов связи и/или радиоканала. Конструктивное исполнение модуля *ADAM-4550* аналогично остальным изделиям серии *ADAM-4000*. Электрические характеристики интерфейса с КС соответствуют требованиям *EAIRS232C* и рекомендациям *V.24* и *V.28* Международного конгресса качества телекоммуникаций. Порт ВОЛС модуля оснащен ответной частью соединителя типа *ST* или *SMA*. Дальность связи – не менее 2 км. Обмен данными по волоконно-оптической линии связи осуществляется в режиме полного дуплекса. Диапазон рабочих температур модуля – от 0 до 50 °С. В качестве физической среды интерфейса ВОЛС может быть использован кабель с диапазоном длин волны 50/125 мкм, 62,5/125 мкм и 100/140 мкм.

Весьма перспективным в серии *ADAM-4000* можно считать *ADAM-4500*. Данное устройство может использоваться в качестве полноценного контроллера сети благодаря наличию в его составе микропроцессора *80C188*, двух последовательных портов (*RS-232* и *RS-232/RS-485*), 170 Кбайт флеш-ПЗУ для хранения и 234 Кбайт ОЗУ для использования прикладного программного обеспечения. В оставшейся части флеш-ПЗУ (86 Кбайт) находится автоматически загружаемая операционная система *ROM-DOS*, совместимая с *MS-DOS* фирмы *Microsoft*. Кроме того, модуль содержит часы реального времени и сторожевой таймер. Разработка программного обеспечения для модуля *ADAM-4500* выполняется при помощи любого инструментального средства, подобного Си или Си++, на стандартном *IBM PC* – совместимом персональном компьютере – с использованием операционной системы *MS-DOS*. Перед пересылкой во флеш-ПЗУ модуля через коммуникационный порт *RS-232* исполняемый код приложения должен быть преобразован в программу, совместимую с процессором *80188*, путем использования специальной сервисной программы, входящей в комплект поставки модуля. Варианты применения модуля *ADAM-4500* показаны на рисунке 4.10.

Таким образом, серия *ADAM-4000* представляет собой набор модулей, обеспечивающих интеграцию в единую систему устройств операторского интерфейса и устройств сбора данных и управления, в том числе дискретного и аналогового ввода-вывода, релейной коммутации и ввода импульсных сигналов. Кроме того, в составе серии имеется и ряд коммуникационных модулей для обмена данными по различным каналам связи: беспроводным (радиоканал), проводным и волоконно-оптическим линиям связи с использованием интерфейсов *RS-485* и *CAN*, протоколов *Modbus* и *Device Net*. Пользователь может выбрать тот канал связи, который оптимально соответствует решаемой задаче. Данные для

отображения и контроля могут быть напрямую переданы на верхний уровень системы управления через сеть *Ethernet*. Все описанные возможности реализуются без больших дополнительных затрат с использованием уже имеющихся каналов и линий связи.

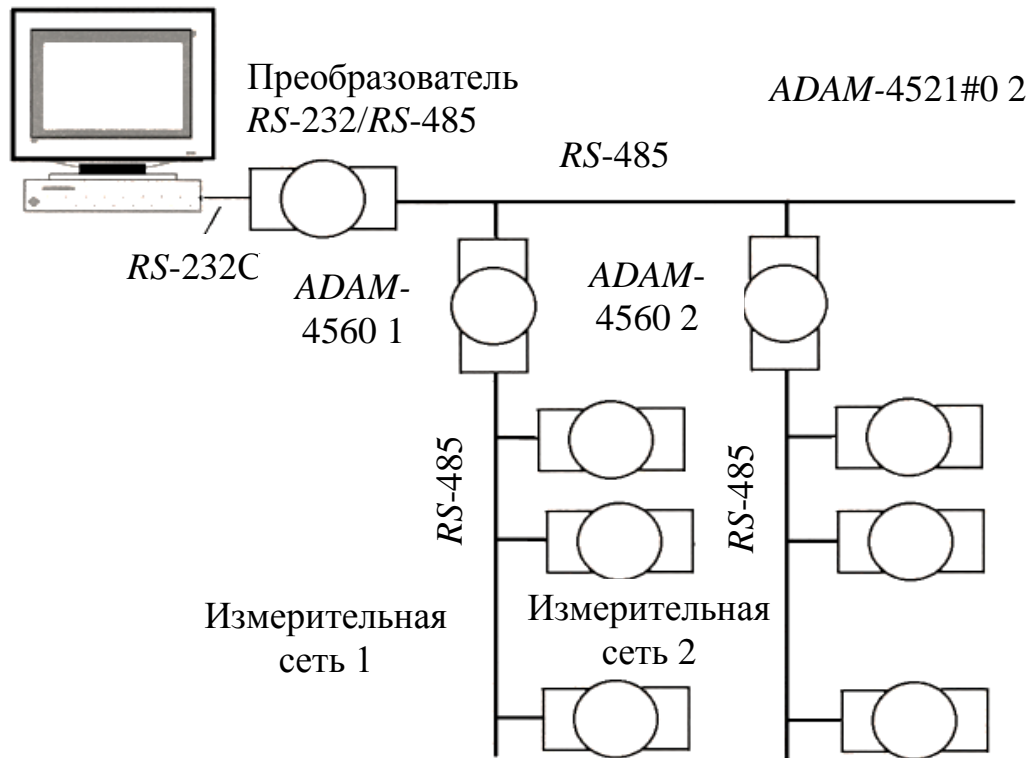


Рисунок 4.10 – Вариант применения модуля *ADAM-4500*

Модули *ADAM-4570/4571/4572* предназначены для сопряжения устройств и сетей на базе последовательных интерфейсов *RS-232/485/422* с сетью *Ethernet*. Использование таких модулей делает возможным для всех абонентов сети *Ethernet* непосредственный доступ к данным модулей удаленного ввода-вывода.

Протокол *Modbus* де-факто является стандартом для систем промышленной автоматизации. Для интеграции имеющихся сетей на его основе и предназначен модуль *ADAM-4572*, который представляет собой шлюз между сетями *Ethernet* и *Modbus*. Кроме того, с помощью *IBM PC* и совместимого с ним программируемого микроконтроллера *ADAM-5511*, имеющего встроенную поддержку протокола *Modbus*, очень просто осуществить модернизацию и развитие действующих систем автоматизации.

Устройства серии *ADAM-4000* объединяются в сеть с использованием интерфейса *RS-485*, который является одним из наиболее распространенных промышленных стандартов для двунаправленной последовательной передачи данных по симметричной двухпроводной линии связи. Интерфейс

EAIRS-485 был специально разработан для применения в промышленной автоматизации для высокоскоростной передачи информации на большие расстояния. Во всех модулях серии *ADAM-4000* реализована оптическая изоляция интерфейса последовательной передачи данных для предотвращения влияния гальванической связи между территориально распределенными устройствами на качество функционирования системы, а также для снижения вероятности повреждения модулей импульсными помехами и выбросами напряжения в цепях питания и линии связи.

Для приложений, в которых требуется передача данных на большое расстояние или полная невосприимчивость канала связи к воздействию электромагнитных помех и атмосферных разрядов, рекомендуется использовать волоконно-оптические линии связи и модуль *ADAM-4541* для сопряжения этих линий с проводными каналами связи, в которых используются интерфейсы *RS-232* и *RS-485*. Протяженность линии связи при использовании модулей *ADAM-4541* может достигать 2,5 км. Для приложений, в которых определяющее значение имеет работа в реальном масштабе времени, а также быстрый и прямой обмен данными между отдельными устройствами системы, рекомендуется использовать интерфейс *CAN* и модули *ADAM-4525* для его организации. Эти модули осуществляют преобразование сигналов интерфейса *RS-232* в сигналы шины *CAN*. При этом для *CAN* обеспечивается передача данных со скоростью до 500 кбит/с на расстояние до 1000 м.

Наименование, назначение и характеристики модулей серии *ADAM-4000* приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Модули серии *ADAM-4000*

Назначение	Наименование	Характеристика
Контроллер	<i>ADAM-4500</i>	Контроллер связи совместимый с <i>IBM PC</i>
Коммутация	<i>ADAM-4570</i>	Шлюз передачи данных от двух портов <i>RS-232/422/485</i> в сеть <i>Ethernet</i>
	<i>ADAM-4571</i>	Шлюз передачи данных от одного порта <i>RS-232/422/485</i> в сеть <i>Ethernet</i>
	<i>ADAM-4572</i>	Шлюз передачи данных от одного порта <i>RS-232/422/485</i> с протоколом <i>Modbus</i> в сеть <i>Ethernet</i>
	<i>ADAM-4510</i>	Повторитель сигналов интерфейса <i>RS-422/485</i>
	<i>ADAM-4510S</i>	Повторитель сигналов интерфейса <i>RS-422/485</i> с гальванической изоляцией

Продолжение таблицы 4.3

Назначение	Наименование	Характеристика
	ADAM-4520	Преобразователь сигнала интерфейса RS-232 в RS-232/485 с гальванической изоляцией
	ADAM-4521	Адресуемый преобразователь сигналов интерфейса RS-232 в RS-422/485
	ADAM-4525	Преобразователь интерфейсов RS-232/CAN
	ADAM-4541	Модуль сопряжения интерфейсов RS-232/422/485 с ВОЛС
Дискретный ввод	ADAM-4052	Модуль гальванически изолированного дискретного ввода
	ADAM-4053	16-канальный модуль
Дискретный вывод	ADAM-4060	Модуль релейной коммутации
Аналоговый ввод	ADAM-4012	Модуль аналогового ввода
	ADAM-4017	Модуль 8-канального ввода
	ADAM-4011	Модуль аналогового ввода
	ADAM-4018M	8-канальный регистратор аналоговых сигналов
	ADAM-4019	8-канальный универсальный модуль аналогового ввода
	ADAM-4013	Модуль ввода сигнала термометра сопротивления
	ADAM-401	6-канальный модуль ввода сигнала термопар
	ADAM-4021	Модуль аналогового вывода
Аналоговый вывод	ADAM-4050	Модуль дискретного ввода-вывода
Ввод-вывод	ADAM-4016	Модуль аналогового ввода-вывода
	ADAM-4080	Модуль ввода частотных/импульсных сигналов

Структура системы удаленного сбора данных и управления на базе модулей серии ADAM-4000 приведена на рисунке 4.11.

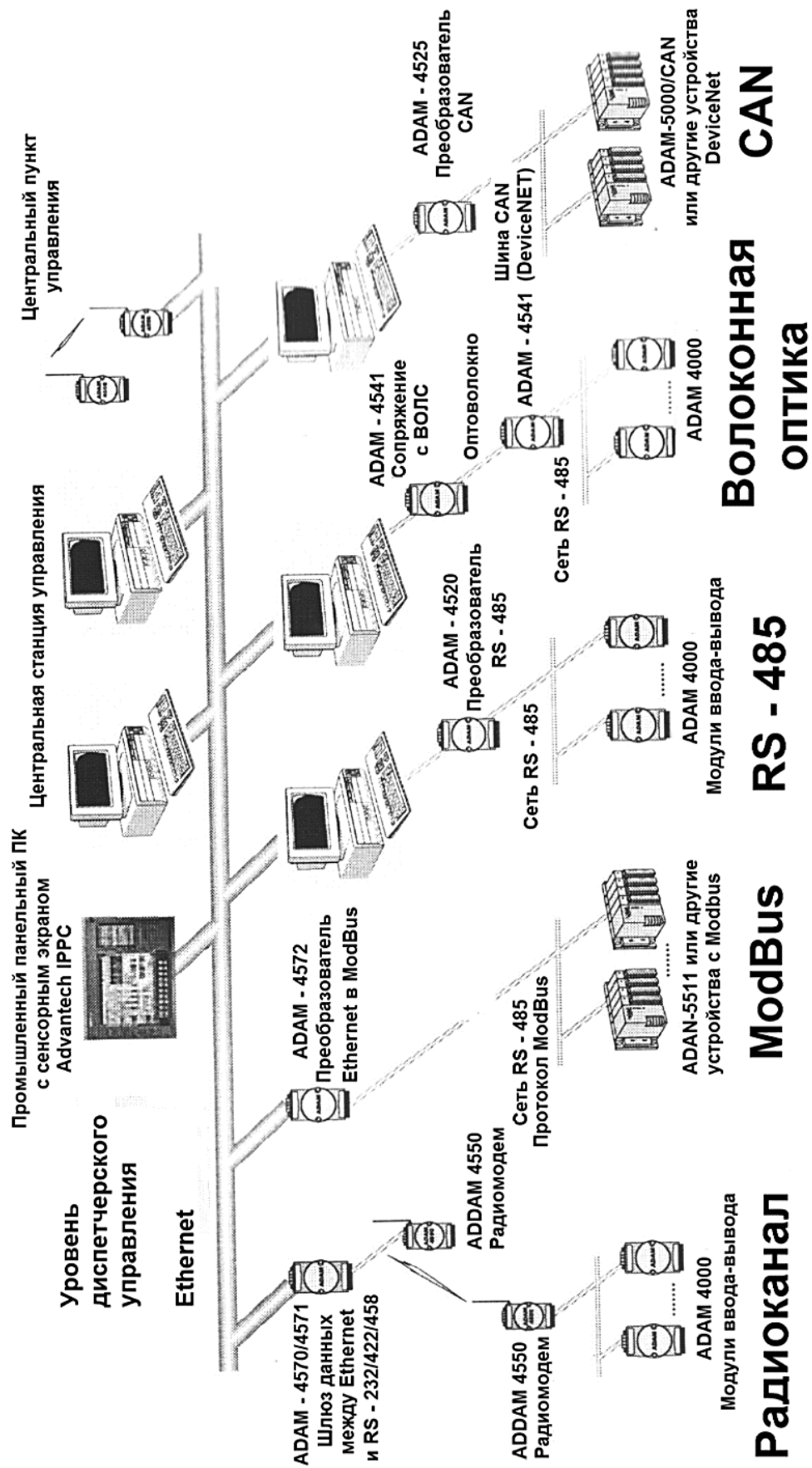


Рисунок 4.11 – Система удаленного сбора данных и управления

4.2.4 Контроллеры сбора данных и управления ADAM-5000

Появление изделий данной серии явилось результатом развития концепции построения измерительных сетей на основе модулей ADAM-4000 и коммуникационного протокола *Fieldbus*. В настоящее время реализована поддержка двух широко применяющихся в промышленности интерфейсов: *EAI RS-485* и *CAN (Controller Area Network)*.

По назначению контроллеры серии ADAM-5000 аналогичны модулям ADAM-4000. Основные отличия заключаются в следующем. Конструктивное исполнение подобно традиционным ПЛК. Контроллер состоит из блока процессора и модулей ввода-вывода, устанавливаемых в локальную магистраль блока процессора. Каждый блок процессора может объединять на локальной магистрали до 64 каналов аналогового и/или дискретного ввода-вывода.

Скорость передачи данных в пределах сети на основе интерфейса *RS-485*, состоящей из 256 контроллеров, может составлять до 115 200 бит/с. Для контроллеров ADAM-5000/*CAN* скорость обмена зависит от используемого протокола прикладного уровня.

Трехуровневая гальваническая изоляция. Структурная схема блока процессора приведена на рисунке 4.12, в которой предусмотрена трехуровневая гальваническая изоляция.

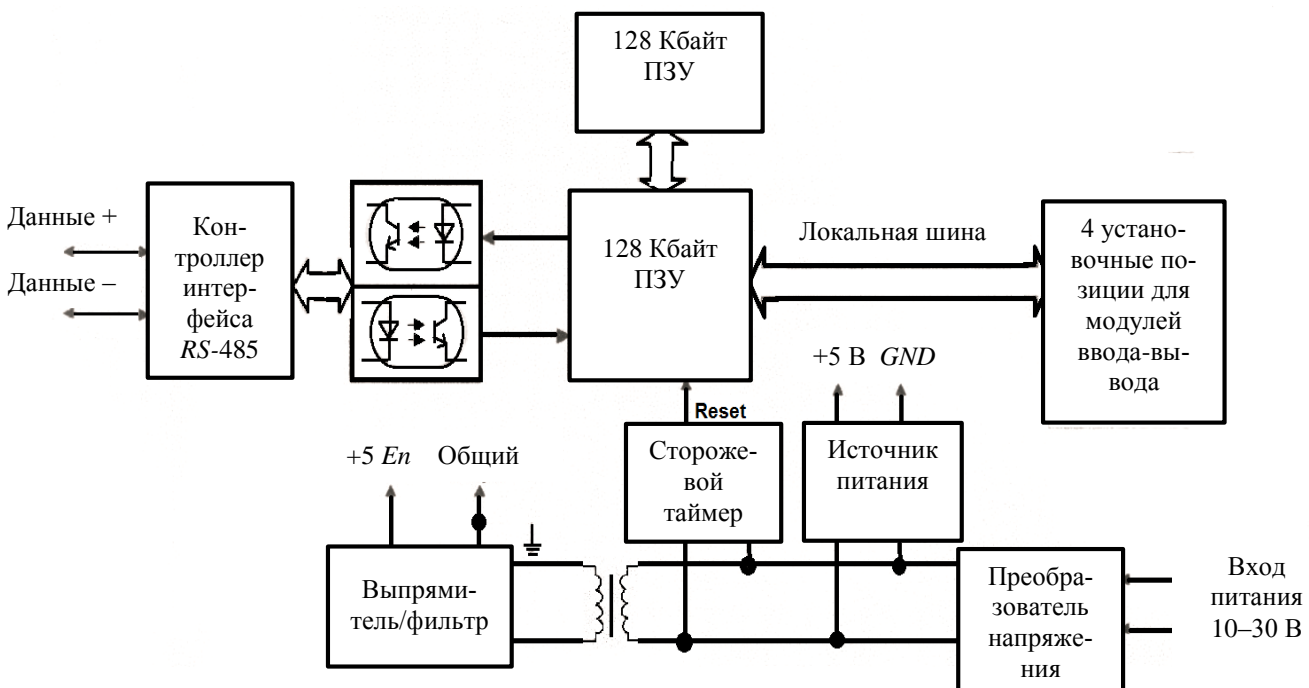


Рисунок 4.12 – Структурная схема блока процессора ADAM-5000

Первый уровень обеспечивает гальваническую изоляцию цепей питания процессора, второй – изоляцию между процессором и приемопередатчиком интерфейса последовательной связи. Каждый модуль ввода-вывода также имеет

гальванически изолированный выход на локальную магистраль блока процессора. Напряжение изоляции приемопередатчика составляет 2500 В. Для остальных уровней изоляции данный параметр равен 3000 В.

Присвоение сетевого адреса модулям *ADAM-4000* выполняется программным способом, что не всегда удобно. Контроллеры серии *ADAM-5000* оснащены набором переключателей, предназначенных для этой цели.

Одноканальные модули аналогового ввода серии *ADAM-4000* имеют два дискретных выхода, изменение состояния которых возможно связать с событиями на канале аналогового ввода, заключающимися в выходе измеряемого параметра за пределы предварительно заданного диапазона. В контроллерах серии *ADAM-5000* обеспечена возможность назначения условий управления с любого из каналов аналогового ввода контроллера на любой входящий в состав контроллера канал дискретного вывода. Для контроллеров *ADAM-5000/CAN* указанная возможность расширена в еще большей степени: любой канал аналогового ввода и/или дискретного вывода информационно-измерительной сети может быть логически связан с любым из каналов аналогового и/или дискретного ввода, входящим в состав любого из контроллеров данной сети, а это означает, что любой абонент сети может быть инициатором передачи данных в адрес любого другого абонента. Как и для серии *ADAM-4000*, все операции по настройке параметров конфигурации контроллера, за исключением сетевого адреса, выполняются программным способом.

Многоканальные модули аналогового ввода серии *ADAM-4000* обеспечивают возможность только поочередного считывания значений измеряемых параметров на каждом входе. Модули аналогового ввода, входящие в серию *ADAM-5000*, позволяют выполнять одновременно считывание значений за один запрос.

Большими функциональными возможностями обладают контроллеры серии *ADAM-5500*, блок процессора которых имеет в своем составе процессор 80188/80386, флеш-ПЗУ объемом 256 Кбайт, содержащее автоматически загружаемую операционную систему *ROM-DOS* и обеспечивающее возможность записи прикладного программного обеспечения, а также ОЗУ объемом 256 Кбайт, предназначенное для его загрузки и исполнения. После загрузки программного обеспечения контроллер данной серии способен функционировать в автономном режиме, подобно программируемым логическим контроллерам других производителей, но обладая при этом открытой архитектурой, совместимой с *IBM PC*.

Фирма *Advantech* ведет интенсивную работу по развитию серии *ADAM-5000* в части увеличения производительности процессора (785/586), разработки нового программного обеспечения и реализации поддержки более широкой номенклатуры шин семейства *Fieldbus* (*PROFIBUS* и т. п.).

Наименование, назначение и характеристики модулей серии *ADAM-5000* приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Модули серии ADAM-5000

Назначение	Наименование	Характеристика
Аналоговый ввод	ADAM-5013	3-канальный от термометров сопротивления
	ADAM-5017	8-канальный аналоговый
	ADAM-5017H	8-канальный быстродействующий аналоговый
	ADAM-5018	7-канальный от термопар
Аналоговый вывод	ADAM-5024	4-канальный
Дискретный ввод	ADAM-5051	16-канальный
Дискретный вывод	ADAM-5051D	16-канальный с индикацией входов
	ADAM-5051S	16-канальный с индикацией и защитой от перенапряжения
	ADAM-5052	8-канальный с гальванической изоляцией
	ADAM-5056	16-канальный
Дискретный ввод-вывод	ADAM-5056D	16-канальный с индикацией состояния выходов
	ADAM-5056S	16-канальный с гальванической изоляцией и индикацией
	ADAM-5050	16-канальный
	ADAM-5055S	16-канальный с гальванической изоляцией, индикацией и защитой от перенапряжения по входу
Релейная коммутация	ADAM-5060	6-канальный
Ввод импульсных сигналов	ADAM-5068	8-канальный
	ADAM-5080	4-канальный
Интерфейс RS-232	ADAM-5090	4-портовый, поддерживается в контроллерах ADAM-5510
Микроконтроллер	ADAM-5510	Совместимый с ЭВМ программируемый микроконтроллер. Позволяет реализовать автономно функционирующие распределенные системы управления, для которых применение какого-либо управляющего компьютера совершенно не обязательно

Вариант построения распределенной системы сбора данных и управления на основе контроллеров ADAM-5000/485 показан на рисунке 4.13.

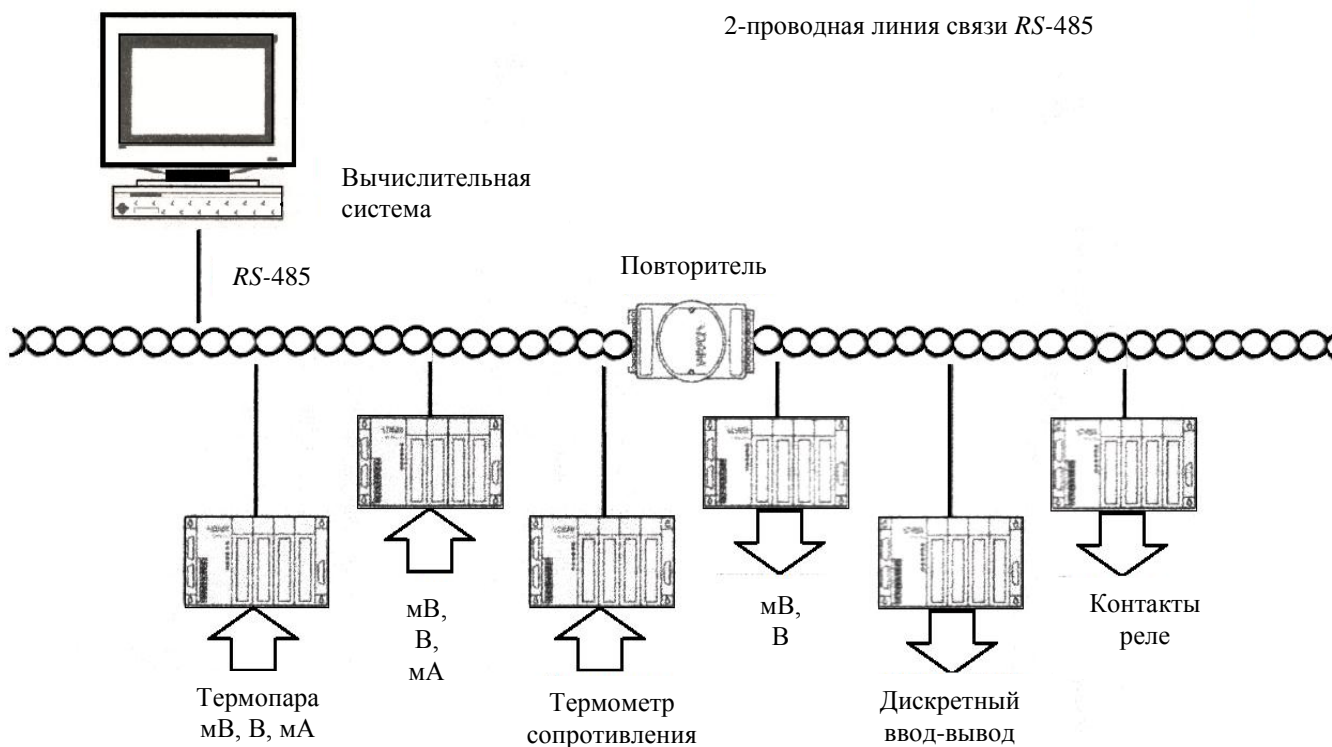


Рисунок 4.13 – Структура распределенной системы сбора данных и управления на базе контроллеров *ADAM-5000/485*

Блок процессора *ADAM-5000/485* имеет следующие технические характеристики:

- тип процессора – 16-разрядный, 80188;
- объем оперативной памяти – 32 Кбайт;
- объем флеш-ПЗУ – 128 Кбайт;
- количество установочных позиций на локальной магистрали – 4;
- сторожевой таймер;
- потребляемая мощность – 1 Вт;
- напряжение изоляции: между процессором и интерфейсом *CAN* – не менее 2500 В постоянного тока, цепей питания – не менее 3000 В;
- имеется один последовательный порт интерфейса *RS-232*;
- количество портов *CAN* – 2;
- среда обмена данными – экранированная витая пара;
- максимальная дальность связи при использовании протокола *Device Net*:
 - а) 500 м при скорости обмена 125 кбит/с;
 - б) 200 м при скорости обмена 250 кбит/с, 100 м при скорости обмена 500 кбит/с;
 - в) 40 м при скорости обмена 1 Мбит/с;
- количество контроллеров, обслуживаемых по одному последовательному порту – до 64;
- протоколы обмена – *Device Net* и *CANopen*;

- формат асинхронной передачи данных: 1 старт-бит; 11-разрядное поле адреса, 1-разрядное поле управления, 8 байт данных, 15-разрядное поле контрольной суммы, 1 бит окончания кадра (АСК);

- контроль ошибок и столкновений: проверка контрольной суммы, целостности кадра, поразрядная проверка и контроль занятости канала связи;

- гарантированное время редакции/обслуживания запроса при скорости обмена 500 кбит/с – не более 94 мкс.

Вариант построения распределенных систем сбора данных и управления на основе контроллеров *ADAM-5000/CAN* показан на рисунке 4.14.

В качестве преобразователя интерфейсов *RS-232/CAN* для подключения к последовательному порту КС имеется возможность применения модуля *ADAM-4525*, обеспечивающего скорость обмена для интерфейса *CAN* до 1 Мбит/с и оснащенного цепями гальванической изоляции (напряжение изоляции – 3000 В). Для организации очередного сегмента сети на основе интерфейса *CAN* предназначен модуль *ADAM-4515*. В качестве формиратора интерфейса *CAN* в составе *IBM PC* – совместимого персонального компьютера – может быть применен один из модулей фирмы *Advantech*, предназначенный для непосредственной установки в соединитель магистрали *ISA*. Перечень модулей и их технические характеристики приведены в таблице 4.5.

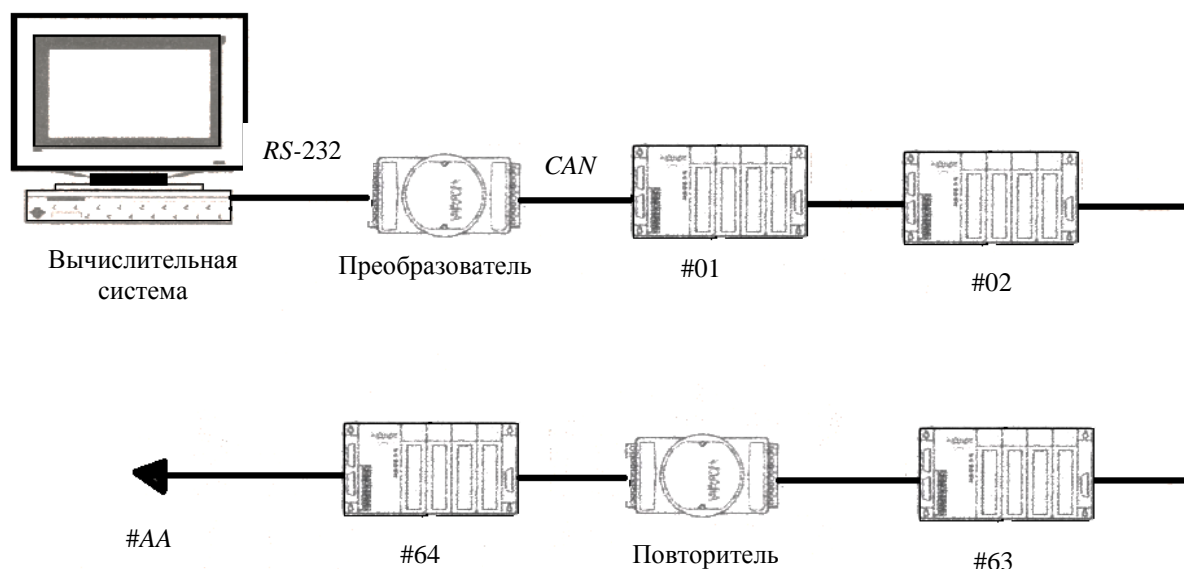


Рисунок 4.14 – Структура распределенной системы сбора данных и управления на базе контроллеров *ADAM-5000/CAN*

Таблица 4.5 – Характеристики модулей-соединителей

Параметр	Модули		
	<i>PCL-841</i>	<i>PCL-845</i>	<i>PCM-3680</i>
Количество независимых каналов	2	2	2
Поддерживаемые сигналы	<i>CAN-H, CAN-L</i>	<i>CAN-H, CAN-L</i>	<i>CAN-H, CAN-L</i>
Тип контроллера <i>CAN</i>	<i>SJA-1000</i>	<i>SJA-1000</i>	<i>SJA-1000</i>
Тип приемопередатчика	85C250	85C250	85C250
Скорость обмена	до 1 Мбит/с	до 1 Мбит/с	до 1 Мбит/с
Особенности	–	Имеет встроенный процессор V25+ и протокол прикладного уровня	Модуль выполнен в формате <i>PC/104</i>

В заключение следует отметить, что изделия серии *ADAM-5000* представляют собой устройства значительно более высокого уровня. На их основе практически без вмешательства контроллера сети можно решать многие задачи сбора данных и управления, а также приема при тщательной проработке алгоритмов двух- или однокомпозиционного управления. За счет более высокой скорости обмена количество каналов распределенной системы может быть существенно увеличено по сравнению с модулями *ADAM-4000*.

В то время как сети на основе интерфейса *RS-485* строятся в основном по принципу «главный – подчиненный» с последовательным опросом узлов, в сетях на базе интерфейса *CAN* каждый узел может инициировать передачу данных в произвольный момент времени. Поэтому если в рамках распределенной системы требуется обеспечить немедленную доставку сообщений о каком-либо событии (аварийная сигнализация и т. п.) в адрес другого абонента сети, предпочтительнее использовать серию *ADAM-5000/CAN*. Таким образом, новые изделия фирмы *Advantech* открывают еще более широкие возможности эффективной реализации сложных проектов в области промышленной автоматизации в максимально сжатые сроки.

Характеристики модулей серии *ADAM-6000* приведены в таблице 4.6, модулей *ADAM-8000* – в таблице 4.7, радиомодемов и других устройств систем передачи информации – в таблице 4.8.

Таблица 4.6 – Модули серии ADAM-6000

Назначение	Наименование	Характеристика
Аналоговый ввод	ADAM-6015	7-канальный от термометров сопротивления
	ADAM-6017	8-канальный
	ADAM-6018	8-канальный от термопар
Дискретный ввод-вывод	ADAM-6050	12-канальный с гальванической изоляцией
	ADAM-6051	16-канальный с двумя счетчиками
	ADAM-6052	8-канальный ввод; 8-канальный мощный (до 35 В/1 А) вывод
Универсальный ввод-вывод	ADAM-6024	6-канальный аналоговый ввод; 2-канальный аналоговый вывод; 2-канальный дискретный ввод; 2-канальный дискретный вывод
Релейная коммутация и дискретный ввод	ADAM-6060	6-канальный вход с гальванической изоляцией; 6 реле
Двухконтурный ПИД-регулятор	ADAM-6022	2 контура регулирования, в каждом из которых 3 аналоговых входа, 1 аналоговый выход, 1 дискретный вход/выход

Таблица 4.7 – Модули серии ADAM-8000

Назначение	Наименование	Характеристика
Аналоговый ввод-вывод	ADAM-8231-1BD52	4 канала аналогового ввода (мА, В, термопары, термометры сопротивления)
	ADAM-8231-1BD60	4 канала аналогового входа (0/4–20 мА)
	ADAM-8231-1BF00	8 каналов аналогового ввода (термопары, термометры сопротивления)
	ADAM-8232-1BD50	4 канала аналогового вывода (мА, В)
	ADAM-8234-1BD50	2 канала аналогового ввода, 2 канала аналогового вывода

Продолжение таблицы 4.7

Назначение	Наименование	Характеристика
Дискретный ввод-вывод	<i>ADAM-8221-1BF00</i>	8 каналов дискретного ввода 24 В (постоянный ток)
	<i>ADAM-8221-1BH10</i>	16 каналов дискретного ввода 24 В (постоянный ток)
	<i>ADAM-8221-1FD00</i>	4 дискретных входа 230 В (переменный ток)
	<i>ADAM-8221-1FF20</i>	8 каналов дискретного ввода 230 В (постоянный и переменный ток)
	<i>ADAM-8221-1FF30</i>	8 каналов дискретного ввода 24–48 В (постоянный и переменный ток)
	<i>ADAM-8222-1BH20</i>	16 каналов дискретного вывода 24 В/2 А (постоянный ток)
	<i>ADAM-8222-1HD10</i>	4 канала дискретного вывода релейного типа, 5 А
	<i>ADAM-8222-1HD20</i>	8 каналов дискретного вывода релейного типа, 16 А
	<i>ADAM-8222-2BL10</i>	32 канала дискретного вывода 24 В/1 А (постоянный ток)
Коммуникационный процессор	<i>ADAM-8208-1DP01</i>	Интерфейс <i>PROFIBUS DP</i> со скоростью передачи до 12 Мбит/с, до 125 устройств
	<i>ADAM-8240-1CA10</i>	Интерфейс <i>RS 422/485</i> ; поддерживаемые протоколы: <i>Modbus/ASCII</i> и <i>Modbus/RTU</i>
Интерфейсный модуль	<i>ADAM-8253-1DN00</i>	Модуль <i>Divice Net Slave</i> : скорость передачи – 125, 250 и 500 кбит/с; подключение до 32 модулей ввода-вывода
	<i>ADAM-8253-1DP00</i>	Модуль <i>PROFIBUS DP Slave</i> : скорость передачи – до 12 Мбит/с; подключение до 32 модулей ввода-вывода
	<i>ADAM-8253-1CA01</i>	Модуль <i>CANopenSlave</i> : скорость передачи – до 1 Мбит/с, подключение до 32 модулей ввода-вывода

Таблица 4.8 – Радиомодемы и другие элементы и устройства систем передачи информации

Назначение	Наименование	Характеристика
Усилитель	<i>ANF-2401</i>	Выходная мощность – 1 Вт
Внешняя антенна	<i>ANT-12P 1CPDAS</i>	Дальность – 5 км; направленная; усиление – 12 дБи
	<i>ANT-15 1CPDAS</i>	Дальность – 9 км; всенаправленная; усиление – 15 дБи
	<i>ANT-18 1CPDAS</i>	Дальность – 12 км; направленная; усиление – 18 дБи
Модем	ГАММА-433	Передача цифровой информации от телеметрических датчиков
	<i>TC35i Siemens</i>	Факс/модем в стандарте <i>GSM 900/1800</i> МГц; при подключении внешней телефонной трубки можно использовать как сотовый телефон
	<i>XT55 Siemens</i>	Модем передачи данных с поддержкой <i>SPRS</i> и встроенным <i>GPS</i> -приемником на 12 каналов с точностью позиционирования 10 км
	<i>RX100-R COM GPRS</i>	Малогабаритный модем для передачи данных, текстовых сообщений <i>SMS</i> и факсов в сети <i>GSM</i>
	<i>RX101 USB GPRS</i>	Модем для передачи данных в сетях <i>GSM, GPRS</i> ; подключение через <i>USB</i> -порт; питание от <i>USB</i> ; скорость – до 85 кбит/с
	<i>RX201 USB GPRS</i>	Высокоскоростной модем для передачи данных; поддерживает <i>GSM</i> -технологии <i>EDGE</i> ; подключение через <i>USB</i> -порт; питание от <i>USB</i> ; скорость – до 230 кбит/с
	<i>Walecom Fastrack 1206</i>	Обмен телеметрическими сообщениями и командами между машинами
Беспроводная точка доступа	<i>NWH 650VSCom</i>	<i>WI-FI 802.11b wireless LAN</i> ; 40/128-bit <i>WEP</i> -кодирование
<i>GPS</i> -приемник	<i>GM-350 ICPDAS</i>	Частотный диапазон <i>L1 (157 542 МГц)</i> ; <i>C/A code</i> ; 12-канальный
	<i>DAXON PR-GPS</i>	<i>GPS</i> -навигатор; жидкокристаллический дисплей; прием от спутников по 12 параллельным каналам
Блок питания	<i>TELEOFIS</i>	12 В; 500 мА; для модемов <i>TELEOFIS RX 100, RX 102</i>

4.3 Датчики телеметрических систем

4.3.1 Определения и основные характеристики

Устройство, преобразующее физический (телеметрируемый) параметр (ТМП) в первичный электрический сигнал s (обычно напряжение, ток или импеданс), называется датчиком. Датчик, в свою очередь, называют также измерительным преобразователем, поскольку он представляет собой средство измерений для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и/или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателя [43]. Таким образом, здесь сигнал измерительной информации – это сигнал, функционально связанный с измеряемой физической величиной или ТМП.

Совокупность операций, направленных на установление численного значения ТМП, составляет процесс телеизмерения. Если при измерении используются электронные средства обработки сигнала, необходимо сначала преобразовать измеряемый параметр λ в эквивалентную электрическую величину s (первичный сигнал), причем как можно точнее. Это значит, что полученная электрическая величина должна содержать всю информацию об измеряемом параметре $s = f(\lambda)$.

Для всех датчиков характеристика преобразования – соотношение $s = f(\lambda)$ – в численной форме определяется экспериментально в результате градуировки, при проведении которой для ряда точно известных значений λ измеряют соответствующие значения s что позволяет построить градуировочную кривую $s = f(\lambda)$. Из этой кривой для всех полученных в результате измерений значений s можно найти соответствующие значения искомой величины X .

Изменение условий функционирования датчика (температуры, давления, перегрузки и т. д.) приводит к изменению $f(\lambda)$. Это отражается в паспортных данных, где приводятся характеристики с учетом условий работы датчика. Различают характеристики датчиков для статического и динамического режимов их работы [43].

Статическими характеристиками датчика являются:

- $s = f(\lambda)$, имеющая вид графика или таблицы. Эта характеристика называется градуировочной или тарировочной;
- коэффициент преобразования или чувствительность:

$$k = \frac{\Delta s}{\Delta \lambda},$$

где Δs и $\Delta \lambda$ – приращение сигнала и параметра соответственно;

- порог чувствительности (разрешающая способность) датчика, под которым понимается минимальное изменение параметра λ , вызывающее изменение выходного сигнала и превышающее уровень собственных шумов датчика.

Для удобства измерений датчик стараются построить или по крайней мере использовать таким образом, чтобы существовала линейная зависимость между малыми приращениями выходной Δs и входной $\Delta \lambda$ величин ($\Delta s = k\Delta \lambda$).

Большое значение имеют **динамические свойства датчика**, которые характеризуются **инерционностью**. Для экспериментального определения динамических свойств датчика применяются стандартные типовые входные воздействия. По реакции на выходе датчика судят о его инерционных свойствах. Чаще всего применяются входные воздействия типа функций включения или гармонические сигналы. Важными параметрами датчика являются амплитудно-частотная $A(\omega)$ и фазочастотная $\varphi(\omega)$ характеристики.

Характеристиками датчиков являются также диапазон измерений, надежность, габариты, масса, потребляемая мощность и др. Выбирая тип датчика, нельзя забывать об условиях его работы: диапазоне изменений окружающей температуры, механических воздействиях (вибрациях, перегрузках), действии электрических и магнитных полей и радиации, диапазоне изменений атмосферного давления и др.

4.3.2 Классификация телеметрических датчиков

Телеметрические датчики принято классифицировать:

- по физическому параметру, преобразуемому в электрический сигнал, классификация датчиков весьма многообразна. Чаще всего наименование датчика согласуется с измеряемой физической величиной (например, датчик давления);

- по форме сигналов различают датчики функциональных и сигнальных параметров;

- по характеру электрических сигналов датчики подразделяются на датчики постоянного и переменного тока;

- по величине выходного электрического сигнала различают датчики сигнала высокого (100 мВ – 6 В) и низкого уровня (0–100 мВ). Наряду с однодиапазонными датчиками в ряде случаев используются многодиапазонные датчики, которые позволяют охватывать более широкие пределы изменения контролируемого параметра;

- по форме представления сигнала датчики делятся на аналоговые и цифровые;

- в зависимости от метода преобразования неэлектрических величин в электрические сигналы различают активные (генераторные) и пассивные (параметрические) датчики.

Различие между активными и пассивными датчиками обусловлено их эквивалентными электрическими схемами, отражающими фундаментальные отличия в природе используемых в датчиках физических явлений. Активный датчик является источником непосредственно выдаваемого электрического сигнала, а измерение изменений параметров импеданса пассивного датчика производится косвенно, по изменению напряжения или тока в результате его обязательного включения в схему с внешним источником питания. Электрическая схема, непосредственно связанная с пассивным датчиком, формирует его сигнал, и, таким образом, совокупность датчика и этой электрической схемы является источником электрического сигнала.

4.3.3 Активные датчики

Принцип действия активного датчика основан на том или ином физическом явлении, обеспечивающем преобразование соответствующей измеряемой величины в электрическую энергию. Наиболее важные из этих физических явлений указаны в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Физические эффекты, используемые для построения активных датчиков

Измеряемая величина	Используемый эффект	Выходная величина
Температура	Термоэлектрический эффект	Напряжение
Поток оптического излучения	Пироэлектрический	Заряд
	Внешний фотоэффект	Ток
	Внутренний фотоэффект в полупроводнике с <i>p-n</i> -переходом	Напряжение
	Фотоэлектромагнитный эффект	Напряжение
Сила, давление, ускорение	Пьезоэлектрический эффект	Заряд
Скорость	Электромагнитная индукция	Напряжение
Перемещение	Эффект Холла	Напряжение

4.3.4 Пассивные датчики

В пассивных датчиках некоторые параметры выходного импеданса могут меняться под воздействием измеряемой величины. Импеданс датчика, с одной стороны, обусловлен геометрией и размерами его элементов, а с другой – свойствами материалов: удельным сопротивлением, магнитной проницаемостью и диэлектрической постоянной.

Таким образом, изменения импеданса могут быть вызваны воздействием измеряемой величины либо на геометрию и размеры элементов датчика, либо на электрические и магнитные свойства его материала, либо, что реже, на то и на другое одновременно. Геометрические размеры датчика и параметры его импеданса могут изменяться, если датчик содержит подвижный или деформирующийся элемент.

Каждому положению подвижного элемента датчика соответствует определенный импеданс, и измерение его параметров позволяет узнать положение элемента. На этом принципе работает большое число датчиков положения и перемещения объектов: потенциометрических, индуктивных с подвижным сердечником, емкостных.

Деформация является результатом действия силы (или величины, с ней связанной, – давления, ускорения) на чувствительный элемент датчика. Изменение импеданса датчика, вызванное деформацией чувствительного элемента, вызывает изменение соответствующего электрического сигнала в специальной измерительной схеме, в которую этот датчик включают.

Электрические свойства материала и состояние чувствительного элемента датчика зависят от переменных физических величин: температуры, давления, влажности, освещенности и т. д. Если меняется только одна из величин, а остальные поддерживаются постоянными, то можно оценить существующее однозначное соответствие между значениями этой величины и импедансом датчика. Это соответствие описывается градуировочной кривой. Зная градуировочную кривую, по результатам измерения импеданса можно определить соответствующее значение измеряемой величины.

В таблице 4.10 указан ряд физических эффектов, связанных с преобразованием значений электрических характеристик пассивных датчиков. Среди них нужно отметить резистивные датчики.

Таблица 4.10 – Физические принципы преобразования величин и материалы, используемые для построения пассивных датчиков

Измеряемая величина	Электрическая характеристика, изменяющаяся под действием измеряемой величины	Тип используемых материалов
Температура	Сопротивление	Металлы (платина, никель, медь), полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика
Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление	Сплавы никеля, легированный кремний
Емкость	Магнитная проницаемость	Ферромагнитные сплавы
Перемещение	Сопротивление	Магниторезистивные материалы: висмут, антимонид индия
Влажность	Сопротивление, диэлектрическая проницаемость	Хлористый литий, окись алюминия, полимеры
Уровень	Диэлектрическая проницаемость	Жидкие изоляционные материалы

Импеданс пассивного датчика и его изменения можно измерить не иначе, как включая датчик в специальную электрическую схему, содержащую источник питания и схему формирования сигнала. Наиболее часто используются измерительные схемы следующих видов:

- потенциометрическая схема, содержащая соединенные параллельно источник напряжения и датчик-потенциометр;
- мостовая схема, разбаланс которой характеризует изменение импеданса датчика;
- колебательный контур, включающий в себя импеданс датчика (при этом контур является частью генератора колебаний и определяет его частоту);

- операционный усилитель, в котором импеданс датчика является одним из элементов, определяющих коэффициент усиления.

Выбор схемы формирования сигнала является важным этапом в реализации измерений, от которого зависят метрологические характеристики телеметрических комплексов в целом – погрешность, чувствительность, линейность, невосприимчивость к влиянию определенных величин.

4.3.5 Комбинированные датчики

При измерениях некоторых неэлектрических величин не всегда удается преобразовать их непосредственно в электрическую величину. В этих случаях осуществляют двойное преобразование исходной (первичной) измеряемой величины в промежуточную неэлектрическую величину, которую преобразуют затем в выходную электрическую величину. Совокупность двух соответствующих измерительных преобразователей образует комбинированный датчик.

Подобные преобразования удобны для измерения механических величин, вызывающих в первичном преобразователе деформацию или перемещение выходного элемента, к которым чувствителен вторичный преобразователь.

Давление, например, можно измерить с помощью мембраны, служащей первичным преобразователем, деформация которой преобразуется в электрическую величину датчиком, реагирующим на механическое смещение. Так мембрана электродинамического микрофона является первичным преобразователем, деформация которой, вызванная воздействием акустического давления, преобразуется в соответствующий электрический сигнал.

Если механические напряжения в первичном преобразователе не превышают предел упругости, то его характеристика линейна. Характеристику преобразования датчика в целом определяют путем градуировки.

4.3.6 Величины, влияющие на характеристики датчиков

Датчик в определенных условиях эксплуатации может подвергаться воздействию не только измеряемой величины, но и других физических величин, именуемых влияющими, к которым чувствителен датчик. Вариации этих паразитных воздействий могут привести к изменениям выходного электрического сигнала датчика и появлению соответствующей погрешности измерений.

Основными физическими величинами, влияющими на погрешность датчиков, являются:

- **температура**, которая изменяет электрические и механические характеристики датчика, а также размеры составляющих его деталей;

- **давление**, ускорение и вибрация, вызывающие в определенных элементах датчиков деформации и напряжения, изменяющие их чувствительность;

- **влажность**, которая может вызвать изменение определенных электрических характеристик элементов, таких как диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление, вследствие чего возникает опасность нарушения электрической изоляции между отдельными конструктивными элементами датчика (либо между датчиком и окружающей средой);

- **постоянное или переменное магнитное поле**, индуцирующее в проводниках электродвижущую силу, которая накладывается на полезный сигнал, и изменяющее электрические характеристики некоторых чувствительных элементов, например, удельное сопротивление магниторезисторов;

- **изменение параметров напряжения питания** – его амплитуды и частоты.

Если обозначить величины, влияющие на датчик, через g_1, g_2, \dots , то связь между выходным электрическим сигналом s и измеряемой величиной λ , которая в идеальном случае выражается как $s = f(\lambda)$, преобразуется к виду $s = f(\lambda, g_1, g_2, \dots)$.

Для того чтобы в этом случае определить измеряемую величину по выходному сигналу датчика без внесенной влияющими величинами погрешности, необходимо:

- либо снизить значения влияющих величин соответствующей защитой датчика, используя, например, антивибрационное основание, магнитные экраны и др.;

- либо стабилизировать влияющие величины и градуировать датчик для этих условий, используя, например, термостат, источник стабилизированного напряжения питания и др.;

- либо использовать такую схему, которая позволила бы скомпенсировать влияние паразитных величин, например, «мост Уитстона» с двумя одинаковыми датчиками, один из которых предназначен для измерений, а второй – для компенсации погрешности, вызванной влияющими факторами.

В связи с общим развитием техники и появлением широкого класса новых материалов с уникальными свойствами наблюдается явная тенденция совершенствования аппаратуры датчиков. Появляются типы датчиков с возможностями, ранее считавшимися недостижимыми. Мировые производители датчиков активно конкурируют на рынке. В результате разработчики систем телеметрии имеют в своем распоряжении широкий спектр датчиков с высокими техническими характеристиками, легко и просто сопрягаемых с блоками сбора, обработки и контроллерами.

4.4 Сетевое оборудование

При проектировании распределенных АСУ ТП с применением промышленных сетей могут возникать следующие проблемы [41]:

- требуемая длина отводов от общей шины превышает допустимую;
- предельно допустимая длина линии связи меньше необходимой;
- необходимое количество подключенных к сети устройств превышает допустимое по спецификации на используемое оборудование;
- к сети необходимо подключить устройство, не имеющее соответствующего порта (вольтметр на основе интерфейса *RS-485* или *Ethernet*);
- необходимо объединить несколько различных сетей с различными протоколами в единую сеть (например, когда требуется объединить *Ethernet*, *CAN* и *Modbus RTU*);

- не удастся ослабить влияние помех до допустимого уровня, используя медный кабель;
 - фрагмент сети установлен на подвижном объекте.
- Эти и аналогичные проблемы решаются с помощью вспомогательных сетевых устройств: повторителей и преобразователей интерфейса, концентраторов, коммутаторов, мостов, маршрутизаторов, шлюзов (рисунок 4.15).

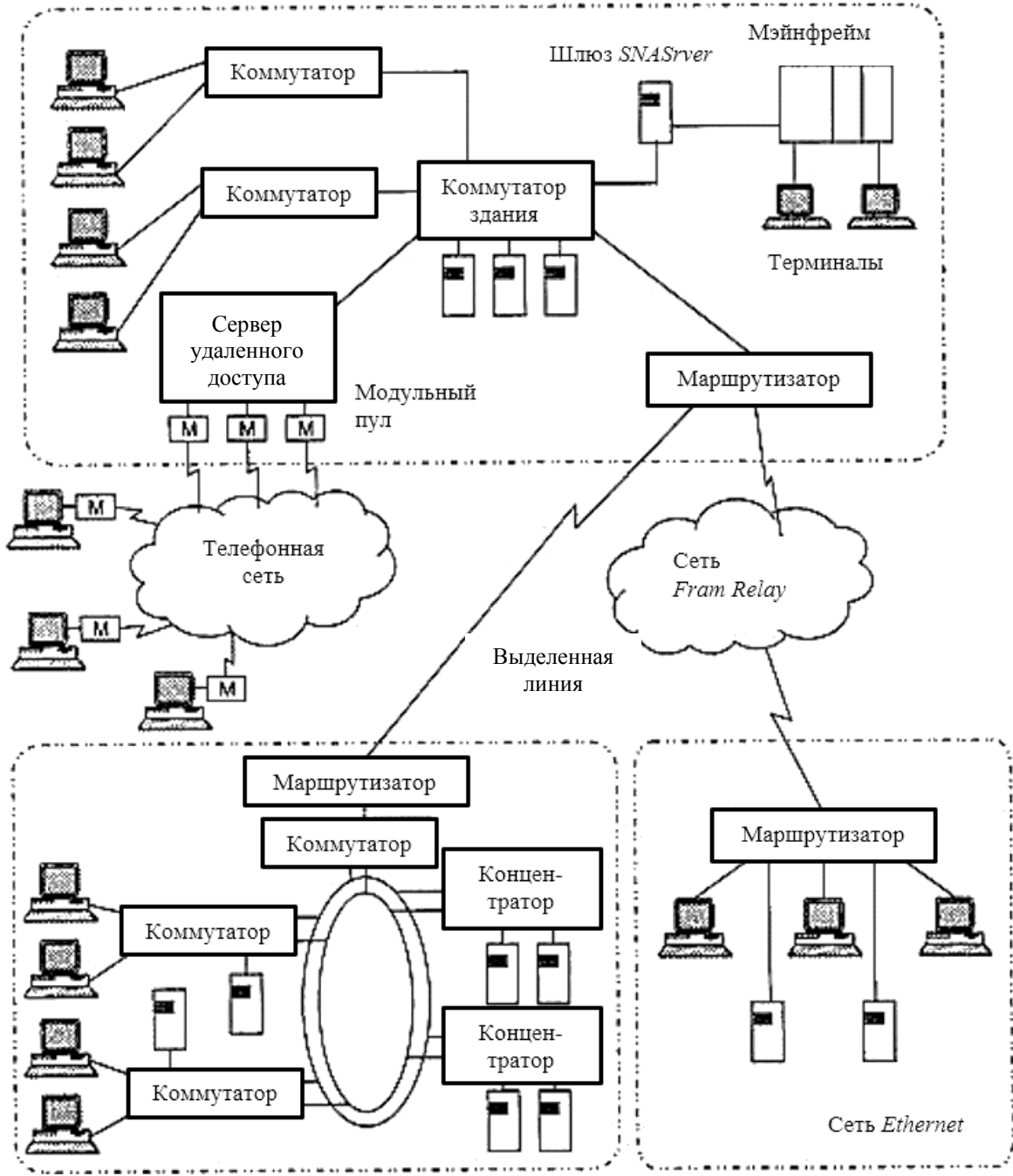


Рисунок 4.15 – Пример разделения сетей на сегменты

4.4.1 Преобразователи интерфейса

Преобразователь (конвертор) интерфейсов (медиаконвертор) используется для обеспечения совместимости устройств с разными интерфейсами или изменения физического способа передачи информации.

Сложность преобразователя интерфейсов существенно зависит от числа уровней модели *OSI* и их функций, которые должны быть реализованы в преобразователе. В простейшем случае, когда требуется преобразовать *RS-232* в *RS-485* и интерфейс *RS-232* работает в режиме программного управления потоком данных, возможна побитовая ретрансляция сигналов без изменения протокола даже физического уровня. Однако в общем случае интерфейс *RS-232* передает параллельно 10 сигналов, в то время как *RS-485* – только два (*Data+* и *Data-*), поэтому для полного преобразования интерфейса пришлось бы делать конвертирование между параллельным и последовательным форматом данных. Кроме того, *RS-232* может работать в полнодуплексном режиме, а *RS-485* только в полудуплексном (при двухпроводной схеме подключения). Поэтому в общем случае преобразование интерфейсов невозможно без изменения протокола передачи данных и специального программного обеспечения для портов ввода-вывода.

Даже если преобразование выполняется без изменения параллельной формы представления информации в последовательную, как, например, в преобразователе *RS-485-CAN*, может потребоваться выполнение одним из интерфейсов специфических для конкретной сети функций канального уровня (адресация, борьба за доступ к шине, отсылка сообщений об ошибках, обеспечение достоверности передачи и др.). Преобразователи интерфейсов не используют функции уровня приложений, поскольку в этом случае они переходят в разряд межсетевых шлюзов.

4.4.1.1 Преобразователь *RS-232* в *RS-485/422*. В простейшем, но наиболее распространенном случае, когда к компьютеру с портом *RS-232* требуется подключить сеть на основе интерфейса *RS-485*, порт *RS-232* используют в режиме программного управления потоком данных. При этом из десяти клемм интерфейса используются только три: *TD* (*Transmit Data* – передача данных), *RD* (*Receive Data* – прием данных) и *SG* (*Signal Ground* – сигнальное заземление), а протокол передачи не зависит от типа интерфейса. Преобразование интерфейса сводится фактически только к побитовому преобразованию потока данных из одной электрической формы в другую, без преобразования протоколов передачи и изменения драйверов порта ввода-вывода.

Структурная схема такого преобразователя показана на рисунке 4.16.

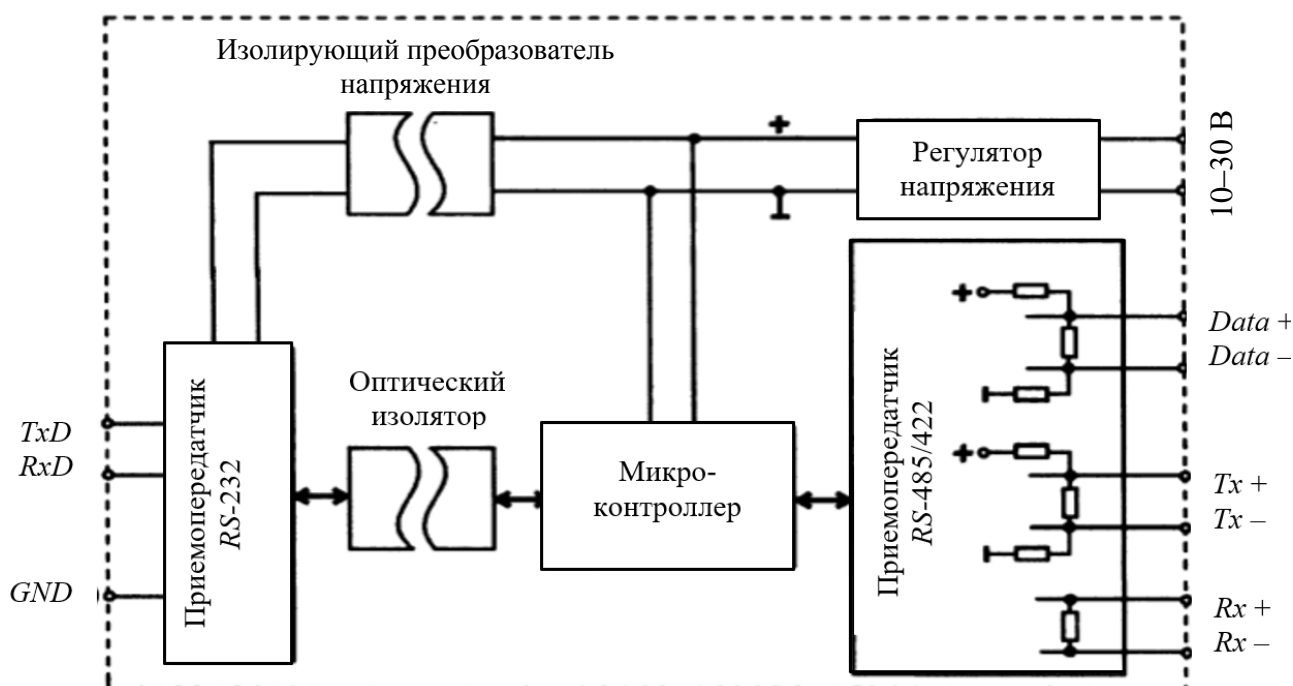


Рисунок 4.16 – Типовая структура двунаправленного преобразователя интерфейсов RS-232 в RS-485 и RS-422 типа NL-232C (www.RealLab.ru)

Описанный преобразователь применяется, например, при подключении к компьютеру промышленной сети Modbus или DCON, а также отдельных устройств с интерфейсом RS-485 или RS-422.

Преобразователи интерфейса часто используют в качестве удлинителей интерфейса, т. е. для увеличения расстояния, на которое можно передать информацию. Например, для удлинения порта RS-232 можно использовать преобразователь RS-232 в RS-485, который обеспечивает дальность до 1,2 км, и на приемном конце сделать обратное преобразование из RS-485 в RS-232. Аналогично можно использовать оптоволоконный интерфейс или CAN. Однако чаще для удлинения интерфейсов используют преобразование в промежуточный нестандартный канал передачи, использующий повышенную мощность сигнала и позволяющий передавать данные на расстояние, например, до 20 км по медному кабелю.

4.4.1.2 Преобразователь RS-232 в оптоволоконный интерфейс. Оптоволоконный канал имеет ряд неоспоримых преимуществ, связанных с оптическим способом передачи информации:

- большая дальность передачи: обычно до 2 км в многомодовом канале или до 20 км в одномодовом, с повторителями – до нескольких сотен километров;
- нечувствительность к электромагнитным помехам, в том числе при разряде молнии или электростатических разрядах;
- отсутствие аварийных ситуаций и порчи оборудования в случае коротких замыканий, отсутствие коррозии мест соединений;

- более высокая пропускная способность (скорость передачи) или уменьшенное количество ошибок в канале при той же скорости по сравнению с медным кабелем;

- гальваническая развязка с практически неограниченным напряжением изоляции;

- хорошая защищенность от несанкционированного доступа: невозможно перехватить передаваемую информацию, не нарушив связь по каналу.

Одномодовое оптоволокно позволяет передавать сигнал на большее расстояние, чем многомодовое, однако коннекторы и приемопередатчики, а также вся кабельная инфраструктура для многомодового оптоволокна обычно на 25–50 % дешевле, чем для одномодового. Это связано с жесткими технологическими допусками на компоненты систем для одномодового волокна.

В многомодовом кабеле распространяются световые волны нескольких мод (длин волн), в одномодовом – одной длины волны. Диаметр сердцевины многомодового оптоволокна на порядок больше длины волны, поэтому технологические допуски на кабельную инфраструктуру могут быть больше, а изготовление дешевле.

Примером оптоволоконного преобразователя может служить преобразователь *SN-OFC-ST-62.5/125* фирмы НИЛ АП (www.RealLab.ru), передающий сигналы по оптоволокну на длине волны 820 нм, имеющий пропускную способность 5 Мбит/с, дальность передачи 1,5 км и разъемы типа *ST* для оптического кабеля.

4.4.1.3 Преобразователь *USB* в *RS-232*, *RS-422*, *RS-485*. Преобразователь из *USB* в *RS-232/422/485* гораздо сложнее, чем описанные выше. Сложность появляется вследствие того, что для шины *USB* стандартом установлен определенный порядок обмена пакетами данных и пакетами квитирования с устройствами *USB*. Поэтому побитовая ретрансляция становится невозможной. В преобразователе интерфейсов большую роль играет модификация драйверов порта.

Преобразователи из *USB* в *RS-232/422/485* используются, когда компьютер имеет недостаточное количество портов *RS-232/422/485*, но есть неиспользуемые порты *USB*. При подключении к компьютеру преобразователя и установки соответствующих драйверов в операционной системе появляется новый виртуальный *COM*-порт, который со стороны программного и аппаратного интерфейса ничем не отличается от обычного.

4.4.2 Адресуемые преобразователи интерфейса

Адресуемый преобразователь интерфейса может выполнять часть сетевых функций: проверку доступности канала, состязание за доступ к каналу, разбивку данных на кадры, обнаружение и коррекцию ошибок, повторную передачу в случае обнаружения ошибок. В частности, в соответствии со стандартом адресуемый преобразователь *RS-232* в *CAN* выполняет все функции физического и канального уровня *CAN*, однако он не выполняет функций уровня приложений, как это делают межсетевые шлюзы.

Наиболее распространены адресуемые преобразователи интерфейса *RS-232* в *RS-485*, которые позволяют подключить к сети на основе интерфейса

RS-485 такие устройства, как вольтметр, аппарат для считывания штрих-кодов, кассовый аппарат или ПЛК с интерфейсом *RS-232*. Для подключения нескольких таких устройств к компьютеру без адресуемых преобразователей потребовалось бы несколько *COM*-портов, по количеству *RS-232*-устройств. Дополнительные *COM*-порты можно получить с помощью преобразователей *USB* в *RS-232* или с помощью многопортовых сетевых карт. Увеличить количество *USB*-портов можно также с помощью *USB*-хабов.

Вторым вариантом является подключение устройств с портом *RS-232* к общей шине *RS-485* с помощью адресуемого преобразователя. Обращение к таким устройствам выполняется по адресу, записанному в программируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ) преобразователя. Использование шины *RS-485* вместо нескольких портов *RS-232* позволяет также отнести устройство на расстояние до 1,2 км от компьютера и расположить его в любом удобном месте.

Примером адресуемого преобразователя может быть модуль *NL-232AC* фирмы НИЛ АП (www.RealLab.ru), структурная схема которого не отличается существенно от структуры обычного безадресного преобразователя, отличие содержится только в микропрограммном обеспечении. Настройка модуля (установка адреса, скорости обмена, длины поля данных, режима четности, количества стоповых битов и др.) выполняется командами в *ASCII*-кодах, которые посылаются в модуль через порт *RS-232*.

Скорости обмена преобразуемых портов могут быть различными. Например, если интерфейс *RS-232* имеет стандартную скорость обмена 115 200 бит/с, а *CAN* имеет стандартную скорость 125 000 бит/с, то преобразование таких интерфейсов невозможно без промежуточной буферизации данных, которая выполняется, например, с помощью буфера *FIFO* (*First Input – First Output*).

Функцию адресуемого преобразователя можно реализовать с помощью универсального контроллера, имеющего соответствующие порты. Контроллер, содержащий программу преобразования портов, называют коммуникационным контроллером. Коммуникационный контроллер принимает сигнал через один из своих портов и передает его через другой порт. В общем случае коммуникационный контроллер может также выполнять функции сигнализации состояния шины, несложные функции управления и быть как ведомым, так и ведущим.

Широкое применение нашли адресуемые преобразователи интерфейса *RS-232* в *Ethernet*. Они позволяют подключить устройство с портом *RS-232* к компьютеру через сеть *Ethernet*. Поскольку написание программ для работы с *Ethernet* портом значительно сложнее, чем для работы с *COM*-портом, преобразователи *RS-232* в *Ethernet* поставляются с драйверами, которые создают в компьютере виртуальные *COM*-порты, каждый из которых соответствует устройству *RS-232*, подключенному к шине *Ethernet* через адресуемый преобразователь. Это позволяет использовать программы, написанные для работы через *COM*-порт, в сети *Ethernet* без какой-либо их модификации. Пользовательское приложение общается с *RS-232*-устройством и через виртуальный *COM*-порт, а все сложности *Ethernet* и стандарта *IEEE 802.3* оказываются скрыты в драйверах, поставляемых в комплекте с адресуемым преобразователем.

4.5 Требования к программному обеспечению

Система телемеханики, построенная в соответствии с требованиями SCADA-систем, обуславливает специфические требования, предъявляемые к программному обеспечению [43]:

- программное обеспечение (ПО) должно представлять собой интегрированный комплекс программных средств, включающих в себя все необходимые для создания современного человеко-машинного интерфейса (HMI) и SCADA-приложений с поддержкой OPC-стандарта;

- комплекс должен работать под управлением *Windows 95/98/NT/2000/XP/Vista/CE* и выше и иметь средства обмена данными по последовательному каналу связи;

- комплекс должен обеспечивать возможность создания пользовательских приложений, допускающих написание специальных программ для создания мнемонических схем на экране дисплея и реализации специфических программ управления;

- программное обеспечение должно обеспечивать динамическое отображение изменения контролируемых параметров и их привязку к физическим каналам ввода-вывода;

- в состав комплекса программных средств должны входить программы, обеспечивающие генерацию отчета о текущем состоянии процесса, работе отдельных приоритетных блоков и систем оборудования, архивацию данных телеметрии и своевременный прогноз, предсказание, обнаружение и идентификацию аварийных и других событий, связанных с контролируемым процессом и состоянием технического оборудования.

Изложенные требования являются достаточными при разработке подавляющего большинства систем телемеханики (СТ). Однако естественно, что особенности некоторых технологических процессов и применяемого специального оборудования программных объектов могут потребовать введения дополнительных требований. Примерами такого специального процесса и оборудования могут быть комплекс оборудования, работающий на шельфовой нефтедобывающей платформе (специальные условия работы объекта и СТ), или технологический комплекс специального оборудования по утилизации радиоактивных отходов (специальные материалы объекта).

В настоящее время имеется достаточно большое количество программных средств, отвечающих сформулированным выше требованиям. Например, *Advantech Studio*, *GeniDAQ* (*Advantech*), *Trace Mode* (Россия), *InTouch* (*Wonderware*), *WinCC* (*Siemens*) и *GENESIS32* (*Iconics*).

Сравнительный анализ указанных программных пакетов показал значительные преимущества пакета *GENESIS32* фирмы *Iconics* по ряду параметров, которые следует считать основными и наиболее существенными для рассматриваемого класса технологических процессов.

Во-первых, данный пакет обладает компонентностью (в отличие от других «монолитных» пакетов). Компонентная архитектура позволяет приобретать

только нужные компоненты и на необходимое количество точек ввода-вывода (тегов). Это обстоятельство позволяет экономить финансовые средства при лицензировании своих программных компонентов, количество и состав которых определяются прикладной задачей.

Во-вторых, пакет *GENESIS32* по сравнению с другими пакетами имеет в своем составе мощные и гибкие средства для создания графических экранных форм с минимальными затратами труда и времени. При этом пакет содержит обширную библиотеку графических символов (примитивов) с возможностью ее расширения пользователем.

В-третьих, в пакет входят компоненты, обеспечивающие широкие возможности для построения различных графических зависимостей контролируемых параметров, их архивации и генерации отчетов.

В-четвертых, пакет *GENESIS32* содержит в своем составе программный компонент, обеспечивающий обнаружение, фильтрацию и представление информации об аварийных событиях.

Все указанные основные преимущества пакета *GENESIS32* определяют целесообразность его применения в качестве программного обеспечения математического информационно-аналитического комплекса основных технологических процессов и ПО.

4.6 Описание пакета *GENESIS32*

Пакет *GENESIS32* является комплексом 32-разрядных приложений для *Windows 95/98/NT/2000*, построенных в соответствии со *OPC*-стандартом. Пакет *GENESIS32* предназначен для создания программного обеспечения сбора данных и оперативного диспетчерского управления верхнего уровня систем промышленной автоматизации.

В состав пакета входит также среда разработки и исполнения сценарных процедур *VBA*, обеспечивающая возможность разработки части программного обеспечения средствами *Visual Basic for Application* для приложений, входящего в состав в пакет *MS Office 2000*. Все программные компоненты реализованы на базе многопоточковой модели и поддерживают технологию *ActiveX*.

В состав пакета *GENESIS32* входят следующие компоненты (клиентские приложения), соответствующие *OPC*-стандарту:

- *GraphWorX32*;
- *TrendWorX32*;
- *AlarmWorX32*.

Эти компоненты могут заказываться и применяться как в составе пакета, так и автономно. Кроме того, в состав пакета входит большое число дополнительных приложений и инструментальных средств разработки.

Рассмотрим далее более подробно назначение и возможности каждого из компонентов пакета.

GraphWorX32 является инструментальным средством, предназначенным для визуализации контролируемых технологических параметров и оперативного

диспетчерского управления, который полностью соответствует OPC-стандарту и поддерживает технологии *ActiveX* и *OLE (Object Linking Embedded)*.

Основные характеристики *GraphWorX32*:

- наличие инструментов для создания экранных форм и динамических элементов отображения;
- встроенная среда редактирования сценарных процедур с помощью *VBA*;
- динамизация элементов отображения с временем обновления графической информации 50 мс;
- поддержка шаблонов экранных форм, содержащих наиболее часто используемые графические объекты;
- возможность взаимодействия с приложениями *MS Office (MS Word, MS Excel, MS Access* и др.);
- наличие обширной и расширяемой пользователем библиотеки элементов отображения, ориентированных на построение мнемосхем промышленных объектов;
- наличие встроенного редактора выражений для выполнения математических, функциональных, логических и других операций над данными.

TrendWorX32 обеспечивает накопление и представление текущих данных в виде графических зависимостей от времени.

Кроме того, *TrendWorX32* является средством архивации накапливаемой информации в базах данных с возможностью последующего извлечения и представления в виде отчета или графика.

Основные характеристики *TrendWorX32*:

- представление значений контролируемых параметров, получаемых от серверов *OPC*, на графиках различных типов в реальном масштабе времени. Поддерживаются следующие виды графиков:
 - а) зависимость от времени;
 - б) логарифмическая зависимость от времени;
 - в) гистограмма;
 - г) круговая диаграмма;
 - д) зависимость одного параметра от другого;
- возможность построения графических зависимостей на основе данных пользователя с помощью сценариев *VBA* или внешних приложений;
- архивирование значений контролируемых параметров в базах данных *MS Access, MS SQL Server, Oracle* и *Microsoft Data Engine (MSDE)*;
- вычисление статистических характеристик выборок значений контролируемых параметров;
- возможность одновременного просмотра текущих и исторических данных в одной области построения;
- вывод графиков на печатающее устройство;
- генерация отчетов в базах данных и *MS Excel*.

AlarmWorX32 является набором программных компонентов, предназначенных для обнаружения аварийных событий, оповещения оператора, приема

подтверждений восприятия информации об аварийных событиях и регистрации информации об авариях в базе данных.

Основные характеристики *AlarmWorX32*:

- обнаружение аварийных событий по множеству критериев и признаков, устанавливаемых пользователем;
- простое оповещение персонала об обнаруженных аварийных событиях путем прерывистого отображения информации об аварии и звукового сигнала;
- голосовое оповещение персонала об обнаруженных аварийных ситуациях;
- оповещение персонала путем автоматического дозвона по коммутируемым каналам связи (*e-mail*, факс) с передачей сообщений об аварийных событиях и приемом подтверждений восприятия от ответственных лиц;
- персональное планирование оповещения для привлечения к мероприятиям по устранению аварийной ситуации только дежурного персонала;
- анализ аварийных событий и действий ответственного персонала;
- связь с аппаратными средствами через интерфейсы *OPC*.

4.7 Пример построения телеметрической системы

Принцип построения современных систем телемеханики на базе контроллеров *ADAM* рассмотрим на базе систем телеизмерения метеопараметров в аэропортах [46].

Система должна измерять следующие метеопараметры: температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление, метеорологическую дальность видимости, высоту нижней границы облачности.

Метеорологические параметры должны измеряться со следующей точностью: температура – 0,4 °С; влажность – 5–10 %; скорость ветра – 0,5 м/с; направление ветра – 10 %; атмосферное давление – 0,5 гПа; метеорологическая дальность видимости – 7–20 %; высота нижней границы облачности – 10 %.

Измерение должно проводиться не реже: температура, влажность и атмосферное давление – 30 с; скорость, направление ветра и метеорологическая дальность видимости – непрерывно; высота нижней границы облачности – 15 с.

В системе должна быть предусмотрена возможность ввода следующих автоматически не измеряемых метеорологических параметров: количество и форма облачности; высота второго и третьего ярусов облачности; видимость огней высокой интенсивности; направление и скорость ветра на различных высотах; метеорологические явления; прогноз на посадку; сцепление на взлетно-посадочной полосе (ВПП); количество осадков; освещенность; степень яркости огней ВПП; дополнительная информация.

Кроме этого, должны сохраняться все данные и действия оператора в архиве и вестись вспомогательные таблицы. Метеорологическая информация должна передаваться службам аэропорта и в метеорологический банк данных.

Датчики должны быть расположены вблизи ВПП в соответствии с требованиями Международного авиационного комитета (МАК).

Метеорологическая информация должна кодироваться международным метеорологическим кодом *METAR*. Кодом *METAR* кодируются только данные регулярных наблюдений за фактической погодой. Сводки *METAR* используются для передачи на другие аэродромы. Структурная схема телеметрической системы метеопараметров приведена на рисунке 4.17.

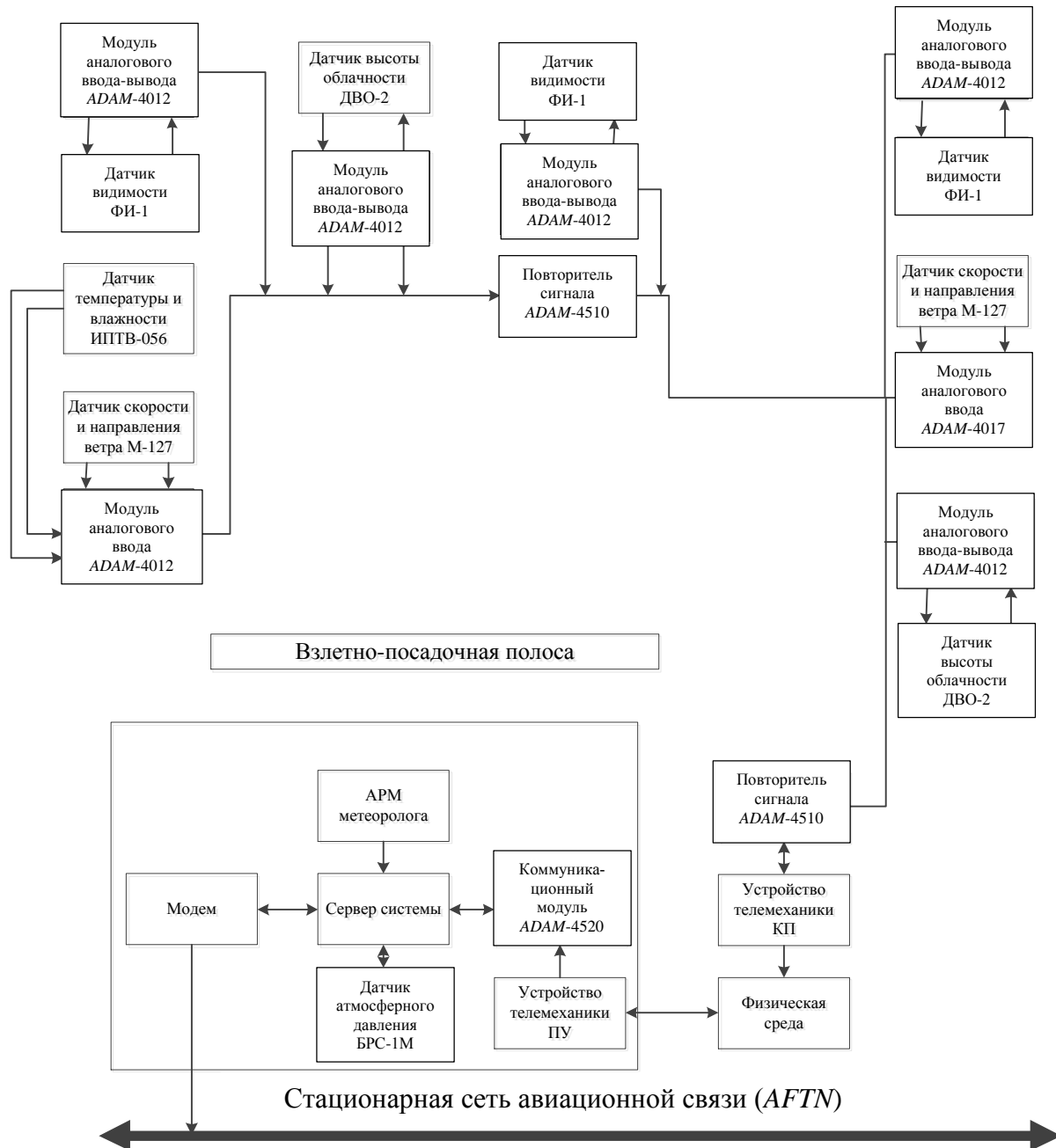


Рисунок 4.17 – Структурная схема системы телеизмерения метеопараметров в аэропортах

Метеорологическая измерительная система является многоточечной и распределенной. В качестве базовых устройств использованы модули удаленного сбора данных и управления серии *ADAM-4000* фирмы *Advantech*, основная часть которых предназначена для преобразования унифицированного выходного сигнала метеорологических датчиков в цифровой код, эквивалентный измеряемой величине. Модули установлены на расстоянии до нескольких десятков метров от соответствующих датчиков и подключены параллельно к двухпроводной линии (витой паре), проложенной вдоль взлетно-посадочной полосы. В разрывах линии через определенные расстояния включены повторители сигналов *ADAM-4510* для компенсации потерь мощности сигнала. Построенная на основе интерфейса *RS-485* сеть соединена с устройствами телемеханики, которые в свою очередь соединены с ведущим компьютером через преобразователь интерфейса *ADAM-4520*. Каждый модуль откликается на свой идентификационный номер величиной измеренного метеопараметра и/или информацией о состоянии дискретного ввода-вывода.

Установка датчиков метеопараметров в аэропортах определяется нормативными документами. В районе ближних приводных радиомаяков аэродрома установлены датчики высоты облачности типа ДВО-2, выходной сигнал которых (0–10 В) преобразуется модулем аналогового ввода *ADAM-4012* в цифровой эквивалент высоты от 0 до 2000 м. Первый канал подсистемы дискретного вывода модуля используется для включения/выключения, второй – для включения/выключения обогрева блоков датчика (приемника и передатчика), расположенных вне помещения. Дискретный вход счетчика внешних событий модуля использован для обнаружения преднамеренного несанкционированного воздействия на датчик и помещение, где установлен измерительный блок датчика и сам модуль. Рядом с первым глиссадным радиомаяком установлены датчики скорости и направления ветра М-127 и измерительный преобразователь температуры и влажности воздуха ИПТВ-056. Эти датчики выдают унифицированный выходной сигнал, равный 0–5 мА и преобразуемый далее в цифровой код 8-канальным модулем аналогового ввода *ADAM-4017*. Оставшиеся четыре канала модуля можно использовать для элементарной диагностики датчиков, контроля температуры в помещении и пр. Здесь же установлен датчик видимости типа ФИ-1, его выходной сигнал, равный 0,06–6 В, преобразуется модулем *ADAM-4012* в цифровой эквивалент оптической дальности видимости от 60 до 6000 м. Второй датчик ФИ-1 с модулем *ADAM-4012* установлен на уровне середины взлетно-посадочной полосы. В районе второго глиссадного маяка установлен третий датчик видимости с модулем *ADAM-4017*. Первые дискретные выходы модулей *ADAM-4012* используются для включения/выключения датчиков, вторые – для переключения их измерительной базы (ближняя/дальняя). Датчик атмосферного давления БРС-1М расположен на рабочем месте метеоролога и подключен к *IBM PC* через порт *RS-232*. При необходимости его можно включить в измерительную сеть через адресуемый преобразователь интерфейса *RS-232/RS-485 ADAM-4521*.

Вся полученная информация от датчиков обрабатывается техническими средствами метеокабинета и отображается на дисплее ПЭВМ. Система может автоматически формировать метеорологические телеграммы в коде *METAR* и направлять их по модульной линии в стационарную сеть авиационной связи.

5 КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

5.1 Источники проблем безопасности

Чтобы разбираться в данной тематике, вначале необходимо дать определения различным понятиям безопасности.

Безопасность – состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества, государства от внутренних и внешних угроз либо способность предмета, явления или процесса сохраняться при разрушающих воздействиях.

Безопасность сетей – действия по защите компьютерных сетей от различных угроз, например, целевых атак или вредоносных программ.

Безопасность приложений – защита устройств от угроз, которые преступники могут спрятать в программах. Зараженное приложение может открыть злоумышленнику доступ к данным, которые оно должно защищать. Безопасность приложения обеспечивается еще на стадии разработки, задолго до его появления в открытых источниках.

Безопасность информации – обеспечение целостности и приватности данных как во время хранения, так и при передаче.

Операционная безопасность – обращение с информационными активами и их защита. К этой категории относится, например, управление разрешениями для доступа к сети или правилами, которые определяют, где и каким образом данные могут храниться и передаваться.

Кибербезопасность – это совокупность методов и практик защиты от атак злоумышленников для компьютеров, серверов, мобильных устройств, электронных систем, сетей и данных.

В процессе слияния корпоративных сетей передачи данных с промышленными системами управления технологическими процессами возникла тенденция замены нестандартизированных сетей и сетей с собственными узкоспециализированными протоколами передачи данных доступным коммерческим оборудованием, использующим технологии *Ethernet TCP/IP*.

Эта тенденция в индустрии серьезно повлияла на связанность процессов внутри систем управления в сторону их усложнения. Построение сетей АСУ ТП по принципу офисных сетей привело к миграции уязвимостей последних в промышленный *IT*-контур. ПЛК и прочие средства управления полевого уровня вместе с подключением к *Ethernet* стали открыты новым источникам угроз, на которые их разработчики не рассчитывали.

В дополнение к этому возрастает потребность в онлайн-доступе к технологическим данным, что означает необходимость прямого соединения технологической сети связи с информационной сетью предприятия и сетью *Internet*. В результате серьезно возросло число сбоев и простоев оборудования из-за последствий вредоносного ПО и кибератак (скоординированное генерирование потока

ложных запросов от нескольких сетевых компьютеров на сервер, вызывающее отказ в обслуживании сервера).

Пренебрежение этой проблемой может приводить, например, к отказу в работе сетей электроснабжения, жизнеобеспечения, связи; отказу морских маяков, дорожных светофоров; к заражению воды неочищенными стоками и т. п. Возможны и более тяжелые последствия с человеческими жертвами или большим экономическим ущербом.

Можно выделить три источника проблем безопасности [36]:

1 Уязвимости в программной части оборудования. SCADA-системы и средства АСУ ТП, такие как ПЛК и распределенные системы управления, удаленные терминалы и интеллектуальные конечные устройства, проектировались из расчета максимальной надежности и возможности ввода-вывода в реальном времени. Проблемы защищенного обмена данными по сети практически не существовало. Некоторые средства полевого управления перестают нормально функционировать при получении по сети нестандартных посылок данных или чрезмерного потока данных правильного формата. Также персональный компьютер под управлением операционной системы *Windows* в сетях управления традиционно работают без обновлений системы, патчей и антивирусных баз, что делает их уязвимыми даже для устаревших типов вредоносного ПО.

2 Множественные точки входа. Даже без прямого подключения к сети *Internet* современные системы управления доступны из множества внешних ресурсов, с которых возможна потенциальная атака. К таким относятся интерфейсы удаленного управления и диагностики, серверы *MES*-систем, модемы удаленного доступа, последовательные соединения, беспроводные системы, мобильные станции оператора, *USB*-накопители, файлы данных о процессе, файлы документации (*PDF*). Перечисленные способы доступа к системам управления обычно не принимаются во внимание операторами и владельцами, они к тому же плохо задокументированы. На рисунке 5.1 показаны возможные пути проникновения вредоносного ПО в систему. Стоит обратить особое внимание на то, что внешняя сеть *Internet* – только один путь из многих.

Последствия атаки вируса *Stuxnet* в 2010 году показали, что все открытые каналы доступа к промышленному сегменту сети могут быть задействованы вредоносным ПО.

3 Недостаточная сегментация сети. Сети передачи данных в АСУ ТП сейчас намного более сложны, чем раньше, они объединяют сотни, а иногда и тысячи конечных устройств. К сожалению, данные сети в основном являются «плоскими», сегментация практически отсутствует. Как результат, проблемы, возникшие на одном участке сети, быстро распространяются на всю сеть.

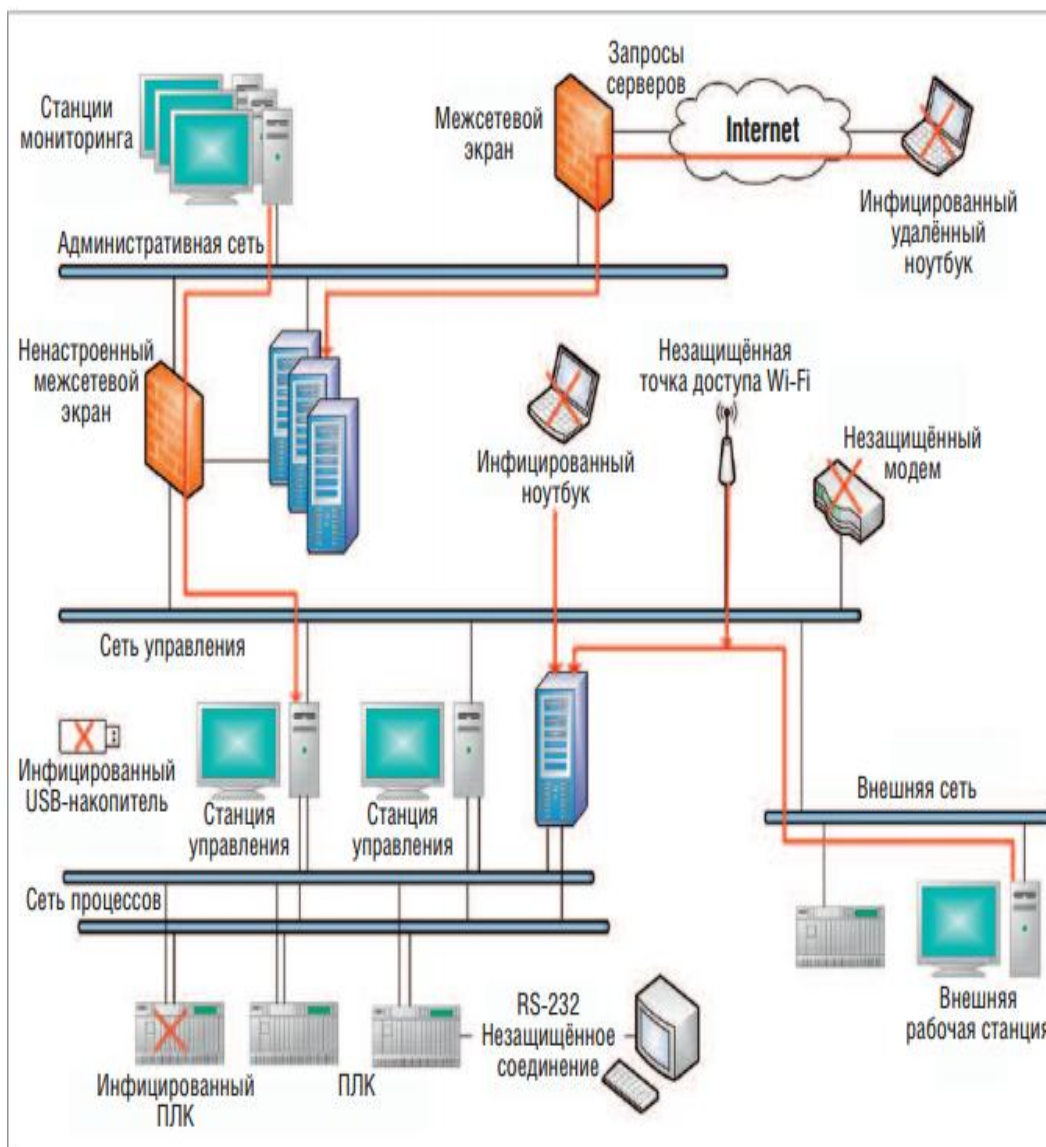


Рисунок 5.1 – Возможные пути проникновения вредоносного ПО в систему управления

5.2 Этапы обеспечения безопасности

Для обеспечения безопасности SCADA и систем управления можно рекомендовать следующую последовательность действий [36]:

1 Оценка рисков для систем управления производством. Оценку рисков для конкретного производства стоит начать с выделения типовых угроз для систем управления промышленным производством:

- несанкционированный удаленный доступ;
- атаки через офисную корпоративную сеть;
- атаки на промышленные системы посредством поиска уязвимостей;
- саботаж и ошибки персонала;
- внедрение вредоносного кода на переносных и внешних носителях;

- чтение и перезапись команд управления (ПЛК);
- несанкционированный доступ к ресурсам;
- атаки на сетевые устройства;
- технические сбои и форс-мажорные события.

При анализе уязвимостей также следует учитывать различия в подходах к обеспечению безопасности в корпоративных сетях и в промышленных системах управления (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Основные отличия в подходах к обеспечению безопасности в информационных технологиях и АСУ ТП

Методы обеспечения безопасности	Информационные технологии (IT)	АСУ ТП
Антивирус	Очень распространено	Слабое распространение; существует риск отказа ПО предыдущего поколения
Обновление ПО	Налаженный процесс	Сложный организационный процесс; существуют риски деградации производительности
Жизненный цикл технологий	2–3 года; разные поставщики	10–20 лет; один поставщик
Методы тестирования и аудита кибербезопасности	Налаженный процесс	Современные методы непригодны для производственных систем
Управление изменениями	Регулярные и плановые	Требуется долгая плановая подготовка по причине непрерывного производственного процесса

2 Выработка правил и процедур по информационной безопасности.

После составления таблицы с возможными рисками и их последствиями необходима выработка политик и регламентов для уменьшения вероятности каждого риска и устранения возможных последствий. Хорошим базисом для этого является *ANSI/ISA99* – серия стандартов для обеспечения кибербезопасности промышленных систем автоматизации и управления.

Хотя политики безопасности в каждой организации свои, некоторые пункты в них должны быть упомянуты обязательно:

- удаленный доступ;
- портативные носители данных;
- установка обновлений и патчей;
- управление антивирусной защитой;
- замена оборудования и ПО;
- создание и восстановление резервных копий;
- действия в случае инцидентов.

3 Обучение персонала средствам и регламентам информационной безопасности. Данный шаг проводится в два этапа: 1) ознакомление персонала с выработанными политиками, процедурами и стандартами; 2) проведение тренингов для персонала, раскрывающих непосредственно механизм применения

политик безопасности. Различные категории персонала должны быть ознакомлены с теми ролями, которые относятся к их зоне ответственности. Например, персонал можно разделить по категориям: посетители, подрядчики, операторы, инженеры, обслуживающий персонал, управленцы.

4 Формирование технологических сетей передачи данных. *Industrial Ethernet* становится стандартом де-факто в технологических сетях связи. Технологическое оборудование использует протоколы на базе *IP*, в том числе стандартные *TCP/IP*, *UDP*, наследуя тем самым все их уязвимости.

Формирование защищенной технологической сети заключается в ее сегментации. Каждый сегмент образует зону, защищенную на нескольких уровнях от различных киберугроз. Такие зоны включают в себя физический или логический набор оборудования с идентичными требованиями к безопасности. Обмен данными между зонами осуществляется только по защищенным каналам связи (путям), все типы данных, проходящих по ним, должны быть регламентированы, а любой неопределенный трафик запрещен. Соответственно, любая возможность электронного обмена данными должна осуществляться только через зарегистрированный путь.

Основными технологиями защиты путей являются межсетевые экраны и *VPN*-каналы. Детально эти процессы описаны в стандарте *ANSI/ISA99* и более подробно будут рассмотрены ниже.

5 Регламенты доступа персонала к системам управления. Идея физического и логического доступа состоит в том, чтобы доступ к критически важному оборудованию имел лишь тот персонал, которому это необходимо для работы.

Логический контроль доступа предполагает действия по следующим пунктам: аутентификация и авторизация пользователей; ролевой контроль доступа; лист привилегий; журналы контроля доступа; технологии *Active Directory*, *Radius*, *Idap* и др.; отслеживание изменений.

Физический контроль доступа – иерархическая система доступа в кабинеты с помощью замков и ключей.

6 Контроль функционала производственных систем. Усиление безопасности компонентов системы подразумевает запрещение всех ненужных функций, отключение не используемых для работы компонентов и функций операционной системы (например мультимедийных), отключение всех лишних коммуникационных интерфейсов и связанных с ними сервисов (например, веб-сервера на ПЛК, если он не используется).

На рабочих станциях должно быть установлено антивирусное ПО, а операционные системы и программы обновлены с помощью официальных пакетов обновлений (патчей).

Контроль актуальности антивирусных баз и обновления системы должен производиться в соответствии со специальным регламентом. Немаловажным средством для выявления уязвимостей является специализированное программное обеспечение типа *Nessus* или *Bandolier*. Данное ПО проверяет систему на наличие известных уяз-

вимостей и правильной конфигурации серверов и рабочих станций исходя из соображений безопасности. Однако тестирование работающей системы проводить не рекомендуется. Этот процесс лучше оставить до плановой остановки или перезапуска.

В завершение стоит ознакомиться с рекомендациями производителей оборудования по повышению безопасности в процессе настройки.

7 Мониторинг и управление системой информационной безопасности. Постоянный сетевой мониторинг безопасности системы должен быть неотъемлемой частью работы оператора системы. Этот процесс подразумевает множество действий, в том числе установку обновлений ПО и антивирусных баз, мониторинг сети на подозрительную активность. Последнее может проводиться, например, путем анализа *log*-файлов на неавторизованную активность. Также существуют специальные технологии под общим названием «*Система обнаружения вторжения (СОВ)*». СОВ тоже не является панацеей и не в состоянии защитить систему управления от любого вредоносного ПО, это только часть стратегии защиты «в глубину».

6 СТРУКТУРЫ ФОРМАТОВ КАДРОВ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ ПО СТАНДАРТУ МЭК 870

Материал данного раздела изложен на основании стандартов международной электротехнической комиссии (МЭК), основные положения которых приведены в [32].

При автоматизации пространственно рассредоточенных объектов на базе систем телемеханики (СТМ) необходимо решать задачу организации телемеханического взаимодействия автоматизированного рабочего места диспетчера, входящего в состав телемеханического пункта управления (ПУ), с размещенными на объектах устройствами телемеханики (УТМ), входящими в состав контролируемых телемеханических пунктов (КП).

Серия стандартов ГОСТ Р МЭК 870 (часть 5 «Протоколы передачи») предлагает пути стандартизированных решений по организации взаимодействия ПУ и КП, которое рассматривается в рамках структуры повышенной производительности *EPA* (*Enhanced Performance Architecture*), являющейся упрощенной моделью открытых систем и содержащей три уровня: физический, канальный, пользовательский.

Требования физического уровня определяют интерфейс между УТМ и АПД. При этом на АПД возлагается выполнение следующих функций:

- преобразование телемеханического сигнала;
- гальваническая развязка УТМ от канала связи;
- контроль качества сигнала;
- обеспечение побитовой синхронизации, добавление или устранение признаков синхронизации кадра;
- определение состояний канала связи (занятости, ожидания, повреждения).

Характеристиками физического уровня являются скорость передачи сигнала, помехоустойчивость, отношение сигнал/помеха, вероятность искажений бита, вероятность стирания бита.

Требования протокольного взаимодействия ПУ и КП на канальном и пользовательском уровнях, а также на уровне пользовательских процессов излагаются в стандартах серии ГОСТ Р МЭК 870-5, представленных в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Перечень стандартов, определяющих протоколы передачи

Уровни взаимодействия	Определяющие стандарты	Предмет стандартизации «Протоколы передачи»
Пользовательские процессы	ГОСТ Р МЭК 870-5-5	Основные прикладные функции
Модель <i>EPA</i> : уровень 7 (пользовательский)	ГОСТ Р МЭК 870-5-4	Определение и кодирование элементов пользовательской информации
	ГОСТ Р МЭК 870-5-3	Общая структура данных пользователя
Модель <i>EPA</i> : уровень 2 (канальный)	ГОСТ Р МЭК 870-5-2	Процедуры в каналах передачи
	ГОСТ Р МЭК 870-5-1	Форматы передаваемых кадров

6.1 Классы организации передачи и форматы кадров

Стандарты [36, 40] на канальном уровне определяют требования к реализации следующих телемеханических функций: обеспечение доступа к тракту передачи; задание последовательности кадров сообщений и ее расшифровки; добавление или устранение маркеров кадра (если эта функция не выполняется АПД); обнаружение ошибок синхронизации кадра или ошибок размера кадра; определение кадров, адресованных конкретной станции; сообщение об устойчивых ошибках передачи; переключение на резервный канал при необходимости; сообщение о состоянии конфигурации линии связи.

На канальный уровень возлагается обеспечение достоверности передачи сообщений в соответствии с требованиями классов *I1*, *I2* и *I3* путем эффективной защиты от ошибочных битов и ошибочных кадров, потерь информации и появления непредусмотренной информации (образование сообщений из помех), разрывов или перестановок в связных массивах информации. Это достигается выбором эффективных принципов организации передачи и форматов кадров телемеханических сообщений.

В стандарте [36] установлены требования к условиям передачи данных в СТ и к форматам кадров переменной или фиксированной длины, обеспечивающим необходимые показатели достоверности при асинхронной передаче последовательных кадров в полудуплексном и дуплексном режимах.

Организация передачи телемеханических сообщений в канале связи регламентируется тремя классами, представленными в таблице 6.2.

В зависимости от конфигурации телемеханической сети все три класса относятся к организации передачи информации между одной передающей станцией и либо одной станцией назначения (одиночный адрес), либо группой станций назначения (групповой адрес), либо всеми остальными станциями (общий адрес).

Таблица 6.2 – Классы организации передачи телемеханических сообщений

Классы	Функции	Назначение класса организации передачи сообщений на уровне канала
<i>S1</i>	Посылка/без ответа	Переданное сообщение не требует ни подтверждения, ни ответа. Используется в циклических системах или в симплексных системах без обратного канала (системы с низкими требованиями к достоверности информации)
<i>S2</i>	Посылка/подтверждение	Канальный уровень обеспечивает передачу сообщений и контроль подтверждения приема каждого сообщения (положительная квитанция)
<i>S3</i>	Запрос/ответ	Первичная станция передает запрос, на который должен формироваться ответ, содержащий запрошенные данные или отказ (отрицательная квитанция). Обеспечивает возможность опроса в многоточечной конфигурации

Структура байта форматов кадра телемеханических сообщений в вариантах фиксированной и переменной длины в [36] представлена для канальных протоколов *FT1.1*, *FT1.2*, *FT2*, *FT3* (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Структура байта форматов кадра телемеханических сообщений

Формат	Кодовое расстояние	Класс достоверности	Структура байта										
			<i>b0</i>	<i>b1</i>	<i>b2</i>	<i>b3</i>	<i>b4</i>	<i>b5</i>	<i>b6</i>	<i>b7</i>	<i>b8</i>	<i>b9</i>	<i>b10</i>
<i>FT1.1</i>	$d = 2$	<i>I1</i>	<i>start</i> 0	<i>b1</i>	<i>b2</i>	<i>b3</i>	<i>b4</i>	<i>b5</i>	<i>b6</i>	<i>b7</i>	<i>b8</i>	<i>pt</i>	<i>stop</i> 1
<i>FT1.2</i>	$d = 4$	<i>I2</i>		8 бит, начиная с младшего									
<i>FT2</i>	$d = 4$	<i>I2</i>	X	1	2	3	4	5	6	7	8	X	
<i>FT3</i>	$d = 6$	<i>I2, I3</i>		8 бит, начиная со старшего									

Они предназначены для асинхронной передачи телемеханических сообщений в полудуплексном или дуплексном режимах с различными требованиями достоверности.

Следует обратить внимание на то, что форматы кадров *FT1.1* и *FT1.2* используют асинхронный (стартстопный) формат байта с обрамлением битом *start* = 0 и битом *stop* = 1, в то время как форматы *FT2* и *FT3* относительно формата байта являются синхронными.

Соответственно для них требуются разные методы побитовой синхронизации на уровне байта. Поэтому ошибкой является реализация форматов *FT2* и *FT3* на базе стартстопного оформления байт, т. к. при этом нарушается модель «канала без памяти», а фактическое кодовое расстояние (*d*) для обоих форматов из-за этого оказывается равным 2. Нарушение линейной модели «канала без памяти» относится и к форматам *FT1.1* и *FT1.2*, но в формате *FT1.2* специально введен стопбит (*F*-стоп), защищающий от ошибок, связанных с нарушением правильности подсчета бит вследствие искажения (потери) какого-либо старт-бита.

В форматах *FT1.1* и *FT1.2* защита каждого байта от искажения осуществляется битом паритета (*pt*), а в *FT1.2* добавляется **защита кадра сообщения контрольной суммой**. Формат *FT1.1* характеризуется низкой достоверностью передачи данных, область его применения ограничивается простейшими системами, и поэтому далее в учебном пособии он рассматриваться не будет.

Форматы *FT1.2* и *FT2* рекомендуются для СТ с классом достоверности *I2*, но *FT2* обеспечивает более высокую эффективность передачи кадров. Формат *FT3* предназначен для использования в тех случаях, когда требуется особо высокая достоверность передачи телемеханических сообщений.

Структуры форматов *FT1.2*, *FT2* и *FT3* представлены в таблице 6.4.

Как видно из таблицы 6.4, кадр любого формата начинается со стартового байта (байтов) *F*-старт. Кадр *FT1.2* заканчивается конечным байтом *F*-стоп. Байты начала и конца кадра используются для кадровой синхронизации. Форматы с переменной длиной информационной части содержат байт *L*, в котором

указывается количество передаваемых пользовательских байтов. Информационная часть кадра передается блоками пользовательских данных (БПД), которые содержат байты пользовательских данных. Необходимо предупредить, что аббревиатура БПД относится именно к блокам. Кадр формата $FT1.2$ содержит один БПД, защищаемый контрольной суммой CS . Поскольку в структуре сообщений принят 8-битовый формат, то определяемое количество байтов в БПД (L) может задаваться в диапазоне от 1 до 255.

Кадр формата $FT2$ содержит стартовый байт F -старт и до 16 БПД, каждый из которых содержит 15 пользовательских байтов, дополненных контрольным байтом циклического кода CRC . Кадр формата $FT3$ содержит стартовое слово $F(1, 2)$ -старт и до 15 БПД, каждый из которых содержит 16 пользовательских байтов, дополненных двухбайтовым контрольным словом циклического кода $CRC(1, 2)$. Первый БПД в форматах $FT2$ и $FT3$ имеет фиксированную длину и содержит байт длины кадра L , указывающий суммарное число пользовательских байтов во всех БПД кадра (не считая самого байта L). Последний БПД может быть укороченным. В кадрах фиксированной длины $L = 0$.

Таблица 6.4 – Структуры форматов кадра телемеханических сообщений

Формат $FT1.2$		Формат $FT2$				Формат $FT3$					
переменная длина	фиксированная длина	переменная длина	фиксированная длина	переменная длина	фиксированная длина	переменная длина	фиксированная длина	переменная длина	фиксированная длина		
F -старт = $= 68h$	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
Длина L		–	–	–	$F1$ -старт = $= 05h$	$F1$ -старт = $= 05h$					
Повтор байта L		F -старт = $= 27h$	F -старт = $= 27h$	$F2$ -старт = $= 64h$	$F2$ -старт = $= 64h$						
F -старт = $= 68h$	F -старт = $= 10h$	Длина L	Длина $L = 0$	Длина L	Длина $L = 0$						
1 ... 255	БПД	1 ... 255	БПД	1 ... 15	БПД	1 ... 15	БПД	1 ... 16	БПД	1 ... 16	БПД
CS	CS	CRC	CRC	$CRC1$	$CRC1$						
F -стоп = $= 16h$	F -стоп = $= 16h$	–		$CRC2$	$CRC2$						

Кадр фиксированной длины любого из форматов может иметь любой заранее фиксированный размер.

Поскольку стартовые комбинации во всех форматах могут встречаться и в теле кадра, надежное детектирование начала кадра требует, кроме обнаружения стартовой комбинации, также фиксации определенного интервала молчания, т. е. пассивного состояния канала.

6.2 Процедуры в каналах передачи

В стандарте [40] рассмотрены процедуры взаимодействия ПУ и КП при передаче последовательности телемеханических сообщений с окном, равным единице. Это означает, что уровень канала на первичной станции (станции, которая инициирует передачу сообщения) принимает от прикладного уровня запрос на новую передачу сообщения в линию связи только после того, как предыдущий принятый запрос выполнен удовлетворительно или с уведомлением об ошибке.

Для описания информационных процессов, сопровождающих передачу данных, в [40] в соответствии с рисунком 6.1 используются понятия сервисных примитивов, которые охватывают интерфейс между уровнем пользователя и уровнем канала, и процедур передачи (без ошибок) кадров по линии связи между станциями.

Имеются четыре типа процедур обмена между канальным и прикладным уровнями примитивов, которые могут содержать пользовательские данные и ряд параметров: *REQ* – запрос, инициируемый пользователем и обеспечивающий активизацию ряда процедур на уровне канала; *CON* – подтверждение, инициируемое на уровне канала для окончания процедуры, активизированной запросом; *IND* – оповещение, выставляемое на уровне канала как требование передачи пользователю данных или активизации той или иной процедуры на уровне пользователя; *RESP* – ответ, инициируемый пользователем для извещения об окончании процедуры, предварительно активизированной оповещением. Подтверждения (квитанции) или ответы могут быть как положительными, так и отрицательными в зависимости от обстоятельств.

Типичным содержанием сервисных примитивов являются параметры, условия и пользовательские данные, например: пользовательские данные, класс передачи (*S1*, *S2*, *S3*), положительная/отрицательная квитанция или ответы, контроль потока данных, запрос данных, число повторений, состояние ошибки, состояние уровня (например, состояние рестарта). Содержание сервисных примитивов в стандарте не рассматривается.

Элементы процедур передачи показаны на рисунке 6.1: посылка, подтверждение (квитанция), запрос, ответ.

Предметом стандарта являются два типа процедур передачи канального уровня: небалансная, балансная.

Небалансная процедура передачи используется в СТМ, в которых ПУ контролирует трафик данных последовательным опросом КП. В этом случае ПУ всегда является первичной станцией, инициирующей передачу всех сообщений, а КП – вторичной станцией, передающей сообщения только по вызову (следует обратить внимание на то, что это относится только к канальному уровню – на прикладном уровне могут быть реализованы любые схемы приоритетов, в частности, первоочередная спорадическая передача информации об изменении состояния). Областью использования данной процедуры являются конфигурации СТ всех типов.

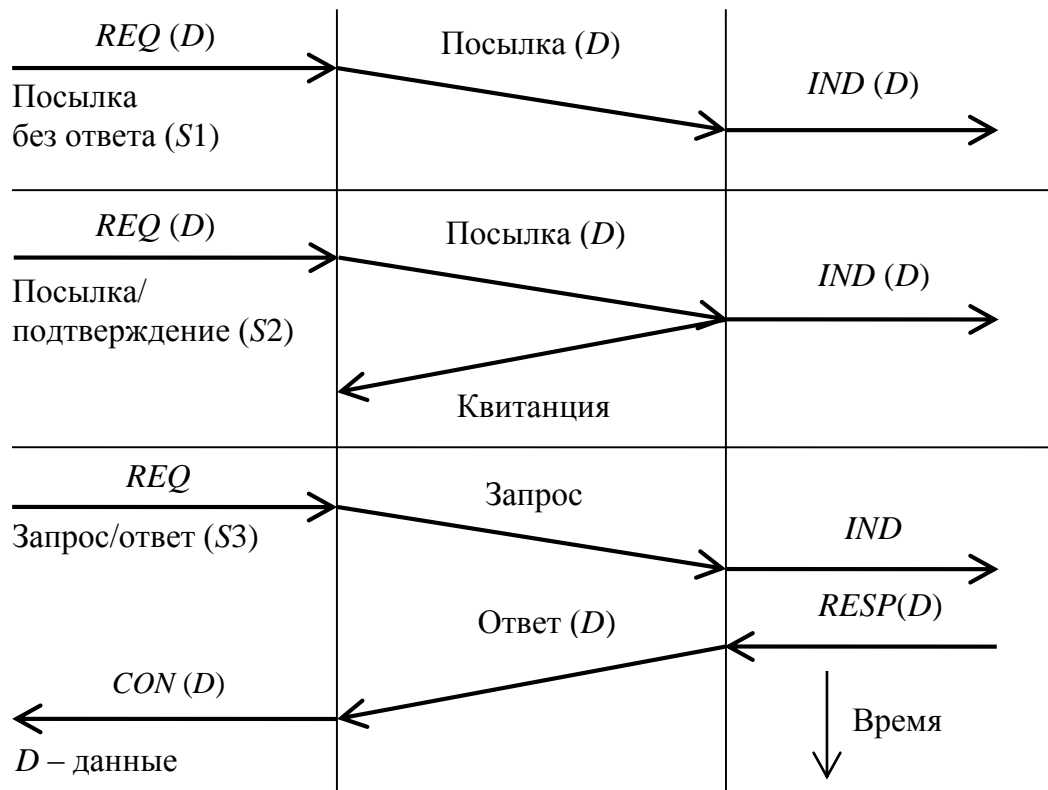
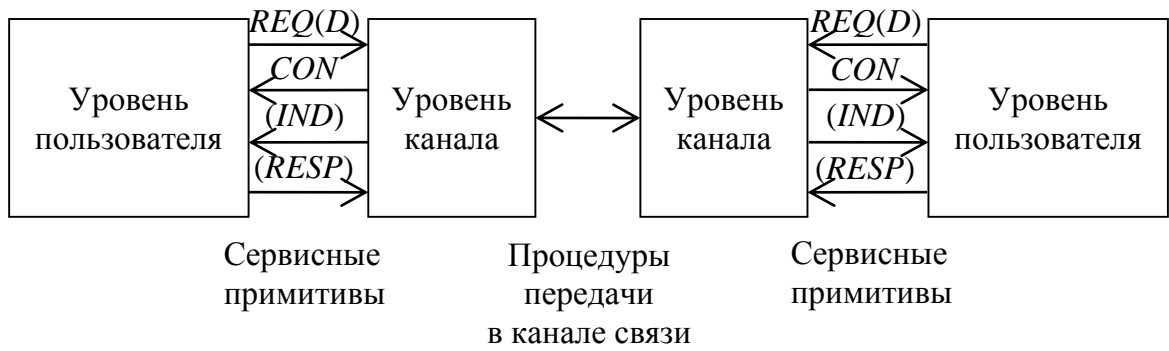


Рисунок 6.1 – Взаимодействие между сервисными примитивами и основными процедурами передачи по каналу связи

Балансная процедура передачи используется в СТМ, в которых каждая станция может быть как первичной, инициирующей передачу сообщений, так и вторичной. Область использования такой процедуры передачи ограничивается конфигурациями типа «точка – точка» и радиальной многоточечной структуры.

Здесь важно отметить, что вторичная станция, хоть часто и именуется принимающей, по сути своей является отвечающей (в оригинале – *responding*), причем она отвечает на запрос данными (S3), а на данные – квитанцией (S2).

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)
КАБЕЛИ И МОНТАЖНЫЕ ПРОВОДА

А.1 Высококачественные кабели для локальных вычислительных сетей

А.1.1 Кабель *DataTwist® 350 UTP* категории 5+

Четыре неэкранированные витые пары одножильных нелуженых медных проводников сечением 0,2 мм² (AWG 24) с изоляцией из полиолефина; оболочка из поливинилхлорида; противоразрывный корд.

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Внешний диаметр	Максимальная некомпенсированная емкость, пФ/м	Волновое сопротивление, Ом	Частота, МГц	Максимальное затухание, дБ/100 м
		футы	м					
1700A	4	1000 1640 3000	305 500 914	5,08	66	100 ± 12	4	4
						100 ± 15	25	10,3
						100 ± 15	100	21,7
						100 ± 18	155	27,6
						100 ± 20	310	41,3
						100 ± 22	350	44,3

А.1.2 Кабель *DataTwist® 5 UTP* категории 5

Четыре неэкранированные витые пары одножильных нелуженых медных проводников сечением 0,2 мм² (AWG 24) с изоляцией из полиолефина; оболочка из поливинилхлорида; противоразрывный корд.

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Внешний диаметр	Максимальная некомпенсированная емкость, пФ/м	Волновое сопротивление, Ом	Частота, МГц	Максимальное затухание, дБ/100 м
		футы	м					
1583E	4	1000 1640	305 500	6,2	330	100 ± 15	4	4,1
						100 ± 15	16	8,2
						100 ± 15	62,5	17
						100 ± 15	100	22
						100 ± 15	100	22

A.1.3 Кабель *DataTwist® 5 FTP* категории 5

Четыре витые пары одножильных нелуженых медных проводников 0,2 мм² (AWG 24) с изоляцией из полиолефина, заключенные в 100%-й экран из алюминиево-полиэфирной фольги с дренажным проводом; оболочка из поливинилхлорида; противоразрывный корд.

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Внешний диаметр	Максимальная нескомпенсированная емкость, пФ/м	Волновое сопротивление, Ом	Частота, МГц	Максимальное затухание, дБ/100 м
		футы	м					
1633E	4	1640	500	5,44	330	100 ± 15	4	4,1
						100 ± 15	16	8,2
						100 ± 15	62,5	17
						100 ± 15	100	22

A.1.4 Коаксиальный кабель для *Ethernet 10Base-5* («толстый»)

Коаксиальный кабель с одножильным медным центральным проводником, диэлектриком из вспененного полиэтилена и двойной медной экранирующей оплеткой; оболочка из поливинилхлорида желтого цвета. Имеет разметку в виде кольцевых рисок через каждые 2,5 м, обозначающих возможные точки подключения или отреза.

Обозначение	Стандартная длина		Сечение		Погонное сопротивление, Ом/км ²		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м	Номинальное затухание,	
	футы	м	AWG	мм ²	проводник	экран				частота, МГц	дБ/100 м
9880	1000 1640	305 500	12	3,1	4,66	5	10,29	50	85	1	0,62
										5	1,21
										10	1,71
										100	5,58
										400	12,8
										1000	22,6

A.1.5 Кабель-спуск для *Ethernet 10Base-5*

Четыре индивидуально экранированные (алюминиево-полиэфирная фольга) витые пары из многожильных медных луженых проводников с изоляцией *Datalene®*, заключенные в общий экран из алюминиево-полиэфирной фольги и медной оплетки.

Имеет многожильный дренажный провод, выполненный из медных луженых проводников. Наружная оболочка из поливинилхлорида светло-серого цвета.

Обозначение	Стандартная длина		Кол-во пар	Сечение		Погонное сопротивление, Ом/км ²		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м
	футы	м		AWG	мм ²	проводник	экран			
9901	100	30,5	4	20	0,5	34,4	6,6	10,54	78	54,4
	1000	304,8								
	3280	999,7								
	5000	1524								
9903	1000	304,8	3	28	0,08	213	9,5	6,35	78	64,6
			1	24	0,2	78,7				

А.2 Кабели для распределенных систем передачи данных

А.2.1 Кабели передачи данных *DATABUS*® для шины *ISA/SP-50 Fieldbus*

Витая пара из многожильных медных луженых проводников с изоляцией из полиолефина, заключенная в 100%-й экран из алюминиево-полиэфирной фольги.

Обозначение	Стандартная длина	Сечение		Погонное сопротивление		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м	Номинальное затухание	
	м	AWG	мм ²	проводник	экран				частота, МГц	дБ/100 м
3076F (31,25 кбит/с)	304,8 1524 3048	18 7×26	0,78	22,7	24,6	6,43	100 (при 31,25 кГц)	78,7	0,010	0,20
									0,039	0,26
									0,100	0,62
									0,500	2,46
									1,000	3,44
3077F (31,25 кбит/с)	3048	22 7×30	0,33	56	37,4	4,97	100 (при 31,25 кГц)	77,1	0,010	0,39
									0,039	0,46
									0,100	0,66
									0,500	2,99
									1,000	4,53
3078F	304,8	22 7×30	0,33	56	11,1	9,47	150	27,9	0,250	0,59
									0,625	0,85
									1,250	1,12
									3,125	1,81
									5,000	2,20
									10,00	3,05

Имеет многожильный дренажный провод, выполненный из медных луженых проволок. Наружная оболочка из поливинилхлорида оранжевого цвета.

А.2.2 Кабель передачи данных *DATABUS®* для шины *PROFIBUS*

Витая пара из одножильных медных луженых проводников с изоляцией из ячеистого полиэтилена, заключенная в экран из алюминиево-полиэфирной фольги и медной оплетки; наружная оболочка из поливинилхлорида черного цвета.

Обозначение	Стандартная длина		Сечение		Погонное сопротивление, Ом/км		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м	Номинальное затухание	
	футы	м	AWG	мм ²	проводник	экран				частота, МГц	дБ/100 м
3079A	1000 3000	304,8 914,4	22	0,33	52,5	12,8	8	150	29,5	0,2	0,9
										4	2,2
										16	4,5
										100	12,3
										300	21,4

А.2.3 Кабели передачи данных *DeviceBus™* для шины *Device Net*

Две индивидуально экранированные (алюминиево-полиэфирная фольга) витые пары из многожильных медных луженых проводников, заключенные в общий экран в виде медной оплетки со степенью экранирования 65 %. Стандартная длина при поставке – 1000 футов (304,8 м).

Обозначение	Сечение		Погонное сопротивление, Ом/км		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м	Номинальное затухание	
	AWG	мм ²	проводник	экран				частота, МГц	дБ/100 м
3082A (магистральный)	15/18	0,96 1,65	22,7	5,9	12,2	120	39,4	0,125	0,41
			11,8					0,500	0,82
								1,000	1,18
3084A (ответвительный)	22/24	0,22 0,33	90,9	10,5	7,0	120	39,4	0,125	0,95
			57,4					0,500	1,64
								1,000	2,3
3083A (магистральный)	15/18	0,96 1,65	22,7	5,9	12,2	120	39,4	0,125	0,41
			11,8					0,500	0,82
								1,000	1,18
3085A (ответвительный)	22/24	0,22 0,33	90,9	10,5	7,0	120	39,4	0,125	0,95
			57,4					0,500	1,64
								1,000	2,3

А.3 Промышленные кабели интерфейса RS-485

А.3.1 AWG 22 (7×30), 0,33 мм²

Витые пары из многожильных медных луженых проводников с изоляцией *Datalene*®, заключенные в общий экран из алюминиево-полиэфирной фольги и медной оплетки. Многожильный дренажный провод сечением 0,33 мм², выполненный из медных луженых проводников. Наружная оболочка из поливинилхлорида черного цвета, стойкая к воздействию ультрафиолетового излучения.

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Погонное сопротивление		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м
		футы	м	проводник	экран			
3105A	1	1000	304,8	48,2	9,5	7,26	120	36,1
3106A	1,5	5000	1523,9		9,2	7,67		
3107A	2	1000	304,8		4,6	9,15		
3108A	3	1000	304,8		4,6	10,77		
3109A	4	2000	609,6		3,6	11,63		

А.3.2 AWG 22 (7×30), 0,35 мм²

Витые пары из многожильных медных луженых проводников с изоляцией *Datalene*®, заключенные в общий экран из алюминиево-полиэфирной фольги и медной оплетки. Многожильный дренажный провод сечением 0,35 мм², выполненный из медных луженых проводников. Имеют один многожильный дренажный провод из луженой меди сечение 0,35 мм² (AWG 22 (7×30)).

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Погонное сопротивление		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м
		футы	м	проводник	экран			
3105A	1	1000	304,8	48,2	9,5	7,26	120	36,1
3106A	1,5	5000	1523,9		9,2	7,59		
3107A	2	1000	304,8		4,6	11,60		
3108A	3	1000	304,8		4,6	12,20		
3109A	4	2000	609,6		3,6	13,20		

А.3.3 AWG 24 (7×32), 0,2 мм²

Витые пары из многожильных медных луженых проводников с изоляцией из полиэтилена, заключенные в общий экран из алюминиево-полиэфирной фольги и медной оплетки. Многожильный дренажный провод сечением 0,2 мм², выполненный из медных луженых проводников. Наружная оболочка из поливинилхлорида черного цвета.

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Погонное сопротивление		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м
		футы	м	проводник	экран			
9841	1	100 1000	30,5	78,7	11	5,89	120	42
9842	2		304,8		7,2	8,64		
9843	3		7,7		9,14			
9844	4		304,8		6,9	9,91		

А.4 Промышленные кабели интерфейса RS-422

А.4.1 AWG 24 (7×32), 0,23 мм²

Индивидуально экранированные (алюминиево-полиэфирная фольга) витые пары из многожильных медных луженых проводников с изоляцией *Datalene*®. Каждая пара имеет многожильный дренажный провод сечением 0,2 мм² (AWG 24), выполненный из медных луженых проводников.

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Погонное сопротивление проводник	Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м
		футы	м				
9729	2	100	30,5	78,7	8,05	100	41
9730	3	1000	304,8		8,48		
		10000	3048				
9728	4	100	30,5		9,22		
9731	6	1000	304,8		10,69		
9732	9	–	–		12,40		
9733	11	–	–		14,61		
9734	12	–	–		14,61		
9735	15	–	–		16,23		
9736	17	–	–		17,04		
9737	19	–	–		17,04		

А.5 Промышленные кабели интерфейса RS-232

А.5.1 AWG 24 (7×32), 0,2 мм²

Витые пары из многожильных медных луженых проводников с изоляцией из модифицированного поливинилхлорида, заключенные в общий экран из алюминиево-полиэфирной фольги и медной оплетки. Многожильный дренажный провод сечением 0,2 мм², выполненный из медных луженых проводников. Наружная оболочка из поливинилхлорида черного цвета.

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Погонное сопротивление		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м
		футы	м	проводник	экран			
9501	1	100 1000	30,5 304,8	78,7	59,1	3,96	7	131
9502	2				55,8	5,64		
9503	3				55,8	5,89		
9504	4				55,8	6,73		
9505	5				55,8	7,34		
9507	7				55,8	7,47		
9515	15				54,1	10,06		
9525	25				54,1	12,8		
9550	30				49,0	18,00		98

А.6 Приборные кабели

А.6.1 AWG 22 (7×30), 0,33 мм²

Две индивидуально экранированные (алюминиево-полиэфирная фольга) витые пары из многожильных медных луженых проводников с изоляцией из полипропилена. Общий многожильный дренажный провод, выполненный из медных луженых проводников. Наружная оболочка из поливинилхлорида черного цвета.

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Погонное сопротивление		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м
		футы	м	проводник	экран			
8723	2	100	30,5	49,2	54,5	4,27	45	115
		1000	304,8					
		3280	999,7					
		5000	1524					

А.6.2 AWG 22 (7×30), 0,33 мм²

Индивидуально экранированные (алюминиево-полиэфирная фольга) витые пары сечением 0,33 мм² (AWG 22) из многожильных медных луженых проводников с изоляцией из полипропилена. Для каждой пары – многожильный дренажный провод, выполненный из медных луженых проводников.

Обозначение	Кол-во пар	Стандартная длина		Погонное сопротивление		Внешний диаметр, мм	Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость, пФ/м
		футы	м	проводник	экран			
8776	15	100 1000	30,5 304,8	49,2	34,8	13,92	50	98
8777	3	100 1000 3280 5000	30,5 304,8 999,7 1524	49,2	34,8	6,93	50	98
8778	6	100 1000	30,5 304,8	49,2	34,8	9,19	50	98

A.6.3 AWG 22 (7×30), 0,33 мм²

Экранированная (алюминиево-полиэфирная фольга) витая пара из многожильных медных луженых проводников с изоляцией из полиэтилена. Многожильный дренажный провод, выполненный из медных луженых проводников. Наружная оболочка из поливинилхлорида черного цвета.

Обозначение	Стандартная длина		Сечение		Толщина изоляции, мм	Внешний диаметр, мм	Погонная емкость, пФ/м
	футы	м	AWG	мм ²			
8760	1000 5000	304,8 1524	18 (16×30)	0,8	0,48	5,64	79
8761	1000 5000	304,8 1524	22 (7×30)	0,33	0,41	4,45	79

A.7 Монтажный провод

A.7.1 Многожильный провод из медных луженых проводников с изоляцией из поливинилхлорида

Предназначен для монтажа электрических цепей на номинальное напряжение 600 В.

Обозначение	Стандартная длина		Сечение		Толщина изоляции, мм	Внешний диаметр, мм
	футы	м	AWG	мм ²		
8920	100 1000	30,5 304,8	22 (7×30)	0,33	0,76	2,36
8919			20 (10×30)	0,5	0,76	2,54
8918			18 (16×30)	0,8	0,76	2,69
89182	–	–	19 (19×34)	0,38	0,76	7,82

А.7.2 Типы изоляции

Название материала	Диапазон рабочих температур, °С
Полиэтилен (однородный и вспененный)	-40...+80
Полипропилен (однородный и вспененный)	-40...+105
Поливинилхлорид	-20...+80
Хлористый полиэтилен	-35...+90
<i>Datalene</i>	-40...+80
Хлористосульфированный полиэтилен	-20...+90
Неопрен	-20...+60
Резина	-30...+60
Фторэтиленовый пропилен	-70...+200
Поливинилхлорид	-20...+80
Силикон	-80...+150
Халар	-70...+150
Тetraфторэтилен	-70...+260
Полиэтилен с перекрестными связями	-35...+90
Этиленовый пропилен с замедлением горения	-25...+90
Термопластичный эластомер с замедлением горения	-55...+105

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АКД – аппаратура канала данных
АМ – амплитудный модулятор
АОКС – анализатор обратного канала связи
АОН – автоматическое определение номера
АПД – аппаратура передачи данных
АПК – аппаратно-программный комплекс
АС – абонентская станция
АСУ – автоматизированная система управления
АТС – автоматическая телефонная станция
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
БАРУ – быстродействующая автоматическая регулировка усиления
БАСИ – блок аварийной сигнализации и индикации
БН – буферный накопитель
БНУ – блок начальной установки
БПВИ – блок преобразований и выдачи информации
БПД – блок пользовательских данных
БППИ – блок проверки преобразования информации
БС – базовая станция
БСб – бортовая базовая станция
БСн – наземная базовая станция
БЦФ – блок цифрового фазирования
ВОК – волоконно-оптический кабель
ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи
ВОСП – волоконно-оптическая система передачи
ВП – витая пара
ВПП – взлетно-посадочная полоса
ВРМ – визитный (гостевой) регистр местоположения
ВхРг – входной регистр
ВЧ – высокая частота
ГВЧ – гипервысокая частота
ГР – генератор развертки
ДК – декодер
ДКУ – декодирующее устройство
ДМ – демодулятор
ДН – диаграмма направленности
ДНБ – датчик номера блока
ДРМ – домашний регистр местоположения
ДС – дифференциальная система
ДСК – датчик служебной комбинации
ДшСК – дешифратор служебных комбинаций
ЗО – зона обслуживания

ИИ – источник информации
ИК – инфракрасный
ИОС – информационная обратная связь
ИСЗ – искусственный спутник Земли
К – кодер
КБС – контроллер базовых станций
КВЧ – крайне высокая частота
КК – коаксиальный кабель
КНД – коэффициент направленного действия
КнС – контроллер сети
КОС – комбинированная обратная связь
КП – контролируемый пункт
КС – канал связи
КТСОП – коммутируемая телефонная сеть общего пользования
КУ – кодирующее устройство
ЛБ – линейная батарея
ЛВС – локальная вычислительная сеть
ЛС – линия связи
ЛЭП – линия электропередач
М – модулятор
МС – мобильная станция
МСЛ – магистральная соединительная линия
МЭК – международная электротехническая комиссия
НЧ – низкая частота
ОА – оптическая антенна
ОАМ – однополосная амплитудная модуляция
ОВ – оптическое волокно
ОВЧ – очень высокая частота
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ОК – обратный канал
ОЛС – оптическая линия связи
ОМ – оптический модулятор
ОНЧ – очень низкая частота
ООД – оконечное оборудование данных
ОП – оптронная пара
ОС – обратная связь
ОФМП – относительная фазовая манипуляция
ОЧМ – однополосная частотная модуляция
ПБС – подсистема базовых станций
ПД – поляризационная диаграмма
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство
ПИ – получатель информации
ПИД – пропорционально-интегрально-дифференцирующий
ПК – прямой канал

ПсК – подсистема коммутации
ПЛК – программируемый логический контроллер
ПМС – подсистема мобильных станций
ПО – программное обеспечение
ППЗУ – программируемое постоянное запоминающее устройство
ПРД – передатчик
ПРМ – приемник
ПТ – пост телемеханики
ПУ – пункт управления
РгСК – регистр служебных комбинаций
РИО – регистр идентификации оборудования
РОС – решающая обратная связь
РСЛ – распределительные силовые линии
РСС – распределительные силовые сети
РУ – решающее устройство
СВЧ – сверхвысокая частота
СКИ – служба космических исследований
СКК – сеть с коммутацией каналов
СКП – сеть с коммутацией пакетов
СКС – сеть с коммутацией сообщений
СКЭ – служба космической эксплуатации
СОВ – система обнаружения вторжения
СПЗ – счетчик повторных запросов
ССИ – селектор синхроимпульсов
ССМС – система сотовой мобильной связи
СТ – система телемеханики
СЧ – средняя частота
ТИ – телеизмерения
ТМП – телеметрируемый параметр
ТП – технологический процесс
ТС – телесигнализация
ТСОП – телефонная сеть общего пользования
ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика
ТУ – телеуправление
У – усилитель
УАПП – универсальный асинхронный приемопередатчик
УВЧ – ультравысокая частота
УЗО – устройство защиты от ошибок
УК – узел коммутации
УКВ – ультракороткие волны
УПС – устройство преобразования сигналов
УПЧ – усилитель промежуточной частоты
УСЛ – устройство сопряжения с линией
УСО – устройство связи с объектом

УТМ – устройство телемеханики
УУ – устройство управления
Ф – фазовращатель
ФАР – фазированная антенная решетка
ФД – фотодетектор
ФИМ – фазово-импульсная модуляция
ФМ – фазовая манипуляция
ФНЧ – фильтр нижних частот
ФП – фильтр присоединения
ФСО – формирователь сигнала обмена
ФСОС – формирователь сигналов обратной связи
ФТИ – формирователь тактовых импульсов
ФЧХ – фазочастотная характеристика
ЦА – центр аутентификации
ЦК – центр коммутации
ЦКП – центр коммутации пакетов
ЦКС – центр коммутации сообщений
ЦРЗ – цветоразделительное зеркало
ЦРС – цветоразностный сигнал
ЦУО – центр управления и обслуживания
ЧВЧ – чрезвычайно высокая частота
ЧД – частотный детектор
ЧМ – частотный модулятор
ШПС – шумоподобный сигнал
ЭВМ – электронная вычислительная машина
ЭМВ – электромагнитные волны

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Макаров, В. А. Теоретические основы телемеханики / В. А. Макаров. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1974. – 287 с.
- 2 Немеровский, А. С. Системы связи и радиорелейные линии / А. С. Немеровский, Е. В. Рыжков ; под ред. А. С. Немеровского. – М. : Связь, 1980. – 432 с.
- 3 Волоконно-оптические системы передачи и кабели. Справочник / И. И. Гроднев [и др.] ; под общ. ред. И. И. Гроднева. – М. : Радио и связь, 1993. – 264 с.
- 4 Городские телефонные кабели. Справочник / А. С. Брискер [и др.] ; под общ. ред. А. С. Брискера. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1991. – 207 с.
- 5 Линии связи : учебник для вузов / Л. Н. Качановский [и др.] ; под общ. ред. Л. Н. Качановского. – 6 изд., перераб. – М. : Радио и связь, 1995. – 489 с.
- 6 Убайдулаев, Р. Волоконно-оптические сети / Р. Убайдулаев. – М. : Эко-Трендз, 1998. – 267 с.
- 7 Оптические системы передачи : учебник / Б. В. Скворцов [и др.] ; под общ. ред. Б. В. Скворцова. – М. : Радио и связь, 1994. – 223 с.
- 8 Гаранин, М. В. Системы и сети передачи информации / М. В. Гаранин, В. И. Журавлев, С. В. Кунечин ; под ред. М. В. Гаранина. – М. : Радио и связь, 2001. – 336 с.
- 9 Маковеева, М. М. Системы и средства связи с подвижными объектами / М. М. Маковеева, Ю. С. Шинаков ; под ред. М. М. Маковеевой. – М. : Радио и связь, 2002. – 440 с.
- 10 Галкин, В. А. Телекоммуникации и сети : учеб. пособие для вузов / В. А. Галкин, Ю. А. Григорьев ; под ред. В. А. Галкина. – М. : МГТУ им. Баумана, 2003. – 608 с.
- 11 Лагутенко, О. Н. Современные модемы / О. Н. Лагутенко. – М. : Эко-Трендз, 2002. – 344 с.
- 12 Надежность электрорадиоизделий. Справочник / С. Ф. Прытков [и др.]; под общ. ред. С. Ф. Прыткова. – М. : ФГУП «22 ЦНИИИ МО РФ», 2008. – 641 с.
- 13 Липаев, В. В. Надежность программных ресурсов / В. В. Липаев. – М. : Синтез, 1998. – 232 с.
- 14 Черкесов, Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов / Г. Н. Черкесов. – СПб. : Питер, 2005. – 479 с.
- 15 Дианов, В. Н. Диагностика и надежность автоматических систем / В. Н. Дианов. – М. : МГИУ, 2005. – 160 с.
- 16 Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л. Н. Александровская [и др.] ; под общ. ред. Л. Н. Александровской. – М. : Логос, 2001. – 206 с.

- 17 Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическими процессами, экспериментами, оборудованием / В. В. Денисенко. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
- 18 Кузнецов, Р. Г. Кабели для современных сетей автоматизации / Р. Г. Кузнецов // Автоматизация в промышленности / Р. Г. Кузнецов. – 2005, № 8. – 205 с.
- 19 Боровиков, С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.
- 20 Скляр, Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – 2-е изд., испр. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
- 21 Лопухов, И. Концепция параллельного и кольцевого резервирования / И. Лопухов // Современные технологии автоматизации. – 2012. – № 1 – С. 18–25.
- 22 Лопухов, И. Резервирование промышленных сетей Ethernet на втором уровне OSI: стандарты и технологии / И. Лопухов // Современные технологии автоматизации. – 2009. – № 3 – С. 16–20.
- 23 Сорока, Н. И. Телемеханика. Конспект лекций для студ. спец. 53 01 03 «Автоматическое управление в технических системах» и 53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах». В 4 ч. Ч. 3 : Линии связи и помехоустойчивость информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2004. – 132 с.
- 24 Ратынский, М. В. Основы сотовой связи / М. В. Ратынский ; под ред. Д. Б. Замина. – М. : Радио и связь, 1998. – 248 с.
- 25 Банкет, В. П. Цифровые методы в спутниковой связи / В. П. Банкет, В. М. Дорофеев. – М. : Радио и связь, 1988. – 240 с.
- 26 Феер, К. Беспроводная цифровая связь / К. Феер ; пер. с англ. ; под ред. В. И. Журавлёва. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.
- 27 Ицкович, Э. Л. Методы рациональной автоматизации производства / Э. Л. Ицкович. – М. : Инфраинженерия, 2009. – 240 с.
- 28 Лопухов, И. Технология питания IP-устройств по сигнальному кабелю «PoweroverEthernet» и ее реализация в промышленном сетевом оборудовании / И. Лопухов // Современные технологии автоматизации. – 2009. – № 4. – С. 14–18.
- 29 Контроллеры привязки измеряемых параметров к единому времени / В. Румянцев [и др.] // Современные технологии автоматизации. – 2013. – № 3. – С. 62–64.
- 30 Лопухов, И. Обеспечение безопасности ОРС для АСУ ТП / И. Лопухов // Современные технологии автоматизации. – 2014. – № 2. – С. 6–8.

- 31 Безопасность систем SCADA и АСУ ТП [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа : http://www.security-bridge.com/biblioteka/stati_po_bezopasnosti/be-zopasnost_sistem_scada_i_asutp.
- 32 Вулис, А. Основные положения базовых стандартов ГОСТ Р МЭК на устройства и системы телемеханики / А. Вулис, В. Сумительнов // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 76–84.
- 33 Рошан, П. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11 / П. Рошан, Дж. Лиэри. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2004. – 304 с.
- 34 Смит, Д. Д. Функциональная безопасность / Д. Д. Смит, К. Д. Симсон. – М. : Изд. дом «Технологии», 2004. – 208 с.
- 35 Олифер, В. Г. Основы сетей передачи данных / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – М. : ИНТУИТ.РУ, 2003. – 248 с.
- 36 ГОСТ Р МЭК 870-5-96. Устройства и системы телемеханики. Ч. 5. Протоколы передачи. Раздел 1. Форматы передаваемых кадров. – М. : Изд-во стандартов, 1996.
- 37 Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
- 38 Нестеров, А. Л. Проектирование АСУТП : метод. пособие. Кн. 1 / А. Л. Нестеров. – СПб. : Изд-во «ДЕАН», 2006. – 552 с.
- 39 Столлингс, В. Современные компьютерные сети / В. Столлингс ; пер. с англ. – М. : Изд-во дом «Вильямс», 2003. – 638 с.
- 40 ГОСТ Р МЭК 870-5-2-95. Устройства и системы телемеханики. Ч. 5. Протоколы передачи. Раздел 2. Процедуры в каналах передачи. – М. : Изд-во стандартов, 1995.
- 41 Харазов, В. Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами / В. Г. Харазов. – СПб. : Профессия, 2009. – 592 с.
- 42 Жиленков, Н. Новые технологии беспроводной передачи данных / Н. Жиленков // Современные технологии автоматизации. – 2003. – № 4. – С. 44–47.
- 43 Шахнович, И. В. Современные технологии беспроводной связи / И. В. Шахнович. – М. : Техносфера, 2006. – 287 с.
- 44 Половинкин В. HART-протокол / В. Половинкин // Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 1. – С. 6–12.
- 45 Гупта, А. Выбор промышленной сети для автоматизации технологических процессов / А. Гупта, Р. Каро // Современные технологии автоматизации. – 1999. – № 3. – С. 16–20.

46 Применение промышленных контроллеров для автоматизации гидрометеорологических измерений / В. Корнеев [и др.]. // Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 1. – С. 26–31.

47 Соловьёв, В. А. Управление космическими полетами : учеб. пособие. В 2 ч. / В. А. Соловьёв, Л. Н. Лысенко, В. Е. Любинский ; под общ. ред. Л. Н. Лысенко. – М. : Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана : Ч. 1, 2009. – 476 с. ; Ч. 2, 2010. – 426 с.

48 Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики : учеб. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М. : Эко-Трендз, 2005. – 392 с.

49 Кудрашов, В. А. Системы передачи дискретной информации / В. А. Кудрашов, В. П. Глушко. – М. : УМКМПС, 2002. – 384 с.

50 Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс / А. В. Назаров [и др.]. – СПб. : Наука и техника, 2007. – 672 с.

51 Сорока, Н. И. Обмен информацией бортовых систем. Конспект лекций для студ. спец. 1-36 04 02 «Промышленная электроника» / Н. И. Сорока. – Минск : БГУИР, 2006. – 284 с.

52 Сорока, Н. И. Телемеханика. Конспект лекций для студ. спец. 53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах». В 6 ч. Ч. 5 : Технологии передачи дискретной информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2005. – 264 с.

53 Шишов, О. В. Современные технологии промышленной автоматизации : учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по спец. 21 01 06 «Промышленная электроника» направления подготовки дипломированных специалистов 21 01 00 «Электроника и микроэлектроника» / О. В. Шишов. – Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2009. – 274 с.

54 Садовомский, А. С. Приемопередающие радиоустройства и системы связи : учеб. пособие для студ. спец. 21 02 01 65 / А. С. Садовомский. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 243 с.

55 Кангин, В. В. Аппаратные и программные средства систем управления. Промышленные сети и контроллеры : учеб. пособие / В. В. Кангин – М. : БИНОМ, 2010. – 418 с.

56 Петраков, А. В. Основы практической защиты информации : учеб. пособие / А. В. Петраков. – М. : Радио и связь, 1999. – 368 с.

57 Давыдов, И. Ю. Сети с нулевым циклом переключения / И. Ю. Давыдов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. – М. : УГТУ, 2016. – № 10. – С. 225–228.

58 Алехин, А. Г. Цифровые коммуникации в управлении. Лабораторный комплекс SDK-2.0 : учеб. пособие / А. Г. Алехин. – Волгоград : ВолгГТУ, 2015. – 83 с.

59 Сорока, Н. И. Телемеханика. Системы контроля и управления : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2 / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2020. – 402 с.

60 Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : метод. пособие для студ. спец. 1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещание и телевидение». В 3 ч. Ч. 3 : Антенны / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук, О. А. Юрцев. – Минск : БГУИР, 2006. – 164 с.

61 Пенин, П. И. Системы передачи цифровой информации : учеб. пособие для вузов / П. И. Пенин. – М. : Сов. радио, 1976. – 368 с.

Учебное издание

Сорока Николай Ильич
Кривинченко Георгий Александрович
Тарасюк Евгений Васильевич

**ТЕЛЕМЕХАНИКА.
ЛИНИИ СВЯЗИ И БЕЗОПАСНОСТЬ
УСТРОЙСТВ И СЕТЕЙ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Е. С. Юрец*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *О. И. Толкач*

Подписано в печать 26.05.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 14,07. Уч.-изд. л. 16,0. Тираж 150 экз. Заказ 125.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск