

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

***ТЕЛЕМЕХАНИКА.
СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ***

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

В двух частях

Часть 1

Минск БГУИР 2020

УДК 621.398(075.8)
ББК 32.968я73
С65

Рецензенты:

кафедра телекоммуникационных систем учреждения образования
«Белорусская государственная академия связи» (протокол №10 от 02.05.2019);

доцент кафедры информационно-измерительной техники и технологии
Белорусского национального технического университета
кандидат физико-математических наук, доцент К. Л. Тявловский

Сорока, Н. И.

С65 Телемеханика. Системы контроля и управления : учеб. пособие.
В 2 ч. Ч. 1 / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2020. –
176 с. : ил.

ISBN 978-985-543-544-1 (ч. 1).

Рассмотрены принципы построения систем телеизмерения, телеуправления, теле-сигнализации, телерегулирования, бортовых информационно-телеметрических и современных систем для контроля и управления распределенными технологическими процессами и передачи цифровой информации. Приведены выражения для оценки помехоустойчивости непрерывных, импульсных и цифровых видов модуляции. Рассмотрены вопросы оценки помехоустойчивости двоичных избыточных кодов, кодов с обнаружением и исправлением ошибок, а также систем с дублированием сообщений и обратными каналами связи.

Предназначено для студентов специальности «Информационные технологии и управление в технических системах», может быть полезно магистрантам, аспирантам и специалистам, занимающимся проектированием, созданием и эксплуатацией телемеханических комплексов и систем передачи цифровой информации.

Издано в двух частях. Часть 1 издания включает разделы 1–7 учебного пособия и список использованных источников к ним.

Табл. : 7. Ил. : 92. Библиогр. 61.

УДК 621.398(075.8)
ББК 32.968я73

ISBN 978-985-543-544-1 (ч. 1)
ISBN 978-985-543-543-4

© Сорока Н. И., Кривинченко Г. А., 2020
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	6
Введение.....	7
1 Телеизмерение.....	10
1.1 Основные понятия. Классификация систем телеизмерения.....	10
1.1.1 Классификация систем телеизмерения.....	12
1.1.2 Функции, выполняемые системами телеизмерений.....	15
1.2 Телеметрические системы с частотным разделением каналов.....	16
1.2.1 Искажения в системах ТИ с ЧРК.....	19
1.2.2 Улучшение энергетических соотношений.....	29
1.2.3 Методика расчета перекрестных искажений.....	30
1.2.4 Переходные искажения.....	33
1.2.5 Выбор поднесущих и несущих частот.....	38
1.3 Телеметрическая система с временным разделением каналов.....	39
1.3.1 Калибровка как способ уменьшения ошибок.....	44
1.3.2 Временные характеристики.....	45
1.3.3 Искажения.....	47
1.3.4 Погрешности при восстановлении сообщений.....	51
1.3.5 Некоторые специфические вопросы построения систем ТИ с ВРК.....	54
1.3.6 Синхронизация в системах ТИ с ВРК.....	57
1.4 Телеметрические системы с частотно-временным разделением каналов.....	61
1.4.1 Структурная схема.....	61
1.4.2 Спектр сигналов и полоса частот.....	63
1.4.3 Энергетические показатели.....	64
1.4.4 Искажения сигналов.....	64
1.4.5 Выбор поднесущих частот.....	64
1.5 Цифровые телеметрические системы.....	64
1.5.1 Структурная электрическая схема.....	65
1.5.2 Структура сигналов.....	69
1.5.3 Адресные телеметрические системы.....	70
1.5.4 Структура сигналов в системе, реализующей адресно-кодový принцип.....	73
1.5.5 Спектр кодовых сигналов.....	73
1.5.6 Выбор кодов.....	74
1.5.7 Другие примеры построения цифровых систем ТИ.....	75
1.6 Адаптивные телеизмерительные системы.....	78
1.6.1 Телеметрические системы с адаптивной дискретизацией.....	81
1.6.2 Телеметрические системы с адаптивной коммутацией.....	85
1.6.3 Телеметрические системы с автоматическим регулированием частоты опроса датчиков.....	88

1.6.4 Телеметрические системы с рациональным построением телеметрического кадра.....	90
1.6.5 Использование сжатия данных для улучшения характеристик телеметрических систем.....	93
2 Телеуправление и телесигнализация.....	94
2.1 Основные понятия.....	94
2.1.1 Требования, предъявляемые к устройствам ТУ-ТС.....	95
2.1.2 Виды команд.....	96
2.2 Методы телеуправления.....	97
2.3 Виды и методы сигнализации.....	98
2.4 Классификация объектов управления и устройств ТУ-ТС.....	98
2.5 Методы разделения и избирания сигналов.....	100
2.6 Частотное разделение сигналов.....	101
2.7 Временное разделение сигналов.....	106
2.8 Временное кодовое разделение сигналов.....	110
2.9 Сравнительная оценка и области применения методов разделения сигналов.....	113
2.10 Оборудование, располагаемое на ПУ и КП.....	113
3 Телерегулирование.....	115
4 Бортовая радиоэлектронная система.....	120
4.1 Принцип построения.....	120
4.2 Стандартная и иерархическая модели системы.....	126
5 Принципы построения современных систем для контроля и управления распределенными технологическими процессами.....	130
5.1 Структурная схема.....	130
5.2 Иерархия современной системы автоматизации.....	133
5.3 Применение интернет-технологий.....	135
5.3.1 Проблемы применения интернет-технологий и их решение.....	136
5.3.2 Примеры применения интернет-технологий.....	137
6 Системы передачи цифровой информации.....	139
6.1 Структурная схема системы передачи цифровой информации.....	140
6.2 Этапы обработки и распространения сигнала.....	144
6.2.1 Кодирование источника.....	146
6.2.2 Сжатие данных.....	147
6.2.3 Шифрование.....	148
6.2.4 Канальное кодирование.....	149
6.2.5 Уплотнение и множественный доступ.....	152
6.2.6 Линейное кодирование.....	153
6.2.7 Цифровая модуляция.....	153
6.2.8 Расширение спектра сигнала.....	154
6.2.9 Синхронизация.....	154
6.3 Функции, выполняемые отдельными устройствами систем передачи дискретной информации.....	155

6.4 Методы повышения качества работы систем передачи дискретных сообщений.....	157
7 Многофункциональные системы телемеханики.....	158
7.1 Назначение и структурная схема телемеханического комплекса.....	158
7.2 Структурная схема пункта управления.....	160
7.3 Структурная схема контролируемого пункта.....	162
7.4 Структура сигналов.....	164
7.5 Алгоритм функционирования пункта управления.....	165
7.6 Алгоритм функционирования контролируемого пункта.....	167
Перечень сокращений.....	171
Список использованных источников.....	174

Библиотека БГУИР

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие написано на основе материалов лекций, которые в течение ряда лет читались авторами в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Данное учебное пособие соответствует 4–8 разделам программы дисциплины «Телемеханика» типового учебного плана для студентов специальности «Информационные технологии и управление в технических системах» и образовательному стандарту Республики Беларусь.

Главная цель, которую поставили авторы при написании учебного пособия, состояла в том, чтобы изложить в систематизированном и доступном для понимания виде ряд важных вопросов передачи телемеханических сообщений. В учебном пособии излагаются идеи, принципы и методы, которые лежат в основе построения телемеханических систем. По возможности авторы не стремились перегружать материал математическими доказательствами, а большое внимание уделяли прикладной стороне, необходимые соотношения доводились до уровня инженерных расчетов. Учитывая, что системы телемеханики в настоящее время применяются для контроля и управления стационарными и подвижными объектами в различных отраслях народного хозяйства с использованием проводных и беспроводных каналов связи, а также Интернета, в учебном пособии отображается специфика построения подобных систем.

Авторы не ставили перед собой задачу рассмотреть все наиболее существенные вопросы передачи телемеханических сообщений. Такие вопросы, как помехи и их математическое описание, виды искажений полезных сообщений, физические каналы связи, промышленные сети, временная синхронизация в сетях, резервирование устройств и каналов связи, кибербезопасность, аппаратная надежность и расчет информационных характеристик, оптимальные методы приема сигналов и ряд других, вообще не затронуты.

Несмотря на это, авторы надеются, что данное учебное пособие позволит студентам быстрее и правильнее ориентироваться при решении практических вопросов по разработке систем телеконтроля, телеуправления и передачи цифровой информации в процессе учебной и научно-исследовательской работы, курсового и дипломного проектирования.

Для закрепления материала и контроля за его усвоением в приложении приведены экспресс-тесты.

Авторы признательны рецензентам: заведующему кафедрой телекоммуникационных систем учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» кандидату технических наук, доценту С. И. Половения и доценту кафедры информационно-измерительной техники и технологии Белорусского национального технического университета кандидату физико-математических наук, доценту К. Л. Тявловскому за деловую критику и замечания, которые были учтены при окончательной подготовке рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие народного хозяйства требует прогрессивных сдвигов в его структуре, разработки и внедрения новых методов производства и управления. В этой связи все большую роль начинают играть комплексная механизация и автоматизация производственных процессов. Одной из существенных сторон этой большой и сложной задачи является проблема сбора, передачи и обработки информации, необходимой как непосредственно для управления процессом производства, так и для решения связанных с ним научно-технических вопросов.

В решении этой сложной комплексной задачи важную роль играют телемеханические методы контроля и управления. В ряде случаев телемеханические системы становятся незаменимым средством при важнейших научных исследованиях. Так, благодаря применению телеметрических систем значительно облегчается исследование земных глубин, становится возможным детальное изучение процессов, протекающих на труднодоступных объектах.

Исключительное значение приобрела радиотелеметрия, с помощью которой можно получить информацию при исследованиях верхних слоев атмосферы и космоса, при испытаниях движущихся объектов, самолетов, космических кораблей, автомобилей и т. п. Развитие новых областей и научных исследований постоянно расширяет круг задач, решаемых телемеханическими методами, предъявляет все более высокие требования к точности, надежности, быстродействию и экономичности телемеханической аппаратуры.

По выполняемым функциям системы телемеханики подразделяются на системы телеуправления и телесигнализации, телеизмерения, телеконтроля, телерегулирования и передачи данных. Системы телемеханики применяются для контроля и управления производственными процессами, для различных научных исследований, для испытаний авиационной и ракетно-космической техники.

Большое внимание в настоящее время уделяется системам передачи данных. Первоначально системами передачи данных, как правило, пользовались в сфере бизнеса и военном деле, но в последнее время они нашли применение в частной жизни. Передать информацию о банковском счете от центрального компьютера на электронную кассовую машину, выбрать платную кабельную телевизионную программу или загрузить игру с компьютерной доски объявлений на домашний компьютер – все это способны реализовать системы передачи данных. Поскольку системы передачи данных играют значительную роль в современном мире, очень важно понимать принципы, на которых они построены.

Таким образом, системы телемеханики служат для передачи различных сообщений. Сообщения могут быть непрерывными, либо дискретными (цифровыми), и передача их 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 харак-

теризуют помехоустойчивость и пропускная способность. Эти основные характеристики тесно связаны между собой, так как 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 пропускная способность, а в системах телеуправления – помехоустойчивость.

Данное учебное пособие посвящено принципам построения систем телеизмерения, телеуправления, телесигнализации, телерегулирования, передачи цифровой информации и получению выражений для инженерного расчета помехоустойчивости как аналоговых сообщений, так и цифровых и состоит из 15 разделов и двух приложений.

В первом разделе даны основные характеристики систем телеизмерения, приведены структурные схемы систем с частотным, временным, частотно-временным и кодовым разделением каналов; поясняется принцип их работы, анализируются возможные искажения сигналов и приводятся расчеты основных параметров. Особое внимание уделено адаптивным телеизмерительным системам.

Второй раздел посвящен методам телеуправления и телесигнализации, приводятся структурные схемы систем, дается сравнительная оценка и указываются области их применения.

Третий раздел посвящен системам телерегулирования, приведены структурные схемы и пояснен принцип их функционирования.

В четвертом разделе рассмотрены бортовые информационно-телеметрические системы, приведена иерархическая модель, описан принцип их функционирования и построения бортовой сети.

Пятый раздел посвящен принципам построения систем контроля и управления распределенными технологическими процессами, указано место систем телемеханики в этих системах, приведена иерархия систем автоматизации и указаны основные проблемы применения интернет-технологий.

В шестом разделе рассмотрены системы передачи цифровой информации, указаны области применения подобных систем, приведена обобщенная структура и подробно описаны этапы обработки и распространения сигнала.

Седьмой раздел посвящен многофункциональным системам телемеханики, на конкретном примере показан принцип иерархического управления, приведены структурные схемы устройств, алгоритмы их функционирования и структуры сигналов, циркулирующих между пунктом управления и контролируемым пунктом.

В восьмом разделе рассмотрены методы расширения спектра частот передаваемых сообщений, псевдослучайные последовательности и примеры применения широкополосных сигналов на практике.

В девятом разделе рассматриваются многочастотные способы модуляции и треллис-кодирование, позволяющие повысить качество работы систем передачи цифровой информации.

В десятом разделе рассматриваются системы с информационной и решающей обратными связями, приведены структурные схемы, временные диаграммы и алгоритмы функционирования.

Одиннадцатый раздел посвящен методам перемежения, позволяющим устранить подавления полезного сигнала пакетом помех.

В двенадцатом разделе рассматриваются линейные коды для передачи по последовательным каналам связи, а также передачи данных с использованием скремблера и дескремблера, позволяющих сформировать определенный кодовый рисунок.

Тринадцатый раздел посвящен вопросам тактовой, символьной и кадровой синхронизации, приведены структурные схемы и описан принцип работы устройств синхронизации, рассмотрена временная синхронизация в промышленных сетях и особенности синхронизации в системах ракетно-космических аппаратов.

Четырнадцатый раздел посвящен вопросам помехоустойчивости передачи дискретных сообщений, рассмотрен принцип построения идеального приемника Котельникова, приведены выражения для расчета параметра, характеризующего потенциальную помехоустойчивость кодовых сообщений, систем с обратными связями, рассмотрены вопросы помехоустойчивости цифровых видов модуляции и систем с широкополосными сигналами.

В пятнадцатом разделе рассматриваются вопросы помехоустойчивости передачи непрерывных сообщений, получены выражения для приведенной среднеквадратичной ошибки для аналоговых и импульсных видов модуляции.

В приложениях приведены таблицы функций, связанных с интегралом ошибок, и тесты для контроля усвоения лекционного материала.

1 ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЕ

1.1 Основные понятия. Классификация систем телеизмерения

Телеизмерение (ТИ) (телеметрия) – это область науки и техники, занимающаяся вопросами разработки и эксплуатации комплекса автоматизированных средств, обеспечивающих получение, преобразование, передачу по каналу связи, прием, обработку и регистрацию измерительной информации и информации о событиях с целью контроля состояния и функционирования технических и биологических систем различных объектов на расстоянии и изучения явлений природы. Таким образом, телеизмерение определяется как область автоматических измерений на расстоянии через каналы связи без непосредственного участия человека в процессе измерения. ТИ как область техники и технических наук одновременно является частью измерительной техники и телемеханики. В связи с этим в ТИ развиваются и применяются одновременно методы и технические средства измерений и телемеханики. Телеизмерение отличается от обычных электрических измерений, которые не могут быть применены для измерения на расстоянии вследствие возникновения погрешностей из-за изменения параметров линии связи, окружающей среды и действия помех. Даже если бы указанные погрешности находились в допустимых пределах, передача большого числа показаний потребовала бы большого числа проводов. Кроме того, в некоторых случаях (передача измерения с подвижных объектов – самолетов, спутников, ракет и др.) обычные методы принципиально не могут быть использованы. Методы телеизмерения позволяют уменьшить погрешность при передаче измеряемых величин на большие расстояния, а также многократно использовать линию связи. Сущность телеизмерения заключается в том, что измеряемая величина, предварительно преобразованная в ток или напряжение, дополнительно преобразовывается в сигнал, который затем передается по линии связи. Таким образом, передается не сама измеряемая величина, а эквивалентный ей сигнал, параметры которого выбирают так, чтобы искажения при передаче были минимальными.

Структурная схема телеизмерения приведена на рисунке 1.1.

Измеряемая величина X (давление, влажность, уровень, скорость, вибрация и т. п.) преобразуется с помощью датчика (первичного преобразователя) в электрическую величину $U_{д1}$ (ток, напряжение, сопротивление, емкость, индуктивность). Сигнал с выхода датчика не может быть непосредственно использован для передачи по информационному каналу. В таких случаях выходные сигналы от датчиков подаются на каналные преобразователи, где преобразуются к единому (унифицированному) параметру U_{c1} (напряжение 0–5 В, напряжение 0–10 В, ток 0–100 мА), принятому для данной системы. Параметр U_{c1} преобразуется в передатчике методом кодирования и модуляции в параметр сигнала U_{y1} , пригодный для передачи по линии связи. Следовательно, передатчик согласовывает параметр U_{c1} с линией (каналом) связи. На приемной стороне сигнал U_{y2} (он отличается от U_{y1} за счет воздействия помех в линии связи) поступает на вход

приемника и преобразуется (демодулируется и декодируется) в величину U_{c2} , которая приемным преобразователем преобразуется в значение тока или напряжения, которое эквивалентно измеряемой величине и воспроизводит ее на регистрирующем приборе. Совокупность технических средств на передающей, приемной сторонах и канале связи, необходимых для автоматического измерения одного или ряда параметров на расстоянии, включая датчик и регистрирующий прибор, называется **системой телеизмерения (СТИ)**. А технические средства, предназначенные для осуществления телеизмерений путем ряда автоматических преобразований и передачи сигналов через канал связи, называются **телеизмерительным устройством**. Процесс телеизмерения производится **без непосредственного участия человека**.

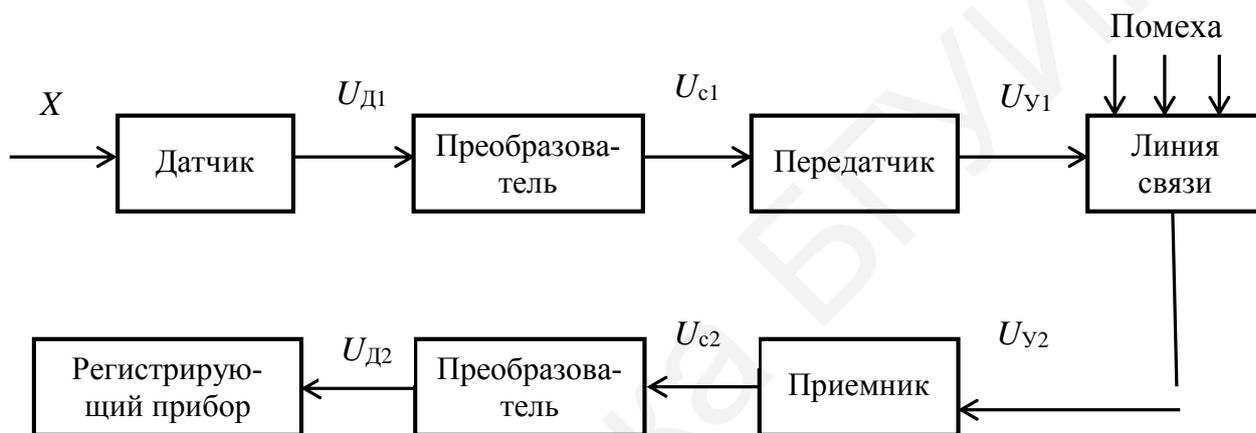


Рисунок 1.1 – Структурная схема телеизмерения

Различают телеизмерение по вызову и по выбору, текущих и интегральных параметров.

Телеизмерение по вызову – телеизмерение по команде, посылаемой с пункта управления (ПУ) на контролируемый пункт (КП) и вызывающей подключение на КП передающих устройств, а на ПУ – соответствующих приемных устройств. Телеизмерение по вызову позволяет использовать одну линию связи (канал телеизмерения) для поочередного наблюдения за многими объектами телеизмерения. Диспетчер с помощью отдельной системы телеуправления может подключать к каналу ТИ желаемый объект ТИ. На ПУ показания можно наблюдать на общем выходном приборе. Если показания имеют различные шкалы, то измеряемые величины подключаются к разным приборам. При ТИ по вызову можно применять автоматический опрос объектов ТИ циклически по заданной программе.

Телеизмерение по выбору – ТИ путем подключения к устройствам ПУ соответствующих приемных приборов при постоянно подключенных передающих устройствах на КП.

Телеизмерение текущих параметров (ТИТ) – получение информации о значении измеряемого параметра в момент опроса устройством телемеханики.

Телеизмерение интегральных параметров (ТИИ) – получение информации об интегральных значениях измеряемых величин, проинтегрированных по заданному параметру, например времени, в месте передачи.

По характеру решаемых задач средства телеметрии используются при измерении температуры морей и океанов, исследовании сейсмической активности различных районов Земли, изучении воздушного и космического пространства, контроля качества продукции, исследовании природных ресурсов и биологических систем Земли. В настоящее время телеметрическая аппаратура широко используется в процессе испытаний военной техники и вооружения, в метеорологии и геофизике, в газовой, атомной и химической промышленности, в медицине и других отраслях народного хозяйства.

1.1.1 Классификация систем телеизмерения

В настоящее время существует большое количество различных систем телеизмерений (СТИ), поэтому целесообразно стремиться к установлению некоторого порядка, облегчающего их обозрение. Приведенная ниже классификация в известной мере является условной, так как на практике не всегда представляется возможным четко разделить телеметрические системы на определенные типы и группы. Обычно СТИ классифицируются по ряду признаков: по числу каналов, назначению, области применения, принципу измерения параметров, способу разделения каналов, методу передачи информации и др. [43].

По назначению СТИ подразделяются на оперативные, регистрирующие и комбинированные.

Оперативные СТИ входят в состав системы телеуправления в качестве информационного звена. Измерительная информация, получаемая с помощью телеметрической системы, используется с целью формирования команд управления.

Регистрирующие СТИ служат для документальной регистрации большого числа разнообразных телеметрических параметров (ТМП), характеризующих работу агрегатов и систем объекта, параметров окружающего пространства, медико-биологических параметров и др. По сравнению с оперативными системами регистрирующие СТИ имеют большое число каналов и характеризуются значительным временем обработки информации.

Комбинированные СТИ выполняют функции как оперативных, так и регистрирующих систем. Большинство современных СТИ относится к комбинированным системам.

В зависимости от области применения СТИ можно разделить на ряд типов: для контроля производственных процессов, для различных научных исследований, для испытаний авиационной, ракетно-космической техники и т. п. Каждый из указанных типов СТИ имеет ряд существенных особенностей, касающихся как принципов построения, так и конструктивных решений.

По способу разделения каналов СТИ подразделяются на системы с временным, частотным, адресным и комбинированным разделением каналов. Наиболее часто на практике используется комбинация частотного и временного разделения каналов.

В зависимости от типа линии связи СТИ делятся на системы с проводным каналом, радиоканалом и оптическим каналом связи. Системы проводной телеметрии широко применяются в промышленности и военном деле. К ним, в частности, относятся стендовые регистраторы, используемые при отработке реактивных двигателей на испытательных стендах.

По принципу использования канала связи СТИ подразделяются на системы с собственным каналом и с совмещенным каналом. На практике часто одна радиолиния служит для измерения параметров движения и передачи телеметрической информации. Совмещение каналов позволяет снизить вес аппаратуры и потребление электроэнергии на борту летательного аппарата.

По способу передачи телеметрической информации СТИ делятся на аналоговые и цифровые. Цифровые методы передачи информации широко используются как в космической телеметрии, так и промышленной. Они обладают достаточно высокой помехоустойчивостью, относительно узкой полосой частот и рядом других положительных качеств.

По информативности (пропускной способности) СТИ делятся на системы малой, средней и высокой информативности. К СТИ малой информативности относятся системы, где суммарная полезная полоса частот всех каналов $\Delta F_{\Sigma} = 300 \dots 500$ Гц. Системы средней информативности, используемые для передачи широкополосной информации, характеризуются значением $\Delta F_{\Sigma} = 5000$ Гц. В системах высокой информативности $\Delta F_{\Sigma} = 20\,000$ Гц.

В зависимости от способа обслуживания СТИ можно разделить на неадаптивные и адаптивные (самонастраивающиеся или приспособляющиеся). Последние отличаются значительной сложностью, но более высокой гибкостью. Они позволяют менять программу телеизмерений, точность передачи и частоту дискретизации ТМП, регулировать скорости передачи данных, приспособляться к изменению помеховой обстановки в канале связи и т. п. Их применение может дать значительный экономический эффект, главным образом в связи с исключением избыточных данных, которые не передаются по каналу связи и не представляют ценности для потребителя информации.

Все системы по списку каналов могут быть **одноканальными**, когда по одной линии связи передается только одно измерение, и **многоканальными**, когда по одной линии связи передается много измерений (**классификация по числу измеряемых величин**). Многоканальность достигается с помощью частотного, временного и кодового способов разделения сигналов.

По методам воспроизведения измеряемой величины системы ТИ подразделяются на аналоговые и цифровые. К аналоговым системам относятся системы, у которых сигналы модулированы с помощью непрерывных и импульсных модуляций. В аналоговых системах может применяться дискретизация по времени, но отсутствует квантование по уровню. В аналоговых системах

регистрация сигнала осуществляется, как правило, в аналоговой форме электроизмерительными приборами. В случае, когда необходимо произвести обработку результатов **на ЭВМ**, на приемной стороне производится преобразование в цифровой эквивалент с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Наибольшее применение находят цифровые системы, где телеизмеряемый параметр преобразуется в цифровой эквивалент. Преимущества этих систем приведены во введении [2]. В настоящее время широкое применение находят системы с кодоимпульсной модуляцией и сложными (псевдослучайными) сигналами.

Системы ТИ можно классифицировать по **виду программы**, по которой они работают. Подавляющее большинство СТИ работают по жесткой (заранее заданной) программе, по которой передаются все измеряемые сообщения независимо от того, несут ли они информацию получателю или являются избыточными. В настоящее время широко применяются адаптивные телеизмерительные системы, автоматически изменяющие программу работы в зависимости от изменения характеристик передаваемых сообщений и внешних условий.

По температурным условиям устройства ТИ делятся на три группы: **для производственных помещений, закрытых неотапливаемых помещений** и для установки на **открытом воздухе**.

В зависимости от **вида используемого** канала связи различают **проводные** (в том числе **волоконно-оптические**), **гидроакустические** и **радиотелеметрические системы**.

Различают телеметрические системы **военного** и **промышленного назначения**, а также используемые для проведения **научных исследований**.

По **помехоустойчивости** системы согласно ГОСТ Р МЭК 60870 делятся на три категории (таблица 1.1) при вероятности искажения бита 10^{-4} .

Таблица 1.1 – Требования к достоверности систем ТИ

Вероятностные характеристики	Вероятность P события не более		
	Категории систем		
	$I1$	$I2$	$I3$
Вероятность трансформации сообщений ТИ	10^{-6}	10^{-10}	10^{-14}

По **надежности** системы ТИ согласно ГОСТ Р МЭК 60870 делятся на три категории (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Требования по надежности

Характеристики по надежности	Категории систем		
	$R1$	$R2$	$R3$
Наработка на отказ, ч	не менее 2000	не менее 4000	не менее 8750

Следует отметить, что иногда телеметрические системы бывают составной частью более крупных систем и комплексов (например, в космических комплексах,

комплексах для трубопроводного транспорта и энергосистем). Однако имеются области науки, техники и народного хозяйства, в которых телеметрические системы применяются как отдельные самостоятельные системы. К таким областям относятся авиационная и ракетно-космическая техника, океанология и морская техника, промышленность, метеорология, геофизика, медицина и т. п.

1.1.2 Функции, выполняемые системами телеизмерений

Согласно требованиям современной телеметрии [43] СТИ должны выполнять следующие функции:

- измерение группы параметров, характеризующих состояние отдельных узлов и деталей, а также по возможности непосредственно процессов;
- представление результатов измерений в форме, удобной для дальнейших операций;
- сбор данных о состоянии отдельных блоков и узлов промышленных объектов (ПО) и о текущих параметрах процесса;
- обработка данных с целью получения информации о состоянии отдельных узлов ПО и характере протекания процесса в отдельных его сечениях;
- преобразование результатов обработки к виду, обеспечивающему оперативное восприятие человеком-оператором информации о текущем состоянии процесса с помощью дисплея (дисплеев);
- ведение архива данных о процессе с целью ретроспективного анализа хода протекания процессов ПО;
- выработка сигналов, предупреждающих о нарушениях режима и возникновении аварийной ситуации;
- решение диагностических задач с целью определения и своевременной локализации места возникновения нарушения режима, меняющего характер протекания процесса;
- обеспечение выработки решения об управляющем воздействии в случае обнаружения тенденции отклонения параметров процесса от нормы (по возможности).

Для выполнения указанных функций система телеметрии в своем составе должна иметь:

- набор датчиков, непосредственно воспринимающих параметры процесса и преобразующих их в электрические сигналы;
- аппаратуру сбора и преобразования этих сигналов для представления телеметрируемых параметров в размерных величинах;
- аппаратуру отображения с использованием одного или нескольких дисплеев;
- инженерный пульт для ручного ввода уставок, тарифовочных характеристик датчиков, выдачи управляющих воздействий и др.;
- аппаратуру архивирования, обеспечивающую непрерывную регистрацию обработанных данных в течение заданного периода времени;

- аппаратуру цветовой, звуковой и световой сигнализации для предупреждения о возникновении предаварийных и аварийных ситуаций;
- средства контроля состояния и режимов работы систем инфраструктуры (системы электроснабжения, водоснабжения, вакуумирования и т. п.).

Система телеметрии должна иметь выход на локальные регуляторы, предназначенные для управления технологическим процессом. В случаях возникновения нештатных и аварийных ситуаций, система телеметрии также должна выработать сигналы различных блокировок, отключений и т. п.

С целью повышения надежности комплекса и достоверности получаемой информации, учитывая специфику процессов (непрерывность и долговременность работы ПО и отдельных групп оборудования), должна быть обеспечена аппаратурная и информационная избыточность, а также бесперебойность электропитания.

Для построения многоканальных систем используются частотное, временное, адресное и комбинированное разделение каналов. Рассмотрим более подробно каждый из способов.

1.2 Телеметрические системы с частотным разделением каналов

Сущность частотного разделения каналов (ЧРК) состоит в том, что в пределах спектра частот ΔF_{Σ} , выделяемого для данной телеметрической системы, выбираются некоторые постоянные частоты $F_{\Pi 1} - F_{\Pi n}$, называемые поднесущими частотами. Каждая поднесущая частота модулируется (первичная модуляция) сигналом U_{ci} , передаваемым по этому каналу. При этом около каждой поднесущей частоты образуется соответствующий спектр частот. Ширина спектра в каждом канале ΔF_i определяется частотным спектром телеметрируемой величины и используемым способом модуляции.

Условное распределение спектра поднесущих частот по информационным каналам системы ТИ приведено на рисунке 1.2.

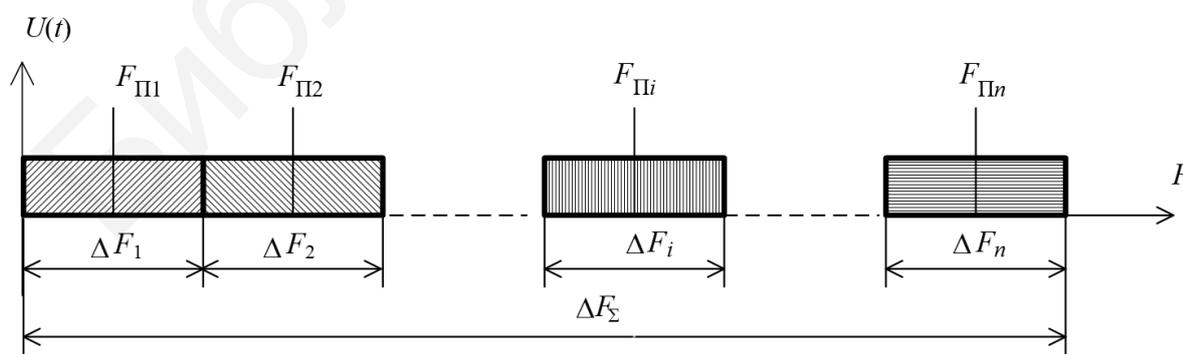


Рисунок 1.2 – Пример распределения спектра поднесущих частот по информационным каналам

Поднесущие частоты разносятся таким образом, чтобы при их модуляции и объединении каналов не произошло заметного наложения спектров сигналов соседних каналов.

Структурные схемы КП и ПУ многоканальной телеметрической системы с ЧРК приведены на рисунках 1.3 и 1.4 соответственно.

Выходные электрические сигналы датчиков (первичных преобразователей), воспринимающих и преобразующих измеряемые величины, поступают на вход преобразователей, где они преобразуются к единому электрическому сигналу (нормируются), принятому для данной телеметрической системы и через фильтр нижних частот (ФНЧ) поступают на первичные (канальные) модуляторы. ФНЧ устраняют высокочастотные выбросы сигнала, поступающего от датчика, которые возникают из-за переходных и других процессов во входных цепях и тем самым устраняют перемодуляцию генераторов поднесущих.

Конструктивно ФНЧ может находиться в преобразователе-нормализаторе. На второй вход канальных модуляторов поступают сигналы от генераторов поднесущих частот. Модуляция в этом случае может быть амплитудной (АМ), частотной (ЧМ) или фазовой (ФМ). Сигналы с выхода канальных модуляторов поступают на вход полосовых фильтров, резонансная частота которых равна частоте генераторов поднесущих, а полоса частот определяется видом первичной модуляции. Сигналы с выхода канальных полосовых фильтров подаются на схему суммирования, где они смешиваются, а затем поступают на групповой модулятор, где осуществляется вторичная модуляция, и после этого через линейный блок поступают в линию связи, которая может быть как радио, так и проводная. Линейный блок (ЛБ) служит для согласования выходных параметров передатчика с параметрами линии связи.

На ПУ сигнал из линии связи поступает на вход ЛБ, который согласовывает выходные параметры линии связи с входными параметрами приемника. Если на второй ступени применялись ЧМ и ФМ, то перед групповым демодулятором (ДМ) помещают ограничитель, который устраняет паразитную амплитудную модуляцию, возникающую в линии связи из-за воздействия помех. Групповой демодулятор освобождает от несущей частоты, и на выходе образуется напряжение, подобное тому, которое действует на входе группового модулятора (см. рисунок 1.3). Этот сигнал, спектр которого охватывает спектры частот всех каналов, подается на входы всех (разделительных) фильтров, настроенных соответственно на частоты поднесущих $F_{П1} - F_{Пn}$, а полоса частот определяется видом модуляции на первой ступени.

Каждый из полосовых фильтров пропускает в основном составляющие спектра частот только соответствующего ему канала, отфильтровывая сигналы всех других частот.

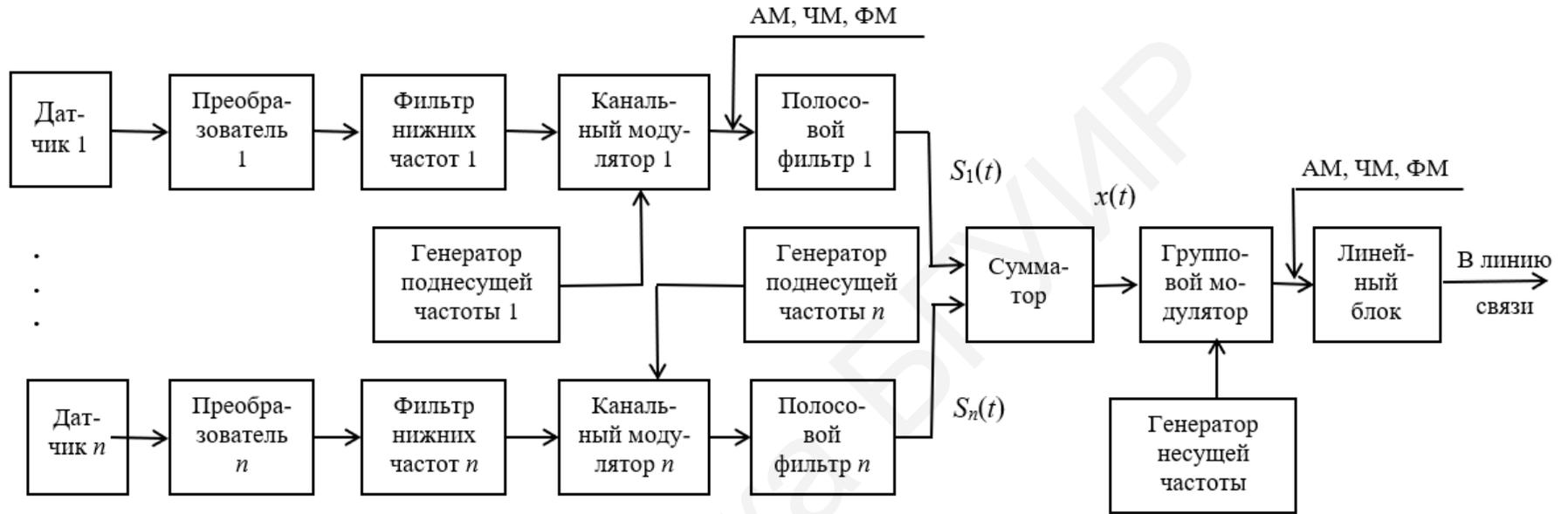


Рисунок 1.3 – Структурная схема КП телеметрической системы с ЧРК

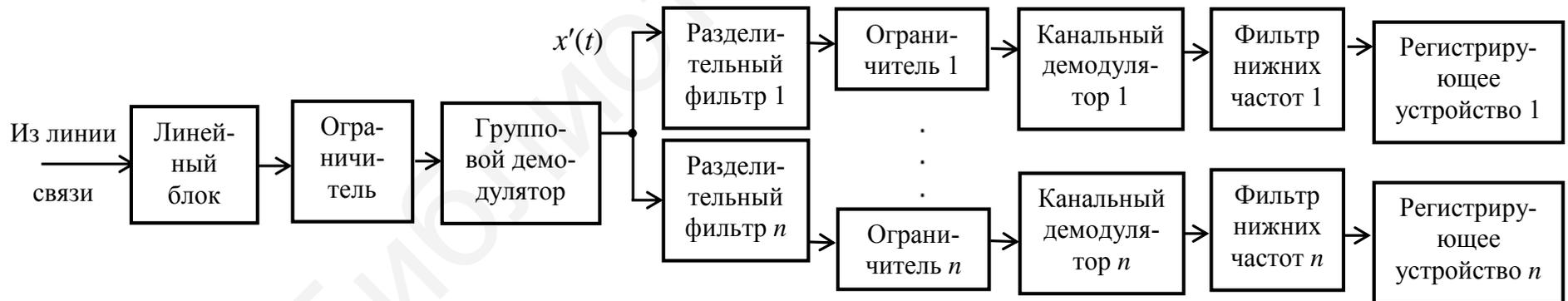


Рисунок 1.4 – Структурная схема ПУ телеметрической системы с ЧРК

Таким образом, с помощью полосовых фильтров производится разделение сигналов по информационным каналам на приемной стороне. За счет несовершенства амплитудно-частотных характеристик полосовых фильтров имеет место взаимное перекрытие их частотных характеристик, что приводит к проникновению сигналов из одних каналов в другие (переходные искажения).

С выхода полосовых канальных фильтров сигнал поступает на канальные демодуляторы непосредственно при АМ или через ограничители при ЧМ и ФМ.

Назначение канальных ограничителей соответствует назначению ограничителя, установленного перед групповым демодулятором. В результате вторичного детектирования (демодуляции) каждого из полученных сигналов демодулятора формируются напряжения, отображающие в некотором масштабе сигналы измерительных преобразователей. Эти сигналы через ФНЧ, которые служат для увеличения отношения сигнал/шум, записываются регистрирующим устройством. Таким образом, разделительные фильтры и демодуляторы составляют декодер телеметрической системы с ЧРК.

Из рассмотрения структурной схемы аналоговой телеметрической системы с ЧРК видно, что основными элементами телеметрической системы являются элементы передатчика и приемника (групповой модулятор, генератор несущей частоты, линейные блоки, групповой демодулятор), канальные модуляторы, генераторы поднесущих колебаний, полосовые фильтры, ограничители, демодуляторы, фильтры нижних частот и регистрирующие устройства. Информация о модуляторах и демодуляторах достаточно полно изложена в [3].

Регистрирующие устройства могут быть индивидуальными, устанавливаемыми в каждом канале, и многоканальными (например самописцы).

Для калибровки показаний регистрирующих устройств, которые могут изменяться из-за изменения условий распространения сигналов, может производиться поочередное подключение к каналам вместо датчиков информации калибровочного напряжения.

По этим показаниям на ПУ производится корректировка коэффициента передачи канальных трактов.

Основной недостаток систем с ЧРК – это работа передатчика в активной области, что снижает мощность сигнала, а следовательно, и помехоустойчивость.

1.2.1 Искажения в системах ТИ с ЧРК

Передача сообщений через любые реальные системы связи сопровождается искажениями, в результате чего эти сообщения на приеме отличаются от передаваемых.

Все искажения логично разделить на два основных вида: независимые, возникающие из-за наложения на сигнал различного рода шумов (**аддитивные помехи**), и зависимые, причиной которых является несовершенство тракта передачи (**мультипликативные помехи**). К мультипликативным искажениям относятся зависимые искажения, появляющиеся вследствие нелинейности амплитуд-

ных, частотных и фазовых характеристик канала связи, а также искажения, обусловленные появлением паразитных каналов связи (например, многолучевое распространение радиоволн). Происхождение этих искажений непосредственно связано с сигналом, и при его отсутствии искажения не обнаруживаются, или, другими словами, при отсутствии полезных сообщений исчезают и зависимые искажения. Для систем с ЧРК характерны два вида зависимых искажений. Первый вид – **перекрестные искажения** – обусловлен неидеальностью характеристик группового тракта, которые приводят к появлению множества комбинационных частот, либо к наложению на сигнал помехи, имеющей случайный характер. Перекрестные искажения в групповом тракте следует разделить на следующие группы: искажения в низкочастотной (НЧ) части тракта, к которой относятся усилители видеоканала, модуляторы и демодуляторы; искажения в высокочастотной (ВЧ) части тракта, которая включает в себя радиотракт передающего и приемного устройств; искажения в пространстве вследствие изменения условий распространения волн.

Второй вид – **переходные искажения** – обусловлен недостаточной селективностью разделительных фильтров, вследствие чего возникает помеха по соседнему каналу.

Проанализируем оба вида искажений и оценим влияние параметров группового тракта передачи на их величину. *Входным сигналом* группового тракта в системах с ЧРК является многоканальное сообщение, представляющее собой сумму модулированных поднесущих $S_i(t)$:

$$U_{\text{вх}} = x(t) = \sum_{i=1}^n S_i(t), \quad (1.1)$$

где n – число каналов.

Выходным сигналом является

$$U_{\text{вых}}(t) = x'(t).$$

Вследствие воздействия различного рода помех форма принятого сообщения $x'(t)$ будет отличаться от переданного, т. е. на приеме будет искажена. Тогда условно сигнал на выходе можно представить в виде

$$U_{\text{вых}}(t) = x'(t) = kx(t - \tau) + \varepsilon_n(t), \quad (1.2)$$

где $kx(t - \tau)$ – неискаженное сообщение;

$\varepsilon_n(t)$ – напряжение перекрестной помехи.

Условием неискаженного прохождения сигнала через групповой тракт является постоянство коэффициента k для всех мгновенных значений сигнала $x(t)$, а время запаздывания τ – постоянно для всех составляющих спектра группового сигнала.

В реальных устройствах получить идеальные характеристики невозможно вследствие следующих причин:

– наличие реактивностей (L , C), входящих в состав звеньев тракта, приводит к тому, что частотная и фазовая характеристики тракта отличаются от идеальных;

– стремление к максимальному использованию мощности передатчика для повышения помехоустойчивости системы к более полному использованию модуляционной характеристики, вследствие чего амплитудная характеристика группового тракта становится нелинейной.

При известных характеристиках реального группового тракта ошибку от перекрестных искажений принципиально можно определить. Однако эта задача настолько сложна, что получить оптимальные для расчетов аналитические выражения невозможно. Поэтому при расчетах приходится идти на дальнейшие упрощения, а именно: определить ошибки, вносимые отдельными звеньями группового тракта, рассматривая их независимо; найти общую ошибку, пользуясь критерием среднеквадратичной ошибки.

В зависимости от того, какой вид модуляции используется во второй ступени, влияние неидеальности характеристики группового тракта в создании перекрестных искажений будет различным. Так, при АМ во второй ступени искажения возникают из-за нелинейности амплитудных характеристик низкочастотной и высокочастотной частей группового тракта.

При частотной модуляции во второй ступени нелинейность амплитудной характеристики НЧ части тракта является причиной перекрестных искажений, так же как и при АМ. Нелинейность же амплитудной и неравномерность частотной характеристик высокочастотной части тракта не вызовут искажений, так как паразитные изменения амплитуды ЧМ сигнала устраняются ограничителем, включенным перед частотным детектором. Это весьма важное качество систем с ЧМ во второй ступени. Основное влияние на прохождение ЧМ сигнала оказывает нелинейность фазовой характеристики группового тракта.

Рассмотрим методику и примеры расчета перекрестных и переходных искажений для НЧ и ВЧ частей трактов системы.

Перекрестные искажения в НЧ части группового тракта. Перекрестные искажения в НЧ части тракта определяются нелинейностью амплитудной характеристики. Так как анализ этих искажений является достаточно сложной задачей, то обычно ограничиваются их приближенной оценкой. Рассмотрим два приближенных способа: при линейно-ломаной аппроксимации амплитудной характеристики, при аппроксимации амплитудной характеристики полиномом.

1.2.1.1 Линейно-ломаная аппроксимация амплитудной характеристики. Амплитудная характеристика НЧ части группового тракта в этом случае будет иметь вид, показанный на рисунке 1.5.

Превышение групповым сигналом $x(t)$ уровня полной линейной модуляции приводит к появлению искажения, так как все мгновенные значения x , превышающие $U_{\text{д}}$, не будут воспроизводиться на выходе группового тракта.

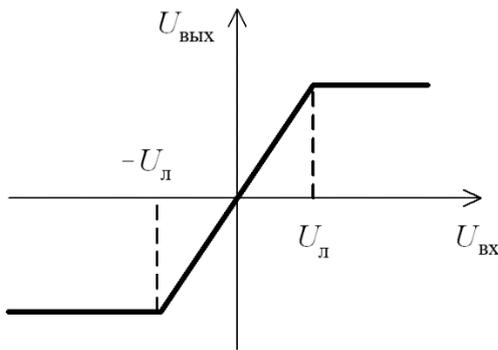


Рисунок 1.5 – Амплитудная характеристика НЧ части группового тракта

Здесь $U_{\text{л}}$ – уровень полной линейной модуляции. Такую аппроксимацию целесообразно выбирать, если перед модулятором включен ограничитель группового сигнала $x(t)$ с целью улучшения энергетических соотношений. При этом амплитудная характеристика тракта будет определяться характеристикой ограничителя. Для получения неискаженного сигнала при работе необходимо использовать только линейную часть характеристики, т. е. $x(t) \leq U_{\text{л}}$.

Известно, что если число модулированных поднесущих достаточно велико (не менее 8–10) и фазы поднесущих случайны и равновероятны в интервале $0 \dots 2\pi$ (используются отдельные генераторы поднесущих), то в соответствии с центральной предельной теоремой Ляпунова можно считать, что сумма напряжений модулированных поднесущих – групповой сигнал – представляет собой случайный стационарный процесс. При этом достаточно хорошим приближением для функции распределения $W(x)$ является нормальный закон

$$W(x) = \frac{1}{x_3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2x_3^2}}, \quad (1.3)$$

где x – мгновенное значение суммы поднесущих;
 x_3 – эффективное значение группового сигнала:

$$x_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^n S_i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}. \quad (1.4)$$

При равенстве всех амплитуд немодулированных поднесущих и при сто-процентной амплитудной модуляции каждой

$$x_3 = U \sqrt{\frac{3n}{4}}, \quad (1.5)$$

при частотной

$$x_3 = U \sqrt{\frac{n}{2}}, \quad (1.6)$$

где U – амплитуда немодулированной поднесущей.

Зная функцию $W(x)$, можно найти вероятность того, что мгновенное значение группового сигнала x превысит уровень $U_{\text{л}}$ (вероятность перемодуляции):

$$P(|x| \geq U_{\text{п}}) = \int_{-\infty}^{-U_{\text{п}}} W(x) dx + \int_{U_{\text{п}}}^{\infty} W(x) dx, \quad (1.7)$$

или

$$P(|x| \geq U_{\text{п}}) = 1 - 2 \int_0^{U_{\text{п}}} W(x) dx.$$

Учитывая выражение (1.3) и производя замену переменных, получим

$$P_{\text{ПМ}} = P(|x| \geq U_{\text{п}}) = 1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^H e^{-\frac{y^2}{2}} dy,$$

или

$$P_{\text{ПМ}} = 1 - 2\Phi(H), \quad (1.8)$$

где $y = \frac{x}{x_3}$;

H – порог перемодуляции ($H = \frac{U_{\text{п}}}{x_3}$).

Вероятность перемодуляции характеризует ту часть времени работы системы, в течение которой $|x| \geq U_{\text{п}}$. Это время зависит от порога перемодуляции. Чем больше величина H , тем быстрее происходит перемодуляция и тем меньше уровень перекрестных помех. Чтобы оценить ошибку, вносимую перекрестной помехой в каждый канал, необходимо найти их спектральную плотность. Так как перекрестные помехи представляют собой случайный процесс, то ширина спектра будет определяться средней длительностью выбросов случайного процесса $x(t)$:

$$\tau(H) = \frac{P_{\text{ПМ}}}{n(H)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{P_{\text{ПМ}}}{F_{\text{П}}} e^{-\frac{H^2}{2}},$$

где $F_{\text{П}}$ – частота поднесущей n -го канала;

$n(H)$ – число выбросов случайной величины y , превосходящих уровень H

$$(n(H) = \frac{2F_{\text{П}}}{\sqrt{3}} e^{-\frac{H^2}{2}}).$$

Средняя ширина спектра перекрестных искажений равна обратной величине средней длительности выброса:

$$\Delta f(H) = \frac{1}{\tau(H)} = \frac{2F_{\Pi}}{\sqrt{3}P_{\Pi M}} e^{-\frac{H^2}{2}}. \quad (1.9)$$

Спектральная плотность перекрестных помех (удельная мощность в полосе 1 Гц) на выходе НЧ части группового тракта может быть определена из выражения

$$P_{0\text{НЧ}} = \frac{P_{\varepsilon}}{\Delta f(H)} = \frac{2 \int_{U_{\text{л}}}^{\infty} \varepsilon_{\Pi}^2 W(\varepsilon_n) d\varepsilon_{\Pi}}{\Delta f(H)} = \frac{2 \int_{U_{\text{л}}}^{\infty} (U_{\text{л}} - x)^2 W(x) dx}{\Delta f(H)}, \quad (1.10)$$

где P_{ε} – мощность перекрестных помех;

ε_{Π}^2 – квадрат ошибки;

$W(\varepsilon_n)$ – плотность вероятности случайного процесса, а так как $U_{\text{л}} = \text{const}$, то для всех $|x| \geq U_{\text{л}}$ ($W(\varepsilon_n) = W(x)$).

Учитывая выражения (1.3) и (1.8) и производя интегрирование, получим

$$\begin{aligned} P_{0\text{НЧ}} &= \frac{\frac{2x_3^2}{\sqrt{2\pi}H} \int_H^{\infty} (H-y)^2 e^{-\frac{y^2}{2}} dy}{\Delta f_n} = \frac{x_3^2 \left[P_{\Pi M} (H^2 + 1) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} H e^{-\frac{H^2}{2}} \right]}{\Delta f_n} = \\ &= \frac{x_3^2 \left[P_{\Pi M} (H^2 + 1) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} H e^{-\frac{H^2}{2}} \right] \cdot \sqrt{3} P_{\Pi M} e^{-\frac{H^2}{2}}}{2F_n} = \\ &= -\sqrt{\frac{3}{2\pi}} \cdot \frac{P_{\Pi M} x_3^2 H}{F_n} \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{H^2 + 1}{H} \right) e^{-\frac{H^2}{2}} P_{\Pi M} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Для $H > 3$ вероятность перемодуляции может быть приближенно оценена соотношением

$$P_{\Pi M} \approx \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{H} e^{-\frac{H^2}{2}}. \quad (1.12)$$

Тогда выражение (1.11) можно представить в виде

$$P_{0\text{НЧ}} \approx \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \cdot \frac{x_3^2 P_{\Pi M}}{HF_{\Pi}}, \quad (1.13)$$

или

$$P_{\text{0НЧ}} \approx \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{x_3^2}{H^2 F_{\Pi}} e^{-\frac{H^2}{2}}. \quad (1.14)$$

Представляя перекрестную помеху на выходе разделителя каналов как шум с постоянной спектральной плотностью $P_{\text{0НЧ}}$, можно рассчитать среднеквадратичную ошибку на выходе отдельного канала. Если поднесущие выбираются из таблицы стандартных поднесущих частот, то F_{ci} изменяется в зависимости от номера канала. Следовательно, ошибка также будет изменяться. Для того чтобы величина ошибки была постоянна в каждом канале, амплитудные значения поднесущих необходимо выбирать из условия

$$U_i = U_1 \sqrt{\frac{F_{ci}}{F_{c1}}}. \quad (1.15)$$

В свою очередь,

$$\sum_{i=1}^n U_i = nU, \quad (1.16)$$

где U – среднее значение амплитуды поднесущей, постоянное для каждого канала.

Следовательно,

$$U_1 = \frac{nU \sqrt{F_{c1}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{F_{ci}}}. \quad (1.17)$$

1.2.1.2 Аппроксимация амплитудной характеристики полиномом. Аппроксимация амплитудной характеристики группового тракта полиномом используется в тех случаях, когда предварительное ограничение группового тракта перед второй ступенью модуляции отсутствует, и аппроксимация линейно-ломаной становится грубым приближением. В этом случае амплитудную характеристику можно определить полиномом вида

$$U_{\text{ВЫХ}} = a_1 U_{\text{ВХ}} + a_2 U_{\text{ВХ}}^2 + a_3 U_{\text{ВХ}}^3 + \dots,$$

где a_1, a_2, a_3 – постоянные коэффициенты, величина и знак которых определяются видом характеристики.

Так как искажения группового тракта должны быть небольшими, то нелинейность реальной характеристики не будет значительной. Поэтому при анализе достаточно ограничения тремя первыми членами этого выражения. Тогда ошибку от перекрестных помех можно представить в виде

$$\varepsilon_{\Pi}(t) = a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t).$$

В качестве примера предположим, что на вход поступают два сигнала $S_1(t) = U_1 \cos \omega_1 t$ и $S_2(t) = U_2 \cos \omega_2 t$. Для простоты вычислений принимаем, что $U_1 = U_2 = 1$.

Тогда

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Pi}(t) &= a_2 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^2 + a_3 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^3 = a_2 (\cos^2 \omega_1 t + 2 \cos \omega_1 t \times \\ &\times \cos \omega_2 t + \cos^2 \omega_2 t) + a_3 (\cos^3 \omega_1 t + 3 \cos^2 \omega_1 t \cos \omega_2 t + 3 \cos \omega_1 t \cos^2 \omega_2 t + \cos^3 \omega_2 t) = \\ &= a_2 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_1 t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{1}{2} \cos 2\omega_2 t + \frac{1}{2} \right] + \\ &+ a_3 \left[\frac{1}{2} \cos \omega_1 t + \frac{1}{4} \cos(2\omega_1 - \omega_1)t + \frac{1}{4} \cos(2\omega_1 + \omega_1)t + \frac{3}{2} \cos \omega_2 t + \frac{3}{4} \cos(2\omega_1 + \omega_2)t + \right. \\ &+ \frac{3}{4} \cos(2\omega_1 - \omega_2)t + \frac{3}{2} \cos \omega_1 t + \frac{3}{4} \cos(2\omega_2 - \omega_1)t + \frac{3}{4} \cos(2\omega_2 + \omega_1)t + \frac{1}{2} \cos \omega_2 t + \\ &\left. + \frac{1}{4} \cos(2\omega_2 - \omega_2)t + \frac{1}{4} \cos(2\omega_2 + \omega_2)t \right]. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Из этого выражения видно, что в спектре даже при немодулированных поднесущих появляются комбинационные составляющие вида

$$2\omega_1 \pm \omega_2, 2\omega_2 \pm \omega_1, 2\omega_1 \pm \omega_1, 2\omega_2 \pm \omega_2, \omega_1 \pm \omega_2.$$

Причем число их резко возрастает с увеличением числа каналов. Так при числе каналов $n = 5$ число комбинационных составляющих вида $\omega_i \pm \omega_j = 20$, а при $n = 10$ число составляющих вида $\omega_i \pm \omega_j$ равно 90.

Последнее обстоятельство является причиной ограничения числа каналов (до 18–20) в радиотелеметрических системах с частотным разделением каналов. На основании выражения (1.18) можно установить, какие составляющие перекрестных помех попадают в полосу, занимаемую групповым сигналом, и определить мощность перекрестных помех:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m P_i,$$

где P_i – мощность составляющих, попадающих в полосу группового тракта.

Расчеты показывают, что

$$P_{\Sigma} \approx \frac{1}{4} (a_2 U^4 n^2 + \frac{3}{2} a_3^2 U^6 n^3). \quad (1.19)$$

Принимая приближенно, что спектральная плотность перекрестной помехи в полосе группового сигнала равномерна, и пренебрегая влиянием квадратичного члена характеристики, получим выражение для спектральной плотности перекрестной помехи:

$$P_{\text{ОНЧ}} = \frac{P_{\Sigma}}{F_{\Pi}} \approx 0,4 \frac{a_3^2 U^6 n^3}{F_{\Pi}}. \quad (1.20)$$

Коэффициент a_3 можно найти из экспериментальной амплитудной характеристики группового тракта.

Среднеквадратичную ошибку от перекрестных искажений на выходе отдельного i -го канала можно определить из выражений [11].

Для уменьшения влияния перекрестных искажений выбор поднесущих частот производят по коэффициентам r_n (таблица 1.3) либо по таблицам стандартных частот (таблица 1.4).

Таблица 1.3 – Типовые наборы коэффициентов

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6
1	1,3	1,8	2,45	3,0	4,5
1	1,8	3,3	5,7	9,85	17,0
1	2,3	3,95	9,0	18,7	35,0

При таком выборе поднесущих частот комбинационные частоты будут присутствовать, но они не будут совпадать с рабочей частотой.

Таблица 1.4 – Стандарты поднесущих частот

Канал	Центральная частота, Гц	Нижний предел, Гц	Верхний предел, Гц	Максимальная девиация частоты, %	Частота передаваемого сигнала, Гц
1	400	370	430	±7,5	6,0
2	560	518	602	±7,5	8,4
3	730	675	785	±7,5	11
4	960	888	1032	±7,5	14
5	1300	1202	1399	±7,5	20
6	1700	1572	1828	±7,5	25
7	2300	2127	2473	±7,5	35
8	3000	2775	3225	±7,5	45
9	3900	3607	4193	±7,5	59
10	5400	4995	5905	±7,5	81
11	7350	6799	7601	±7,5	110
12	10 500	9712	11 288	±7,5	160
13	14 500	13 412	15 588	±7,5	220
14	22 000	20 350	23 650	±7,5	330

Продолжение таблицы 1.4

Канал	Центральная частота, Гц	Нижний предел, Гц	Верхний предел, Гц	Максимальная девиация частоты, %	Частота передаваемого сигнала, Гц
15	30 000	27 750	32 250	±7,5	450
16	40 000	37 000	43 000	±7,5	600
17	52 500	48 562	56 438	±7,5	790
18	70 000	64 750	75 250	±7,5	1050
19	93 000	86 025	99 975	±7,5	1400
20	124 000	114 700	133 300	±7,5	1900
21	165 000	152 625	177 375	±7,5	2500

Перекрестные искажения в ВЧ части группового тракта. Произведем анализ перекрестных искажений, возникающих в высокочастотной части, предполагая, что НЧ часть не вносит искажений.

Если во второй ступени имеет место АМ, то при экспериментальном определении коэффициента a_3 автоматически будет учтено влияние нелинейности характеристики и ВЧ части. Поэтому ограничимся рассмотрением лишь случая ЧМ во второй ступени.

Как было указано выше, при ЧМ во второй ступени искажения в ВЧ тракте возникают из-за нелинейности фазовой характеристики и изменения распространения радиоволн.

Мгновенное значение частот на входе и выходе отличаются на величину

$$\delta_{\omega} = \omega_{\text{вых}}(t) - \omega_{\text{вх}}(t) = \frac{d}{dt}[\varphi(\Delta\omega)], \quad (1.21)$$

где $\varphi(\Delta\omega)$ – фазовая характеристика ВЧ тракта;

$\Delta\omega$ – максимальная девиация частоты.

Следовательно, погрешность частоты δ_{ω} будет проявляться в виде перекрестных искажений.

Если представить фазовую характеристику полиномом

$$\varphi(\omega) = b_1\Delta\omega + b_2\Delta\omega^2 + b_3\Delta\omega^3,$$

то перекрестная помеха на выходе демодулятора группового сигнала будет равна

$$\varepsilon_{\Pi}(t) = K_{\text{д}}\delta_{\omega} = K_{\text{д}} \frac{d}{dt}(b_2\Delta\omega^2 + b_3\Delta\omega^3),$$

где $K_{\text{д}}$ – коэффициент передачи частотного детектора для круговой частоты.

Тогда спектральную плотность можно определить из выражения

$$P_{\text{овч}} = 0,4 \cdot K_{\text{д}}^2 \omega^2 \frac{b_3^2 \Delta\omega^6}{n^3 \omega_{\Pi}} \quad (1.22)$$

и найти среднеквадратичную ошибку. Как показывают расчеты, во многих практических случаях $P_{0ВЧ} \ll P_{0НЧ}$, следовательно, искажениями из-за нелинейности фазовой характеристики можно пренебречь по сравнению с искажениями из-за нелинейности амплитудной характеристики группового тракта.

Перекрестные искажения из-за различных интерференционных явлений можно существенно уменьшить следующими способами:

- выбором частотного диапазона, который не используется для других систем связи, что исключает мешающее действие других передатчиков;
- использованием направленных антенн;
- размещением передатчика и приемника на минимально возможных расстояниях от антенн и тщательным согласованием их с нагрузкой.

Применение этих способов во многих случаях позволяет пренебречь влиянием интерференционных искажений по сравнению с другими видами искажений.

1.2.2 Улучшение энергетических соотношений

Известно, что многоканальное сообщение – групповой сигнал – представляет собой сумму модулированных поднесущих, определяемых выражением (1.1). Для исключения перекрестных помех достаточно, чтобы сумма амплитуд поднесущих не превышала порогового значения $U_{л}$.

Если амплитуды поднесущих равны, то при АМ и ЧМ в системе с известным числом каналов их можно определить из следующих выражений:

– при АМ

$$U' = \frac{U_{л}}{2n}; \quad (1.23)$$

– при ЧМ

$$U' = \frac{U_{л}}{n}. \quad (1.24)$$

Эти условия носят название критерия отсутствия искажений.

Однако при проектировании телеметрической системы обеспечивать такое соотношение невыгодно, так как уменьшение амплитуд поднесущих приводит к снижению помехоустойчивости. Поэтому целесообразно увеличить амплитуды поднесущих, но при условии, чтобы ошибки от перекрестных помех не превышали допустимой величины.

Возможность подобного улучшения качества системы обуславливается тем, что групповой сигнал, как было показано ранее, является случайным. Отсюда следует, что только с определенной вероятностью $P_{пм}$ групповой сигнал может превысить пороговое значение $U_{л}$. В свою очередь, вероятность перемодуляции $P_{пм}$ определяет согласно выражению (1.13) ошибку от перекрестных

помех. На основании этого приведем методику расчета при заданной вероятности $P_{\text{ПМ}}$, определяемой выражением (1.8).

Значения амплитуд поднесущих, при которых перемодуляция отсутствует, определяется выражениями (1.23) и (1.24). Если допустить перемодуляцию, то амплитуды поднесущих можно увеличить. Обозначим их новые значения через U . Тогда согласно выражениям (1.5) и (1.6) эффективное значение группового сигнала будет равно:

– при АМ

$$x_3 = U \sqrt{\frac{3n}{4}};$$

– при ЧМ

$$x_3 = U \sqrt{\frac{n}{2}}.$$

Используя выражения (1.23) и (1.24), можно получить соотношения для относительного порога перемодуляции при АМ и ЧМ в виде уравнений

$$H = \frac{4\sqrt{n}}{\sqrt{3}} \left(\frac{U'}{U} \right)_{\text{АМ}}, \quad H = \sqrt{2n} \left(\frac{U'}{U} \right)_{\text{ЧМ}}.$$

Отсюда

$$\left(\frac{U}{U'} \right)_{\text{АМ}} = 2,3 \frac{\sqrt{n}}{H}, \quad (1.25)$$

$$\left(\frac{U}{U'} \right)_{\text{ЧМ}} = 1,41 \frac{\sqrt{n}}{H}, \quad (1.26)$$

где U' – амплитуда немодулированной поднесущей при отсутствии перемодуляции;
 U – амплитуда немодулированной поднесущей в случае перемодуляции.

Последнее соотношение позволяет рассчитать допустимое увеличение амплитуды поднесущих при заданном пороге H , определяемом вероятностью перемодуляции $P_{\text{ПМ}}$.

1.2.3 Методика расчета перекрестных искажений

Для расчета среднеквадратичной ошибки от перекрестных помех можно предложить следующий порядок:

1 Исходя из требований точности к телеметрической системе, необходимо ориентировочно задаться величиной допустимой вероятности перемодуляции $P_{\text{ПМ}}$. Ее значение, как правило, выбирается в пределах от 10^{-2} до 10^{-5} .

2 По заданной величине вероятности перемодуляции находим порог перемодуляции H из выражений (1.8) либо из таблицы 1.5.

Таблица 1.5 – Соответствие вероятности перемодуляции порогу перемодуляции

$P_{\text{ПМ}}$	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-2}$
H	4,42	4,05	3,89	3,48	3,29	2,81	2,57	1,96

3 По известной величине относительного порога перемодуляции и числу каналов n из соотношений (1.25) и (1.26) определяем, во сколько раз можно увеличить амплитуды поднесущих.

4 Определив из выражений (1.23) и (1.24) амплитуды поднесущих при отсутствии перемодуляции $U'_{\text{АМ}}$ или $U'_{\text{ЧМ}}$, находим амплитудные значения поднесущих в случае перемодуляции $U_{\text{АМ}}$ и $U_{\text{ЧМ}}$.

5 Зная $P_{\text{ПМ}}$, порог перемодуляции H и частоту наиболее высокой поднесущей $F_{\text{П}}$, находим спектральную плотность перекрестной помехи $P_{\text{ОНЧ}}$. Эффективное значение группового сигнала определяется из выражений (1.5) и (1.6). При аппроксимации характеристики линейно-ломаной спектральную плотность находим из точного выражения (1.11) либо из приближенных (1.13) и (1.14). При аппроксимации характеристики полиномом спектральную плотность находим из выражения (1.20), причем коэффициент a_3 определяется непосредственно из экспериментальных данных.

6 При частотной модуляции во второй ступени из выражения (1.22) определяем спектральную плотность перекрестной помехи $P_{\text{ОВЧ}}$, возникающей из-за нелинейности характеристики ВЧ части группового тракта.

7 Общую спектральную плотность перекрестных помех получим в виде

$$P_0 = P_{\text{ОНЧ}} + P_{\text{ОВЧ}}.$$

8 Выбирая поднесущие из таблицы 1.4 стандартных поднесущих частот либо по коэффициентам из таблицы 1.3, определяем амплитудные значения поднесущих для каждого отдельного канала согласно выражениям (1.15) и (1.16).

9 По известным параметрам системы определяем относительную среднеквадратичную ошибку от перекрестных помех согласно выражениям [3].

10 Если полученная ошибка превышает допустимую, то выбирается меньшая величина перемодуляции $P_{\text{ПМ}}$ и расчет повторяется.

Пример 1.1. Найти величину среднеквадратичной ошибки от перекрестных помех в многоканальной системе ТИ с АМ поднесущих и следующими параметрами: $n = 15$; $F_{\text{П}} = 30$ кГц; $U_{\text{Л}} = 9$ В; характеристика группового тракта аппроксимируется линейно-ломаной.

Решение. Зададимся вероятностью перемодуляции $P_{\text{ПМ}} = 10^{-3}$. Согласно таблице 1.5 $H = 3,29$. Тогда

$$\frac{U}{U'} = 2,3 \frac{\sqrt{n}}{H} = \frac{2,3 \cdot \sqrt{15}}{3,29} = 2,7.$$

Из критерия отсутствия перемодуляции при АМ имеем

$$U' = \frac{U_{\text{Л}}}{2n} = \frac{9}{30} = 0,3 \text{ В}.$$

Следовательно, амплитудное значение немодулированной поднесущей будет равно

$$U = 2,7 \cdot 0,3 = 0,81 \text{ В}.$$

Эффективное значение группового сигнала

$$x_3 = U \sqrt{\frac{3n}{4}} = 0,81 \sqrt{\frac{3 \cdot 15}{4}} = 0,81 \cdot 3,36 = 2,72 \text{ В}.$$

Спектральная плотность перекрестной помехи, возникающей в низкочастотной части спектра, определяется из выражения (1.13):

$$P_{\text{0НЧ}} = \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \cdot \frac{x_3^2 P_{\text{ПМ}}}{H \cdot F_{\text{П}}} = \sqrt{\frac{3}{6,28}} \cdot \frac{2,72^2 \cdot 10^{-3}}{3,29 \cdot 3 \cdot 10^4} = 5,2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Предполагая равенство всех амплитуд поднесущих, $m_{i\text{АМ}} = 1$ и $P_{\text{0ВЧ}} \gg P_{\text{0НЧ}}$, определим ошибку:

$$\delta_{\text{АМ}} = \frac{2}{m_{i\text{АМ}} \cdot U} \sqrt{P_{\text{0НЧ}} \cdot F_{\text{ci}}} = \frac{2}{0,81} \sqrt{5,2 \cdot 10^{-8} \cdot 450} = 1,2 \cdot 10^{-2} = 1,2 \text{ \%}.$$

Ошибка, зависящая от F_{ci} , для других каналов будет меньше полученного значения.

Пример 1.2. Требуется найти величину ошибки в системе с АМ поднесущих с параметрами, указанными в примере 1.1, если характеристика группового тракта аппроксимируется полиномом $a_3 = 0,002 \text{ В}^{-2}$.

Решение. По выражению (1.20) находим спектральную плотность шума от перекрестных помех:

$$P_{\text{0НЧ}} = 0,4 \frac{a_3^2 U^6 n^3}{F_{\text{П}}} = \frac{0,4 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot (0,81)^6 \cdot 15^3}{3 \cdot 10^4} = 5,1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Тогда среднеквадратичная ошибка от перекрестных помех

$$\delta_{AM} = \frac{2}{0,81} \sqrt{5,1 \cdot 10^{-8} \cdot 450} = 1,2 \cdot 10^{-2} = 1,2 \text{ \%}.$$

Пример 1.3. Определить амплитуды поднесущих в системе с ЧМ, если величина ошибки постоянна для любого канала при следующих параметрах: $n = 15$; $F_{\Pi} = 30$ кГц; $m_{\text{ЧМ}} = 5$; $U_{\text{Л}} = 4,5$ В; $P_{\text{ПМ}} = 10^{-3}$; $H = 3,29$; $P_{\text{ПМ}} = 0,5$ В; $x_{\text{э}} = 1,34$ В; характеристика группового тракта аппроксимируется линейно-ломаной.

Решение. Пусть поднесущие выбираются из таблицы 1.4 стандартных поднесущих частот. Тогда согласно выражениям (1.15) и (1.17) можно определить

$$U_i = U_1 \sqrt{\frac{F_{ci}}{F_{c1}}} = \frac{nU \sqrt{F_{c1}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{F_{ci}}} \sqrt{\frac{F_{ci}}{F_{c1}}} = \frac{nU \sqrt{F_{ci}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{F_{ci}}}.$$

Результаты расчета амплитуд сведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Результаты расчета амплитуд

Номер канала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
F_{ci}	6	8,4	11	14	20	25	35	45	59	81	110	160	220	330	450
$\sqrt{F_{ci}}$	2,45	2,9	3,32	3,74	4,47	5,0	5,92	6,71	7,68	9,0	10,5	12,6	14,8	18,2	21,2
$U_i, \text{ В}$	0,14	0,17	0,2	0,22	0,26	0,3	0,35	0,4	0,45	0,53	0,62	0,75	0,88	1,07	1,25

Спектральная плотность помехи согласно выражению (1.13) равна

$$P_{\text{0НЧ}} = \sqrt{\frac{3}{6,28}} \cdot \frac{1,37^2 \cdot 10^{-3}}{3,29 \cdot 3 \cdot 10^4} = 1,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}$$

и тогда ошибка

$$\delta_{\text{ЧМ}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{F_{ci}}{U_i F_{\Pi i}} \sqrt{2P_{\text{0НЧ}} \cdot F_{ci}} = 0,045 \text{ \%}.$$

1.2.4 Переходные искажения

Этот вид искажений связан с недостаточной селективностью разделительных полосовых фильтров (ПФ) и разносом частот поднесущих, в результате чего возникают помехи по соседнему каналу.

Рассмотрим простейший случай, когда по трем соседним каналам передаются немодулированные поднесущие:

$$U_{i-1}(t) = U_{i-1} \cos \omega_{i-1} t, \quad U_i(t) = U_i \cos \omega_i t, \quad U_{i+1}(t) = U_{i+1} \cos \omega_{i+1} t,$$

где ω_{i-1} , ω_i , ω_{i+1} совпадают с резонансными частотами соответствующих разделительных фильтров (рисунок 1.6)

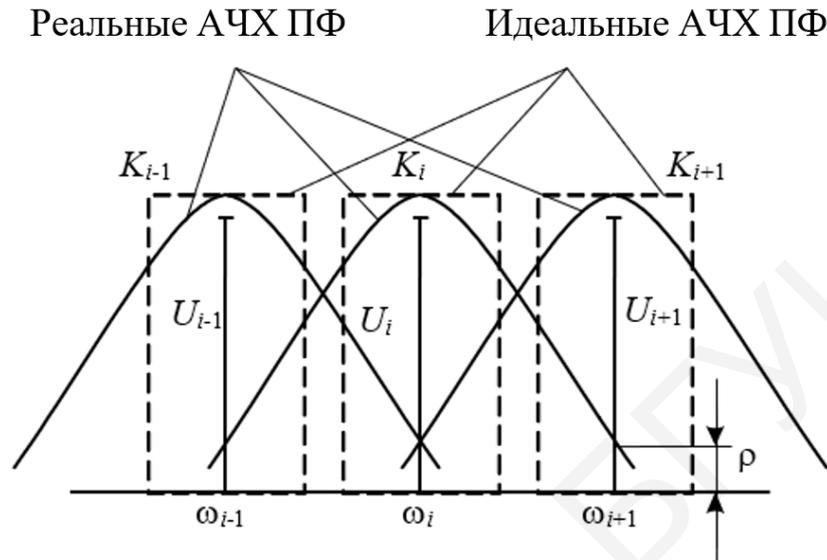


Рисунок 1.6 – АЧХ полосовых фильтров

Для простоты выводов положим, что $U_{i-1} = U_i = U_{i+1} = U$. Как видно из рисунка 1.6, если бы амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) полосовых фильтров была идеальна (показано пунктиром), то влияния канала на канал не было бы. В общем случае соседние каналы влияют друг на друга. Рассмотрим влияние $(i+1)$ -го канала на i -й канал. Обозначим через ρ коэффициент передачи i -го полосового фильтра на частоте ω_{i+1} . Тогда напряжение на выходе i -го полосового фильтра будет

$$U_{\text{вых}i} = U \cos \omega_i t + \rho U \cos \omega_{i+1} t = U_m \cos(\omega_i t + \varphi) = U_m \cos \Psi. \quad (1.27)$$

Следовательно, на сигнал i -го канала будет наложена помеха

$$\varepsilon_n = \rho U \cos \omega_{i+1} t.$$

Взаимодействие сигнала и помехи изображено на рисунке 1.7.

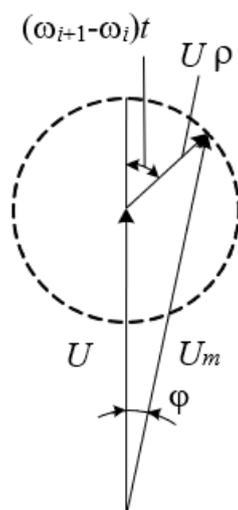


Рисунок 1.7 – Векторная диаграмма

Определим результирующее напряжение U_m из векторной диаграммы:

$$\begin{aligned} U_m^2 &= (U + U\rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t)^2 + (U\rho \sin(\omega_{i+1} - \omega_i)t)^2 = \\ &= U^2 + 2U^2\rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t + U^2\rho^2 \cos^2(\omega_{i+1} - \omega_i)t + \\ &+ U^2\rho^2 \sin^2(\omega_{i+1} - \omega_i)t = U^2(1 + 2\rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t + \rho^2). \end{aligned}$$

Откуда

$$U_m = U\sqrt{1 + 2\rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t + \rho^2}. \quad (1.28)$$

Как видно из векторной диаграммы, будет искажаться и фаза сигнала на выходе i -го полосового фильтра:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U\rho \sin(\omega_{i+1} - \omega_i)t}{U + U\rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t}. \quad (1.29)$$

Учитывая, что $\rho \ll 1$, то

$$\varphi = \rho \sin(\omega_{i+1} - \omega_i)t.$$

Влияние паразитного изменения амплитуды и фазы на полезный сигнал будет зависеть от вида применяемой модуляции, т. е. от того, что является информационным параметром. Определим ошибку от помех по соседнему каналу при амплитудной, частотной и фазовой модуляции.

1.2.4.1 Амплитудная модуляция. Амплитудный детектор выделяет огибающую входного сигнала, определяемого выражением (1.27). Представив амплитуду этого напряжения в виде выражения

$$U_m = U \sqrt{1 + 2\rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t + \rho^2},$$

разложим его по биному Ньютона $\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2 + \dots$ и получим

$$\begin{aligned} U_m &= U \left(1 + \frac{1}{2} 2\rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t + \frac{1}{2} \rho^2 - \frac{1}{8} (2\rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t + \rho^2)^2 + \dots \right) = \\ &= U \left(1 + \rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t + \frac{1}{2} \rho^2 - \frac{1}{2} \rho^2 \cos^2(\omega_{i+1} - \omega_i)t - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \rho^3 \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t - \frac{1}{8} \rho^4 + \dots \right). \end{aligned} \quad (1.30)$$

Учитывая, что $\cos^2(\omega_{i+1} - \omega_i)t = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2(\omega_{i+1} - \omega_i)t$, и учитывая все члены не выше второй степени, получим

$$U_m = U + \frac{1}{4} \rho^2 U + U \rho \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t - \frac{1}{4} \rho^2 U \cos 2(\omega_{i+1} - \omega_i)t.$$

Следовательно, переходная помеха по соседнему каналу искажает постоянную составляющую на величину относительной ошибки

$$\delta_{\sim} = \frac{1}{4m_{AM}} \rho^2, \quad (1.31)$$

и создает переменные составляющие на частотах $(\omega_{i+1} - \omega_i)$ и $2(\omega_{i+1} - \omega_i)$, ошибка от которых составит величину

$$\delta_{\sim} = \frac{\rho}{m_{AM}} |K_{\text{ФНЧ}}(j(\omega_{i+1} - \omega_i))|, \quad (1.32)$$

где $|K_{\text{ФНЧ}}(j(\omega_{i+1} - \omega_i))|$ – коэффициент передачи выходного фильтра нижних частот на разностной частоте $(\omega_{i+1} - \omega_i)$.

Если крутизна спада характеристики ФНЧ достаточно большая и частота среза $\omega_c < (\omega_{i+1} - \omega_i)$, то ошибками на частоте $(\omega_{i+1} - \omega_i)$ и тем более на частоте $2(\omega_{i+1} - \omega_i)$ можно пренебречь. Здесь m_{AM} – коэффициент глубины АМ.

1.2.4.2 Частотная модуляция. Так как напряжение на выходе частотного детектора определяется производной от фазы, то ошибка по соседнему каналу будет равна

$$\varepsilon(t) = \frac{d\varphi}{dt} = \rho(\omega_{i+1} - \omega_i) \cos(\omega_{i+1} - \omega_i)t, \quad (1.33)$$

следовательно, влияние соседнего канала заключается в появлении на выходе i -го канала переменной составляющей на частоте $(\omega_{i+1} - \omega_i)$ с амплитудой, зависящей от разности этих частот. Относительную ошибку от переходных искажений при ЧМ можно определить из выражения

$$\delta = \frac{\rho(\omega_{i+1} - \omega_i) |K_{\text{ФНЧ}}(j(\omega_{i+1} - \omega_i))|}{\omega_{\text{Д}i}}, \quad (1.34)$$

где $\omega_{\text{Д}i}$ – максимальная девиация частоты i -й поднесущей.

1.2.4.3 Фазовая модуляция. При ФМ ошибка будет пропорциональна изменению фазы. Тогда переходная помеха по соседнему каналу будет представлять собой переменную составляющую на разностной частоте $(\omega_{i+1} - \omega_i)$ с амплитудой, равной ρ . Относительная ошибка будет равна

$$\delta = \frac{\rho |K_{\text{ФНЧ}}(j(\omega_{i+1} - \omega_i))|}{\Phi_{\text{Д}i}}, \quad (1.35)$$

где $\Phi_{\text{Д}i}$ – девиация фазы i -й поднесущей.

Если допустить, что по $(i+1)$ -му каналу передается сообщение, то помеху по соседнему i -му каналу будет создавать каждая спектральная составляющая нижней и верхней боковых полос сигнала $(i+1)$ -го канала. При этом анализ существенно усложняется.

Полученные соотношения (1.31), (1.32), (1.34) и (1.35) позволяют рассчитать величину ошибки при известных характеристиках разделительных фильтров либо сформулировать требования к селективности полос пропускания разделительных полосовых фильтров и выходных ФНЧ при заданной ошибке.

Пример 1.4. Определить относительную ошибку в системе с АМ поднесущих при $\rho = 0,1$, $|K_{\text{ФНЧ}}(j(\omega_{i+1} - \omega_i))| = 0,05$ и $m_{\text{АМ}} = 1$.

Решение. Согласно выражению (1.31) ошибка по постоянной составляющей равна

$$\delta_{\text{=}} = \frac{\rho^2}{4} = \frac{10^{-2}}{4} = 0,25 \cdot 10^{-2} = 0,25 \text{ \%}.$$

Ошибка по переменной составляющей при $m = 1$ равна

$$\delta_{\text{~}} = 10^{-1} \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 0,5 \cdot 10^{-2} = 0,5 \text{ \%}.$$

Пример 1.5. Определить относительную ошибку в системе с ЧМ поднесущей при $\rho = 0,1$ и $|K_{\text{ФНЧ}}(j(\omega_{i+1} - \omega_i))| = 0,02$.

Решение. Согласно таблице стандартных поднесущих частот отношение

$$\frac{(\omega_{i+1} - \omega_i)}{\omega_{\text{Д}}} \approx 9.$$

Тогда из выражения (1.34) величина ошибки равна

$$\delta = 0,1 \cdot 9 \cdot 0,02 = 1,8 \cdot 10^{-2} = 1,8 \text{ \%}.$$

1.2.5 Выбор поднесущих и несущих частот

При выборе несущих частот необходимо учитывать вид модуляции на первой и второй ступенях. Если применяется радиоканал, то несущая частота определяется типом радиостанции, а в случае применения проводных каналов связи может быть рассчитана по следующей приближенной формуле:

$$F_{\text{Н}} = (20 \dots 30) \Delta F, \quad (1.36)$$

где ΔF – полоса частот, занимаемая соответствующим сигналом.

При выборе поднесущей частоты необходимо учитывать нестабильность настройки фильтров и допустимый уровень переходных помех. С учетом данных замечаний частоты поднесущих при АМ можно выбрать из выражения

$$F_{\text{П}i} = (10 \dots 20) F_{\text{сmax}} + (i - 1)(2, 2 \dots 2, 3) F_{\text{сmax}}, \quad (1.37)$$

где $F_{\text{сmax}}$ – максимальная частота спектра передаваемого сообщения;

i – номер канала;

$(2, 2 \dots 2, 3)$ – коэффициент, учитывающий запас по частоте между каналами.

При ЧМ разнос поднесущих частот ΔF_{max} выбирается с учетом индекса модуляции $m_{\text{ЧМ}}$, граничной частоты спектра первичного сигнала и нестабильности настройки канальных фильтров. При проектировании систем заданными являются: индекс модуляции $m_{\text{ЧМ}}$ и максимальная частота спектра передаваемого сообщения $F_{\text{сmax}}$. Тогда определим девиацию частоты из выражения

$$F_{\text{Д}} = m_{\text{ЧМ}} F_{\text{сmax}}. \quad (1.38)$$

Тогда частота первой поднесущей

$$F_{\text{П1}} = F_{\text{Д}} / 0,075, \quad (1.39)$$

где 0,075 – коэффициент, учитывающий линейность характеристики частотного модулятора.

Если разнос частот для всех каналов одинаков, то поднесущие частоты могут быть определены из выражения

$$F_{\Pi i} = (F_{\text{д}}/0,075) + (2,2\dots2,3)(i-1)m_{\text{чМ}}F_{\text{сmax}} \quad (1.40)$$

либо по коэффициентам кратности или таблице стандартных значений поднесущих (см. таблицы 1.3 и 1.4), а после определения частоты первой поднесущей – по выражению (1.39).

1.3 Телеметрическая система с временным разделением каналов

В телеметрических системах с временным разделением каналов (ВРК) каждому каналу ik для передачи информации представляется поочередно со строгой периодичностью относительно короткий временной интервал Δt_i в периоде опроса каналов T (рисунок 1.8).

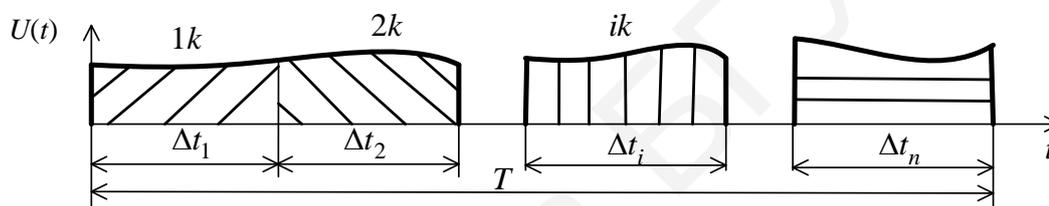


Рисунок 1.8 – Пример распределения времени передачи по информационным каналам

В результате передача сигналов по каждому из каналов осуществляется прерывисто в виде импульсов, модулированных передаваемым сообщением по амплитуде, длительности или временному положению (фазе).

Периодически следующие один за другим модулированные телеметрическим сообщением начальные импульсы называются **измерительными импульсами**.

Таким образом, если при частотном разделении каналов каждому каналу отводилась часть общей полосы пропускания линии связи в течение всего времени ее работы, то при временном разделении каналов каждому каналу предоставляется вся полоса пропускания, но на некоторую часть общего времени цикла передачи (время, отводимое на разовую передачу сигналов всех каналов).

На приемной стороне импульсные серии, соответствующие различным каналам, разделяются по отдельным цепям. Разделение основано на том, что заранее известны промежутки времени (в цикле передачи), в течение которых могут появляться импульсы отдельных каналов. Для определения этих промежутков времени передающим устройством излучаются специальные синхронизирующие импульсы, обозначающие начало каждого цикла опроса всех датчиков. Синхронизирующие импульсы (отличаются от канальных импульсов по амплитуде, длительности или полярности) определяют темп передачи и называются **кадровыми импульсами**.

Из модулированных импульсов, получаемых в каждой отдельной канальной цепи, после демодуляции выделяются напряжения, характеризующие телеметрируемые величины. Эти напряжения записываются с помощью регистрирующих устройств.

Структурные схемы КП и ПУ, иллюстрирующие описанный принцип построения многоканальных телеметрических систем с ВРК, представлены на рисунках 1.9 и 1.10, а временные диаграммы работы КП и ПУ – на рисунках 1.11 и 1.12 соответственно. Назначение датчиков, преобразователей и ФНЧ приведено в подразделе 1.2.

Телеметрируемая величина, преобразованная в электрический и единый (по виду) для всех каналов сигнал, с выхода ФНЧ поступает на один из входов канального модулятора, на второй вход поступает импульсная поднесущая, формируемая распределителем импульсов, где осуществляется амплитудно-импульсная модуляция (АИМ), широтно-импульсная модуляция (ШИМ) или фазоимпульсная модуляция (ФИМ). С выходов всех канальных модуляторов сигналы объединяются сумматором в групповой видеосигнал, который подается на вход передатчика для модуляции его высокочастотными колебаниями.

По одному из каналов системы передается калибровочное напряжение, подводимое от датчика калибровочных напряжений с целью уменьшения систематических ошибок. Формирователь синхросигнала формирует синхроимпульсы, отличающиеся от измерительных (канальных) каким-либо параметром (амплитуда, длительность, полярность). Синхронизирующие импульсы необходимо подавать на приемную сторону телеметрической системы для того, чтобы распределители приемной и передающей сторон системы работали синхронно и синфазно.

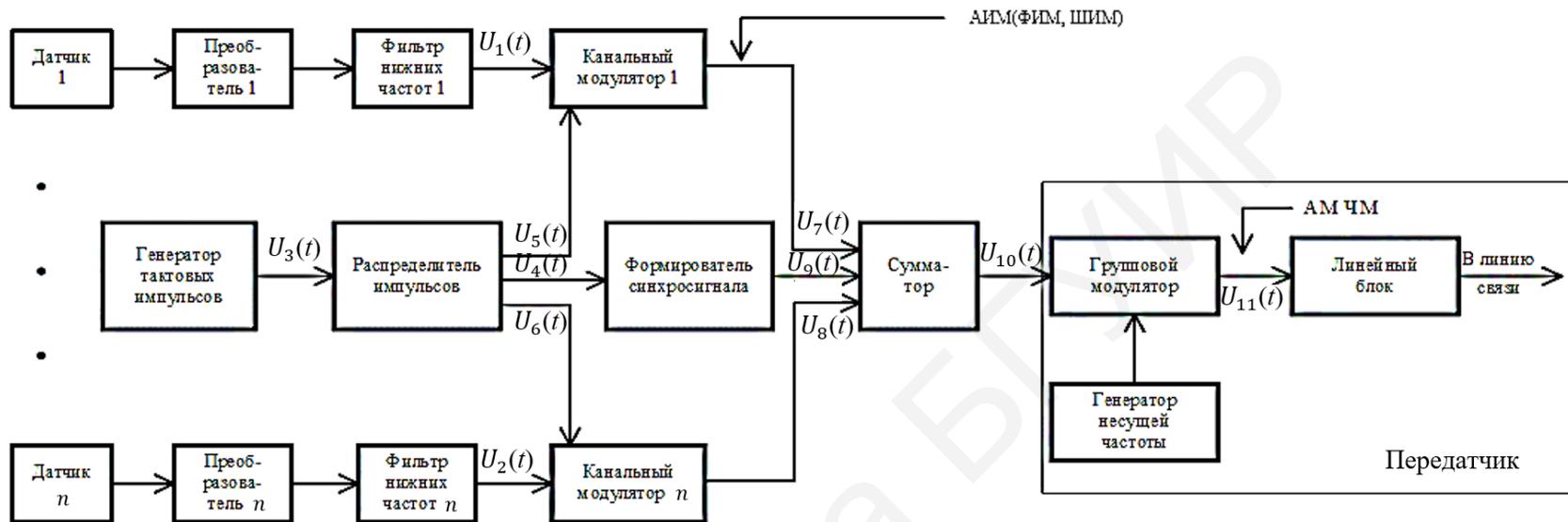


Рисунок 1.9 – Структурная схема КП телеметрической системы с ВРК

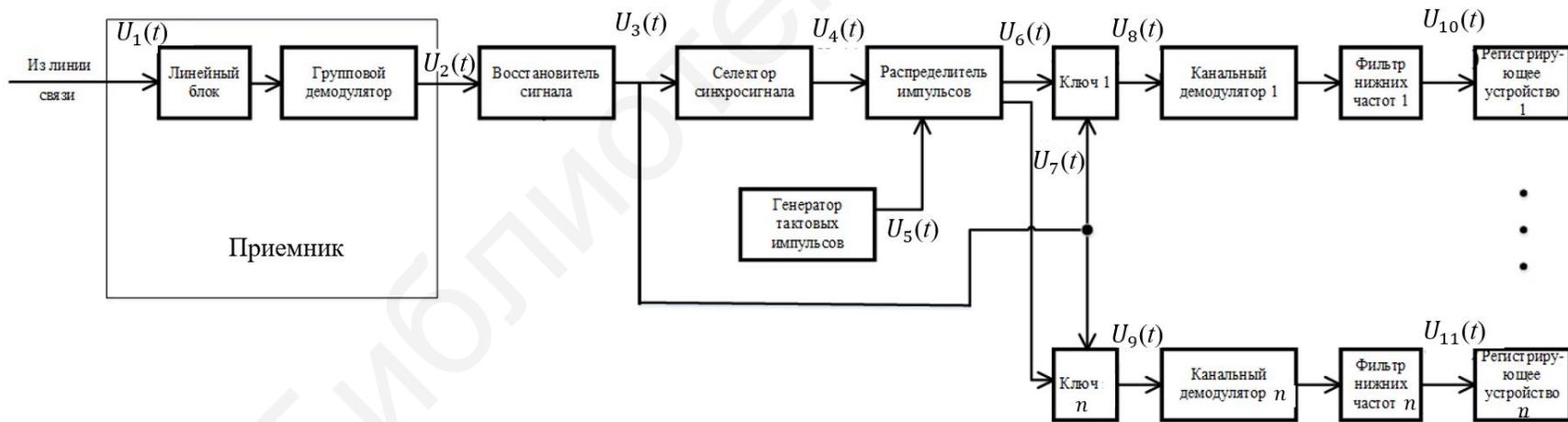


Рисунок 1.10 – Структурная схема ПУ телеметрической системы с ВРК

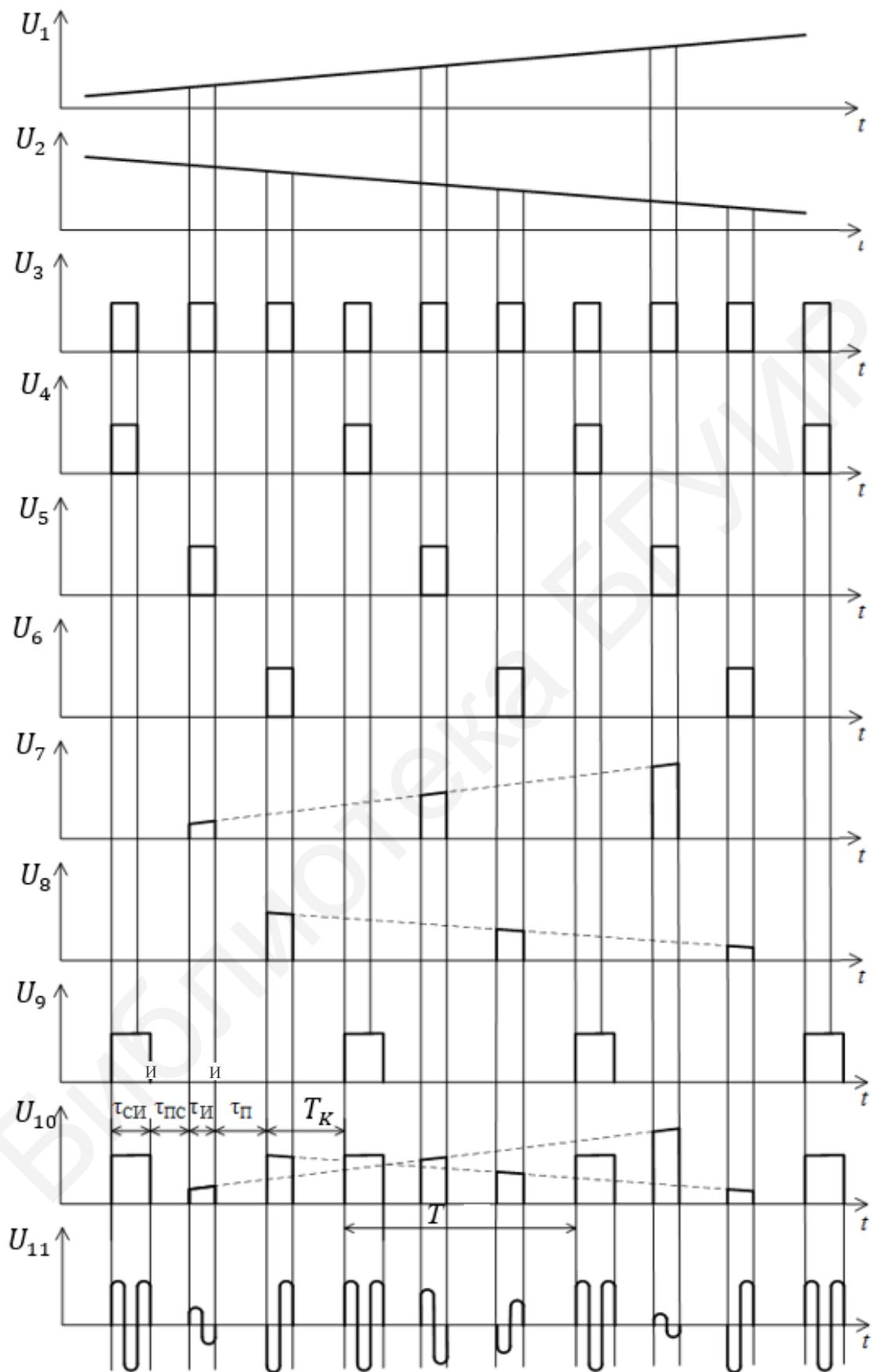


Рисунок 1.11 – Временные диаграммы работы КП

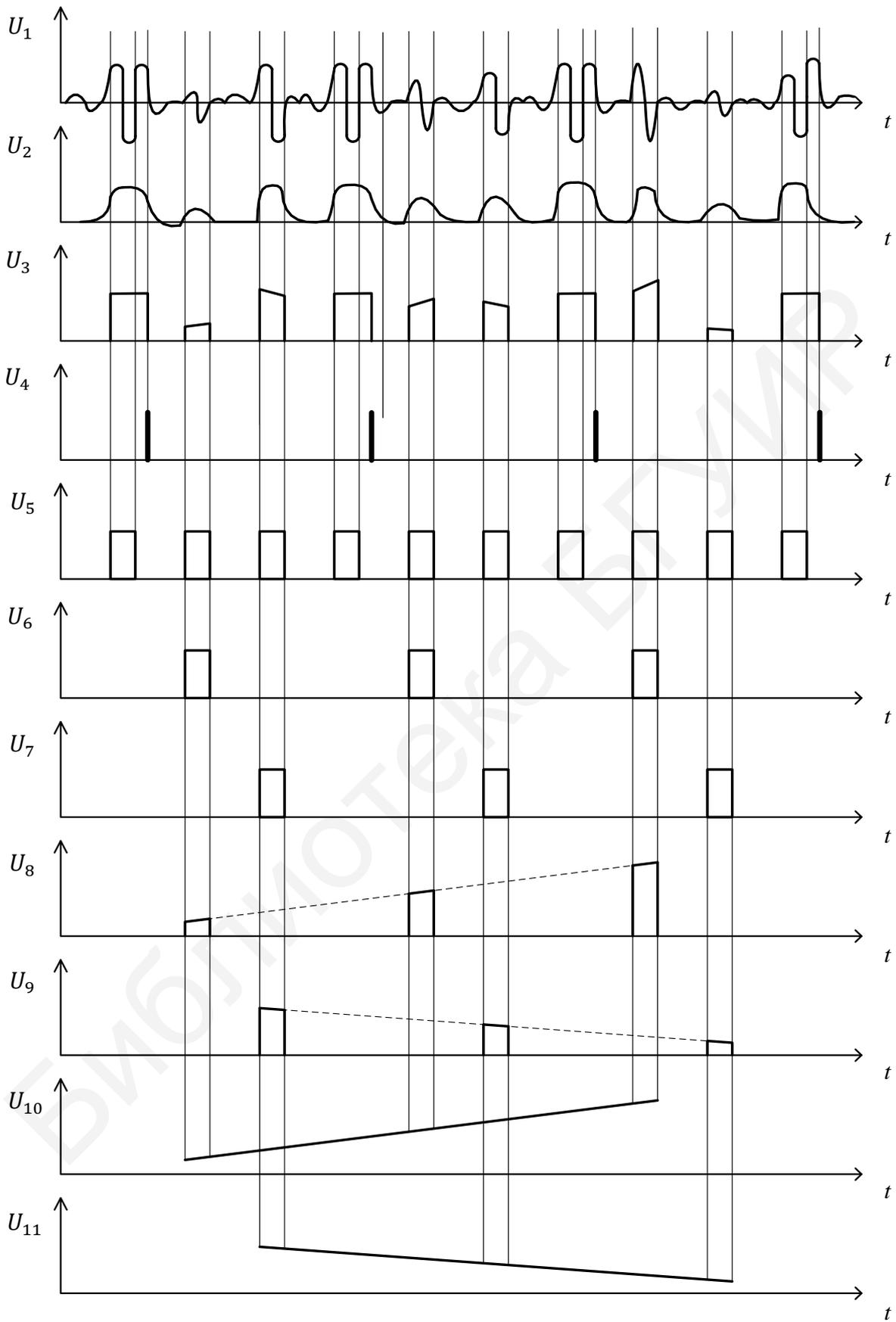


Рисунок 1.12 – Временные диаграммы работы ПУ

На ПУ сигналы с выхода приемника поступают в восстановитель сигнала, где выделяется средняя часть видеосигнала, которая менее поражена помехами в канале связи. Восстановленный сигнал поступает на вход селектора синхросигнала и на вход всех канальных ключей. В селекторе синхросигнала происходит выделение синхронизирующих импульсов, из которых затем формируется сигнал для синхронизации приемного распределителя импульсов. Распределитель формирует n разнесенных по времени последовательностей импульсов, которые поступают на вторые входы канальных ключей и распределяют измерительные импульсы по соответствующим информационным каналам. Сигналы каждого из каналов демодулируются в канальных демодуляторах, а затем через ФНЧ, который служит для увеличения отношения сигнал/шум, поступают в индивидуальные или многоканальные регистрирующие устройства.

Различают два вида регистрации: непрерывная и дискретная. При непрерывной регистрации сигнал на регистрирующее устройство поступает с выхода ФНЧ, а при дискретной – с выхода канального демодулятора.

В зависимости от видов первичной и вторичной модуляции различают следующие основные типы телеметрических систем с временным разделением каналов: АИМ-АМ, АИМ-ЧМ, ШИМ-АМ, ШИМ-ЧМ, ФИМ-АМ, ФИМ-ЧМ.

В заключение следует отметить, что основным недостатком систем с ВРК является необходимость синхронизации передатчика и приемника.

1.3.1 Калибровка как способ уменьшения ошибок

Как указывалось выше, величину систематических ошибок можно значительно уменьшить калибровкой системы. Калибровка – операция определения зависимостей выходных напряжений телеметрических систем от входных путем измерения (с помощью самой системы) эталонных (калиброванных) уровней напряжений. Калибровке подвергаются все элементы системы, за исключением датчиков. Калибровка последних трудноосуществима и обычно производится до установки по месту назначения (в радиотелеметрических системах до постановки датчиков на борт либо на стартовой позиции).

Поскольку систематическая ошибка может медленно изменяться, калибровку необходимо производить периодически. Частота калибровки определяется скоростью изменения систематической ошибки, т. е. ее спектром. Интервал между посылками калиброванных сигналов должен быть таким, чтобы за это время систематическая компонента ошибки значительно не менялась. В противном случае будет невозможно определить величину ошибки интервала и соответственно нельзя устранить ее. Для успешного устранения медленно изменяющейся ошибки частота посылки калибровочных сигналов должна быть согласована (по теореме Котельникова) со скоростью ее изменения.

Калибровка производится следующим образом. Пусть в момент времени t_1 объекта передается калибровочный сигнал $U_k(t_1)$, известный с высокой точностью.

Вследствие различных причин на приемной стороне этот сигнал будет получен как

$$U_k^*(t_1) = U_k(t_1) + \delta U_k(t_1),$$

где $\delta U_k(t_1)$ – величина погрешности.

Полагая $U_k(t_1)$ и $U_k^*(t_1)$ известными, величину погрешности можно определить из уравнения

$$\delta U_k(t_1) = U_k^*(t_1) - U_k(t_1).$$

Если в момент времени t_2 передается полезное сообщение $U_c(t_2)$, то на выходе приемника оно будет равно

$$U_c^*(t_2) = U_c(t_2) - \delta U(t_2),$$

где $\delta U(t_2)$ – ошибка, возникающая в системе ТИ в момент времени t_2 .

Положим, что за время $t_2 - t_1$ ошибка δU не изменилась, т. е. $\delta U(t_1) = \delta U(t_2)$. Тогда величина истинного значения сообщения находится из выражения

$$U_c(t_2) = U_c^*(t_2) - \delta U(t_1). \quad (1.41)$$

Таким образом, калибровка позволит в принципе устранить упомянутую погрешность информации, если с момента передачи калибровочного сигнала до момента передачи полезного сообщения погрешность не изменила своей величины. С помощью калибровки, проводимой с малой частотой, нельзя избавиться от быстро изменяющейся компоненты погрешности. В этом случае мы приходим к неустраняемому виду ошибок – случайным ошибкам.

1.3.2 Временные характеристики

Как следует из временной диаграммы (см. рисунок 1.11), период опроса датчиков равен

$$T = \tau_{СИ} + \tau_{ПСИ} + (\tau_{И} + \tau_{П})n, \quad (1.42)$$

где $\tau_{СИ}$ – длительность синхроимпульса (СИ);

$\tau_{ПСИ}$ – длительность паузы между СИ и информационным импульсом;

$\tau_{И}$ – длительность информационного импульса;

n – число информационных каналов.

Период опроса датчиков в реальных системах определяется из выражения

$$T = \frac{1}{\mu F_{\max}}, \quad (1.43)$$

где μ – коэффициент, зависящий от вида модуляции и способа регистрации сообщений (по теореме Котельникова $\mu = 2$);

F_{\max} – максимальная частота спектра передаваемого сообщения.

В системах с непрерывной регистрацией на выходе каждого канала устанавливается ФНЧ с полосой пропускания, равной ширине спектра сообщения F_{\max} . С его помощью можно восстановить непрерывное сообщение из АИМ сигнала без существенных искажений при $\mu = 2,5 \dots 3$.

Особенностью низкочастотной области спектра импульсов ШИМ является то, что кроме составляющей F_1 (тактовая частота) и F_c (частота сообщения) она имеет составляющие $(F_1 - F_c)$, $(F_1 - 2F_c)$, $(F_1 - 3F_c)$ и т. д. (см. рисунок 3.10 [3]). Составляющие $(F_1 - 3F_c)$ и более высокого порядка имеют незначительную амплитуду и оказывают малое влияние на погрешность измерений. Составляющую $(F_1 - 2F_c)$ необходимо учитывать. Чтобы исключить влияние этой составляющей, тактовая частота должна выбираться из условия $F_1 \geq 3,5 F_{\max}$.

Спектр импульсов, модулированных способом ФИМ, имеет составляющую F_c с очень малой амплитудой, а состав боковых полос при гармониках, кратных F_1 , намного сложнее, чем в спектре импульсов ШИМ (см. выражение (3.15) [1]). Кроме того, амплитуда составляющей F_c зависит от частоты сообщения. Поэтому импульсы, модулированные по времени, прежде чем пропустить через ФНЧ, необходимо преобразовать в импульсы АИМ или ШИМ (см. рисунок 5.58 [1]).

Если длительность импульсов, модулированных по амплитуде, мала, они предварительно подвергаются расширению, при этом амплитуда восстановленного непрерывного сигнала на выходе ФНЧ увеличивается во столько раз, во сколько раз произошло растяжение длительности импульсов (см. рисунок 5.51 [1]).

В телеметрических системах при дискретной регистрации, исследуемая непрерывная функция записывается в виде дискретных значений. Частота дискретизации должна выбираться так, чтобы достаточно точно восстановить исходную функцию. Точность интерполяции зависит не только от частоты дискретизации сообщения, но и от метода интерполяции. Основные виды интерполяции: линейная, круговая и параболическая. В общем случае тактовую частоту для систем с дискретной регистрацией будем принимать $F_1 = (5 \dots 10) F_{\max}$.

Для расчета временных характеристик можно рекомендовать следующие соотношения:

1 Для систем с АИМ (см. рисунок 1.11):

$$\tau_{СИ} = (2 \dots 4) \tau_{И}, \tau_{ПСИ} = (1 \dots 2) \tau_{П}, \tau_{И} = \tau_{П}, \tau_{П} + \tau_{И} = T_K, \quad (1.44)$$

где T_K – интервал времени, отведенный для передачи информации по одному из каналов.

2 Для систем с ШИМ (рисунок 1.13):

$$\begin{aligned} \tau_{П} + \tau_{И} = T_K, \tau_{\max} = \tau_{И} + \Delta\tau = \tau_{И} + m_{ШИМ} \tau_{И} = \\ = \tau_{И} (1 + m_{ШИМ}), \tau_{ПСИ} = (1 \dots 2) \tau_{П} + \Delta\tau, T_K = \tau_{\max} + \tau_{П}, \end{aligned} \quad (1.45)$$

где $m_{ШИМ}$ – индекс ШИМ;

$\tau_{И}$ – длительность немодулированного импульса;

$\Delta\tau$ – девиация длительности импульса.

3 Для систем с ФИМ (рисунок 1.14):

$$\begin{aligned} \tau_{СИ} &= (2...4)\tau_{И}, T_K = \Delta\tau + \tau_{И} + \tau_{П}, \Delta\tau = m_{ФИМ}T_K, \tau_{ПСИ} = (0,4...0,8)T_K, \\ \tau_{И} &= (0,2...0,3)T_K, \tau_{П} = (0,2...0,3)T_K, \end{aligned} \quad (1.46)$$

где $m_{ФИМ}$ – индекс ФИМ;

$\tau_{И}$ – длительность информационного импульса;

$\tau_{П}$ – длительность защитного промежутка между измерительным импульсом и началом последующего канального интервала (см. рисунок 1.14).

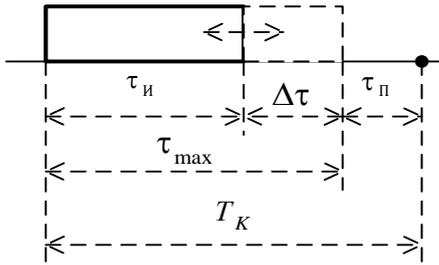


Рисунок 1.13 – Разметка канального интервала при ШИМ

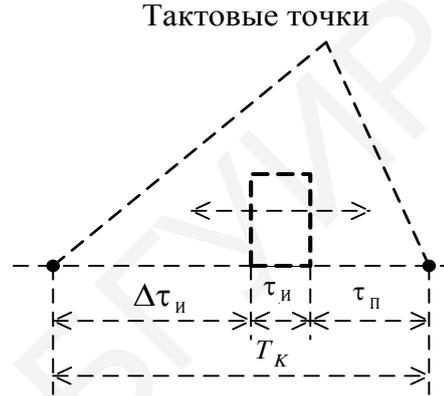


Рисунок 1.14 – Разметка канального интервала при ФИМ

Зная T_K , можно определить частоту генератора тактовых импульсов из выражения

$$F_{ГТИ} = 1/T_K. \quad (1.47)$$

1.3.3 Искажения

В системах ТИ с ВРК возможны междуканальные помехи. Обычно причиной их является недостаточно широкая полоса пропускания группового тракта. Различают два рода таких помех:

- помехи первого рода, появляющиеся вследствие линейных искажений спектра сигнала в области низких частот;
- помехи второго рода, появляющиеся вследствие линейных искажений спектра сигнала в области высоких частот.

Помехи (искажения) первого рода могут возникать в тех случаях, когда частотная характеристика группового тракта имеет завал на низких частотах (на рисунке 1.15 это завал на частоте Ω_1), а именно: в области спектра модулирующих сигналов. Вследствие нелинейности амплитудной и фазовой характеристики амплитуда составляющей на частоте Ω_1 уменьшается в $|K(j\Omega_1)|K_0$ раз, а ее фаза сдвигается на угол $\varphi(\Omega_1)$ (рисунок 1.16). На векторной диаграмме $|K(j\Omega)|U_{\Omega_1}$ – амплитуда составляющей на выходе реального усилителя, $U_{\Omega_1}K_0$ – амплитуда на выходе идеального усилителя.

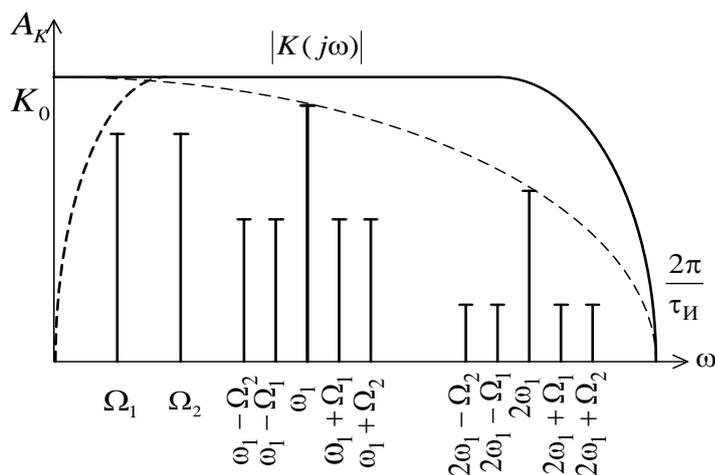


Рисунок 1.15 – АЧХ группового тракта

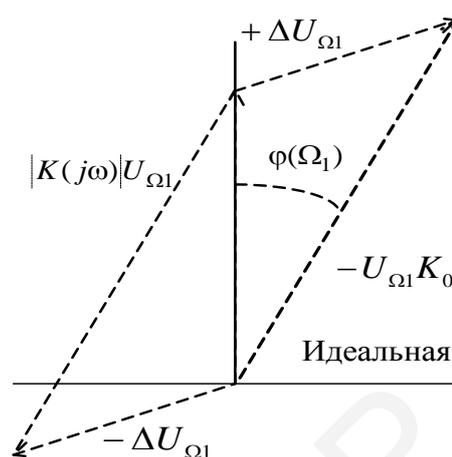


Рисунок 1.16 – Векторная диаграмма искажений первого рода

Тогда ошибка от искажений первого рода для АИМ при регистрации ФНЧ может быть определена из выражения

$$\delta = \frac{\tau_{\text{И}}}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^n [1 + m_i^2 - 2m_i \cos \varphi(\Omega_i)]}, \quad (1.48)$$

где $\tau_{\text{И}}$ – длительность информационного импульса;
 T – период опроса;

m_i – относительный коэффициент передачи на частоте Ω_i ($m_i = \frac{|K(j\Omega_i)|}{K_0}$).

Для случая ШИМ и ФИМ, если считать все каналы независимыми, результирующую ошибку можно определить как

$$\delta = \frac{\sqrt{n(1 + m_i^2 - 2m_i \cos \varphi(\Omega_i))}}{TF_{\text{В}}}, \quad (1.49)$$

где $F_{\text{В}}$ – полоса частот группового видеотракта;
 n – число информационных сигналов.

Для уменьшения ошибки, вызванной этого рода искажениями, необходимо тщательно корректировать частотную характеристику группового тракта.

Пример 1.6. Определить ошибку от искажений первого рода в системе ШИМ со следующими параметрами: $n = 50$, $F_c = 10$ Гц, относительный коэффициент передачи на частоте $F_c = 10$ Гц, $m = |K(j\Omega) / K_0| = 0,9$, $\varphi(\Omega) = 10^\circ$, $F_{\text{В}} = 10^3$ Гц.

Решение. Согласно выражению (1.49)

$$\delta = \frac{\sqrt{50(1+0,9)^2 - 2 \cdot 0,9 \cdot 0,98}}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3} = 2,8 \text{ \%}.$$

Искажения второго рода возникают вследствие недостаточно хорошего пропускания в групповом тракте высокочастотных составляющих спектра импульсов $2\omega_1$ (см. рисунок 1.15). Внешне они проявляются в растягивании импульсов и в наложении импульсов одного канала на импульсы последующих каналов (рисунок 1.17).

Как видно из рисунка 1.17, при влиянии $(i-1)$ -го канала на i -й канал искажается амплитуда импульсов на величину ΔU , длительность импульсов – на величину $\Delta\tau_{\text{ШИМ}}^*$ и временной интервал относительно тактовых точек – на величину $\Delta\tau_{\text{ФИМ}} - \Delta\tau_{\text{ФИМ}}^*$.

При демодуляции сигнала АИМ с помощью ФНЧ переходные искажения следует оценивать относительно приращения площади импульса i -го канала:

$$\delta_{\text{АИМ}} = \frac{\Delta S_i}{S_i}, \quad (1.50)$$

где S_i – площадь импульса i -го канала;

ΔS_i – приращение площади.

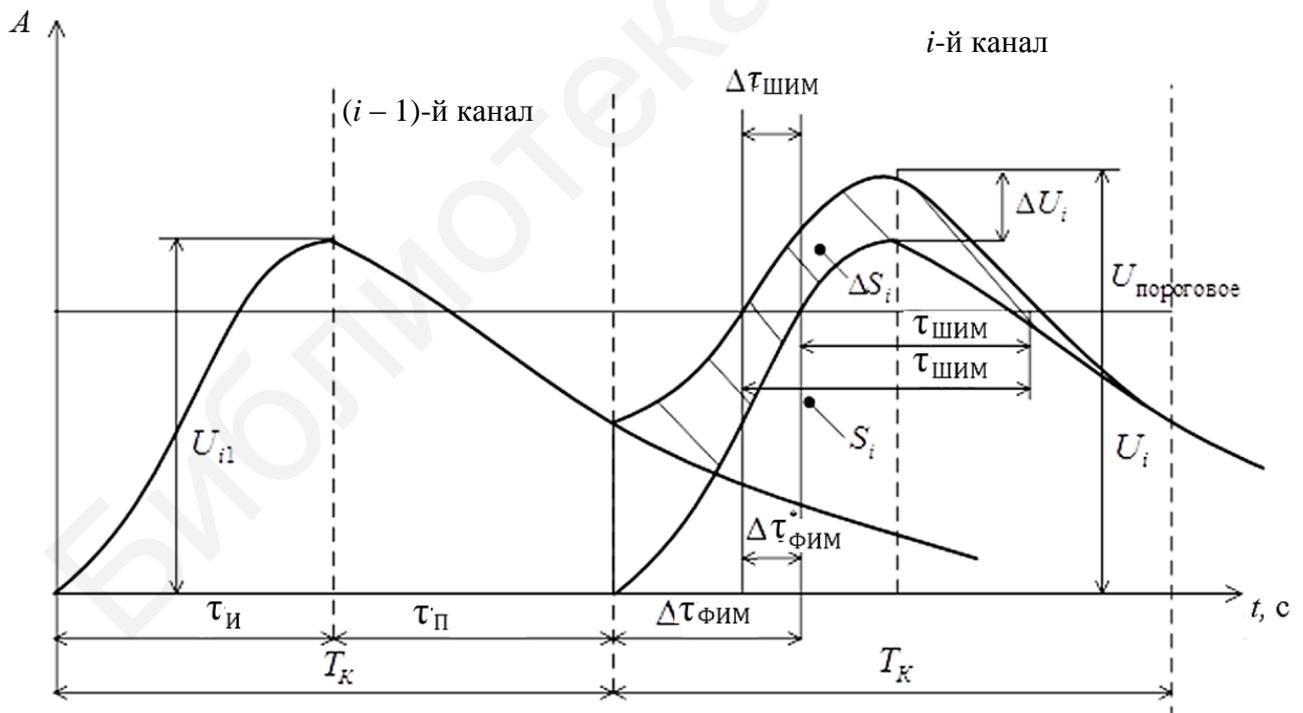


Рисунок 1.17 – Искажения второго рода

Подставляя в выражение (1.50) конкретные значения S_i и ΔS_i , получим

$$\delta_{\text{АИМ}} = \frac{U_{i-1}}{U_i} \cdot \frac{e^{-\frac{\pi F_B}{2\lambda n F_{\max}}}}{\frac{\pi F_B}{2\lambda n F_{\max}} - 1}, \quad (1.51)$$

где U_{i-1} – амплитуда $(i - 1)$ -го импульса;

U_i – амплитуда i -го импульса;

F_B – полоса пропускания тракта на уровне 0,707;

λ – коэффициент, показывающий, во сколько раз частота дискретизации в реальной системе превышает частоту по Котельникову.

Переходные искажения в системе ШИМ (ФИМ) возникают из-за паразитного сдвига фронтов импульса и не зависят от изменения амплитуды, т. е.

$$\delta_{\text{ШИМ(ФИМ)}} = \frac{\Delta\tau^*}{\Delta\tau},$$

где $\Delta\tau^*$ – сдвиг переднего фронта импульса за счет влияния предыдущего канала;
 $\Delta\tau$ – девиация импульса при ФИМ или его фронта при ШИМ.

При аппроксимации амплитудно-частотной характеристики группового тракта аperiодическим звеном выражение для ошибки будет иметь вид

$$\delta_{\text{ШИМ(ФИМ)}} = \frac{1}{2\pi F_B \Delta\tau} e^{-2\pi F_B \tau_i}. \quad (1.52)$$

Как следует из формул (1.51) и (1.52), уменьшить ошибку из-за влияния предыдущего канала можно путем увеличения полосы пропускания группового тракта F_B .

Пример 1.7. Построить зависимость ошибки от полосы пропускания видеотракта, определить полосу, при которой $\delta_{\text{АИМ}} \leq 0,5\%$ в системе с АИМ при следующих параметрах: $n = 50$; $F_{\max} = 10$ Гц; $\lambda = 3$; регистрация непрерывная с помощью ФНЧ.

Решение. Расчет произведем по выражению (1.51) для наихудшего случая, когда $U_{i-1} > U_i$, но при этом примем, что $U_{i-1}/U_i = (1 + m)/(1 - m)$, где m – коэффициент глубины АИМ. Результаты расчета приведем в таблице 1.7, графические зависимости – на рисунке 1.18.

Непосредственно с графика находим, что при $\delta \leq 0,5\%$ полоса видеотракта $F_B \geq 4,8$ кГц для $m = 0,5$ и $F_B \geq 5,4$ кГц для $m = 0,75$.

Таблица 1.7 – Результаты расчета ошибок в системе с АИМ

Ошибка	Полоса пропускания F_B , кГц							
	4,18	4,4	4,57	4,77	5,1	5,53	5,9	6,2
δ , %, при $m = 0,5$	1,08	0,83	0,65	0,5	0,31	0,19	0,12	–
δ , %, при $m = 0,75$	–	1,94	1,5	1,18	0,72	0,44	0,27	0,19

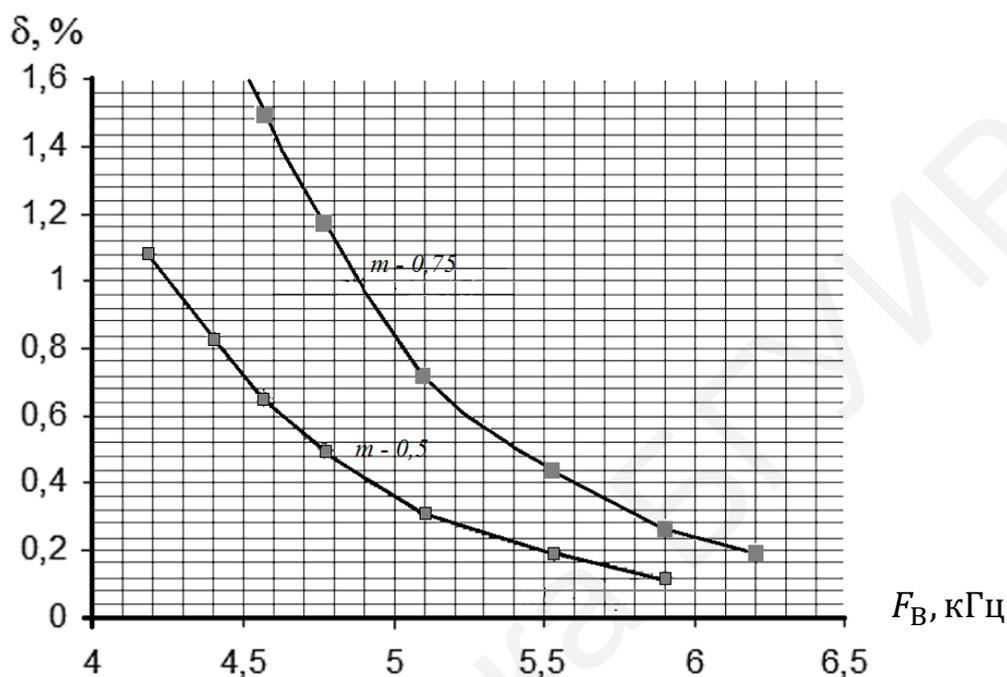


Рисунок 1.18 – Зависимость ошибки в системе с АИМ от полосы пропускания видеотракта

1.3.4 Погрешности при восстановлении сообщений

Если функция $f(t)$ не содержит частот выше F_{\max} , то она полностью определяется своими мгновенными значениями в моменты времени, отстоящие друг от друга на $0,5 / F_{\max}$, т. е. функцию с ограниченным спектром можно записать в виде тригонометрического ряда (выражение (1.30) [1])

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F_{\max}(t - k\Delta t)}{2\pi F_{\max}(t - k\Delta t)}. \quad (1.53)$$

Из данного ряда следует, что процесс синтезирования функции $f(t)$ сводится к суммированию откликов на бесконечную последовательность дискретных отсчетов $f(k\Delta t)$. На практике количество отсчетов ограничено, а следовательно, имеет место погрешность восстановления.

Как известно, реальные сообщения имеют конечную продолжительность по времени, а следовательно, бесконечный спектр. Однако такие сообщения относятся к классу функций, у которых практически вся энергия сосредоточена в

конечных интервалах времени и полосы частот. При таком допущении, если имеется сигнал длительностью T_c с полосой частот, ограниченной F_{\max} , в соответствии с теоремой Котельникова число отсчетов, которое необходимо для полного представления сигнала, равно

$$N = T_c / T = 2F_{\max} T_c.$$

Тогда сообщение можно заменить рядом с конечным числом членов:

$$f(t) = \sum_{k=-N/2}^{N/2} f(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F_{\max}(t - k\Delta t)}{2\pi F_{\max}(t - k\Delta t)}.$$

Действительная функция времени $f(t)$ и функция $f^*(t)$, полученная суммированием конечного числа членов ряда, точно совпадают только в точках отсчета. В интервалах между точками отсчета появляется погрешность, имеющая наибольшее значение на краях интервала T_c , а наименьшее – в ее середине.

На рисунке 1.19 приведены функции передаваемого сигнала $f(t)$ (пунктирная линия), восстановленного – $f^*(t)$ (сплошная линия) и относительная ошибка восстановления γ . Ошибка уменьшается по мере роста числа отсчетов.

Погрешность восстановления сообщения может быть оценена среднеквадратичной ошибкой

$$\rho_{\text{ТКВ}} = 2\delta_F^2,$$

т. е. дисперсия ошибки восстановления сообщения с неограниченным спектром рядом Котельникова равна удвоенной энергии спектральных составляющих, которые не пропускаются интерполятором из-за конечности его полосы.

Демодуляционные искажения. Недостаточная селективность реального фильтра нижних частот при непрерывной регистрации приводит к прохождению на выход канала высокочастотных составляющих спектра сигнала (рисунок 1.20).

Такие искажения возникают независимо от числа каналов и вида импульсной модуляции и называются демодуляционными.

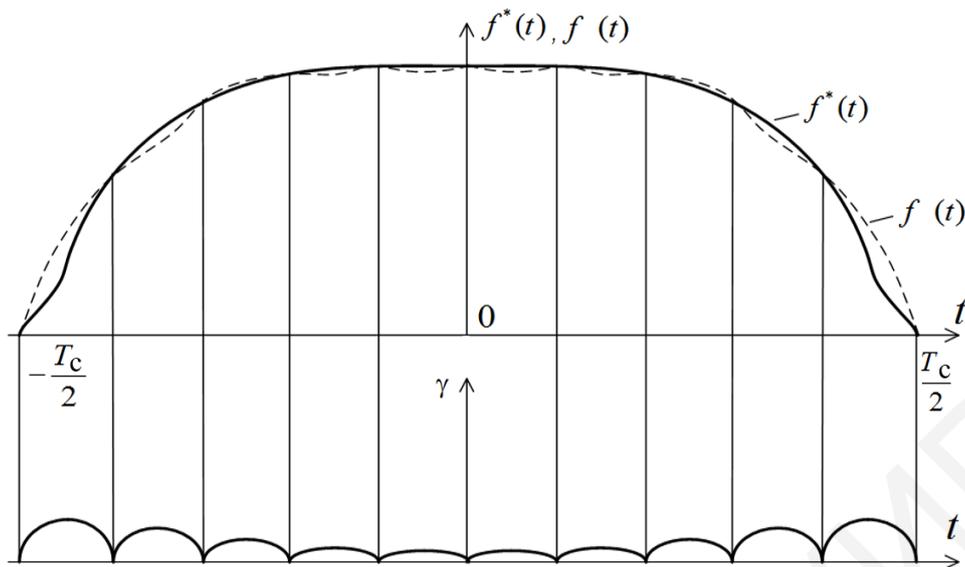


Рисунок 1.19 – Восстановление непрерывной функции при ограничении времени сообщения

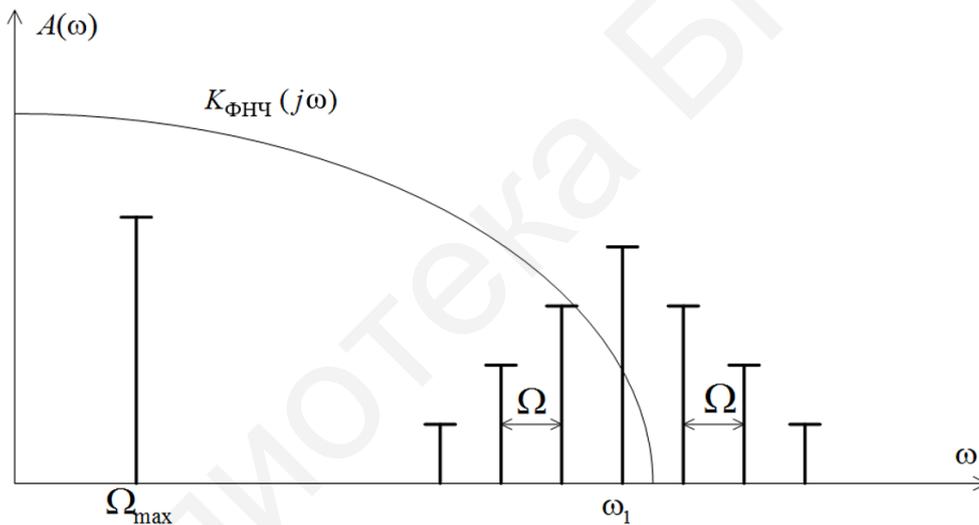


Рисунок 1.20 – Пояснение демодуляционных искажений

Если принять, что ФНЧ представляет собой линейный четырехполосник с амплитудно-частотной характеристикой $K_{\text{ФНЧ}}(j\omega)$, то относительная среднеквадратичная ошибка воспроизведения полезного сигнала будет определяться выражением, где суммирование в числителе проводится по всем учитываемым компонентам спектра помех:

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} |k_{\text{ФНЧ}}(j\Omega_{\text{max}}, jn\omega_1)|^2 C^2(n\omega_1, \Omega_{\text{max}}, t)}{k_{\text{ФНЧ}}(j\Omega_{\text{max}}, jn\omega_1)^2 B^2(\Omega_{\text{max}}, t)}}$$

где $C(n\omega_1, \Omega_{\max}, t)$ – амплитуды спектральных составляющих на частотах $n\omega_1 \pm k\Omega_{\max}$;

$B(\Omega_{\max}, t)$ – амплитуда полезной составляющей.

Апертурные искажения. Полезная составляющая спектра на входе демодулирующего ФНЧ при АИМ-1 равна

$$B_{\text{АИМ-1}}(\Omega, t) = U_0 \frac{\tau_{\text{И}}}{T} m \sin(\Omega t + \varphi).$$

Для многоканальных систем величина полезного сигнала зависит от числа каналов и достаточно мала, так как $\tau_{\text{И}} \ll T$, а $m \leq 1$. Для увеличения амплитуды полезной составляющей при демодуляции АИМ-1 производят расширение информационных импульсов в q раз, т. е. преобразуют в АИМ-2 [1], тогда

$$B_{\text{АИМ-2}}(\Omega, t) = \frac{U_0 q \tau_{\text{И}}}{T} m \frac{\sin \frac{\Omega q \tau_{\text{И}}}{2}}{\frac{\Omega q \tau_{\text{И}}}{2}} \sin(\Omega t + \varphi),$$

где $q\tau$ – длительность расширенных импульсов, $q\tau = \tau_{\text{р}}$.

Нетрудно заметить, что при расширении импульсов амплитуда полезного сигнала увеличивается в q раз и появляется зависимость амплитуды от частоты модуляции.

1.3.5 Некоторые специфические вопросы построения систем ТИ с ВРК

В ряде случаев возникает необходимость передачи сообщений о медленно- и быстропротекающих процессах. Для повышения эффективности использования систем ТИ с ВРК необходимо обеспечить возможность получения различной тактовой частоты опроса по различным каналам. Изменение тактовой частоты опроса в СТИ с постоянным числом каналов может осуществляться при помощи запараллеливания каналов или вторичной подкоммутации.

В настоящее время разработаны коммутаторы, которые позволяют изменять число каналов и тактовую частоту опроса по различным каналам перед работой и в процессе работы в зависимости от требуемой программы.

Кроме того, с целью сужения полосы частот, занимаемой системой, передачу канальных импульсов осуществляют без разделительных пауз (рисунок 1.21). Нулевой канал используется для посылки синхронизирующего импульса (СИ), амплитуда которого должна быть в 1,5–2 раза больше максимальной амплитуды измерительного импульса.

На приемной стороне коммутатор распределяет импульсы во времени так, что в каждом канале из приходящего импульса «вырезается» часть, менее подверженная изменениям в канале связи, что существенно уменьшает взаимное влияние, т. е. осуществляется стробирование в середине импульса.

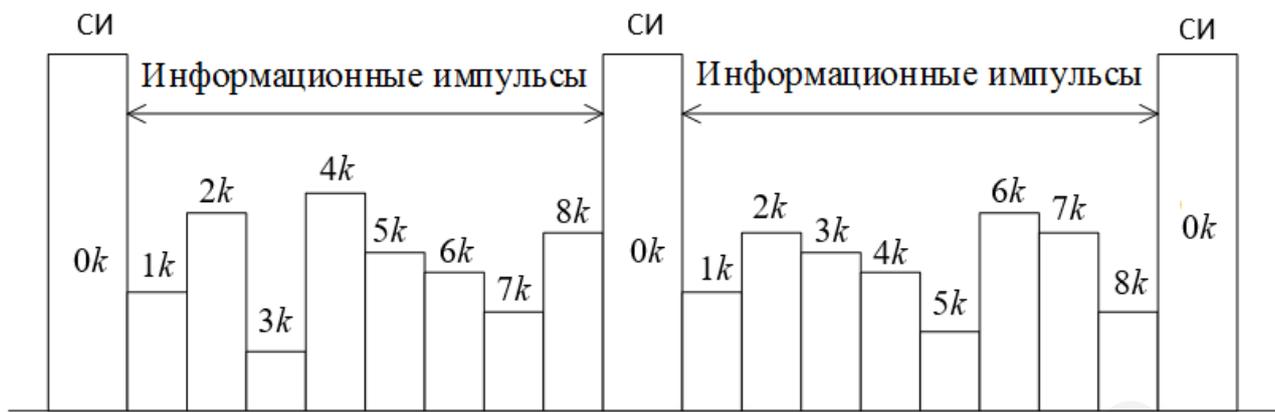


Рисунок 1.21 – Беспauseный метод передачи сообщений

В системах с ШИМ и ФИМ применяется контроль импульсов по длительности с помощью узла двойной дискриминации (УДД). УДД должен браковать импульсы, длительности которых меньше или больше длительности информационных импульсов при ШИМ или при ФИМ. Задача дискриминации длительности импульсов с обеих сторон – сверху и снизу – решается схемой, содержащей два дискриминатора длительности (ДД) (рисунок 1.22).

Один из них – ДД1 – настроен на порог дискриминации τ_1 , другой – ДД2 – на порог τ_2 , причем τ_1 меньше номинальной длительности полезного импульса на величину допуска, а τ_2 больше на такую же величину.

Кроме дискриминатора в схему входят логические элементы, с помощью которых проверяется соблюдение условия $\tau_1 < \tau_{\text{И}} < \tau_2$. Признаком является то, что ДД1 срабатывает, а ДД2 не срабатывает. Проверка выполнения этих событий проводится через интервал времени τ_3 после начала импульса, причем $\tau_3 > \tau_2$.

Факт срабатывания ДД1 запоминает триггер, который переводится фронтом импульса ДД1 в состояние единицы. При срабатывании ДД2 триггер возвращается в состояние нуля. Опрос триггера проводится импульсом одновибратора S_2 , сдвиг которого τ_3 относительно начала отсчета задается одновибратором S_1 . Временная диаграмма работы УДД приведена на рисунке 1.23, для трех возможных случаев: $\tau_1 < \tau_{\text{И}} < \tau_2$, $\tau_{\text{И}} < \tau_1$, $\tau_2 < \tau_{\text{И}}$.

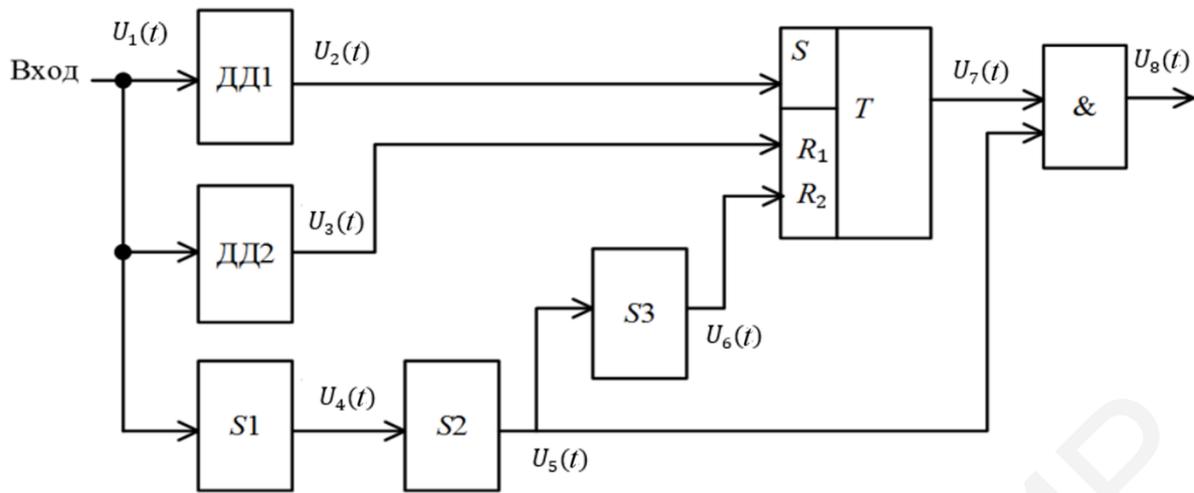


Рисунок 1.22 – Узел двойной дискриминации по длительности

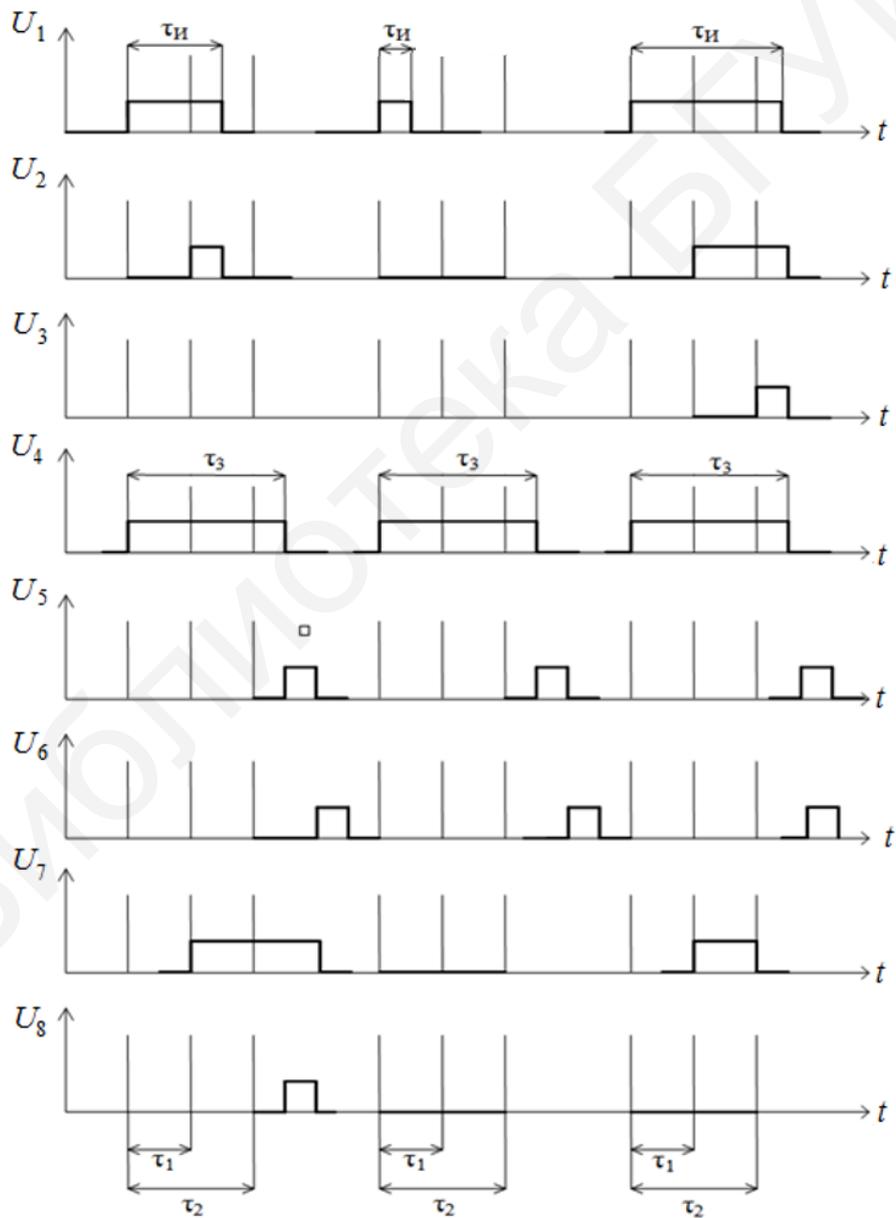


Рисунок 1.23 – Временные диаграммы УДД

Из рисунка 1.23 видно, что импульс $U_8(t)$ появляется только в случае, когда информационный импульс находится в допустимых пределах.

1.3.6 Синхронизация в системах ТИ с ВРК

Синхронная и синфазная работа передающей и приемной сторон системы достигается синхронным и синфазным движением распределителей каналов. Применяются следующие способы синхронизации и синфазирования:

1 *Пошаговый*, при котором каждый очередной импульс вызывает продвижение распределителя на передающей и приемной сторонах на один шаг. Данный способ реализуется наиболее просто и не требует установки генератора тактовых импульсов на приемной стороне. Он может быть реализован тремя путями: передачей тактовых импульсов по специальному каналу, передачей специальных продвигающих импульсов перед каждым измеряемым и использованием измерительных импульсов в качестве продвигающих. Первый путь целесообразно применять, если в данном направлении имеется более восьми информационных каналов.

Схема синхронизации для второго пути приведена на рисунке 1.24. Этот путь требует увеличения числа импульсов на периоде опроса, а следовательно, и расширения полосы частот канала связи. Очевидно, что данный путь можно применять при небольшом количестве каналов и достаточной полосе частот. На рисунке 1.24 ВТИ – выделитель тактовых импульсов, РИ – распределитель импульсов.

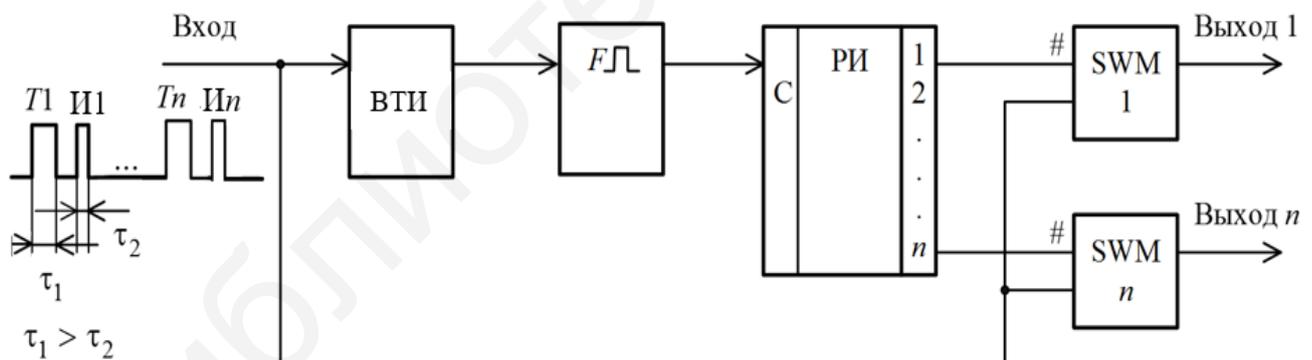
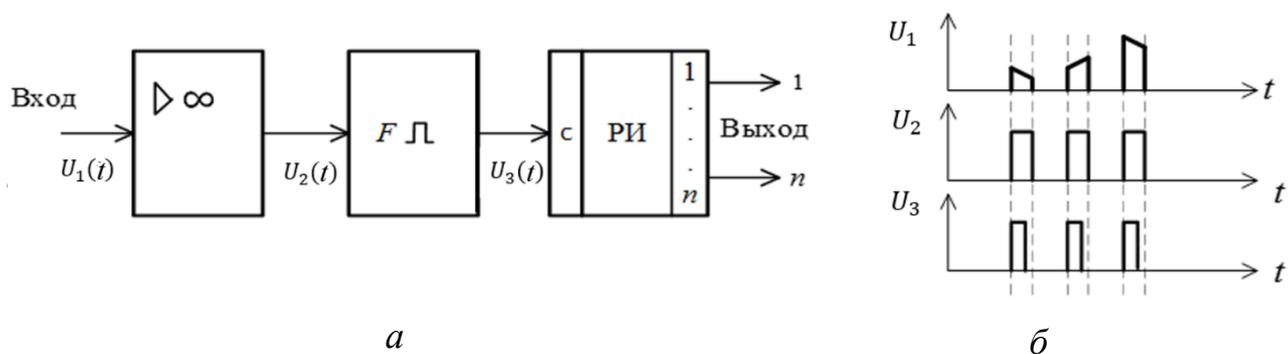


Рисунок 1.24 – Схема синхронизации при передаче перед каждым информационным импульсом тактового импульса

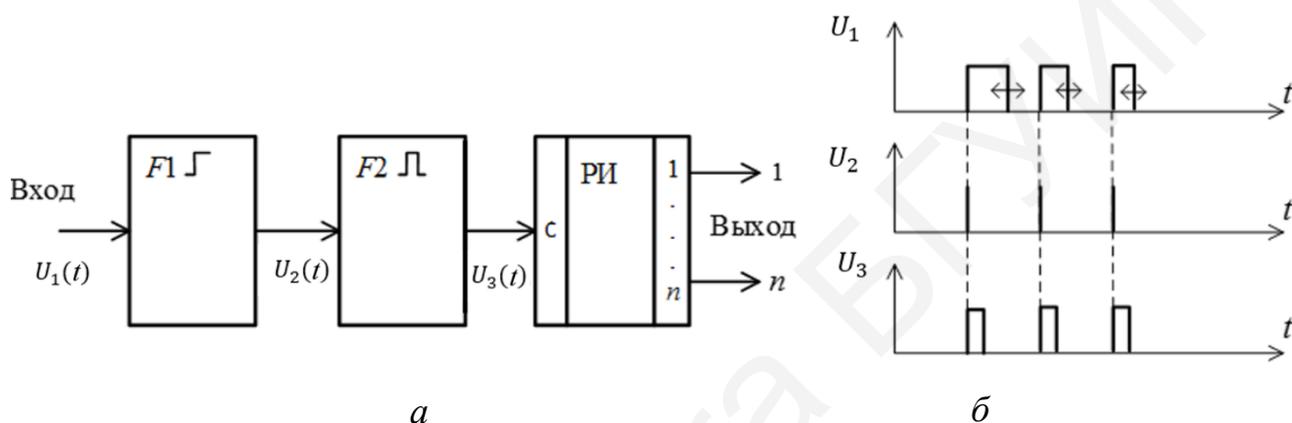
Третий путь пошаговой синхронизации применяется в таких системах, в каждом такте которых имеется импульс, несущий измерительную информацию. Примером таких систем может быть система с АИМ при условии, что нулевые значения измеряемых величин передаются импульсами минимальной амплитуды.

Схема формирования тактовых импульсов и временные диаграммы для систем с АИМ и ШИМ приведены на рисунках 1.25 и 1.26 соответственно.



a – функциональная схема; *б* – временные диаграммы

Рисунок 1.25 – Схема формирования тактовых импульсов из АИМ сигнала:



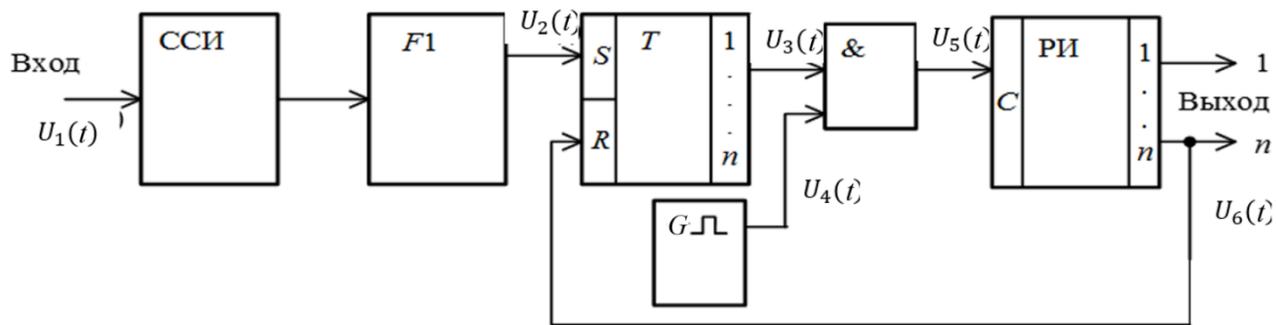
a – функциональная схема; *б* – временные диаграммы

Рисунок 1.26 – Схема формирования тактовых импульсов из ШИМ сигнала:

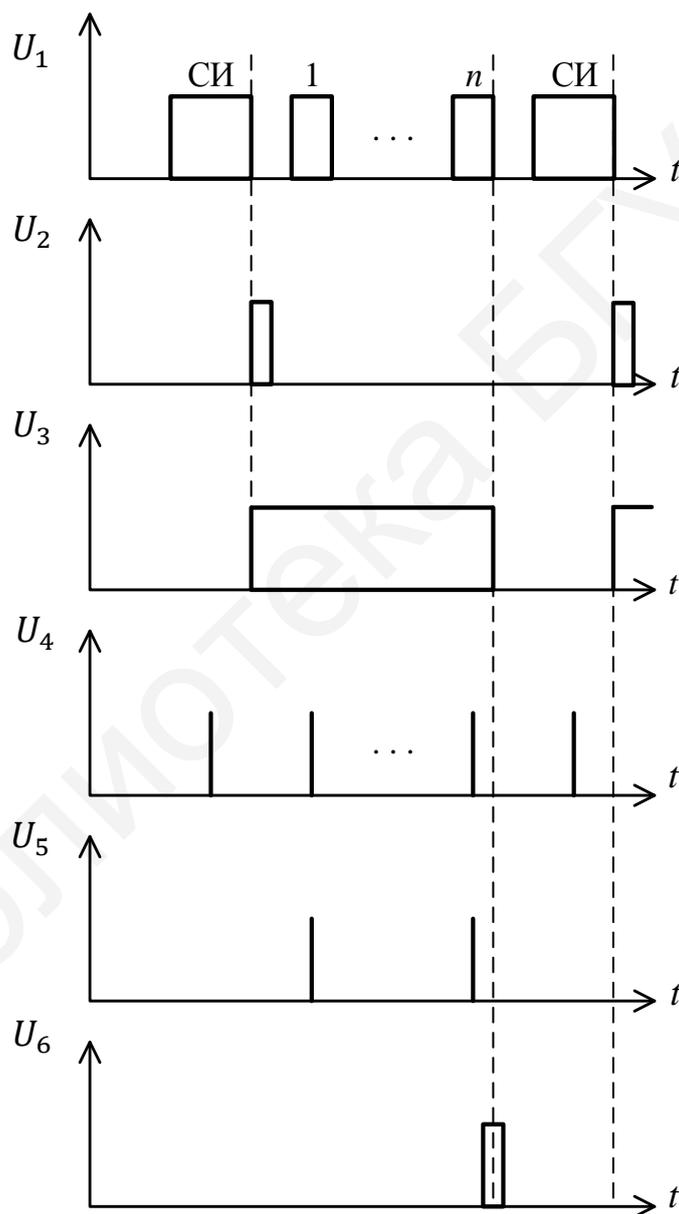
Необходимо отметить низкую помехоустойчивость пошаговой синхронизации. Появление в сигнале лишнего импульса или пропада импульса под действием помех приводит к сбою синхронизации или к пропаже измерительной информации, если не предусмотрена защита от помех в виде счета импульсов в каждом канале.

2 *Стартстопный* способ, при котором распределители переключают канал на передающей и приемной сторонах от местных генераторов, работающих со стабильной, почти одинаковой частотой. Запуск распределителя приемной стороны, начиная с первой позиции, производится синхроимпульсом (СИ), который поступает от передатчика и выделяется селектором синхроимпульса (ССИ). Распределитель на приемной стороне останавливается после прохождения всех n позиций (каналов) до момента прихода очередного циклически посылаемого СИ, который вновь запускает РИ. Функциональная схема и временные диаграммы работы представлены на рисунке 1.27.

Помехоустойчивость стартстопного способа значительно выше, так как единичное искажение помехой может вызвать рассогласование в движении распределителей только в пределах цикла до прихода очередного СИ. Очередной СИ восстанавливает синхронное движение распределителей.



a



б

a – функциональная схема; *б* – временные диаграммы
 Рисунок 1.27 – Стартстопный способ синхронизации

3 Циклический способ синхронизации отличается только тем, что СИ сбрасывает в исходное состояние РИ и по совершении n шагов РИ не останавливается, а продолжает работу дальше, а очередной СИ снова устанавливает его в исходное состояние. Очевидно, что для синхронизации необходимо, чтобы нестабильность частоты местного генератора была такой, чтобы рассинхронизация не происходила в течение цикла. Схема циклического способа синхронизации приведена на рисунке 1.28.

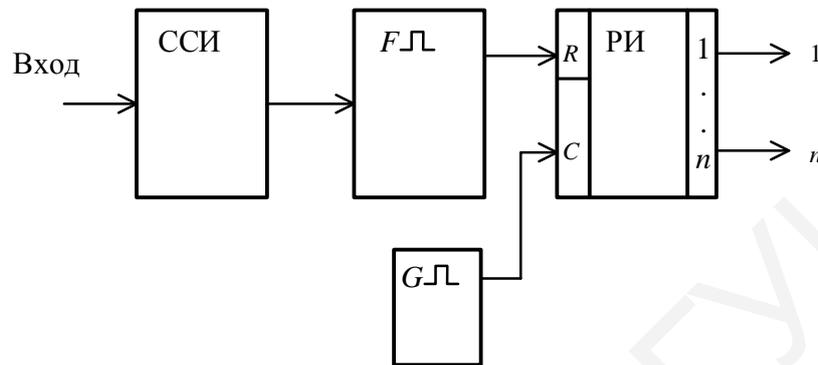


Рисунок 1.28 – Циклический способ синхронизации

4 Инерционный способ, при котором, так же как и при стартстопном способе, циклически передаются синхроимпульсы. Однако распределители переключаются от стабильных по частоте местных тактовых генераторов равномерно, без остановки в конце цикла. Синхроимпульсы воздействуют на частоту генератора тактовых импульсов (ГТИ) в небольших пределах обычно через инерционное звено. Для приема синхроимпульсов применяется стробирование и другие меры, уменьшающие влияние помех в интервалы времени, в которые не ожидается приход синхроимпульсов. Структурная схема, реализующая этот способ, приведена на рисунке 1.29.

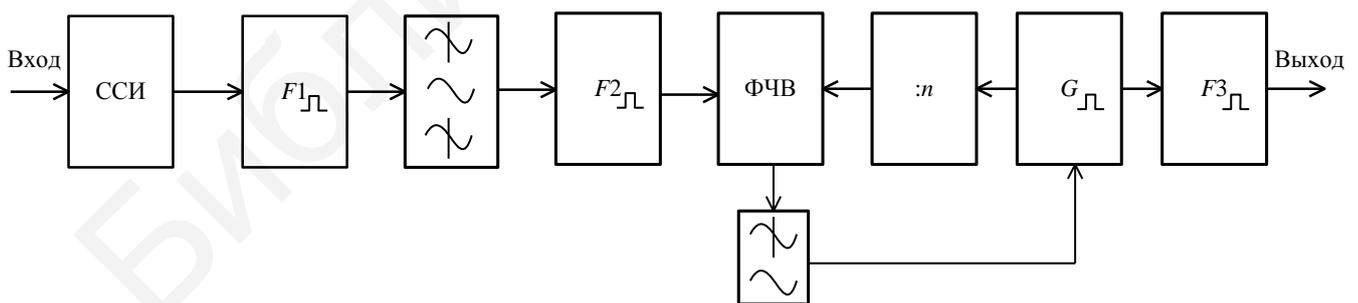


Рисунок 1.29 – Схема инерционного способа синхронизации

Синхроимпульсы, поступающие из канала связи, селективируются ССИ и через полосовой фильтр (ПФ), на выходе которого выделяется первая гармоника импульсного сигнала, поступающая через формирователь $F2$ на один из входов фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ), на второй вход ФЧВ поступает сигнал от управляемого напряжением генератора G через делитель. Если эти сиг-

налы не совпадают по фазе, то на выходе ФЧВ появляется сигнал рассогласования, который через фильтр нижних частот (ФНЧ) регулирует частоту генератора G до получения значения сигнала на выходе ФЧВ, равного нулю. Этот способ синхронизации имеет резко увеличенную помехоустойчивость и применяется в условиях с высоким уровнем помех.

В заключение следует отметить, что использование метода временного разделения каналов позволяет создать сравнительно простые по устройству, надежно работающие системы с большим числом каналов, причем при необходимости регистрации сообщений в цифровой форме, а также производить преобразование сигнала из аналоговой формы в двоичный код в приемной части.

1.4 Телеметрические системы с частотно-временным разделением каналов

1.4.1 Структурная схема

Частотно-временное разделение каналов (ЧВРК) использует основные преимущества частотного и временного разделений: отсутствие канала синхронизации и импульсную работу. Достигается это тем, что каждому каналу, работающему на своей поднесущей частоте, отводится промежуток времени для передачи.

Структурные схемы КП и ПУ приведены на рисунках 1.30 и 1.31 соответственно.

На передающей стороне каналные сигналы формируются с помощью генераторов поднесущих частот, которые модулируются по закону исходных сообщений. В этой части имеется аналогия с ЧРК. Далее каналы попеременно опрашиваются распределителем, как это имеет место при ВРК. Сигналы на входе вторичного модулятора представляют собой последовательность радиоимпульсов, модулированных по амплитуде, фазе или частоте поднесущего колебания. Этими сигналами модулируется по какому-либо параметру генератор несущей.

Схема приемной стороны ничем не отличается от схемы при ЧРК. Сигналы разделяются канальными фильтрами и направляются к демодуляторам поднесущих частот и другой канальной аппаратуре.

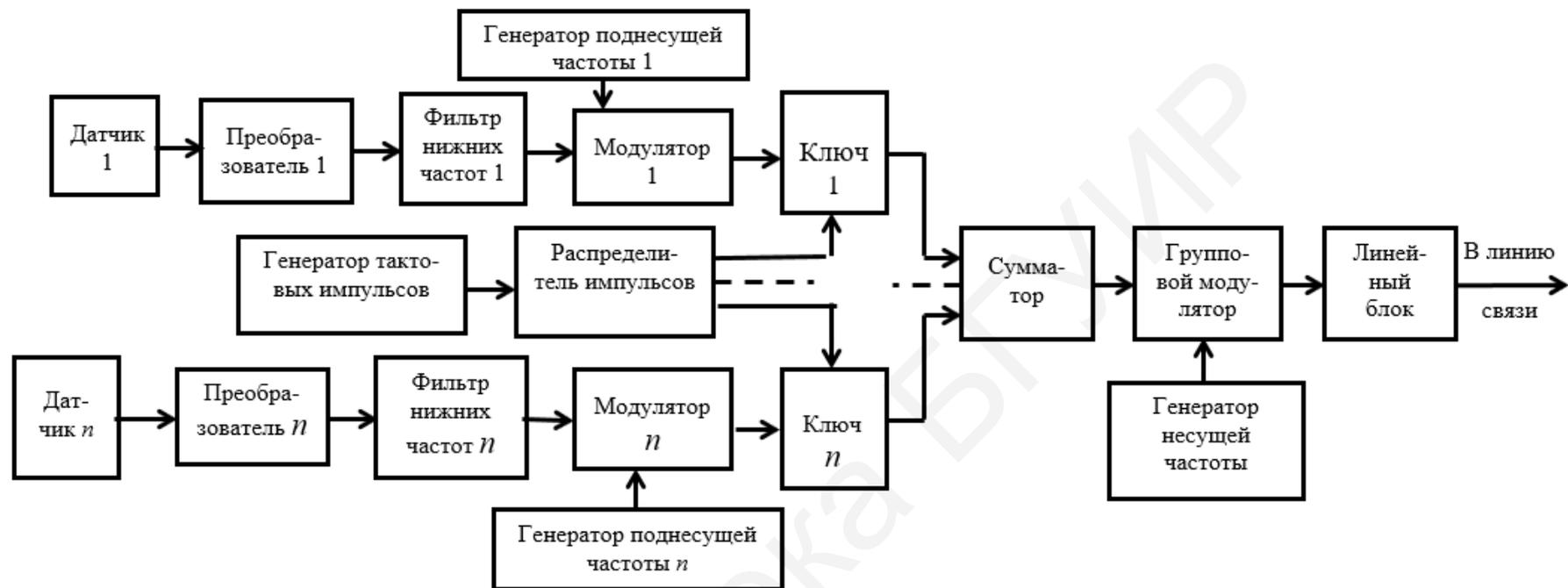


Рисунок 1.30 – Структурная схема КП телеметрической системы с ЧВРК

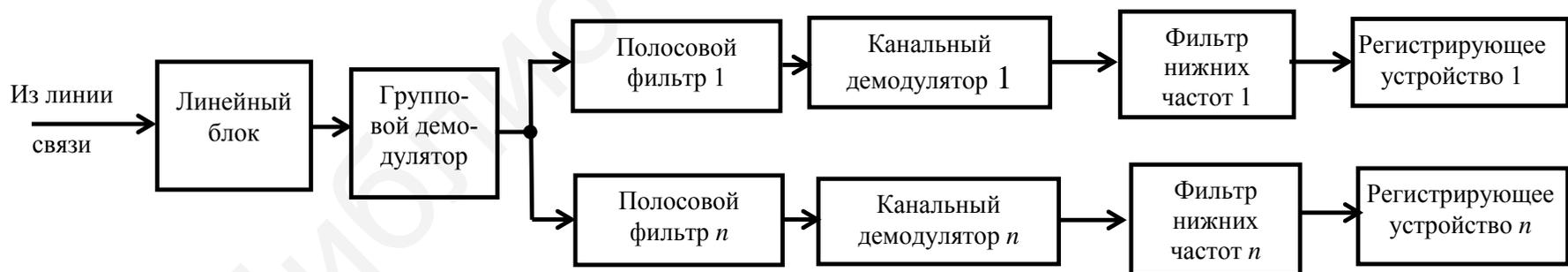


Рисунок 1.31 – Структурная схема ПУ телеметрической системы с ЧВРК

1.4.2 Спектр сигналов и полоса частот

Поочередная модуляция несущего колебания канальными сигналами приводит к тому, что в каждый момент времени спектр сигналов в линии связи содержит только составляющие, обусловленные несущей частотой и одной из поднесущих с ее боковыми составляющими. При коммутации каналов картина спектра изменяется, что иллюстрируется рисунком 1.32.

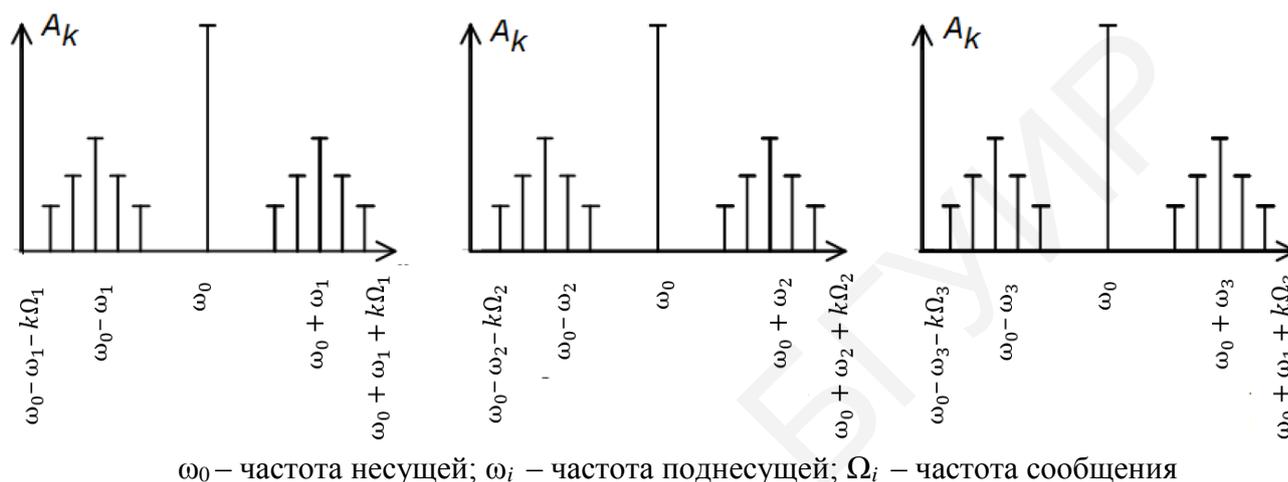


Рисунок 1.32 – Спектры сигналов в линии связи в моменты времени t_i

Ширина полосы частот сигналов определяется здесь так же точно, как и при ЧРК с соответствующим видом модуляции в первой и второй ступенях. Радиоимпульс может подвергаться искажениям, если его огибающая недостаточно хорошо аппроксимирована ВЧ заполнением. Так, например, длительный переходный процесс нарастания и затухания ВЧ колебаний приведет к растягиванию фронта и спада даже в том случае, если модулирующий импульс имел идеально прямоугольную форму. Из этих соображений период ВЧ колебаний должен быть значительно меньше длительности посылки:

$$T_1 \leq 0,1\tau, \quad (1.54)$$

но длительность импульса не должна превышать половины времени, отведенного для передачи информации данного канала, т. е.

$$\tau \leq 0,5T_k = 0,5 \frac{T}{n} = 0,5 \cdot 0,5 \frac{T_{\max}}{n}, \quad (1.55)$$

$$T_1 \leq 0,1 \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{n} \cdot 0,5T_{\max} = 0,0025 \frac{T_{\max}}{n}, \quad (1.56)$$

откуда частота первой поднесущей

$$F_{П1} \geq 40nF_{\max}. \quad (1.57)$$

При одинаковом F_{\max} первая поднесущая при ЧВРК оказывается в $4n$ раз выше, чем при ЧРК.

1.4.3 Энергетические показатели

При ЧВРК, как и при ВРК, каналы включаются поочередно. Поэтому зависимость мощности составляющих полезного сигнала от числа каналов исключена. В результате энергетические показатели примерно эквивалентны показателям ВРК.

1.4.4 Искажения сигналов

Канальные фильтры имеют характеристики, не спадающие до нуля даже для значительных расстроек от полосы пропускания. А поэтому эффект проникновения напряжения одного канала в полосу другого будет иметь место, но в данном случае влияние их совершенно отличается от частотного разделения. Они не могут вызвать паразитную АМ, так как не действуют одновременно с полезным сигналом, а поэтому могут быть легко устранены простым ограничением канального сигнала снизу. А это значит, что требования к канальным фильтрам могут быть менее жесткими, чем при ЧРК.

Что касается перекрестных искажений, то их уровень также ниже, чем при ЧРК, так как поднесущие разнесены во времени, а следовательно, не могут присутствовать комбинационные частоты. Входной сигнал есть напряжение одной лишь поднесущей, а выходной сигнал

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}} &= a_1 \cos \omega_1 t + a_2 \cos^2 \omega_1 t + a_3 \cos^3 \omega_1 t = \\ &= (a_1 + \frac{3}{4} a_3) \cos \omega_1 t + \frac{1}{2} a_2 (1 + \cos 2\omega_1 t) + \frac{1}{4} a_3 \cos 3\omega_1 t. \end{aligned} \quad (1.58)$$

Хотя выражение (1.58) указывает, что из-за нелинейности тракта на выходе его будут появляться вторые и третьи гармоники основной частоты, но их амплитуды сравнительно малы и могут быть устранены с помощью ограничения снизу.

1.4.5 Выбор поднесущих частот

Исходя из перекрестных помех, необходимо при выборе поднесущих соблюдать одно лишь требование: соседние частоты должны быть выбраны так, чтобы они и их гармоники подавлялись канальным фильтром до уровня, меньшего порога срабатывания канальной аппаратуры. При этом первая поднесущая определяется выражением (1.57), а полосы канальных фильтров – максимальной составляющей модулирующей функции и видом первичной модуляции.

1.5 Цифровые телеметрические системы

Принцип действия цифровой телеметрической системы сводится к следующему. Вся информация с датчиков, имеющая аналоговый вид, преобразуется в

цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП) (в случае использования цифровых датчиков такой преобразователь не нужен). Затем формируется полный цифровой телеметрический сигнал, который обеспечивает высокую помехоустойчивость и эффективность. Выход приемного устройства телеметрической системы подключается к системе обработки информации, представляющей собой ЭВМ. Таким образом, последовательная цифровая передача и обработка информации приводит к телеметрической системе, обладающей такими ценными свойствами, как хорошее качество, большая скорость передачи-приема сообщений, высокая степень автоматизации (в особенности процессов обработки), надежность, гибкость и т. д. Учитывая все это, понятен тот интерес, который проявляется в настоящее время к цифровым системам ТИ.

1.5.1 Структурная электрическая схема

На рисунке 1.33 представлена структурная схема КП, на рисунке 1.34 – структурная схема ПУ, а на рисунке 1.35 – временные диаграммы работы КП при числе измерительных каналов $N = 2$. всей работой управляет генератор тактовых импульсов (ГТИ), частота импульсов которого выбирается в зависимости от скорости преобразования в АЦП, скорости передачи информации по каналу связи и числа каналов. Преобразователь параллельного кода в последовательный подсчитывает такты и определяет границы подциклов. Под подциклом понимается время, отведенное для передачи информации по одному информационному каналу. Распределитель каналов подсчитывает подциклы и определяет границы циклов (см. рисунок 1.35, диаграммы U_3-U_5).

Таким образом, в каждый момент времени открыт только один ключ коммутатора и аналоговое сообщение от соответствующего датчика поступает на вход АЦП, где, как правило, преобразуется в двоичный код (цифровой эквивалент). Неизбыточная кодовая комбинация поступает в устройство защиты от ошибок (УЗО), где кодируется в одном из помехозащищенных кодов и через сумматор поступает на вход группового модулятора. Учитывая, что в цифровых телеметрических системах предъявляются более жесткие требования к синхронизации, чем в системах с ВРК, а это связано с тем, что каждому отсчету соответствуют n разрядов, в системе предусмотрено устройство формирования синхросигналов. В качестве синхросигналов применяется специальная кодовая комбинация. Частота следования слов (т. е. частота коммутации сообщений) и двоичных разрядов отличаются в n раз, где $n = k + r$ – разрядность слова. Поэтому слова на выходе УЗО следуют друг за другом плотно, без временных пауз (диаграмма U_8 на рисунке 1.35).

Операция формирования полного телеметрического сигнала заканчивается в сумматоре. Таким образом, КИМ – это последовательность единиц и нулей, несущих информацию о результатах отдельных измерений и различную вспомогательную информацию. Разметка телеметрического цикла (кадра) в цифровой форме на выходе сумматора представлена на диаграмме U_9 рисунка 1.35.

С выхода сумматора КИМ сигнал поступает на модулятор передатчика. Вообще говоря, в цифровой системе может быть применен любой вид манипуляции несущей – амплитудная (АМП), частотная (ЧМП) или фазовая (ФМП), но с точки зрения повышения помехоустойчивости наиболее предпочтительны ФМП (односторонняя фазовая манипуляция (ОФМП)), затем ЧМП. Таким образом, высокочастотный сигнал цифровой телеметрической системы имеет двойную модуляцию КИМ-ЧМП или КИМ-ФМП (ОФМП). В случае применения радиолиний может потребоваться тройная модуляция (например, КИМ-ЧМП-ФМ), которая позволяет сформировать спектр высокочастотного телеметрического сигнала таким образом, чтобы облегчить выделение несущей в приемном устройстве для синхронного детектирования.

На рисунке 1.34 сигнал КИМ с приемника, где проведено детектирование несущей частоты, фильтрация и усиление сигнала, поступает в устройство демодуляции КИМ. Поскольку двоичный сигнал искажен помехой, перед обработкой он проходит через восстановитель, который отфильтровывает помеху и генерирует импульсы стандартной формы.

Восстановитель представляет собой управляемый интегратор, который накапливает (рисунок 1.36) выходное напряжение с детектора приемника в течение одной двоичной единицы. Если в течение этого времени напряжение на интеграторе превысило некоторый порог, считается, что была принята единица, в противном случае – нуль. В первом случае восстановитель выдает стандартный импульс. В конце интервала интегрирования происходит сброс напряжения интегратора.

Работа приемной части управляется двумя типами синхронизирующих устройств: узлом тактовой синхронизации (УТС) и узлом цикловой синхронизации (УЦС). Для подстройки частоты и фазы местного генератора тактовых импульсов может быть использована инерционная система фазовой автоподстройки (ФАП) или система дискретной подстройки. Импульсы синхронизации кодовых слов и циклов получаются в устройстве цикловой синхронизации.

Информационные символы принимаются преобразователем последовательного кода в параллельный, который выполняет функции, ответные аналогичному преобразователю КП, и записывает их в запоминающее устройство. Перед регистрацией производится коррекция ошибок.

В УЗО имеются схемы, анализирующие принятые кодовые комбинации, и при необходимости производится их исправление в запоминающем устройстве и выдается разрешение на шину K . Адрес канала выдает распределитель каналов путем подачи сигнала на шину A .

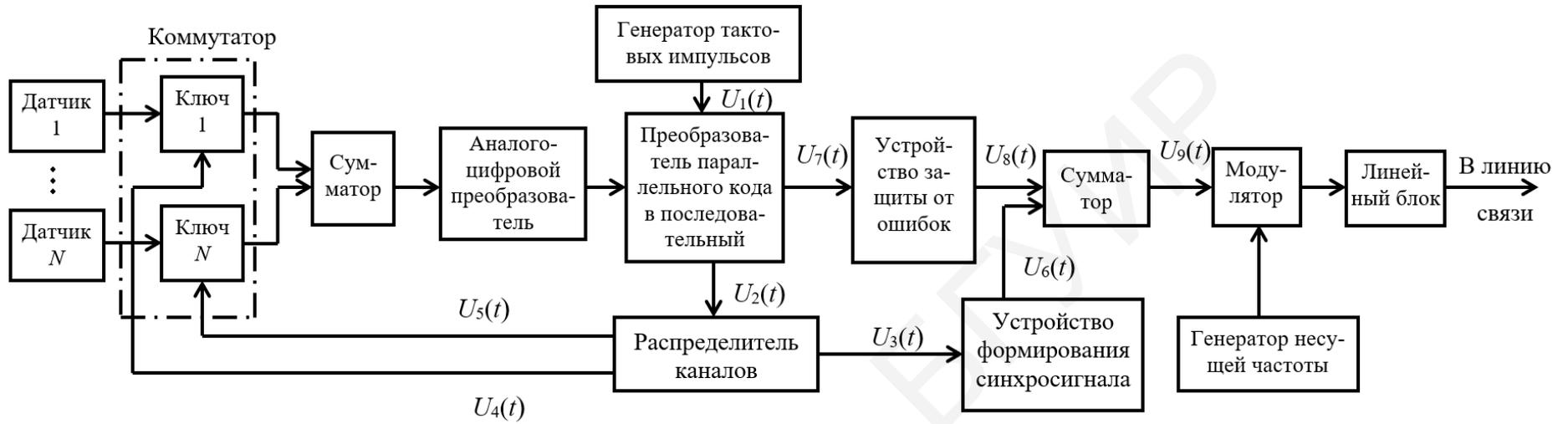


Рисунок 1.33 – Структурная схема КП цифровой телеметрической системы

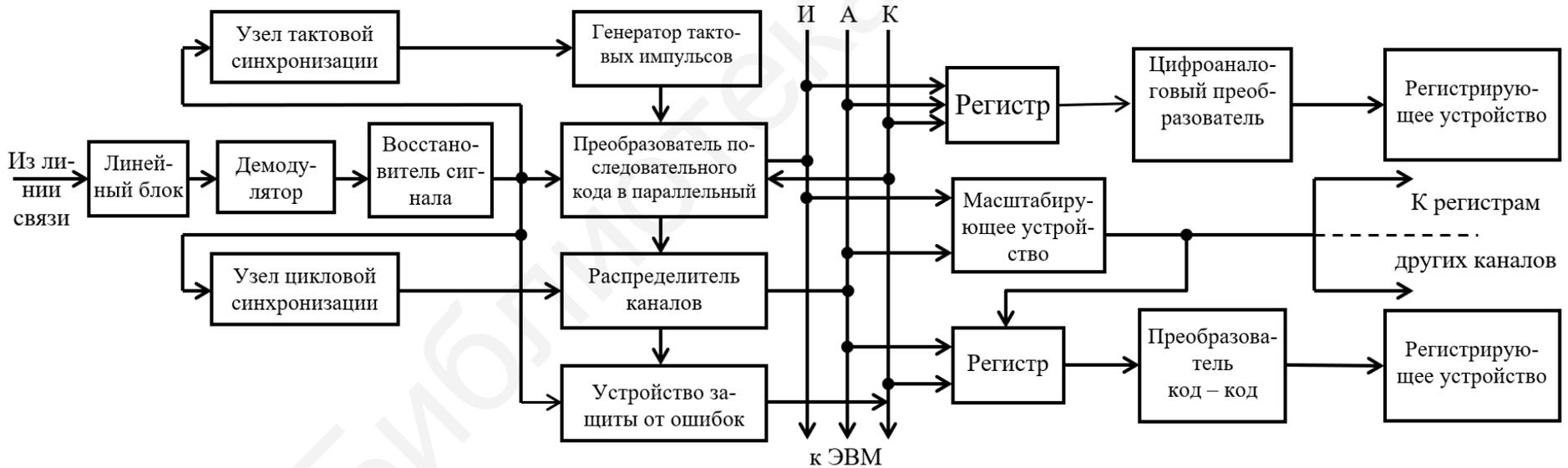


Рисунок 1.34 – Структурная схема ПУ цифровой телеметрической системы

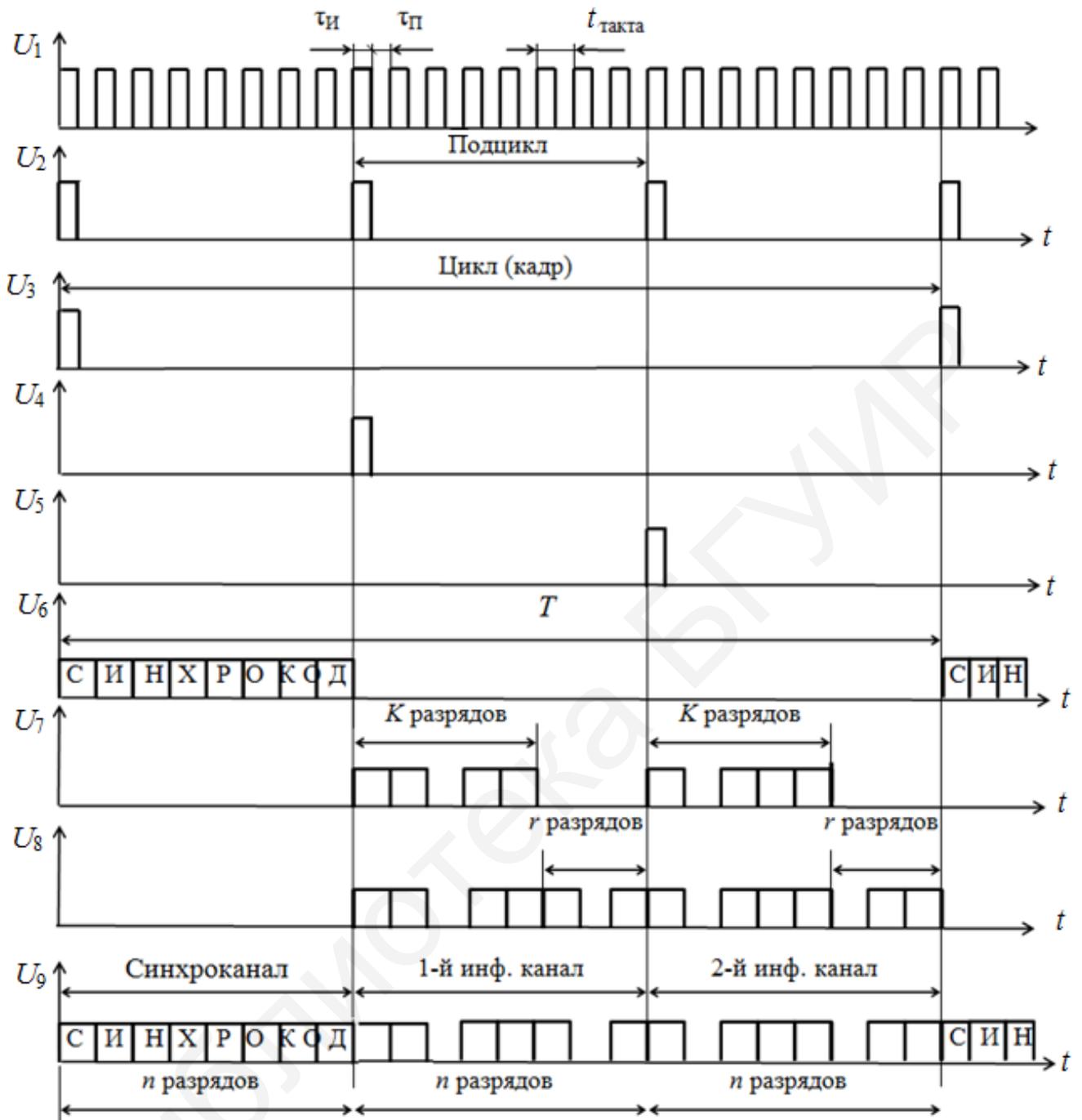


Рисунок 1.35 – Временные диаграммы работы КП

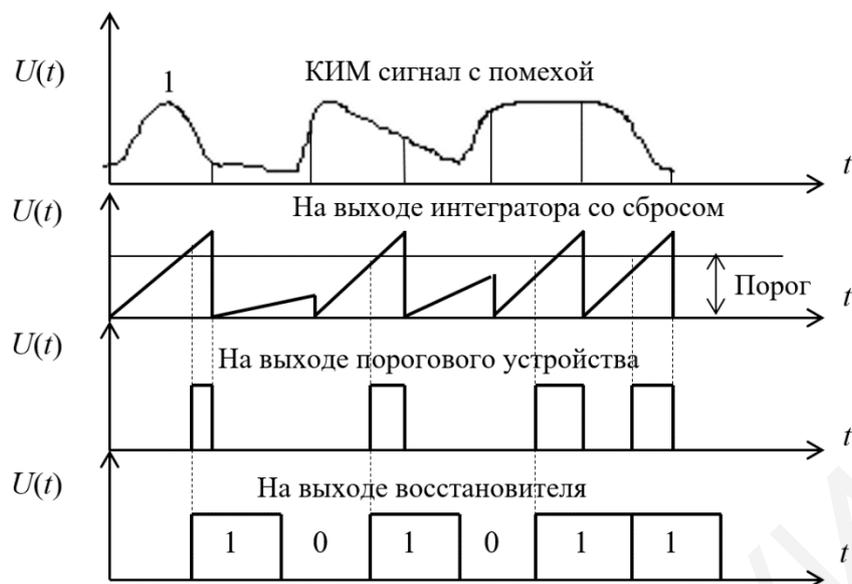


Рисунок 1.36 – Временные диаграммы работы восстановителя сигнала

Исправленная кодовая комбинация поступает на шину *И*. Шины *А*, *К* и *И* – многоразрядные. С этих шин информация в случае необходимости поступает в ЭВМ и на индивидуальные регистрирующие устройства, которые могут быть как аналоговыми, так и цифровыми. При аналоговом воспроизведении полезных сообщений информация из канальных регистров поступает на входы цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), где преобразуется с необходимым коэффициентом в аналоговую величину и поступает на вход регистрирующих устройств.

При цифровой регистрации цифровые эквиваленты снимаются с шины *И*, поступая затем на вход масштабирующих устройств, где происходит их умножение на соответствующие коэффициенты с целью вывода информации в абсолютных единицах. Масштабирующее устройство является общим для всех каналов. Промасштабированные цифровые эквиваленты записываются в канальные регистры, а затем через преобразователь код – код поступают на цифровые регистраторы. Преобразователь код – код производит преобразование цифрового эквивалента в рабочий код регистрирующего устройства.

1.5.2 Структура сигналов

В цифровой телеметрической системе с циклической передачей кодовых сообщений структура сигнала состоит из времени передачи синхрокода $t_{СК}$ и времени передачи измерительного эквивалента $t_{К}$ (рисунок 1.37).

Сумма $t_{СК} + N \cdot t_{К}$ образует период опроса одного датчика $T = \frac{1}{(5...10)F_{\max}}$.

Принимая $t_{СК} = t_{К}$, получим, что

$$T = (N + 1) \cdot t_{К},$$

где N – число информационных каналов.

Таким образом,

$$t_k = \frac{T}{N+1} = \frac{1}{(5\dots 10)F_{\max} \cdot (N+1)}. \quad (1.59)$$

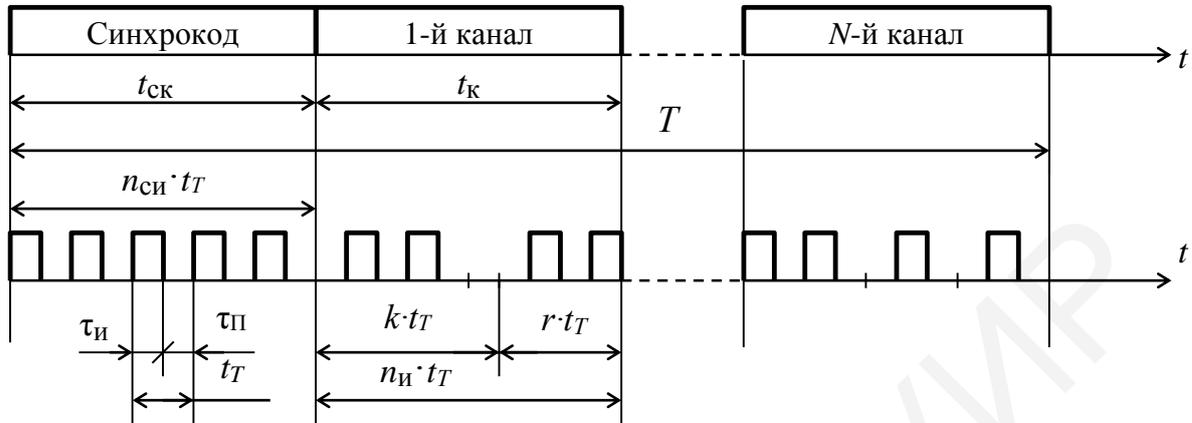


Рисунок 1.37 – Временная структура канальных сигналов в телеметрической системе с циклическим опросом датчиков

Время передачи бита (длительность такта) при длине кодовой комбинации $n_{и} = k + r$ будет

$$t_T = \frac{t_k}{n_{и}} = \frac{t_k}{k + r},$$

где r – число контрольных символов;

k – число информационных символов, определяемых из выражения для приведенной погрешности [58]

$$\delta\%_{\text{прив}} = \frac{50}{2^k - 1}. \quad (1.60)$$

Зная t_T , определим частоту генератора тактовых импульсов:

$$f_{\text{ГТИ}} = \frac{1}{t_T} = \frac{n_{и}}{t_k} = (5\dots 10)F_{\max} \cdot (N+1)n_{и}. \quad (1.61)$$

1.5.3 Адресные телеметрические системы

В настоящее время к телеметрическим системам предъявляются повышенные требования к информативности и информационной гибкости. Так, например, телеметрические системы должны обеспечивать измерение нескольких сотен параметров с различными значениями максимальной частоты их спектра (от долей герца до нескольких десятков килогерц). Такие требования исключают применение телеметрических систем ЧРК и ограничивают использование систем с ВРК. Поэтому получили распространение цифровые телеметрические системы с кодовым разделением каналов (адресные системы ТИ). При кодовом разделении каналов для передачи информации по каждому каналу отводится временной интервал, анало-

гичный, как и в цифровой телеметрической системе, с циклическим опросом датчиков, структурная схема КП которой приведена на рисунке 1.33 (см. пункт 1.5.1), но сигнал каждого канала состоит из двух частей: адресной и информационной. Адресная часть сигнала содержит информацию о номере канала и предшествует информационной. Ввиду того, что каждое измерение снабжено адресом, сигналы различных каналов могут передаваться в любом порядке, который можно изменить в процессе передачи. Последнее очень важно для увеличения информационной гибкости системы, использования устройств, уменьшения избыточности и т. д.

На рисунке 1.38 приведена структурная схема КП телеметрической системы с кодовым разделением каналов.

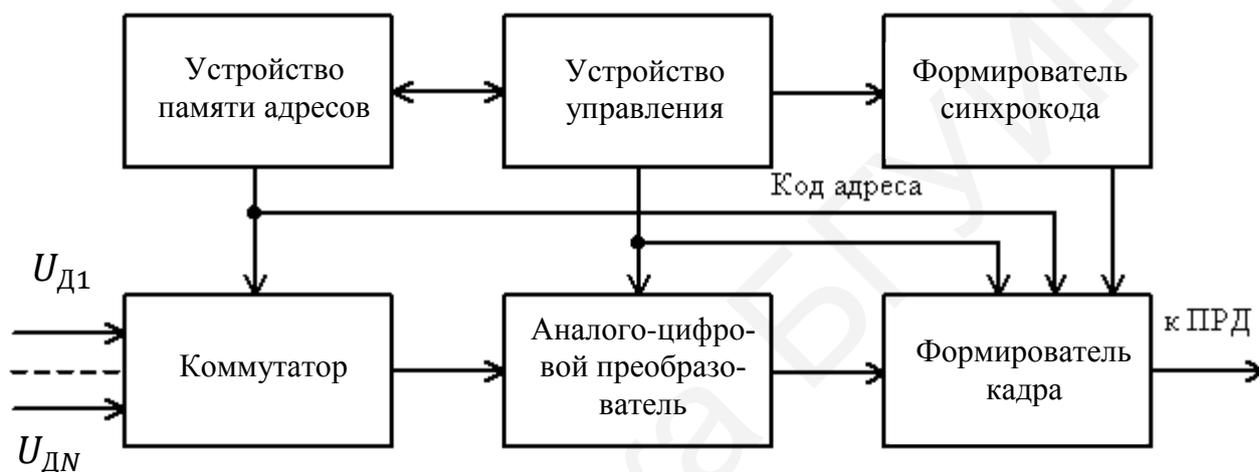


Рисунок 1.38 – Структурная схема КП цифровой системы с кодовым разделением каналов

В устройстве памяти адресов заложена программа опроса каналов. Эта программа записывается в устройство памяти адресов перед работой и может изменяться в процессе работы по командам с ПУ, а также по сигналам с вычислительного блока, если такой предусмотрен на КП, который производит контроль интенсивности входных сообщений. Импульсы управления, поступающие с устройства управления, считывают адреса номеров каналов и подают их в коммутатор и формирователь кадра. Коммутатором производится опрос того канала, адрес которого поступил с устройства памяти адресов. Полезное сообщение поступает в АЦП, где преобразуется в двоичный код информационной части слова. В формирователе кадра к каждой информационной части слова приписывается адрес и необходимые синхросигналы. С выхода формирователя кадра групповой сигнал подается на передатчик (ПРД).

Структурная схема ПУ приведена на рисунке 1.39. Она отличается от структурной схемы цифровой телеметрической системы, работающей в циклическом режиме (см. рисунок 1.34 пункта 1.5.1), наличием блока управления и декодера адреса канала вместо распределителя каналов. Блок управления управляет режимом приема цифровых сообщений и выдает сигнал на шину B для вывода информации в каналные регистры.

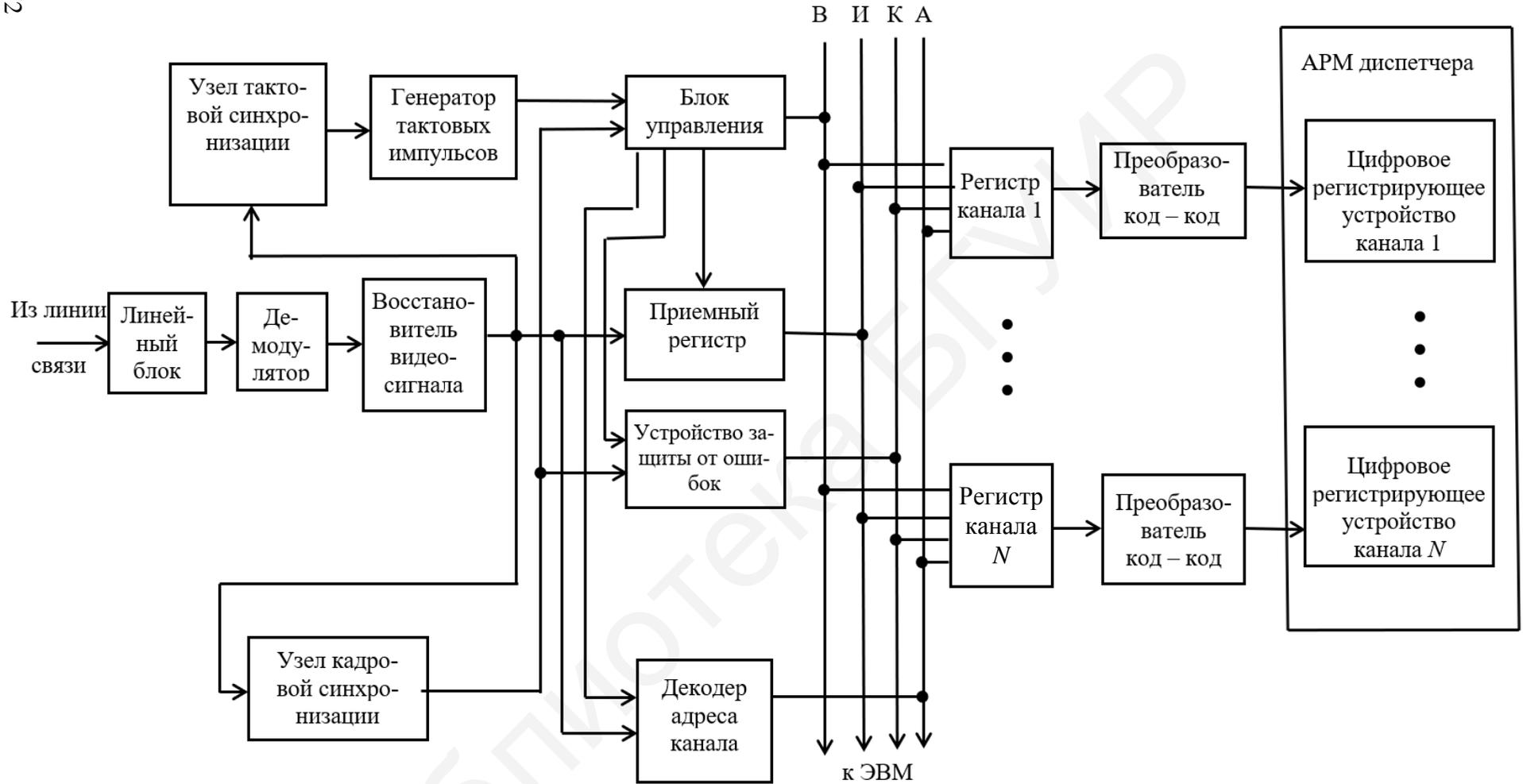


Рисунок 1.39 – Структурная схема ПУ цифровой системы ТИ с кодовым разделением сигнала

1.5.4 Структура сигналов в системе, реализующей адресно-кодовый принцип

Структура состоит из времени передачи синхрокода $t_{ск}$, времени передачи кода адреса $t_{ак}$, времени передачи кода измерительного сигнала $t_{ик}$, а в случае, если число каналов в процессе работы будет меняться, то и кода конца $t_{кц}$ (рисунок 1.40), т. е.

$$T = t_{ск} + N(t_{ак} + t_{ик}) + t_{кц} \quad (1.62)$$

При выборе синхрокода накладываются следующие ограничения: ни одна из разрешенных адресных и измерительных кодовых комбинаций или произвольно вырезанные из них два участка даже при наличии искажений не должны являться синхрокодом или вероятность появления такой ситуации должна быть ничтожно мала.

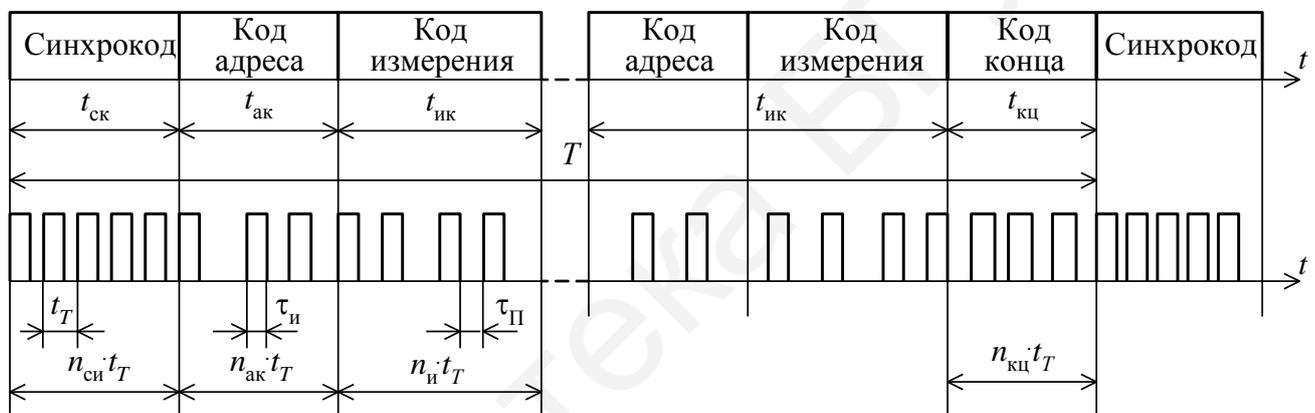


Рисунок 1.40 – Временная структура канальных сигналов в телеметрической системе с кодовым разделением каналов

Число разрядов кода адреса определяется из выражения

$$n_{ак} = E \log N, \quad (1.63)$$

где N – число информационных каналов;
 E – знак округления в большую сторону.

Все остальные параметры рассчитываются так же, как и в пункте 1.5.2.

1.5.5 Спектр кодовых сигналов

Спектр кодовых сигналов определяется спектром последовательности прямоугольных импульсов и занимает полосу частот, равную

$$\Delta F = \frac{1}{\tau_{и}},$$

где $\tau_{и}$ – длительность элементарного сигнала.

1.5.6 Выбор кодов

Для передачи значений измеряемых параметров в цифровых системах применяются, как правило, числовые равномерные коды. Однако обыкновенные коды непомяхоустойчивы. Поэтому с целью повышения помехоустойчивости применяются обладающие свойствами обнаружения и исправления избыточные коды, принципы построения которых, а также кодирующие и декодирующие устройства рассмотрены в [2], а оценка их помехоустойчивости – в [3]. Выбор конкретного кода производится в зависимости от типа помех, действующих в канале связи, и от вида искажений кодовых комбинаций.

Пример 1.8. По каналу связи, в котором преобладают одиночные ошибки, передается 15 кодовых сообщений. Вероятность искажения кодового элемента $P_1 = 10^{-3}$. Выбрать помехозащищенный код, обеспечивающий появление необнаруженной ошибки $P_{н.ош}$: а) менее 10^{-5} ; б) менее 10^{-10} .

Решение. Воспользуемся методикой определения $P_{н.ош}$ для кодов с защитой по паритету, кода с постоянным членом единиц, кода с повторением, корреляционного кода и инверсного кода, изложенной в [1]. Определим $P_{н.ош}$ для кода с защитой по паритету. При общем числе разрядов $n = 4 + 1 = 5$ находим

$$P_{н.ош} = C_5^2 P_1^2 (1 - P_1)^3 = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 0,999^3 \approx 10^{-5}.$$

Находим $P_{н.ош}$ для кода с постоянным числом единиц. Принимаем $m = 2$ в каждой из 15 комбинаций, тогда из $C_n^2 = 15$, $n = 6$. Тогда

$$\begin{aligned} P_{н.ош} &= (C_6^2 - 1)(P_1^2(1 - P_1)^4 + P_1^4(1 - P_1)^2) = \\ &= 14(10^{-6} \cdot 0,999^4 + 10^{-12} \cdot 0,999^2) \approx 1,4 \cdot 10^{-5}, \end{aligned}$$

вероятность необнаруженной ошибки в коде с повторением при $n = 2$, $n_0 = 8$:

$$\begin{aligned} P_{н.ош} &= C_4^1 P_1^2 (1 - P_1)^6 + C_4^2 P_1^4 (1 - P_1)^4 = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,999^6 + \\ &+ 6 \cdot 10^{-12} \cdot 0,999^4 \approx 0,4 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

Такой же вероятностью ошибки оценивается помехоустойчивость корреляционного кода.

Для кода с повторением и инверсией (инверсного)

$$P_{н.ош} = C_4^2 P_1^2 (1 - P_1)^4 + C_4^4 P_1^8 = 6 \cdot 10^{-12} \cdot 0,999^4 + 10^{-24} \approx 6 \cdot 10^{-12}.$$

Таким образом, для обеспечения требуемой помехоустойчивости по критерию вероятности ошибочного приема для случая «а» следует выбрать защиту кодом с повторением либо корреляционным кодом, а для случая «б» – только кодом с повторением и инверсией.

В заключение укажем основные достоинства цифровых телеметрических систем:

- прием сигнала сводится не к измерению, а к обнаружению единицы или нуля;
- сообщения в цифровой форме легко обрабатываются, запоминаются и коммутируются;
- возможность многократной передачи без накопления ошибок;
- применение помехоустойчивого кодирования позволяет значительно увеличить достоверность принимаемых сообщений;
- высокая точность (ошибка может быть доведена до величины, не превышающей 0,01 %);
- при обработке данных ЭВМ отсутствуют ошибки субъективного характера;
- упрощаются требования к калибровке системы.

1.5.7 Другие примеры построения цифровых систем ТИ

Выше были рассмотрены системы с кодовым разделением каналов, в которых сигнал от каждого канала состоял из двух частей: кода адреса и кода измерения. Возможно построение таких систем, в которых адрес канала несет одновременно и информацию об измерении. Существует несколько вариантов подобных систем. Суть одного из них состоит в том, что после преобразования сообщения в цифровую форму, вместо символа =1= передается адрес данного канала, а вместо символа =0= ничего не передается (рисунок 1.41).

Как следует из рисунка 1.41, адрес первого канала – 01001110, а адрес второго канала – 11101001. Основной недостаток этого варианта – это неравномерная загрузка. Этот недостаток отсутствует при мажоритарном уплотнении каналов, схема которого приведена на рисунке 1.42.

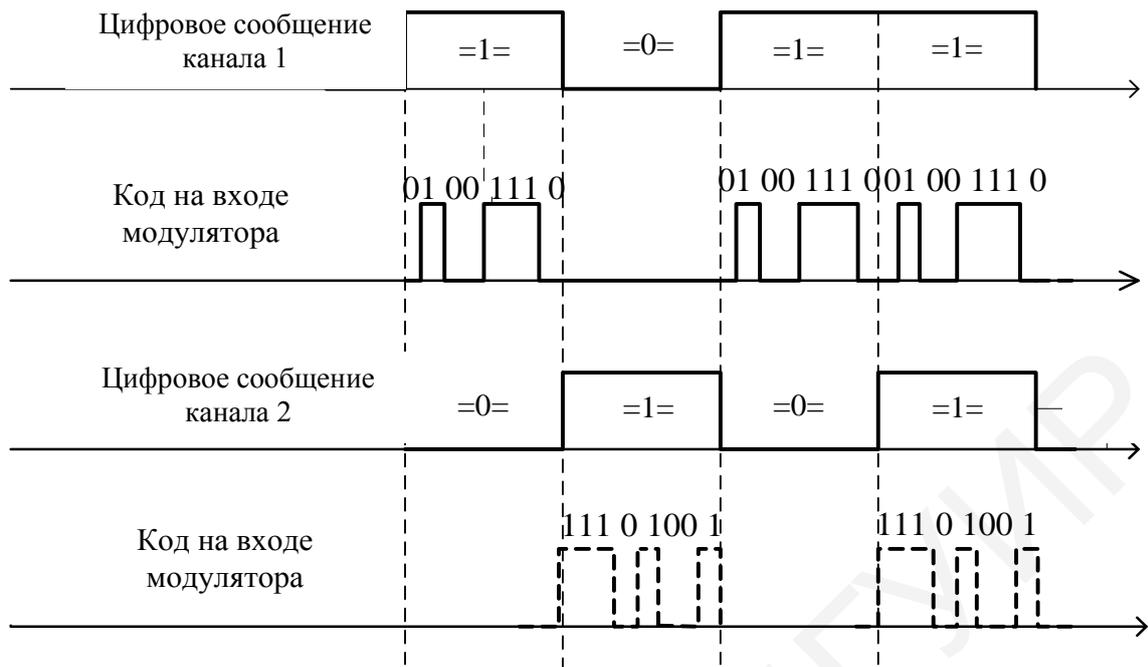


Рисунок 1.41 – Пример кодирования в телеметрической системе с кодовым разделением каналов

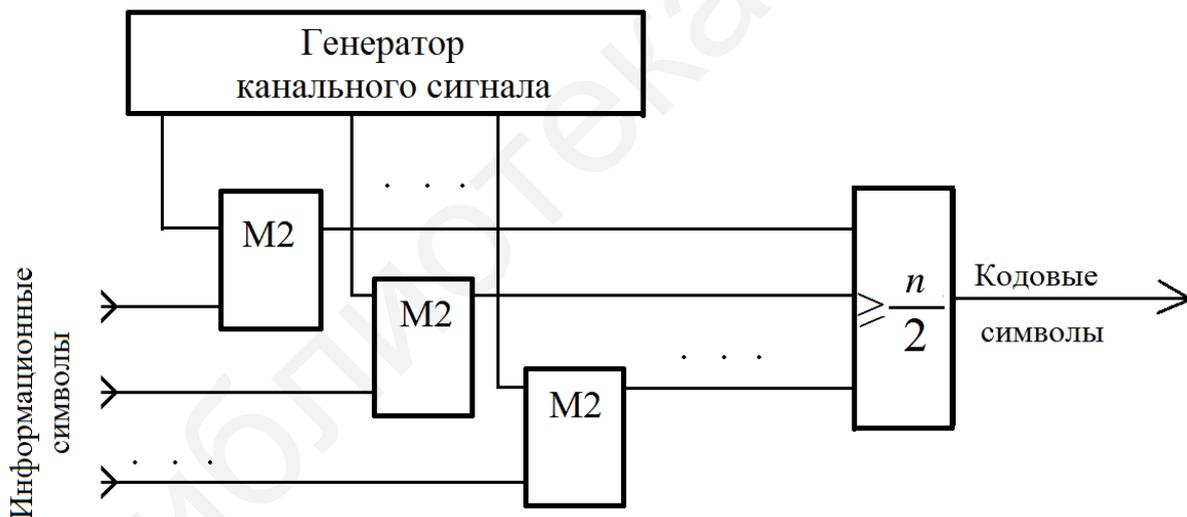


Рисунок 1.42 – Структурная схема устройства формирования кодовых символов в системе с мажоритарным уплотнением

Модулирующие сообщения от каждого n_k уплотняемых источников каналов, представленных двоичным кодом, одновременно во всех каналах поступают на один из входов канального модулятора, которым является сумматор по модулю два. На другой вход каждого канального модулятора поступает канальный сигнал, закрепленный за данным каналом и представляющий собой комбинацию двоичного кода с блоковой длиной n . Длительность двоичного символа канал-

ного сигнала выбирается равной $\tau = T / n$, где T – длительность двоичного символа, поступившего от источника. С выхода сумматора по модулю два в каждом канале получаем либо выделенный данному каналу каналный сигнал (в случае прихода от уплотняемого источника информационного символа «0»), либо его инверсию (в случае прихода от уплотняемого источника информационного символа «1»). Полученные таким образом каналные сигналы или их инверсии одновременно поступают на мажоритарный элемент, на выходе которого формируется двоичное кодовое слово группового сигнала по следующему правилу: i -й его разряд равен единице, если число единиц, поступивших на мажоритарный элемент по всем n_c каналам в i -й момент времени, больше или равно $n_c/2$, и равен нулю в противном случае. Таким образом, на выходе устройства мажоритарного уплотнения формируется двоичный групповой сигнал в последовательной форме, символы которого будем называть кодовыми. Для однозначного декодирования принятых кодовых комбинаций целесообразно число информационных каналов выбирать нечетным.

Устройство разделения каналов (рисунок 1.43) при мажоритарном уплотнении является линейным устройством.

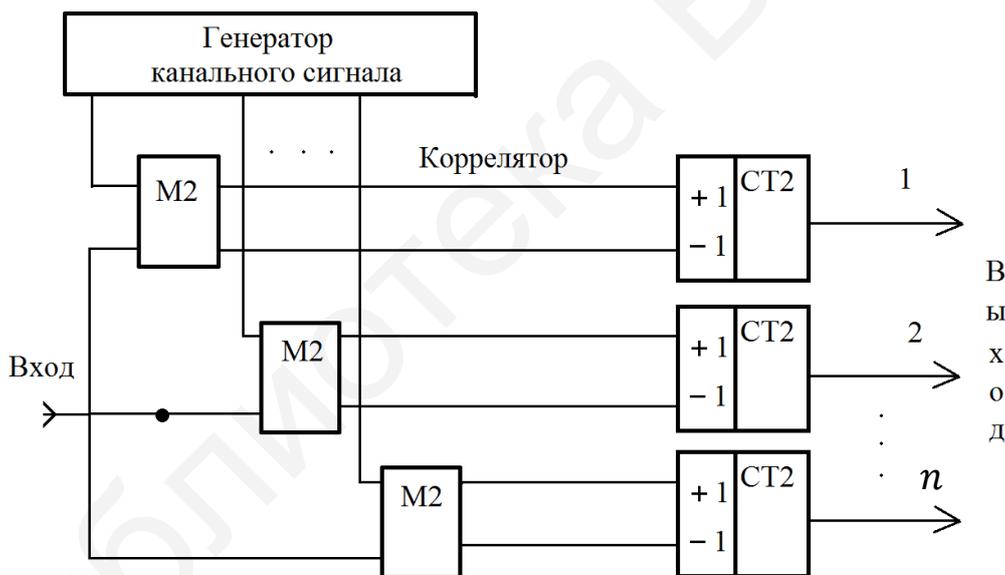


Рисунок 1.43 – Структурная схема устройства разделения каналов системы с мажоритарным уплотнением

Кодовые символы, полученные после поэлементного приема, поступают на набор из n_c каналных корреляторов, каждый из которых состоит из последовательно соединенных сумматоров по модулю два и реверсивного счетчика. На один вход каждого сумматора по модулю два поступают принимаемые кодовые символы, а на другой вход – символы каналного сигнала, используемого данным каналом. Символы с выхода сумматора по модулю два поступают на реверсивный счетчик, на суммирующий его вход поступают единицы, а на вычитающий – нули.

В момент окончания приема очередного информационного символа определяется знак накопленной суммы. Если накопленная величина положительна, то выносится решение о приеме информационного символа «1», а в противном случае – «0». Тем самым осуществляется операция, обратная операции уплотнения.

Следует отметить, что мажоритарное уплотнение каналов, основанное на использовании функций Уолша, псевдослучайных импульсных последовательностей и других дискретных поднесущих, обладающих свойствами ортогональности, позволяет получить высокую помехоустойчивость, скрытность работы, возможность одновременной работы многих систем в одном и том же диапазоне частот и др.

Произвольный порядок опроса источников при кодовом разделении каналов позволяет создавать адаптивные телеизмерительные системы.

1.6 Адаптивные телеизмерительные системы

Адаптивными телеизмерительными системами (АТИС) (лат. *adaptio* – приоровление, приспособление) называют такие системы, в которых сбор, обработка и передача информации автоматически изменяются в зависимости от изменения характеристик входных сигналов, внешних условий, состояния контролируемого объекта или других причин.

Развитие и применение адаптивных телеизмерительных систем обусловлено рядом факторов. Непрерывно возрастающие потоки измерительной информации при научных исследованиях, контроле технологических процессов, испытаниях различных объектов приводят к необходимости расширения полосы частот в канале связи, увеличению времени обработки измерительной информации при помощи ЭВМ, увеличению объема памяти запоминающих устройств. Все это увеличивает стоимость аппаратуры и затрудняет ее эксплуатацию, иногда существенно задерживает выдачу необходимой измерительной информации. В то же время не вся измерительная информация является одинаково ценной. По некоторым опубликованным данным [4] около 90 % расходов на получение и обработку измерительной информации в радиотелеметрических системах тратится на избыточную информацию. Поэтому одной из важнейших задач передачи телеметрической информации является сокращение избыточной измерительной информации, или более кратко – сжатие данных.

По функциональному признаку АТИС могут быть разнесены на следующие группы (рисунок 1.44): системы со сжатием данных, системы с самообучением, системы с перестраиваемой структурой. Системы со сжатием данных можно разделить на две группы: системы с уменьшением числа координат сообщения и системы с уменьшением объема каждой координаты. При достаточно высоких требованиях к точности измерений уменьшение объема каждой координаты, как правило, не дает существенного сжатия данных. Системы, основанные на сокращении числа координат, могут быть классифицированы по нескольким признакам. По принципу действия – алгоритму их работы – эти системы могут

быть разделены на следующие группы: системы с адаптивной коммутацией, системы с адаптивной дискретизацией, системы с рациональным построением телеметрического кадра, системы с автоматически регулируемой частотой равномерной дискретизации. В зависимости от наличия задержки в передаче измерительной информации системы могут быть разделены на две группы: системы, работающие в реальном масштабе времени, т. е. выдающие информацию практически без задержки; системы, выдающие информацию с задержкой, обусловленной наличием буферной памяти.

Системы с самообучением и перестраиваемой структурой в настоящее время почти не изучены.

Сокращение числа координат сообщения заключается в следующем. Измеряемая величина $x(t)$ аппроксимируется некоторой функцией $\bar{x}(t)$, обычно называемой базисной, иногда воспроизводящей, осуществляется сравнение $x(t)$ и $\bar{x}(t)$ в соответствии с принятым критерием верности. В моменты времени, в которые разность $x(t)$ и $\bar{x}(t)$ – погрешность аппроксимации – достигает максимального, еще допустимого значения, передаются координаты $x(t)$, являющиеся существенными (рисунок 1.45). По этим координатам в соответствии с принятой моделью $\bar{x}(t)$ на принимающей стороне реализуется восстановление непрерывной функции $x(t)$ по ее дискретным значениям, при этом погрешность аппроксимации не превосходит допустимого значения.

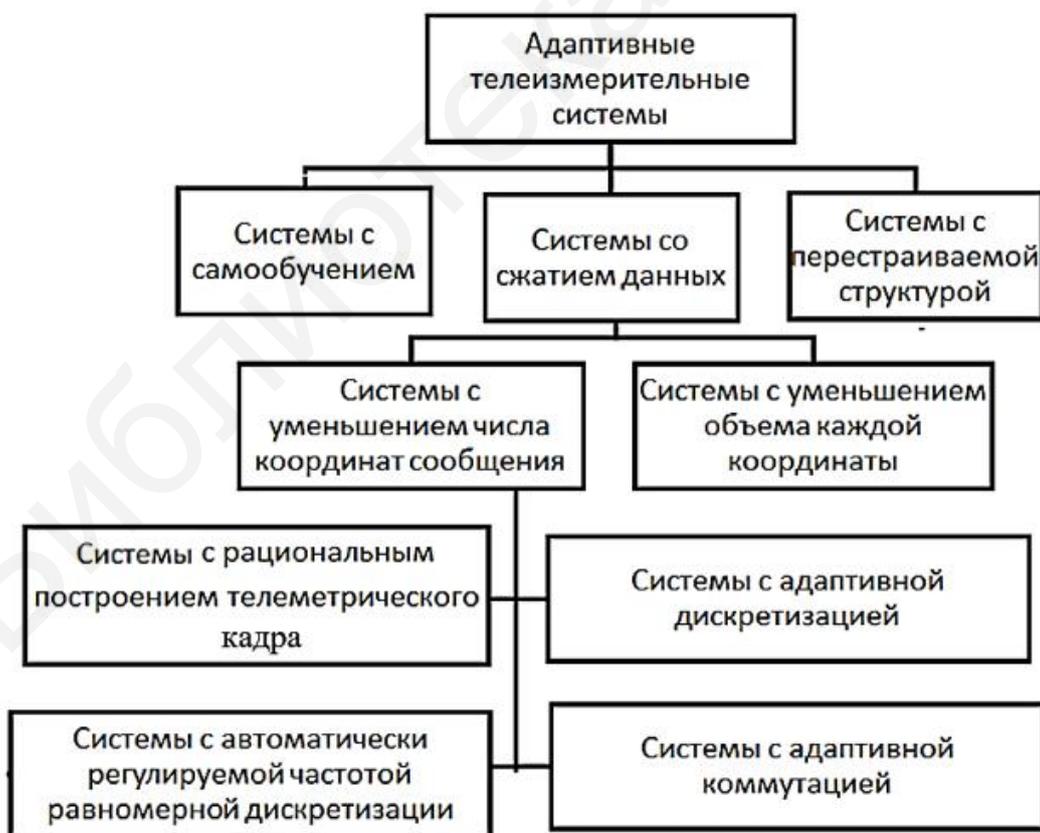


Рисунок 1.44 – Классификация адаптивных телеизмерительных систем

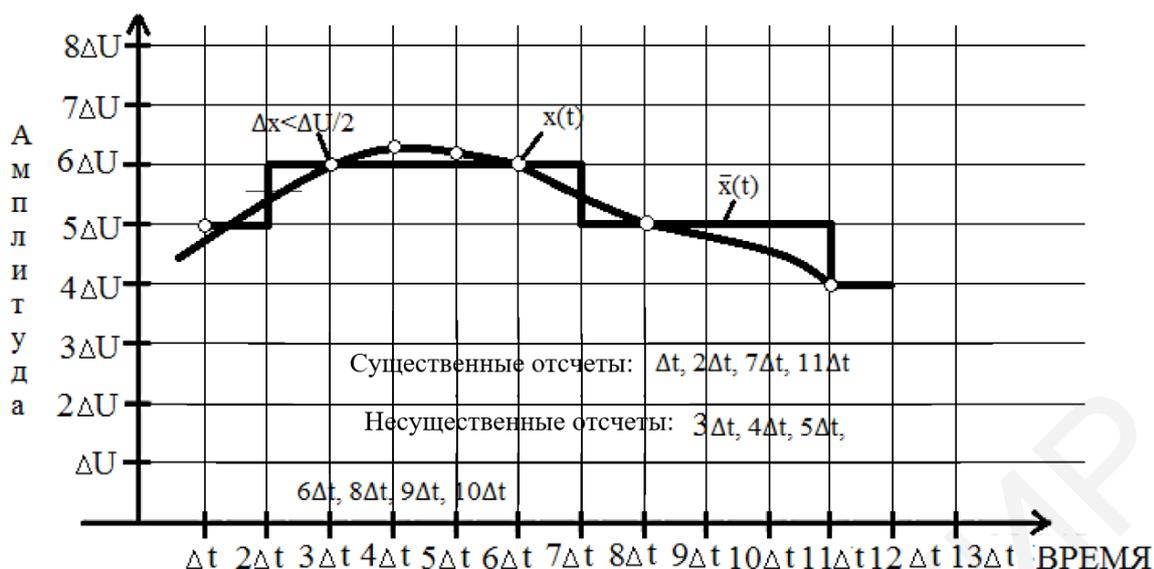


Рисунок 1.45 – График, поясняющий адаптивную дискретизацию

При оценке качества АТИС используются следующие критерии: конструктивные, метрологические, экономические.

Конструктивный критерий показывает техническую осуществимость данной системы. К нему относятся: число измерительных каналов при заданной пропускной способности линии связи, необходимая скорость передачи при заданном допустимом времени задержки, используемый способ сжатия информации и его техническая реализация, техническая возможность восстановления переданной информации на приемной стороне АТИС.

Число каналов зависит от используемого способа сжатия, и чем больше коэффициент сжатия, тем большее число каналов может иметь система:

$$N = \frac{\Delta F}{\Delta f_{\text{и}} + \Delta f_{\text{сл}}} \cdot K_c, \quad (1.64)$$

где ΔF – полоса частот линии связи;

$\Delta f_{\text{и}}$ и $\Delta f_{\text{сл}}$ – полоса частот, занимаемая измерительной и служебной информацией соответственно;

K_c – коэффициент сжатия.

Метрологический критерий показывает достижимую точность представления на выходе системы. К нему относятся: показатель верности, или критерий приближения к входной функции; значение погрешности представления информации и вероятность появления этой погрешности; значение дополнительной погрешности, появляющейся от введения устройств сжатия в многоканальной телеметрической системе; помехоустойчивость системы.

Экономический критерий показывает целесообразность введения адаптации, т. е. определяет экономический выигрыш от сжатия информации.

В дальнейшем основное внимание будет уделено передающим устройствам АТИС со сжатием данных, так как из-за введения адаптации приемная часть практически остается той же, что приведена и на рисунке 1.39 (см. пункт 1.5.3).

1.6.1 Телеметрические системы с адаптивной дискретизацией

Принцип действия систем с адаптивной дискретизацией заключается в исключении несущественных координат (см. рисунок 1.45 подраздела 1.6), что может быть реализовано с помощью специальных устройств – адаптивных временных дискретизаторов (АВД).

Структурная схема АТИС с цифровым АВД показана на рисунке 1.46. Устройство работает следующим образом. Входные сигналы от датчиков поочередно через коммутатор поступают на АЦП, где происходит преобразование аналогового сигнала в код.

Параллельный код входного сигнала сравнивается в цифровой схеме сравнения (СС) с кодом предыдущего отсчета, поступающего от многоканального запоминающего устройства (ЗУ), которое переключается блоком управления (БУ) вместе с коммутатором.

Если значение входного сигнала отличается от значения предыдущего отсчета на величину, превышающую порог срабатывания, который устанавливается в зависимости от заданной допустимой погрешности δ_{\max} , то СС выдает сигнал на схему запуска (СЗ) коммутатора и коммутатор останавливается на данной точке, одновременно открывается ключ (К) и цифровой эквивалент с АЦП подается в устройство защиты от ошибок (УЗО) и записывается новое значение в ЗУ. В УЗО кодовая комбинация кодируется в корректирующем коде и подается в блок считывания (БС). БС передает в линию связи синхрокод, адрес датчика с существенным отсчетом и цифровой эквивалент телеметрируемого параметра. После окончания передачи БС открывает СЗ и коммутатор опрашивает следующий датчик.

Если же значение отсчета входного сигнала не отличается от значения предыдущего отсчета, т. е. отсчет является избыточным, то СС не срабатывает, коммутатор не останавливается и через определенное время коммутатор подключает ко входу АЦП очередной датчик. При этом БС может передавать в линию связи специальный сигнал (маркер), свидетельствующий о том, что на данной позиции погрешность не достигла максимального значения. Подобным образом происходит опрос всех датчиков.

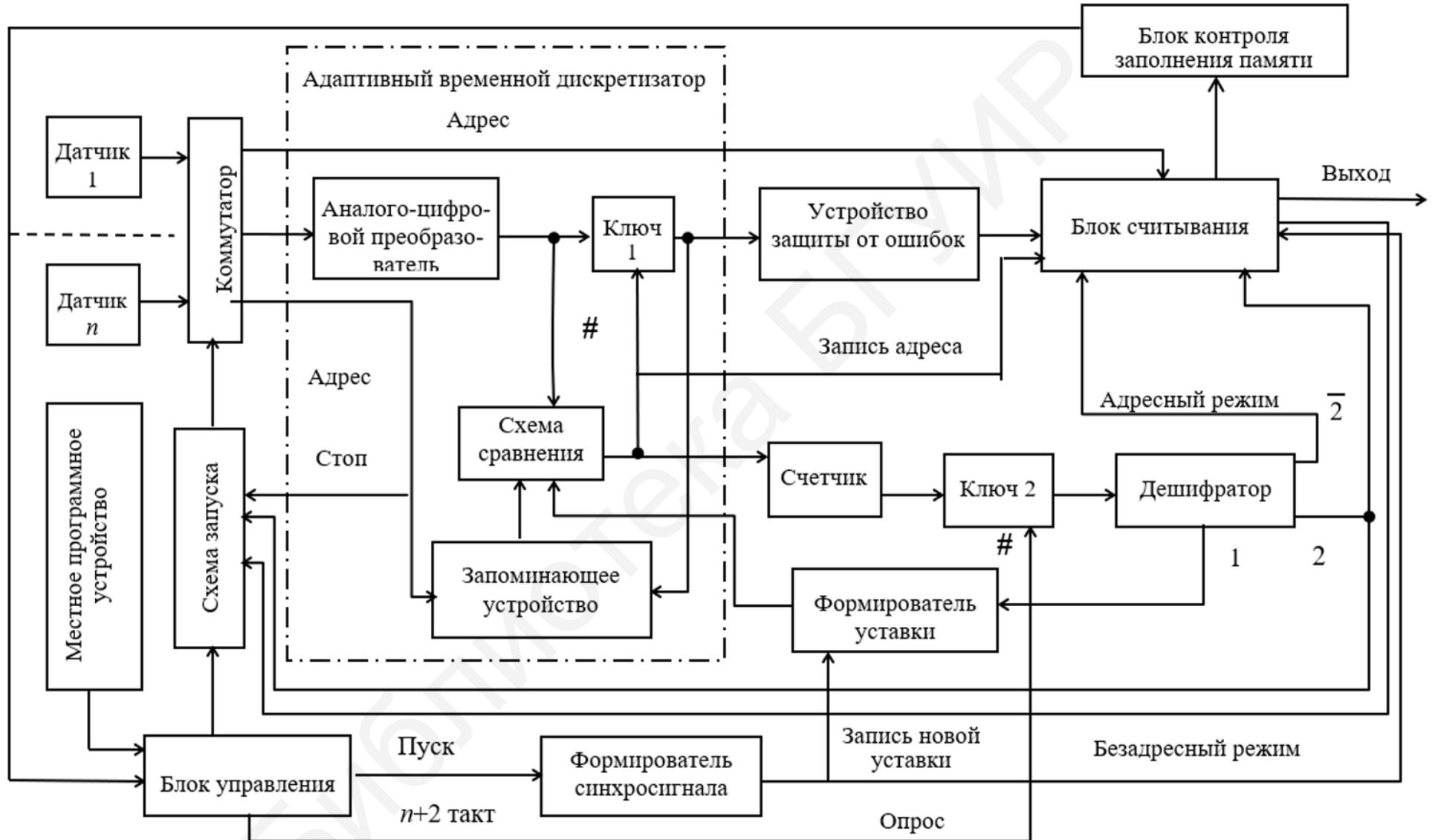


Рисунок 1.46 – Структурная схема КП телеметрической системы с адаптивной дискретизацией

При фиксированном значении допустимой погрешности аппроксимации, т. е. при фиксированном значении уставки, в устройстве возможно появление больших погрешностей аппроксимации, значительно превышающих допустимые, при появлении очереди из нескольких заявок.

Для исключения случаев появления аномальных погрешностей используется обратная связь по погрешности. Для осуществления обратной связи в устройстве предусмотрены счетчик, ключ 2, дешифратор и формирователь уставки. Счетчик подсчитывает число избыточных отсчетов, а опрос его производится на $n + 2$ такте БУ посредством открытия ключа 2. И если число, зафиксированное счетчиком, укажет на возможность появления аномальных погрешностей, дешифратор с выхода 1 выдаст сигнал на формирователь уставки, который устанавливает новый порог срабатывания схемы сравнения. Таким образом, в следующем цикле будут опрошены датчики, у которых погрешность будет наибольшей.

Так как параметры входных сигналов передаются вместе с их адресами, то при высокой активности входных сигналов (много избыточных отсчетов) адаптивная адресная передача может оказаться невыгодной. Например, передача всех параметров в одном цикле опроса вместе с адресами является, безусловно, менее рациональной, чем передача тех же параметров в определенном порядке без адресов. Для учета аналогичных ситуаций используется ранее рассмотренный счетчик с другим допустимым числом избыточных отсчетов, которое фиксируется дешифратором (выход 2).

В каждом цикле опроса коммутатора подсчитывается число избыточных отсчетов счетчиком и сравнивается с допустимым числом этих отсчетов (это условие выполняет дешифратор), рассчитанным из условия равенства объема сигнала при сжатии и при безадресной передаче без сжатия по заранее известной последовательности:

$$(\log N + \log M) \cdot \frac{N}{K_c} = N \log M, \quad (1.65)$$

где N – число измерительных каналов (источников сообщений);

M – число уровней квантования сигнала;

K_c – коэффициент сжатия по отсчетам за цикл опроса.

Из (1.65) можно получить значение коэффициента сжатия, при котором адаптивная и неадаптивная системы будут иметь одинаковую эффективность (граничный случай):

$$K_{c,гр} = \frac{\log N}{\log M} + 1. \quad (1.66)$$

При $K_c > K_{c,гр}$ эффективной будет адаптивная система с адресами, а при $K_c < K_{c,гр}$ большую эффективность будет иметь неадаптивная безадресная система.

В том случае, когда в каком-либо цикле опроса количество избыточных отсчетов достигает заданного, сигнал с выхода 2 дешифратора отключает разряды адреса в БС, открывается на один цикл схема запуска, осуществляется преобразование параллельного кода параметра в последовательный и передача его в канал связи. Таким образом происходит безадресная неадаптивная передача информации.

Одновременно с неадаптивной передачей в СС происходит сравнение кодов с АЦП и ЗУ и в счетчике подсчитывается число избыточных отсчетов за цикл опроса. Если число таких отсчетов оказывается меньше допустимого, то устройство в следующем цикле переходит в режим адаптивной работы с адресацией отсчетов. При этом возможен переход в режим с повышенным значением уставки.

Для правильной расшифровки информации на приемной стороне системы кроме кода адреса и параметра необходимо передавать информацию в виде определенной кодовой комбинации о том, какая будет передача – адресная или безадресная.

Учитывая, что длина цикла в зависимости от активности входных сообщений может меняться, то возможен вариант передачи кода конца цикла.

Для согласования характеристик входного потока сообщений с характеристиками канала связи возможна постановка буферного запоминающего устройства в БС. Известно, что погрешность телеметрической системы, ее быстродействие и полоса частот канала связи связаны следующей зависимостью:

$$\log M = T \Delta F \log(1 + P_c / P_{\text{ш}}), \quad (1.67)$$

где T – период дискретизации;

ΔF – полоса частот канала связи;

$P_c, P_{\text{ш}}$ – мощности соответственно сигнала и шума в канале.

Это выражение показывает, что при сохранении заданной погрешности уменьшение полосы частот канала связи приводит к увеличению периода дискретизации сигнала во времени, т. е. к уменьшению быстродействия. Это обстоятельство позволяет предложить самый простой способ сжатия по полосе частот канала связи, заключающийся в записи всей информации в буферное запоминающее устройство (БЗУ) со скоростью, соответствующей максимальной частоте дискретизации сигналов во времени. Считывание информации осуществляется при этом с меньшей скоростью в соответствии с полосой пропускания частот канала связи.

Обычно БЗУ имеет ограниченную емкость, поэтому в случае активности сразу многих каналов появляется опасность его переполнения. Чтобы не допустить этого, а следовательно, и потери информации, необходимо контролировать степень заполнения БЗУ. Такая операция осуществляется блоком контроля заполнения памяти (КЗП) путем постепенного определения разности между числом слов, записываемых в БЗУ и считываемых с него. Информация о степени заполнения БЗУ от блока КЗП поступает в блок управления (БУ), который в за-

висимости от степени заполнения БЗУ вырабатывает команды, изменяющие величину документов, хранимых в формирователе уставки (ФУ). Если БЗУ заполнено относительно мало, то уставка по всем каналам уменьшается, а число существенных выборок, поступающих в него, увеличивается. В случае быстрого заполнения БЗУ по команде с БУ уставка, хранимая в ФУ, увеличивается и поступление выборок в БЗУ уменьшается. Изменить уставку в одном или нескольких каналах можно и по команде, полученной от местного программного устройства (МПУ) или с пункта управления. Кроме того, блок управления по команде с ПУ или записанной программе может изменить порядок опроса или вообще отключить часть каналов.

Синхронизация по символам при приеме сообщений аналогична синхронизации в обычных цифровых системах телеизмерения (см. рисунки 1.34 в пункте 1.5.1 и 1.39 в пункте 1.5.3). Разделение на ПУ по словам осуществляется адресами, которыми снабжаются при сжатии выборки всех каналов. При этом структурная схема ПУ аналогична структурной схеме ПУ цифровой системы ТИ с кодовым разделением, приведенной на рисунке 1.39 (см. пункт 1.5.3), за исключением того, что информация после приема должна быть представлена в реальном масштабе времени. Сохранение такого масштаба осуществляется передачей времени, либо после каждой выборки, либо один раз за кадр с последующим восстановлением реального масштаба времени на ПУ по адресам каналов и импульсам синхронизации. В первом варианте для восстановления реального масштаба времени требуется дополнительная полоса радиоканала для передачи данных времени, во втором этого почти не требуется.

1.6.2 Телеметрические системы с адаптивной коммутацией

Принцип действия систем с адаптивной коммутацией заключается в следующем. Выбирается некоторая частота опроса измерительных каналов АТИС и при помощи специальных устройств – цифровых анализаторов активности сигналов (ЦААС) – определяется канал с наибольшей погрешностью. Значения измеряемой величины в этом канале и передаются на ПУ. Тактовая частота передачи измерительной информации по каналу связи остается постоянной, меньшей чем при равномерной временной дискретизации, этим и достигается сжатие данных. Сигналы измерительной информации каждого канала сопровождаются так называемой адресной посылкой, указывающей номер измерительного канала.

Структурная схема передающего устройства АТИС с адаптивной коммутацией и цифровым ЦААС приведена на рисунке 1.47.

Устройство работает следующим образом. По окончании считывания предыдущего отсчета БС выдает сигнал на БУ, разрешающий прохождение импульсов управления с БУ на коммутатор измерительных сигналов. Ко входу АЦП подключается первый измерительный канал, где преобразуется в цифровой эквивалент, который записывается в буферное запоминающее устройство (БЗУ), и одновременно поступает на один из входов цифровой схемы сравнения (СС). На второй вход этой схемы с ЗУ поступает цифровой эквивалент предыдущего значения.

Разностный цифровой сигнал, пропорциональный текущей погрешности, подается в блок выделения максимальной погрешности (БВМП). И в блоке памяти адресов (БПА) фиксируется код первого канала. При дальнейшем поступлении импульсов управления из БУ коммутатор опрашивает подряд все датчики.

Схема сравнения определяет текущие значения погрешностей, и их цифровые эквиваленты поступают по очереди на БВМП. Если цифровой эквивалент очередной погрешности превышает цифровой эквивалент погрешностей предыдущих каналов, то БВМП выдает импульс в БПА, в который записывается адрес данного канала.

По окончании опроса всех датчиков БУ производит опрос БПА. Адрес канала с максимальной погрешностью подается через ключ 2 в БЗУ и БС. Одновременно сигналом из БУ открывается ключ 1, через который из БЗУ поступит в УЗО кодовая комбинация измерительного канала, у которого максимальная погрешность. Закодированная кодовая комбинация в помехозащищенном коде поступает в БС. Блок считывания формирует кадр, т. е. передает в канал связи синхрокод, адрес датчика с максимальной погрешностью и его цифровой эквивалент. После чего по сигналу с БС начинается новый цикл. Если будет зафиксировано несколько каналов с одинаковой максимальной погрешностью, то в первую очередь будет опрошен канал с меньшим номером.

Достоинством данной схемы является то, что она может полностью быть реализована на элементах цифровой техники, а в случае применения микроконтроллеров позволит программными методами изменять частоту опроса датчиков, а также вводить обратную связь по погрешности и определять очередность передачи информации от измерительных каналов.

В общем случае адаптивная коммутация представляет собой способ изменения частоты опроса источников измерительных сообщений в соответствии со скоростью изменения входного сигнала.

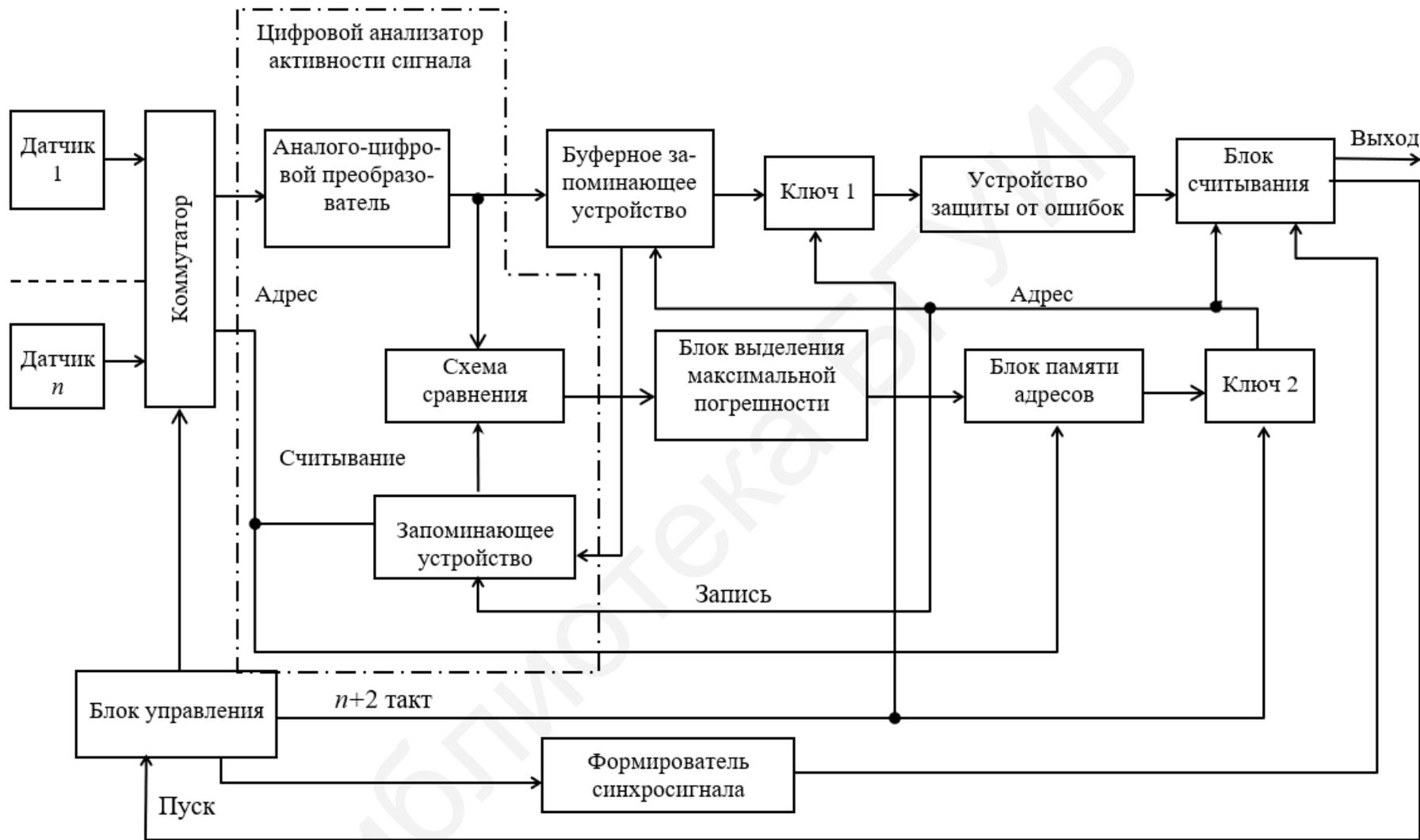


Рисунок 1.47 – Структурная схема КП телеметрической системы с адаптивной коммутацией

1.6.3 Телеметрические системы с автоматическим регулированием частоты опроса датчиков

Рассмотренную выше АТИС с адаптивной коммутацией целесообразно использовать в случае, когда входные сигналы системы некоррелированы, так как иначе возникают значительные дополнительные погрешности из-за ожидания в очереди, и уменьшение этих погрешностей требует принятия специальных мер (например, введения обратных связей), что усложняет систему. При сильной корреляции входных сигналов, т. е. в случае, если входные сигналы меняются одновременно, возможно использование метода автоматического регулирования частоты опроса датчиков, позволяющего получить сжатие по отсчетам при меньших аппаратных затратах.

Структурная схема КП телеметрической системы с автоматическим регулированием частоты опроса датчиков приведена на рисунке 1.48.

В данном устройстве все каналы опрашиваются поочередно друг за другом по сигналам блока управления через коммутатор. Частота опроса определяется синтезатором частот. Входные сигналы от датчиков поочередно поступают на АЦП, где происходит преобразование аналогового сигнала в k -разрядный код. Параллельный код входного сигнала сравнивается в цифровой схеме сравнения с кодом предыдущего отсчета своего канала, поступающего от многоканального запоминающего устройства.

Если значение входного сигнала отличается от значения предыдущего отсчета на величину, превышающую порог срабатывания, который определяется допустимой погрешностью, то на входе СС появляется логическая единица, которая поступает в счетчик. Таким образом, за полный цикл в счетчике будет зафиксировано число избыточных отсчетов. Кодовая комбинация с выхода АЦП в параллельном виде поступает в УЗО и одновременно через ключ 2, который управляется импульсами от БУ, записывается в многоканальное ЗУ и будет участвовать в сравнении в следующем цикле. Кодовые комбинации, закодированные в помехозащищенном коде, из УЗО поступают в БС, где преобразуются в последовательный код и совместно с синхросигналом поступают в передатчик. После окончания передачи информации от всех каналов БС запускает БУ и цикл повторяется. Блок управления после преобразования информации от всех каналов через ключ 1 опрашивает счетчик избыточных отсчетов. Дешифратор выдает пропорциональный записанному в счетчике числу сигнал на синтезатор частот, который изменяет частоту тактовых импульсов (скорость опроса датчиков). Таким образом, частота опроса датчиков зависит от суммарной допустимой погрешности по всем каналам.

Применяя в данных устройствах микроконтроллеры, можно реализовать любой алгоритм автоматического регулирования частоты опроса датчиков: по максимальной погрешности, по наиболее быстро изменяющимся входным сигналам, по суммарной погрешности и т. д.

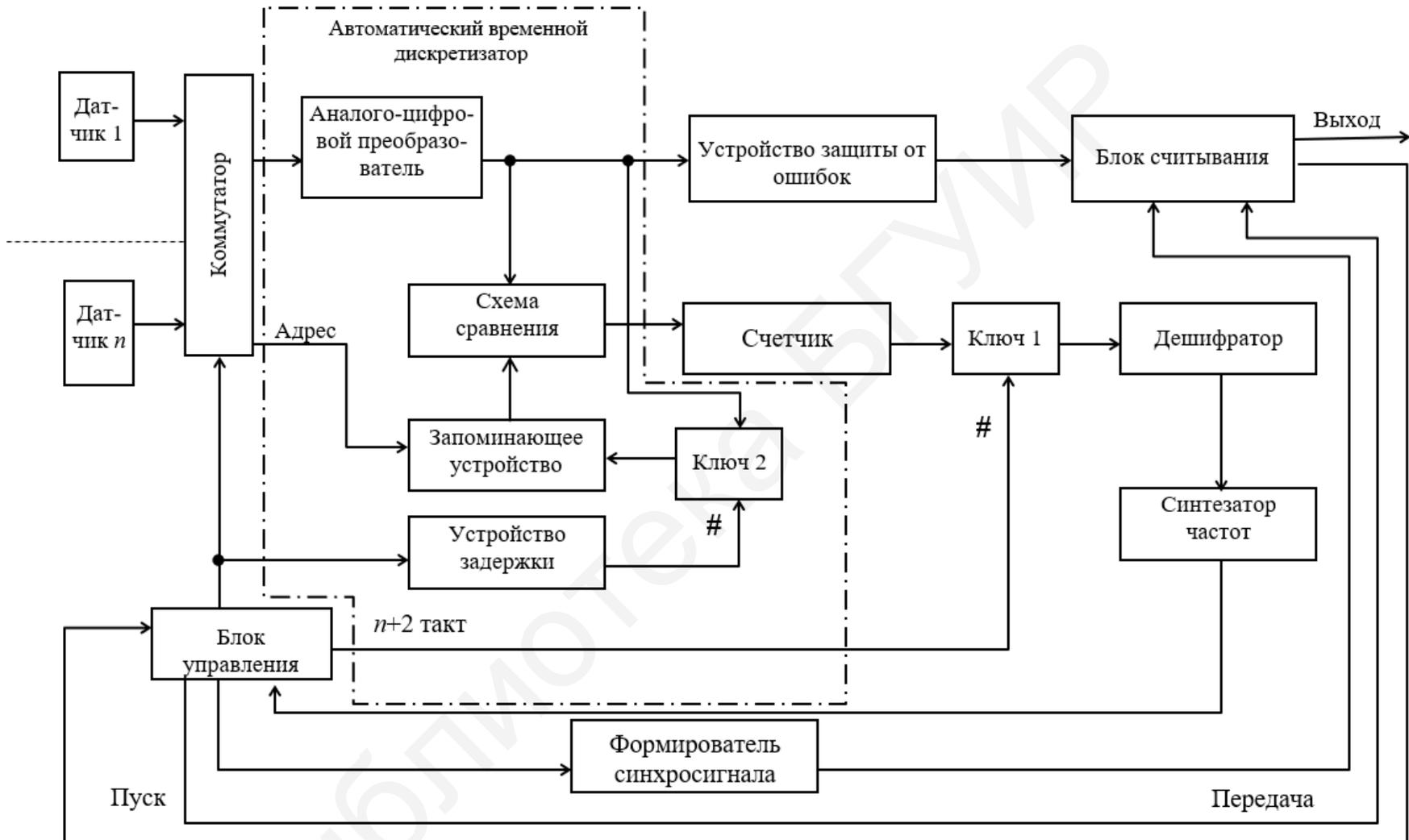


Рисунок 1.48 – Структурная схема КП телеметрической системы с автоматическим регулированием частоты опроса датчиков

1.6.4 Телеметрические системы с рациональным построением телеметрического кадра

Рассмотрим телеметрическую систему с сокращением количества информации не за счет предварительного вычисления погрешности аппроксимации, а за счет рационального построения телеметрического кадра. Данное устройство позволяет передать код параметра и коды адресов тех датчиков, сигналы которых в данный момент равны между собой, с погрешностью, определяемой квантованием сигнала по уровню, в одном телеметрическом кадре.

Структурная схема КП системы с рациональным построением телеметрического кадра представлена на рисунке 1.49.

Устройство работает следующим образом. По сигналу с БУ входные параметры поступают через коммутатор на АЦП, где происходит их преобразование в код. Код входного параметра сравнивается с кодом этого же параметра в предыдущей точке отсчета, записанного в ЗУ. Если абсолютное значение разности данного и предыдущего отсчетов меньше шага квантования, то СС закрывает ключ и не пропускает текущую кодовую комбинацию на вход буферной памяти (БП). Если эта разность оказывается больше шага квантования, то текущая кодовая комбинация передается в БП. Таким образом осуществляется адаптивная дискретизация входных сигналов и все избыточные отсчеты записываются в БП. Далее, с одного из выходов БУ поступает сигнал на анализатор сигналов (АС), разрешающий сравнение кодов всех входных параметров, записанных в БП, между собой. Предположим, что сравнение начинается с кодовой комбинации параметра первого канала. Эта кодовая комбинация сравнивается с кодовыми комбинациями всех других каналов, и если такая же кодовая комбинация встречается в одном или нескольких других каналах, то АС последовательно выдает сигнал для формирования кодов адресов каналов, которым принадлежит рассматриваемая кодовая комбинация. По окончании формирования кода адреса последнего канала, входящего в эту группу каналов, в БП от блока памяти адресов (БПА) подается сигнал считывания данной кодовой комбинации, которая вслед за кодами адресов каналов, соответствующих этой кодовой комбинации, через формирователь кадра поступает в БС. При отсутствии кодовой комбинации данного канала в остальных каналах БПА выдается сигнал на формирование кода адреса только данного канала, а измерительная кодовая комбинация подмешивается к коду вышеуказанным способом.

Затем производится анализ кодовой комбинации второго канала с кодовыми комбинациями остальных каналов и т. д. Учитывая, что устройство работает в относительном масштабе времени, в начале каждого телеметрического кадра передается кодовая комбинация текущего времени.

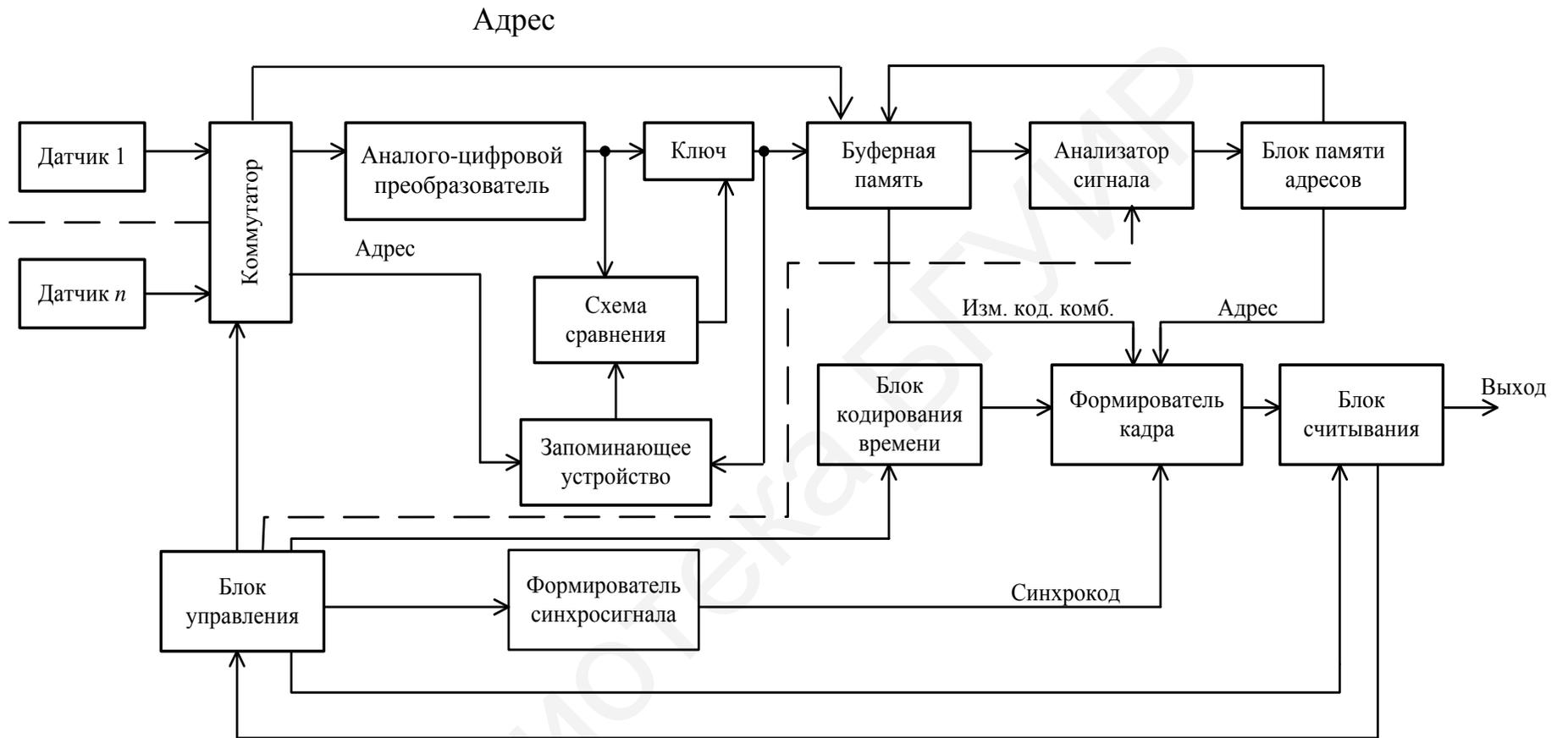


Рисунок 1.49 – Структурная схема КП телеметрической системы с рациональным построением телеметрического кадра

В работе рассматриваемого передающего устройства можно выделить два граничных случая:

– мгновенные значения сигналов датчиков в одном телеметрическом кадре одинаковы. При этом будет достигнута максимальная эффективность, так как будут переданы все номера датчиков и лишь один код параметра;

– мгновенные значения сигналов датчиков распределены по всем возможным уровням квантования. Эффективность передающего устройства в этом случае минимальна.

Определим коэффициент сжатия для граничных случаев по числу двоичных знаков, передаваемых устройством за все время работы. Введем следующие обозначения: M – число уровней квантования; N – число датчиков; m – число разрядов кода параметра ($m = \log M$); n – число разрядов кода номера датчика ($n = \log N$).

Число двоичных знаков в одном телеметрическом кадре, передаваемых неадаптивной адресной многоканальной телеметрической системой, определяется выражением

$$H = N(m + n). \quad (1.68)$$

Для рассматриваемой адаптивной системы минимальное число двоичных знаков, получающихся в первом граничном случае, будет

$$H_{\text{ад min}} = m + nN. \quad (1.69)$$

Максимальное число двоичных знаков для рассматриваемой адаптивной системы (второй граничный случай) при $M < N$ определяется выражением

$$H_{\text{ад max}} = mM + nN. \quad (1.70)$$

Коэффициент сжатия данных определяется отношением числа двоичных знаков в неадаптивной системе к числу двоичных знаков в адаптивной системе и изменяется в этом случае от

$$K_{\text{с min}} = \frac{H}{H_{\text{ад max}}} = \frac{N(m + n)}{mM + nN} \quad (1.71)$$

до

$$K_{\text{с max}} = \frac{H}{H_{\text{ад min}}} = \frac{N(m + n)}{m + nN}. \quad (1.72)$$

Если все сигналы датчиков независимы и имеют равномерное распределение мгновенных значений, то среднее число различных уровней квантования, передаваемых в одном телеметрическом кадре, будет равно [4]

$$M_{\text{ср}} = M(1 - e^{-N/M}). \quad (1.73)$$

Среднее число двоичных знаков в одном кадре рассматриваемой ТИС:

$$H_{\text{ад ср}} = mM_{\text{ср}} + nN. \quad (1.74)$$

При этом коэффициент сжатия информации

$$K_c = \frac{\log MN}{\frac{M}{N}(1 - e^{-N/M}) \log M + \log N}. \quad (1.75)$$

Анализ выражения (1.75) показывает, что для получения высоких коэффициентов сжатия информации необходимо сочетание методов рационального построения телеметрического кадра и адаптивной дискретизации в каждом канале (см. рисунок 1.49).

1.6.5 Использование сжатия данных для улучшения характеристик телеметрических систем

В системах ТИ сжатие данных не является самоцелью, а применяется для улучшения какой-либо характеристики. Наибольшее распространение получили уменьшение полосы частот в канале связи, уменьшение расхода энергии, необходимой для передачи измерительной информации, повышение помехоустойчивости.

В ряде случаев погрешность, обусловленная шумами канала связи, является доминирующей, поэтому вопросы повышения помехоустойчивости становятся первостепенными. Это относится в первую очередь к радиотелеметрическим системам, в частности космическим, в которых энергетические ограничения должны учитываться прежде всего. Для таких систем повышение помехоустойчивости – это выигрыш в дальности действия и в габаритах источников питания, повышение достоверности передаваемых данных и экономический эффект [4].

Возможными путями для использования сокращения избыточности с целью повышения помехоустойчивости систем телеизмерения могут быть следующие: регулирование пиковой мощности передатчика при сохранении средней мощности или средней потребляемой энергии; изменение параметров модулятора либо переход на более помехоустойчивый вид модуляции; целенаправленное введение временной избыточности после сокращения избыточности первоначального сигнала.

2 ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ И ТЕЛЕСИГНАЛИЗАЦИЯ

2.1 Основные понятия

Согласно ГОСТ 26.005–82 телеуправление (ТУ) – управление положением или состоянием дискретных объектов и объектов с непрерывным множеством состояний методами и средствами телемеханики. Телеуправление подразделяется на двухпозиционное и многопозиционное.

Двухпозиционное телеуправление – телеуправление объектами, имеющими два возможных состояния.

Многопозиционное телеуправление – телеуправление объектами, имеющими более двух возможных состояний.

Для выполнения телеуправления согласно ГОСТ 26.005–82 могут быть использованы следующие приказы:

1 Команда телеуправления – телемеханическое сообщение, передаваемое с пункта управления на контролируемые пункты и вызывающее изменение положения или состояния объектов.

2 Групповая команда телеуправления – команда телеуправления, адресованная нескольким объектам одного контролируемого пункта.

3 Циркулярная команда телеуправления – команда телеуправления, адресованная объектам нескольких или всех контролируемых пунктов телемеханической системы.

4 Команда-инструкция – команда телеуправления, передаваемая с пункта управления на контролируемые пункты оперативному персоналу, где она выводится на устройства отображения в виде стандартных инструкций.

5 Телемеханическая команда опроса – телемеханическое сообщение, требующее от контролируемого пункта передачи информации о состоянии объектов.

6 Телесигнализация (ТС) – получение информации о состоянии контролируемых и управляемых объектов, имеющих ряд возможных дискретных состояний, методами и средствами телемеханики (ГОСТ 26.005–82).

В связи с этим устройства телеуправления обычно совмещаются с устройствами телесигнализации и называются устройствами ТУ-ТС. К исключениям относятся, например, устройства ТУ строительными и другими кранами со зрительным контролем, заменяющим ТС и системы циркулярной передачи команд по силовой сети.

При ТУ промышленными объектами во многих случаях передаются простейшие двухпозиционные дискретные команды типа «включить», «выключить» либо «прибавить», «убавить» (давление, расход, напряжение, уровень и т. д.). Такие же простейшие сигналы передаются и при телесигнализации, например, «включен» или «отключен» данный объект.

2.1.1 Требования, предъявляемые к устройствам ТУ-ТС

К устройствам ТУ-ТС предъявляются следующие требования:

1 Операция ТУ обязательно должна сопровождаться ответной телесигнализацией, которая используется для контроля правильности выполнения операции ТУ.

2 Посылка приказа ТУ должна состоять как минимум из двух операций: подготовительной (выбор объекта) и исполнительной (посылка команды исполнения на управляемый объект).

3 Любое одно- или двукратное искажение сигнала при ТУ или повреждение любого элемента должно сопровождаться защитным отказом, т. е. при этом не допускается исполнение ложных приказов.

4 Исполнение приказов не должно происходить при повреждении канала связи в спокойном состоянии системы или в процессе передачи.

5 Выход из строя канала связи, а также потеря питания системы не должны приводить к ложным приказам и должны сигнализироваться на ПУ; канал связи должен непрерывно контролироваться.

6 Посылка приказов ТУ должна производиться методом спорадической передачи; передача ответной ТС допускается как спорадическим, так и циклическим методом.

7 В случае нарушения приема известительной ТС на ПУ схема должна обеспечивать повторные передачи с КП на ПУ до тех пор, пока эти сигналы не будут сквитированы дежурным персоналом ПУ.

8 Приказы ТУ, не выполняемые по каким-либо причинам, не должны запоминаться на КП. Для их выполнения необходим повторный запуск устройства с ПУ.

9 Должно быть предусмотрено предпочтение известительной ТС перед посылкой приказа ТУ.

10 Сигналы, возникающие на КП во время повреждения устройства либо канала связи, при передаче других сигналов должны запоминаться и затем при ликвидации повреждений либо окончании передачи других сигналов автоматически передаваться на ПУ.

11 Приход каждого известительного сигнала на ПУ должен сопровождаться общим вызывным сигналом (звуковым или световым), квитируемым вручную.

12 Одна исполнительная операция ТУ предназначена, как правило, для одного объекта управления. Фиксация приема только одного приказа является дополнительной гарантией его правильности. В отдельных, особых случаях система должна допускать возможность циркулярного управления, т. е. передачу приказов нескольким объектам одной исполнительной операцией ТУ.

По быстрдействию устройства ТУ-ТС разделяются на группы: со временем передачи команды до 1 с – первая группа, до 4 с – вторая группа, более 4 с – третья группа.

По помехоустойчивости системы ТУ-ТС подразделяются на три категории (ГОСТ 26.205–88). Требования к достоверности контрольной и управляющей информации приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Требования к достоверности контрольной и управляющей информации

Вероятностные характеристики	Вероятность события Р, не более		
	Категория систем		
	1	2	3
Вероятность трансформации команды ТУ	10^{-14}	10^{-10}	10^{-7}
Вероятность трансформации сообщений ТС	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
Вероятность образования ложной команды или контрольного сообщения	10^{-12}	10^{-7}	10^{-4}

2.1.2 Виды команд

Команды подразделяются на следующие виды:

- однопозиционные – «включить» или «отключить»;
- двухпозиционные – «включить» и «отключить»;
- трехпозиционные – «прибавить», «убавить» и «стоп», воздействующие во многих случаях на уставки автоматических регуляторов и называемые телерегулированием;

- многопозиционные – передача значения телеуправляемого параметра в аналоговой или дискретной форме (например, открыть на 35 % затвор ирригационного канала). Передача таких команд получает более широкое применение и осуществляется главным образом путем спорадических адресных передач кодовыми комбинациями, содержащими адрес и текст для объекта управления. Они называются многопозиционными кодовыми комбинациями и относятся к телерегулированию;

- спорадические – передаются по мере возникновения необходимости их передачи. Такие команды составляют подавляющее большинство в промышленной телемеханике;

- циклические – повторение передачи одной команды в течение ряда циклов до прихода известительных сигналов. Такие команды реализуются в циклических системах с временным разделением сигналов. Каждому сигналу при этом отводится свой временной интервал;

- в зависимости от источников – команды, формируемые диспетчером (оператором), управляющим устройством и ЭВМ;

- по методу разделения сигналов – временные, частотные и кодовые.

2.2 Методы телеуправления

В телемеханике применяют следующие методы управления: двухступенчатый, иерархический, многоступенчатый, циркулярный и метод циклического опроса.

При двухступенчатом процессе управления диспетчер сначала осуществляет подготовительную операцию – выбирает с помощью индивидуального ключа требуемый объект управления. Далее осуществляет исполнительную операцию – посылает команду «включить» или «отключить» на объект управления при помощи индивидуального либо общего ключа (кнопки). Двухступенчатость управления уменьшает вероятность неправильной посылки команды из-за поспешности, рассеянности или просто ошибки диспетчера. В системе должна быть предусмотрена сигнализация о выбранном объекте либо местная, либо поступившая с КП и подтверждающая выполнение подготовительной операции.

Принцип иерархичности основан на разделении информации управления по определенным уровням, что позволяет создать многоступенчатые системы ТУ-ТС.

Информация, возникающая в каждой ступени, почти полностью замыкается в пределах этой ступени, и лишь часть ее передается на следующую ступень. В центральный диспетчерский пункт (ЦДП) поступают лишь некоторые характерные обобщающие показатели и данные о работе нижних ступеней управления. Самым нижним рангом является местная автоматика, которая может самостоятельно воздействовать на объект. В то же время наиболее важная информация передается непосредственно в ЦДП. В свою очередь, из ЦДП на нижестоящие ступени управления поступают команды обобщающего характера, типа заданий, которые конкретизируются на месте.

Циркулярное управление характеризуется одновременной передачей в течение одного цикла многих команд, т. е. осуществляется управление многими объектами. Причинами этого могут быть условия технологического процесса или необходимость сокращения времени управления, т. е. увеличение быстродействия. Однако в большинстве случаев для обеспечения надежности управления за один цикл посылается команда только одному объекту. При этом достаточно просто осуществляется контроль над достоверностью принятого сообщения (по числу информационных импульсов).

При циклическом опросе диспетчер может послать команду на КП, с которого поочередно будет передаваться информация о состоянии всех или группы объектов. В системах телемеханики для рассредоточенных объектов такая связь может осуществляться с одним КП, несколькими или со всеми. Циклический опрос может производиться спорадически (по мере необходимости) или автоматически. Причем как КП, так и объекты на них могут подключаться поочередно или по заданной программе.

2.3 Виды и методы сигнализации

Различают следующие виды сигнализации:

1 Сигнализация о состоянии объектов и системы. Такая сигнализация имеет место как в устройствах ТС, предназначенных для сигнализации, так и в системах ТУ-ТС. Она может осуществляться либо автоматически, либо по вызову диспетчера. Кроме сигнализации о состоянии объектов в системе предусматривается сигнализация об исправной работе отдельных устройств аппаратуры ДП, КП и линии связи.

2 Сигнализация, подтверждающая выполнение команд ТУ, или так называемая известительная сигнализация. Эта сигнализация может подтверждать как промежуточное исполнение команды, связанное с включением ряда устройств, предшествующих переключению объекта, так и извещать об изменении состояния непосредственно объекта.

3 Сигнализация о выходе измеряемого параметра за заранее установленные пределы (предупредительная сигнализация). Сюда же можно отнести аварийную сигнализацию – когда сигнализируется появление аварийной ситуации на контролируемом объекте.

Согласно ГОСТ 26.005–82 воспроизведение дискретных сообщений при ТС должно обеспечиваться по методу «темного» либо «светлого» щита.

Сигнализация по методу «светлого» щита означает, что зажженная лампочка на щите будет гореть до тех пор, пока объект включен. Если все объекты включены, то все индикаторы светятся. Это может создать неудобства для диспетчера в случае большого числа объектов. От этого недостатка свободна сигнализация по методу «темного» щита, при которой о положении объекта судят не по индикаторной лампочке, которая обычно погашена, а по положению ключа. Индикатор светится лишь при изменении состояния объекта. Например, приходит сигнал, извещающий об изменении положения 4-го объекта. При этом начинает светиться индикатор 4-го объекта и подается акустический сигнал. Возникает состояние несоответствия между новым состоянием объекта и положением ключа, который повернут в положение, соответствующее предшествующему состоянию объекта. Диспетчер переводит ключ в положение, соответствующее новому состоянию объекта, индикатор гаснет и прекращается подача акустического сигнала.

Следует отметить, что телесигнализация может осуществляться либо спорадически (при изменении состояния объекта или по желанию диспетчера), либо циклически.

2.4 Классификация объектов управления и устройств ТУ-ТС

Объекты управления делятся на сосредоточенные и рассредоточенные, двухпозиционные и многопозиционные. Кроме того, имеются объекты управления, требующие непрерывного ТУ.

Стационарные объекты телемеханического управления и контроля могут быть либо расположены в одном пункте (производственном сооружении), либо разбросаны поодиночке или небольшими группами по площади или вдоль общей

линии связи. Телемеханическую систему, обслуживающую объекты первого типа, называют системой с сосредоточенными объектами; система второго типа называется системой с рассредоточенными объектами. Сосредоточенные объекты типичны, например, для электростанций и подстанций.

Примером системы с рассредоточенными объектами может служить телеуправление насосными установками на нефтепромыслах.

Двухпозиционные объекты могут находиться в одном из двух состояний: включенном или отключенном. Многопозиционные объекты могут иметь большое количество фиксированных положений. К таким объектам относятся различные задвижки, а также щиты в водовыпусках ирригационных систем. ТУ этими объектами осуществляется путем передачи соответствующего количества команд на установку в заданную позицию.

Ряд объектов управления, например узлы настройки различных автоматических регуляторов и рули управления подвижными системами, требуют установки их в любое положение из заданного диапазона. Управление настройкой автоматических регуляторов производится организацией непрерывного канала ТУ с передачей команд «больше» или «меньше» и с контролем при помощи систем телеизмерений.

В силу того что методы построения систем телеуправления и телесигнализации аналогичны и функции ТУ и ТС выполняются, как правило, общими установками, в дальнейшем системы ТУ и ТС будем рассматривать обобщенно с выделением лишь элементов, специфичных для ТУ и ТС.

Классификация устройств ТУ-ТС по методам передачи, режимам передачи, кодам и методам защиты приведена на рисунке 2.1.

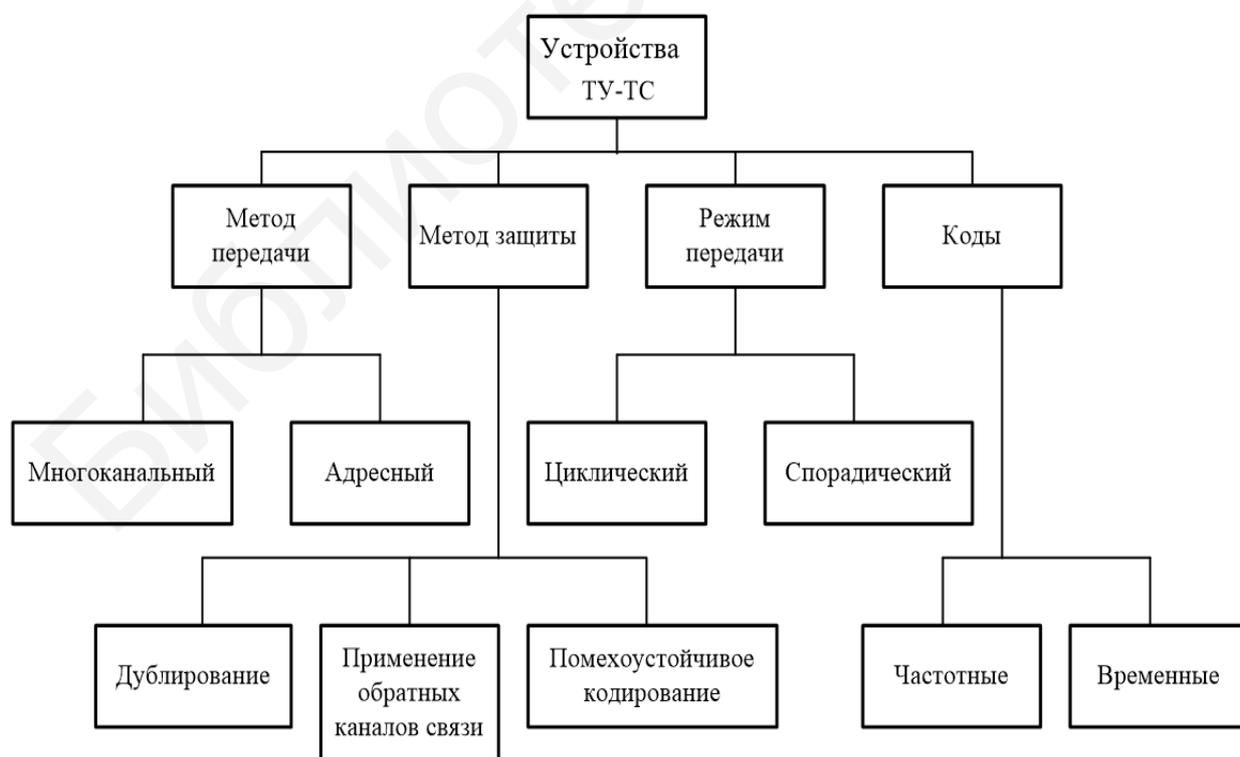


Рисунок 2.1 – Классификация устройств ТУ-ТС

2.5 Методы разделения и избирания сигналов

Разделение сигналов – это обеспечение независимой передачи и приема многих сигналов по одной линии связи или в одной полосе частот, при котором сигналы сохраняют свои индивидуальные свойства и не искажают друг друга. В массовых системах ТУ-ТС в подавляющем большинстве случаев используются только четыре основных метода разделения сигналов: частотный, частотный кодовый, временной циклический и временной кодовый (цифровой).

Избирание сигналов (селекция) – выбор данного сигнала из многих других для обеспечения адресной передачи. Разделение и избирание – понятия, близкие друг другу. Они характеризуют две стороны вопроса передачи сигналов и предназначаются для придания сигналу таких отличительных свойств, с помощью которых можно обеспечить, во-первых, передачу многих сигналов по одной линии связи и, во-вторых, адресную передачу сигналов объектам. Таким образом, условно можно считать, что разделение сигналов больше относится к линии связи, тогда как избирание – к объекту.

Выбор метода разделения сигналов в устройствах ТУ-ТС необходимо производить в соответствии с теорией кодирования, помехоустойчивости и эффективности передачи. Выбор должен подтверждаться расчетами.

С учетом изложенного выше ограничимся рассмотрением только особенностей разделения сигналов ТУ-ТС при частотном, частотном кодовом, временном и кодовом (цифровом) разделении сигналов, тем более что в связи с развитием микропроцессорной техники существует тенденция перехода к передаче команд телеуправления кодовыми (цифровыми) комбинациями с адресом и текстом команды. Передача команды во многих случаях осуществляется в несколько этапов, а телесигнализация передается за время передачи команды от многих объектов ТС, например, многоканальным методом с временным разделением сигналов. В общем случае **многоканальной** называется передача, в которой каждому объекту (источнику) выделен индивидуальный канал с временным или частотным разделением.

2.6 Частотное разделение сигналов

Частотное разделение сигналов характеризуется тем, что передача команд по одной линии связи осуществляется за счет частотного уплотнения, при котором образуются параллельные каналы. Упрощенная функциональная схема устройства ТУ-ТС с частотным методом избирания приведена на рисунке 2.2.

Принцип работы рассмотрим на конкретном примере. Пусть необходимо включить объект 1. Диспетчер замыкает ключи $SB3$ и $SB1$. При этом в линию связи через сумматор и линейный блок (ЛБ) поступают два сигнала с частотами $f1$ и $f3$. Первый несет на себе исполнительную, а второй – адресную команду. Сформированная команда высвечивается устройством индикации. Принятый из линии связи сигнал, усиленный в ЛБ, разделяется полосовыми фильтрами ПФ1 и ПФ3, затем преобразователями П1 и П3 производится преобразование радиоимпульсов в видеоимпульсы, которые через согласующие формирователи $F1$ и $F3$ поступают на схемы И1, И3 и И1, И2 соответственно. Так как совпадение двух сигналов проис-

ходит на входе схемы И1, то выходной сигнал с И1 воздействует на выходной исполнительный элемент ВИЭ1 (вход S), и последний включает объект 1. Датчик сигнализации ДС1 включает генератор G5, и в линию связи поступает сигнал о включении объекта 1. Канал связи для ТС по составу аппаратуры аналогичен каналу связи ТУ. Состояние объекта сигнализируется индикатором ИИ1. В данном устройстве сигнализация осуществляется по методу «светлого» щита.

Сигналы о состоянии объекта могут посылаются по той же линии связи, что и сигналы ТУ, но для этого необходимо, чтобы их частоты были различными.

Количество сигналов ТУ и ТС зависит от числа объектов и их позиционности, метода управления и избирания.

При циркулярном управлении и небольшом количестве объектов (рисунок 2.3, а) количество частотных посылок определяется из выражения $n_{\text{ч}} = N_{\text{об}} + 2$.

Увеличения количества команд при циркулярных методах управления можно достичь, применяя групповой выбор (рисунок 2.3, б). Общее число объектов ТУ-ТС определяется произведением количества групп $n_{\text{ч.гр}}$ на количество объектов в группе $n_{\text{ч.об}}$, т. е. $N_{\text{об}} = N_{\text{гр}} N_{\text{об.гр}}$, а общее число частотных импульсов

$$n_{\text{ч}} = n_{\text{ч.гр}} + n_{\text{ч.об}} + 2.$$

Включить	$f1$
Об.1	$f3$
Об.2	$f5$
Об.3	$f7$

a

Отключить	$f2$
Об.1	$f3$
Об.2	$f5$
Об.3	$f7$

Включить	$f1$
группа 1	$f3$
объект 1	$f5$
объект 2	$f6$
объект 3	$f7$

б

Включить	$f1$
группа 2	$f4$
объект 1	$f5$
объект 2	$f6$
объект 3	$f7$

a – при небольшом количестве объектов;
б – при разделении на группы

Рисунок 2.3 – Структуры сигналов при циркулярном управлении объектами

Максимальная информационная емкость частотных устройств ТУ-ТС ограничивается сравнительно небольшим числом объектов, что вызвано трудностями реализации узкополосных избирателей. Поэтому в частотных устройствах ТУ-ТС с относительно большой информационной емкостью каждому сигналу ТУ (ТС) выделяется не индивидуальная частота, а комбинация нескольких частот, при этом частоты могут передаваться одновременно или поочередно. Для таких систем могут применяться частотные коды, рассмотренные в [2].

Структурные схемы ПУ и КП системы с частотным кодовым разделением и избиранием приведены на рисунках 2.4 и 2.5 соответственно.

Образование частотной кодовой комбинации, соответствующей определенной команде, производится шифрованием операции и адреса объекта, блоком генераторов, ключами и сумматорами при замыкании соответствующих выключателей клавиш на пульте диспетчера. При этом информация о сформированной команде высвечивается на устройстве индикации. На КП радиоимпульсы, выделенные полосовыми фильтрами, преобразуются в видеоимпульсы преобразователями, которые представляют собой амплитудные детекторы совместно с пороговыми элементами и селекторами импульсов по длительности. Декодирование производится дешифраторами операций и адреса объекта.

Сигналы с выходов дешифраторов соответствуют определенной команде и управляют работой выходных исполнительных элементов. Канал телесигнализации работает аналогичным образом, за исключением того, что сигнал о состоянии объектов формируется датчиками сигнализации, которые представляют собой как контактные, так и бесконтактные ключи. Данная система отличается от системы с частотным избиранием наличием шифраторов и дешифраторов на ПУ и КП, а остальные элементы – те же.

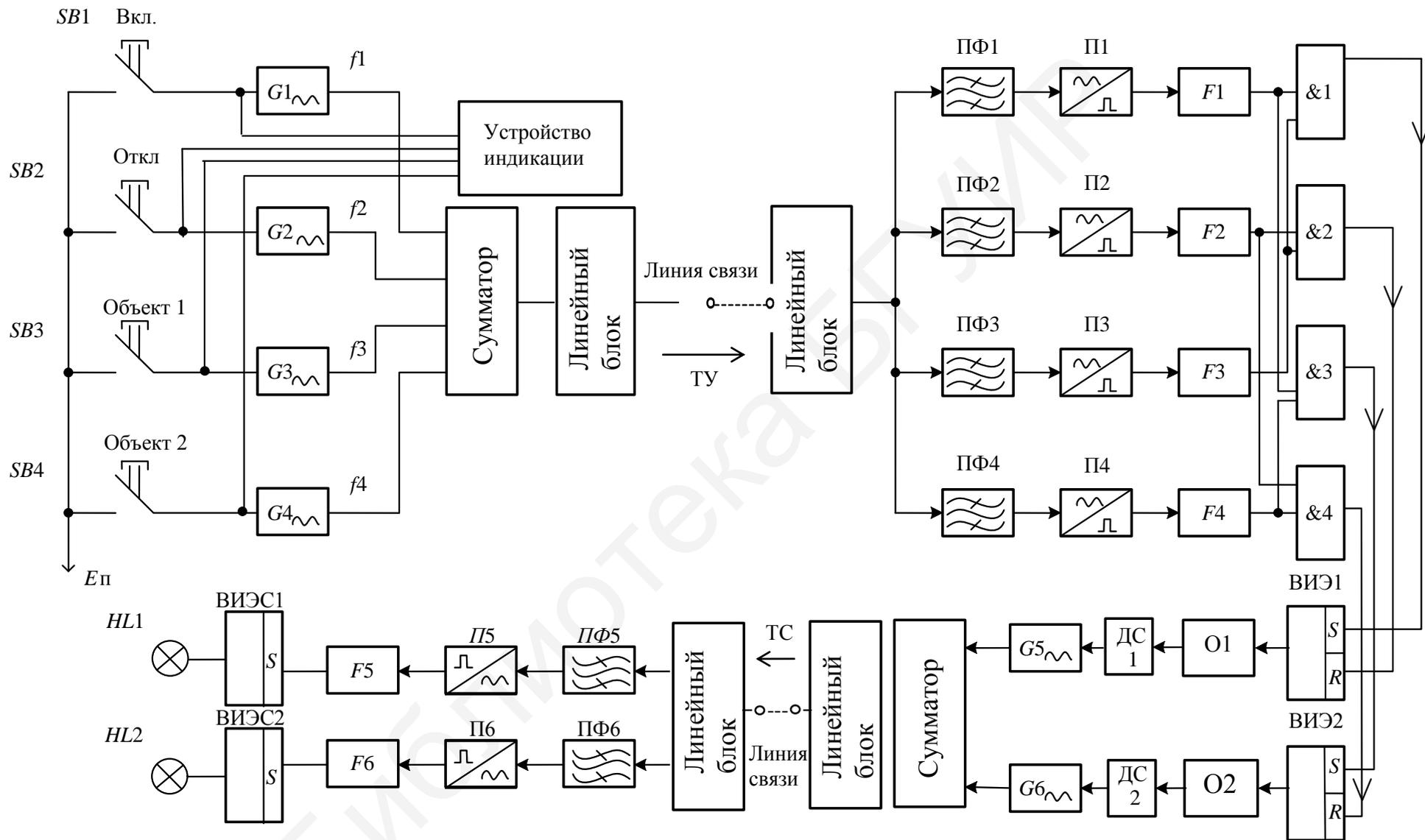


Рисунок 2.2 – Упрощенная функциональная схема устройства ТУ-ТС с частотным методом избирания и сигнализацией по методу «светлого» щита

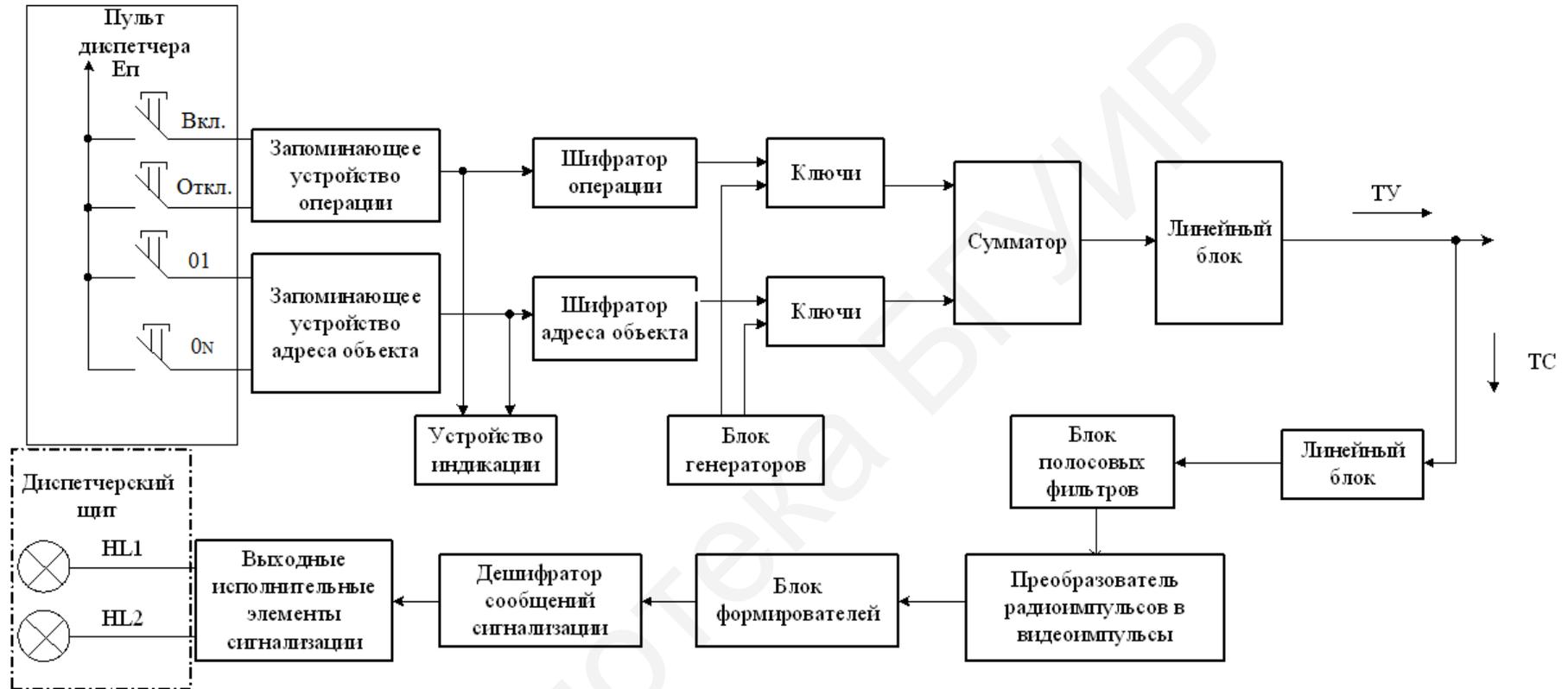


Рисунок 2.4 – Структурная схема ПУ системы ТУ-ТС с частотным кодовым разделением и избиранием сигналов

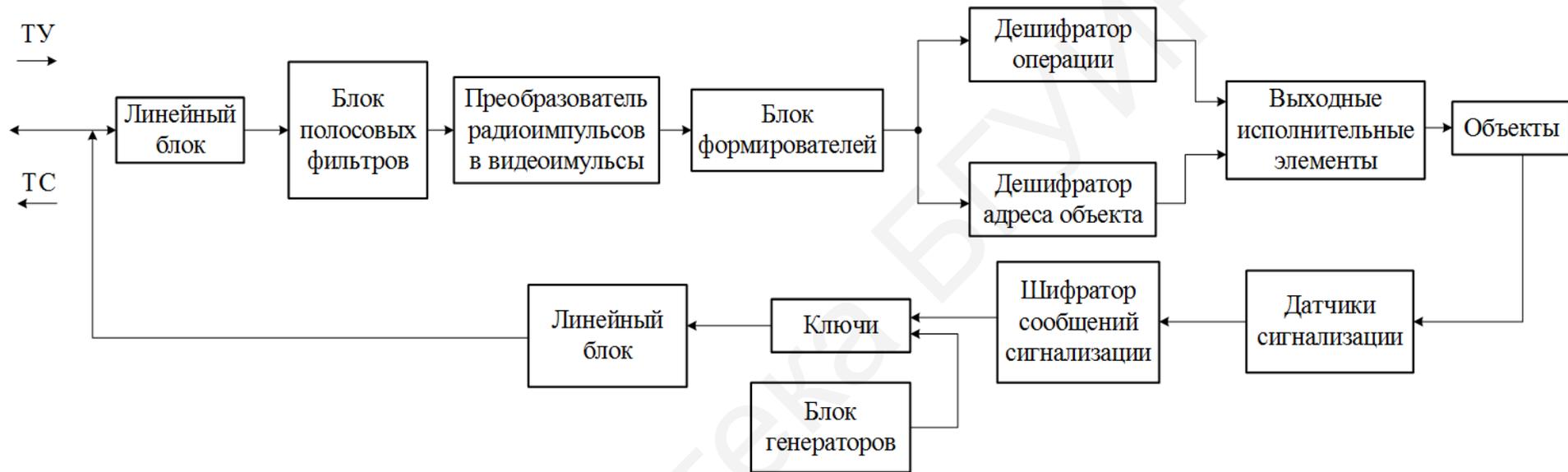


Рисунок 2.5 – Структурная схема КП системы ТУ-ТС с частотным кодовым разделением и избиранием сигналов

2.7 Временное разделение сигналов

При данном разделении сигналов каждый сигнал ТУ или ТС передается одним видеоимпульсом в серии n_B последовательных импульсов.

В настоящее время наибольшее применение находит временное разделение сигналов с использованием циклической синхронизации. При этом информация об управлении объектом заключена в наличии видеоимпульса на соответствующей временной позиции (рисунок 2.6), где показана передача команды на включение первого объекта из первой группы.

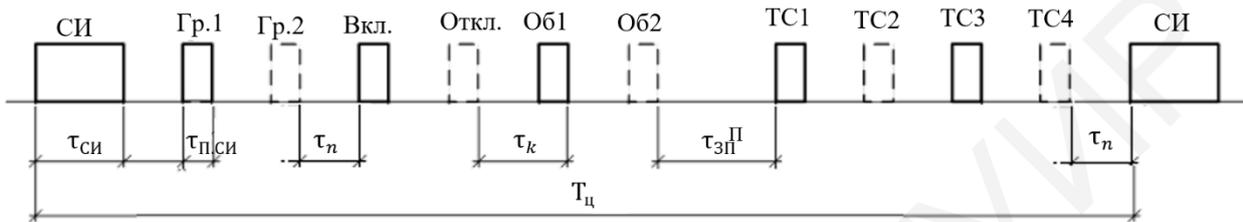


Рисунок 2.6 – Структуры сигналов при групповом управлении объектами

При телесигнализации желательно иметь сигналы о состоянии всех объектов за один цикл работы системы, что наиболее просто реализуется при временном разделении сигналов (см. рисунок 2.6). Как следует из рисунка, первый и третий объекты находятся во включенном состоянии.

Между сигналами управления и сигнализации вводится защитная пауза длительностью $\tau_{зп}$, которая учитывает время распространения сигнала по линии связи и время переходных процессов при включении (отключении) объектов и формировании сигналов ТС.

Длительность цикла согласно рисунку 2.6 будет определяться количеством групп $N_{гр}$, количеством объектов управления $N_{ту}$, защитной паузой $\tau_{зп}$ и общим количеством объектов телесигнализации $N_{тс}$ и составит

$$T_{ц} = \tau_{си} + \tau_{пси} + N_{гр}T_K + 2T_K + N_{ту}T_K + \tau_{зп} + N_{тс}T_K,$$

где $\tau_{си}$ – длительность синхронизирующего импульса ($\tau_{си} = 2...5$).

На рисунках 2.7 и 2.8 приведены функциональные схемы ПУ и КП соответственно системы ТУ-ТС с временным разделением сигналов и сигнализацией по методу «темного щита», соответствующие структуре сигналов, приведенных на рисунке 2.6. Для осуществления ТУ диспетчер с помощью ключей $SB1-SB6$ производит выбор группы объектов, выбор позиции и объекта, а затем нажимает кнопку «Пуск». При этом триггер ТУ устанавливается в единичное положение, открывается схема И и импульсы от генератора G поступают на распределитель импульсов (РИ), который формирует n разнесенных во времени последовательностей импульсов. Для осуществления циклической синхронизации импульсы с первого выхода РИ1 поступают на формирователь синхроимпульса (ФСИ). Отличительным признаком СИ могут являться амплитуда, длительность, полярность.

На рисунке 2.6 СИ отличается от информационных по длительности. Сформированный сигнал (см. рисунок 2.7) через схему ИЛИ, линейный блок (ЛБ) передатчика (ПРД) и блок запрета БЗ1 поступает в линию связи. ЛБ ПРД предназначен для согласования выходных характеристик аппаратуры ПУ с входными характеристиками линии связи. БЗ2 осуществляет закрытие канала ТС на время передачи сигнала ТУ и, наоборот, для исключения ложного срабатывания. Принятый из линии связи сигнал через БЗ2 и ЛБ ПРМ (см. рисунок 2.8) поступает на восстановитель импульсов (ВИ), где производится его усиление и формирование для надежного срабатывания приемных устройств.

Синхроимпульс выделяется селектором синхроимпульсов (ССИ) и устанавливает приемный РИ в исходное состояние. Принятый сигнал запоминается в регистре *RG*, а затем поступает на соответствующие входы схем И5–И12, которые выполняют роль дешифраторов команд. Сигналы с выхода этих схем управляют работой выходных исполнительных элементов ВИЭ1–ВИЭ4. Сообщения о состоянии объектов формируются датчиками сигнализации (ДС) и схемами И1–И4, опрос которых осуществляется РИ на 11–14 тактах. На 7–10 тактах введена разделительная (защитная) пауза между сигналами ТУ и ТС. Назначение БЗ и ЛБ аналогичное, как и на ПУ.

Пришедший из линии связи сигнал о состоянии объектов (ТС) через БЗ2 ЛБ приемника (ПРМ) и ВИ (см. рисунок 2.7) заносится в приемный регистр *RG* и сравнивается с положением ключей SB8–SB11, по состоянию которых судят о включенном или выключенном состоянии объектов. В случае расхождения работает световая и звуковая сигнализация. Диспетчер поворачивает соответствующий ключ в новое положение, после чего прекращает работать световая и звуковая сигнализация. Достоинством данного метода является то, что аппаратура ПУ и КП может быть полностью реализована на цифровых интегральных микросхемах.

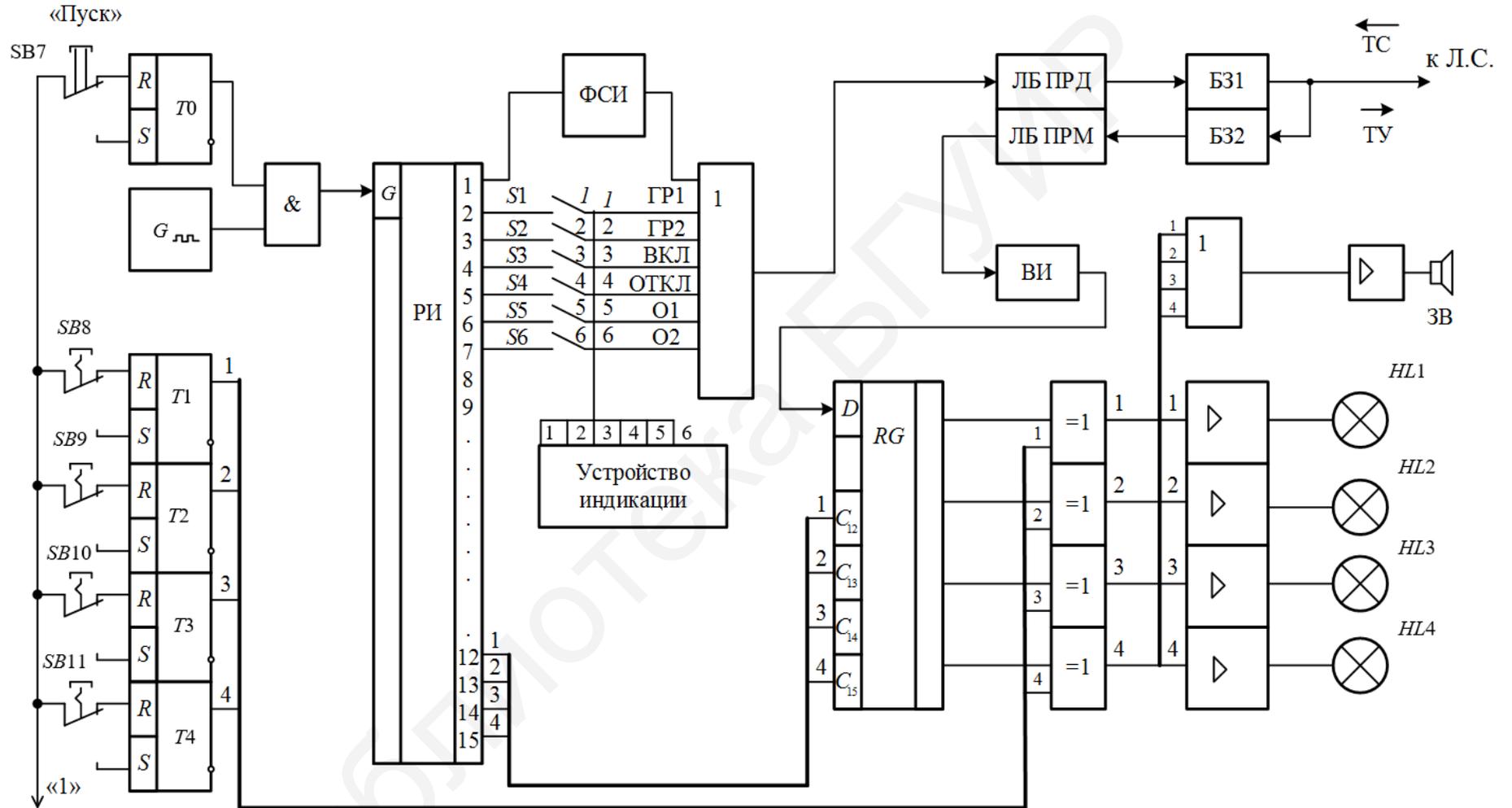


Рисунок 2.7 – Функциональная схема ПУ системы ТУ-ТС с временным разделением сигналов и телесигнализацией по методу «темного» щита

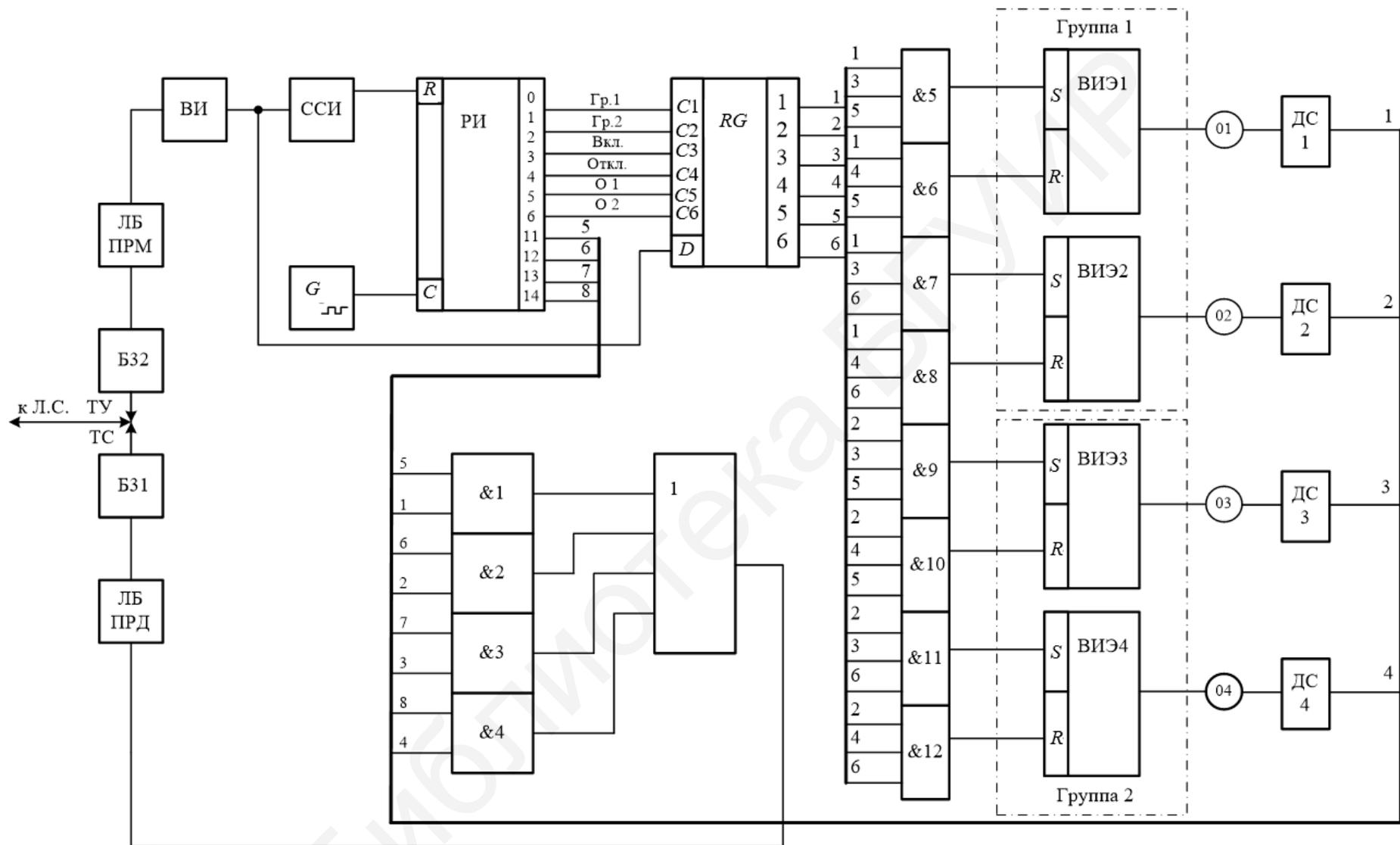


Рисунок 2.8 – Функциональная схема КП системы ТУ-ТС с временным разделением сигналов

2.8 Временное кодовое разделение сигналов

Устройства с временным кодовым разделением сигналов, называемые также цифровыми устройствами, обладающими неоспоримыми преимуществами, такими как более высокая помехоустойчивость, лучшее использование канала связи, большая возможность унификации массового производства и применения в самых разнообразных условиях, несмотря на несколько большее число компонентов в системе на один сигнал. Эти преимущества более эффективны при использовании микропроцессорной техники.

При кодовом разделении сигналов каждый сигнал ТУ или ТС передается определенной комбинацией n_B импульсов, посылаемых последовательно во времени. Наибольшее количество комбинаций получается при использовании двоичного кода на все сочетания. В настоящее время в большинстве промышленных систем сигналы ТС передаются многоканальными методами.

Кодовое разделение сигналов требует меньшего числа импульсов, чем циклическое временное разделение сигналов.

Структурные схемы ПУ и КП системы ТУ-ТС приведены на рисунках 2.9 и 2.10 соответственно. Устройство первичного кодирования кодирует адрес объекта, группы и саму команду первичным кодом, обычно двоичным. Эти кодовые комбинации обычно защищаются помехозащищенным кодом и совместно с синхросигналом через линейный блок поступают в линию связи.

Принятая из линии связи и восстановленная кодовая комбинация записывается в приемный регистр и одновременно анализируется устройством защиты от ошибок. Если искажений не обнаружено, исходная кодовая комбинация поступает в дешифратор, сигналы с выхода которого управляют выходными исполнительными элементами. Обеспечение синхронной и синфазной работы передатчика и приемника осуществляется сигналами с выхода селектора синхросигнала. Канал телесигнализации в случае, если применяется кодовое разделение сигналов ТС, по составу оборудования совпадает с каналом телеуправления. Если сообщения ТС передаются многоканальными методами, то каждому сигналу ТС соответствует импульс на соответствующей временной позиции.

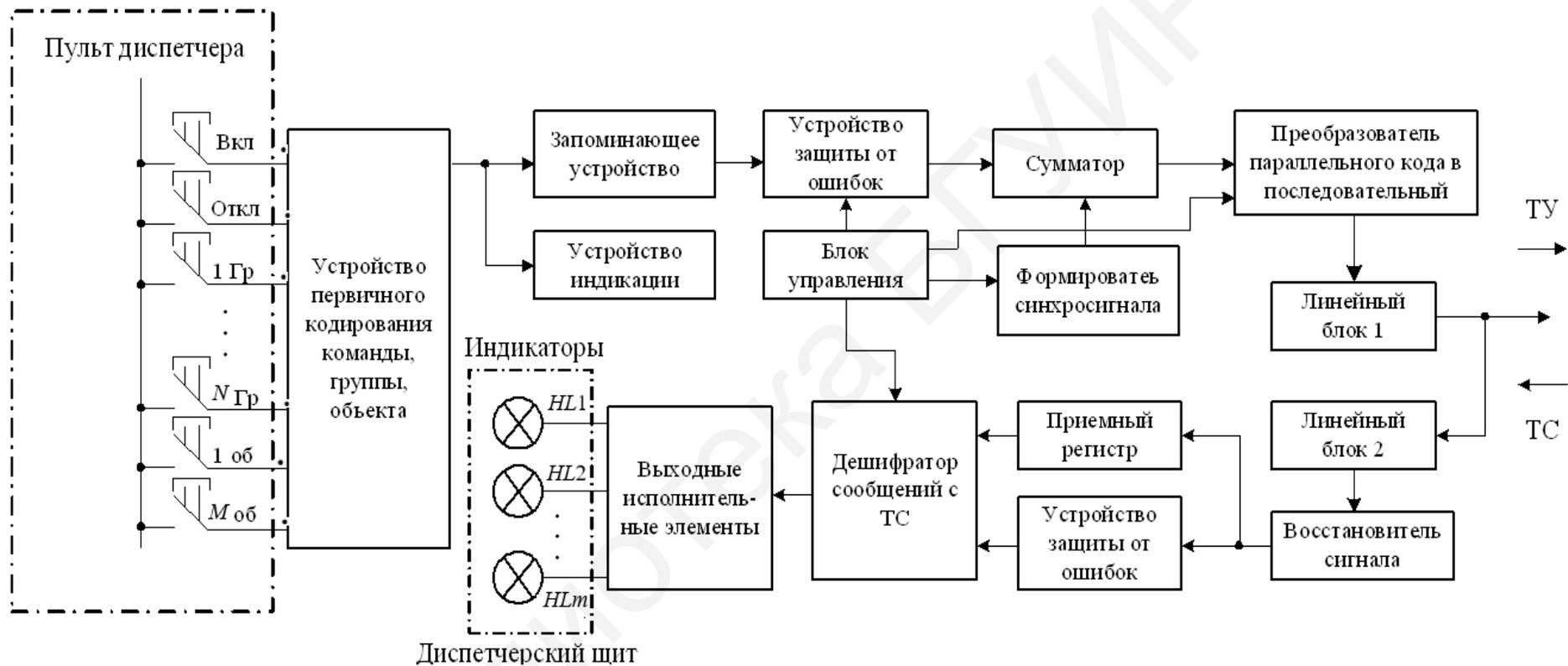


Рисунок 2.9 – Структурная схема ПУ системы ТУ-ТС с временным кодовым разделением сигналов

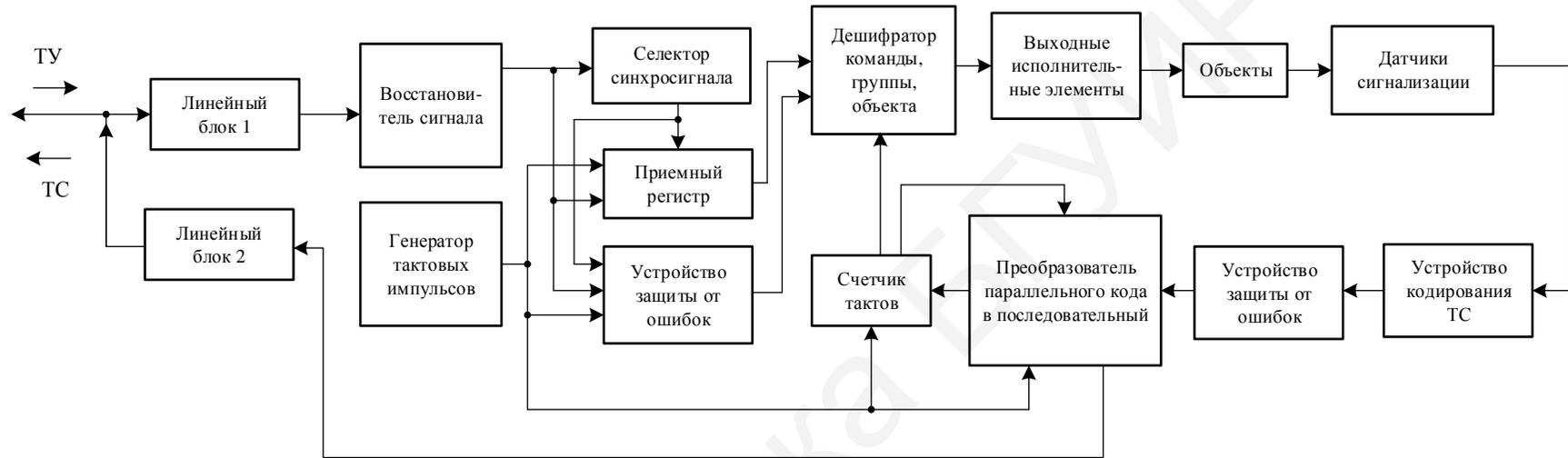


Рисунок 2.10 – Структурная схема КП системы ТУ-ТС с временным кодовым разделением сигналов

2.9 Сравнительная оценка и области применения методов разделения сигналов

Частотный метод разделения сигналов применяется для передачи небольшого числа команд рассредоточенным объектам. Данный метод позволяет передавать как циркулярные, так и нециркулярные приказы. Он обеспечивает хорошую помехоустойчивость и надежность управления при высоком быстродействии.

Благодаря широкому внедрению контроллеров наиболее широко используется временной метод разделения сигналов. Этот метод особенно эффективен при управлении сосредоточенными объектами. При невысоком быстродействии он не требует широкой полосы частот.

Рассматриваемый метод дает возможность как циркулярного, так и нециркулярного управления за один цикл работы.

Частотный кодовый метод избирания следует применять при достаточно большом числе рассредоточенных объектов. Он обеспечивает повышенное быстродействие и помехоустойчивость за счет применения частотных кодов и параллельной передачи элементов кодовых комбинаций.

Временное кодовое разделение сигналов позволяет полнее использовать пропускную способность временных каналов. Использование помехозащищенных кодов обеспечивает высокую достоверность команд управления, однако требует усложнения аппаратуры и по сравнению с временным разделением сигналов может применяться как для сосредоточенных, так и для рассредоточенных объектов, особенно эффективно при адресном групповом выборе.

В заключение следует отметить, что эффективность использования каналов связи и помехоустойчивость при кодовых методах избирания получается выше, чем при частотном и временном методах. В этом и заключается основное преимущество кодовых методов.

2.10 Оборудование, располагаемое на ПУ и КП

Все оборудование можно разделить на три основных типа: телемеханическая аппаратура, диспетчерское оборудование и оборудование автоматической обработки информации.

Телемеханическая аппаратура предназначена для формирования, передачи и приема сигналов, несущих сообщения.

Диспетчерское оборудование предназначено для обеспечения диспетчеру возможности контролировать и управлять технологическим процессом. Оборудование состоит из трех основных устройств: диспетчерский щит, диспетчерский пульт и щит регистрирующих приборов.

На диспетчерском щите изображается мнемосхема объекта и элементы сигнализации о ходе процесса в объектах. Диспетчерские щиты по принципу отображения состояний объектов разделяются на мимические и световые. В мимическом щите состояние объекта отображается положением механического и

электромеханического элемента. Для привлечения внимания диспетчера, в случае расхождения между истинным положением объекта и отображаемым, рядом с элементом устанавливается световой индикатор.

В световых щитах состояние контролируемых объектов указывается цветом свечения символов. При несоответствии символ соответствующего объекта переходит на мигающий свет.

На щите указывающих и регистрирующих приборов размещаются индикаторные измерительные приборы.

На диспетчерском пульте монтируются органы управления объектами и квитирования извещений ТС, а также органы включения и контроля работоспособности отдельных узлов и блоков аппаратуры.

При небольших размерах диспетчерского щита могут конструктивно объединяться диспетчерский пульт и диспетчерский щит, а также диспетчерский щит и щит регистрирующих приборов.

Оборудование автоматической обработки, как правило, состоит из ЭВМ и устройств сопряжения оборудования ПУ с ЭВМ. ЭВМ может работать в двух режимах. В первом режиме «оператор» осуществляет автоматический контроль и управление технологическим процессом. При втором режиме «советчик» ЭВМ обеспечивает выдачу рекомендаций диспетчеру по управлению процессом в различных ситуациях. Оборудование КП состоит из телемеханической аппаратуры, а в отдельных вариантах и из нескольких элементов сигнализации и измерительных приборов, служащих для наладки и проверки работоспособности отдельных блоков при их установке и после ремонта.

В заключение следует отметить, что многое оборудование ПУ в настоящее время выполняется на средствах вычислительной техники, которые входят в АРМ диспетчера.

3 ТЕЛЕРЕГУЛИРОВАНИЕ

Наряду с рассмотренными выше простейшими системами, выполняющими одну из функций ТИ, ТУ, ТС, порой добавляется и телерегулирование (ТР), представляющее собой телеуправление объектами с непрерывным множеством состояний (ГОСТ 26.005–82). Осуществляется ТР с помощью систем телеуправления и телеизмерения. Например, необходимо увеличить давление жидкости в трубопроводе до определенного уровня. Диспетчер посылает команду на включение насоса, нагнетающего жидкость в трубопровод, и по данным телеизмерения проверяет текущее значение давления. Когда давление достигает определенного значения, диспетчер посылает команду на отключение насоса.

Структурные схемы ПУ и КП системы телерегулирования приведены на рисунках 3.1 и 3.2 соответственно.

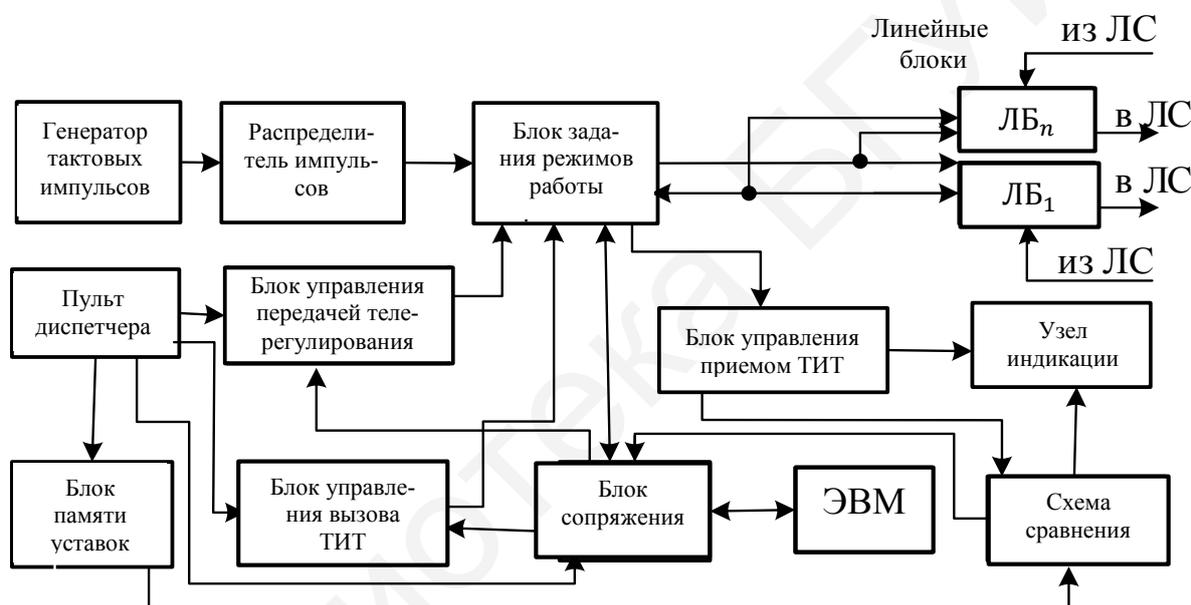


Рисунок 3.1 – Структурная схема ПУ системы телерегулирования

Всей работой ПУ и КП управляет блок задания режимов работы (БРР), который с помощью генератора тактовых импульсов (ГТИ) и распределителя импульсов (РИ) формирует управляющие, командные и тактовые сигналы, реализующие алгоритм работы всех блоков устройств по стандартному сопряжению в соответствии с системой приоритетов, периодически вырабатывающей синхросигнал для синхронизации всех устройств. Блок режима воспринимает коды функциональных адресов информации и преобразует их в управляющие сигналы для соответствующих блоков – приемников информации. Кроме того, БРР осуществляет кодирование и декодирование кодовых комбинаций в помехозащищенном коде. В БРР содержатся узлы контроля работоспособности оборудования ПУ, исправности линий связи и КП, а также элементы для выдачи сигналов

неисправности. Число индивидуальных линейных блоков (ЛБ), устанавливаемых на ПУ, определяется числом подключенных КП.

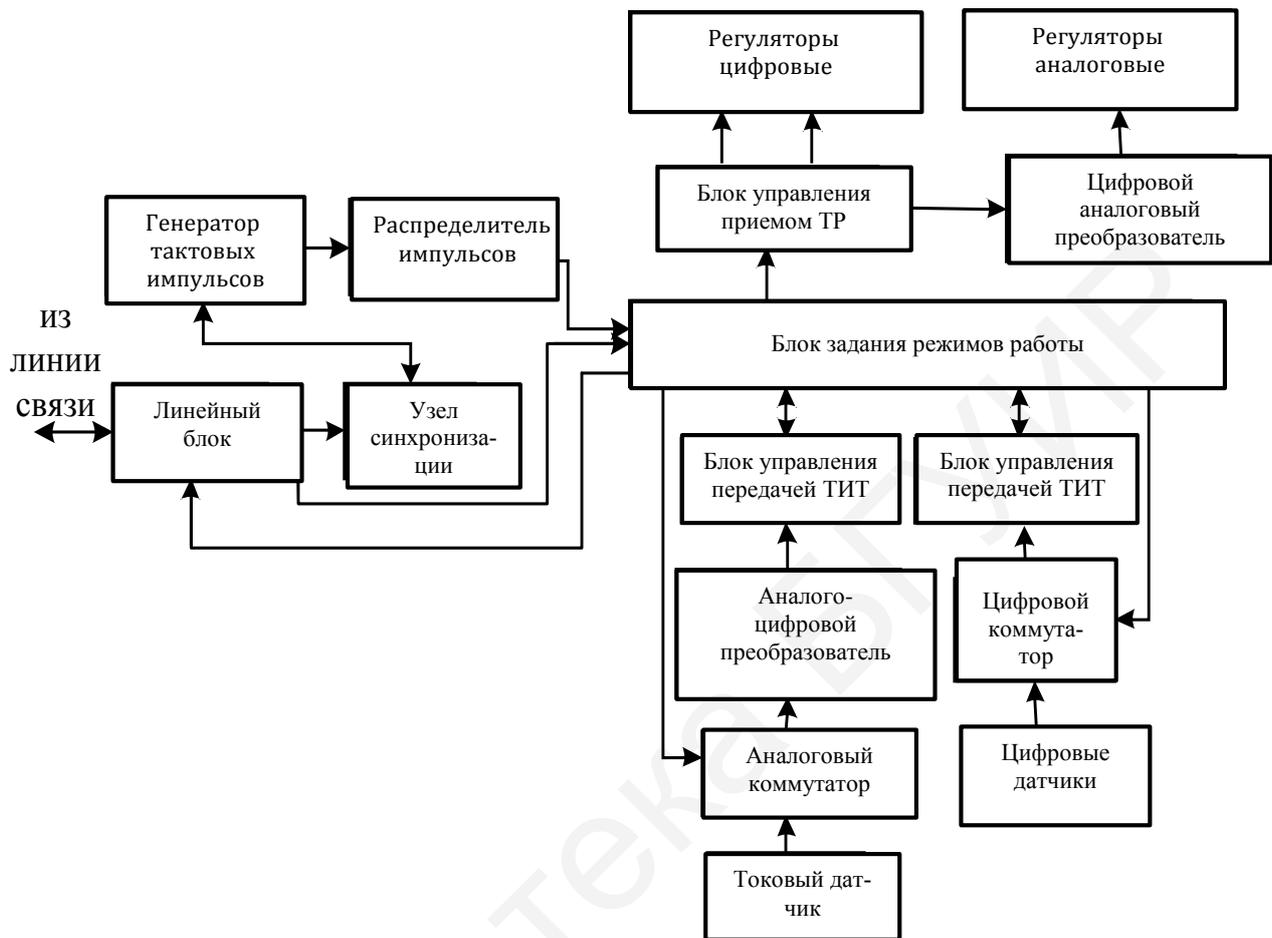


Рисунок 3.2 – Структурная схема КП системы телерегулирования

Прежде чем заниматься телерегулированием, необходимо получить информацию по каналу ТИ о состоянии объектов. Для чего необходимо сформировать и передать команду вызова телеизмерения текущих значений (ТИТ). Команды на ПУ вырабатываются либо диспетчером, либо ЭВМ. Команды поступают в блок управления вызова (БУВ) ТИТ либо от ключей управления, расположенных на пульте диспетчера (ПД), либо от ЭВМ через блок сопряжения. Правильность передаваемой команды диспетчер контролирует с помощью узла индикации команд, воспроизводящего команду на пульте диспетчера. Все команды, формируемые диспетчером, вводятся в ЭВМ. Структура сигнала вызова ТИТ состоит из синхросигнала, кода начала, адреса пункта, функционального адреса, адреса объекта.

На КП (см. рисунок 3.2) сигнал от ЛБ поступает на узел синхронизации (УС), на который также поступают тактовые импульсы от ГТИ. УС подстраивает фазу тактовых импульсов и осуществляет поэлементный прием кода методом

строирования. Кодовая комбинация с выхода ЛБ поступает в БРР, где осуществляется декодирование и формирование управляющих сигналов, посредством которых через блок управления передачей (БУПд) ТИТ осуществляется передача телеизмеряемых величин от токовых и цифровых датчиков. Сообщения от токовых датчиков поступают на вход БУПд ТИТ через аналоговый коммутатор и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а от цифровых датчиков – через цифровой коммутатор. Программа работы коммутаторов определяется БРР. Блок управления передачей ТИТ формирует код, который поступает в БРР. К этому коду в БРР добавляется код начала, адрес пункта, функциональный адрес и адрес объекта, и эта последовательность поступает через ЛБ в линию связи.

Пришедшая на ПУ из линии связи кодовая комбинация через ЛБ (см. рисунок 3.1) поступает в БРР, который сличает принятый код адреса с адресом вызываемого объекта, т. е. осуществляет проверку адреса при информационной обратной связи. После декодирования в БРР полезное сообщение поступает в блок управления приемом (БУПр) ТИТ и в ЭВМ через блок сопряжения, где оно запоминается, сообщение с БУПр ТИТ поступает на устройство индикации (УИ) и одновременно на схему сравнения, где оно сравнивается с соответствующей уставкой, записанной в блоке памяти уставок (БПУ). Если в результате сравнения будет принято решение о передаче команды на регуляторы, то формирование команды осуществляется либо диспетчером, либо ЭВМ, которая через блок управления передачей телерегулирования поступает в БРР. Правильность передаваемой команды диспетчер контролирует с помощью узла индикации команд. В блоке задания режимов работы к команде управления (задание уставок регуляторам) добавляются служебные сигналы аналогичные, как и при вызове ТИТ, и полное сообщение через ЛБ поступает в линию связи. При этом следует сказать, что допускается одновременная передача команды только одному регулятору.

Команды регулирования по типу «больше – меньше» воспринимаются БРР (см. рисунок 3.2). В блоке осуществляется проверка информации по методу повторения, проверка поступления команды только одному регулятору. При этом контролируется отсутствие аппаратных искажений. Кодовые команды воспринимаются блоком управления приема телерегулирования, который обеспечивает контроль исправности элементов. Кодовая комбинация с БУПр ТР поступает либо непосредственно на регуляторы (при цифровом задании уставки), либо через ЦАП при задании уставки аналоговым сигналом. После завершения неискаженного приема на ПУ с БРР передается сигнал «квитанция», а на КП выходные исполнительные элементы в БУПр ТР будут находиться в замкнутом состоянии до тех пор, пока не поступит команда отмены ТР.

При разработке телемеханической системы удобно пользоваться методикой иерархического представления, позволяющей рассматривать систему как формализованный набор процедур. Иерархическое представление, в соответствии с эталонной моделью взаимодействия открытых систем (*Open Systems Interconnect model, OSI*) Международной организации по стандартизации (*International Standards Organization, ISO*) и Международного консультативного

комитета по телеграфии и телефонии (*Consultative Committee on International Telegraphy & Telephony, CCITT*), логически группирует функции телемеханической системы в уровни и устанавливает связи между этими уровнями.

В пределах уровня обмен данными происходит согласно установленным стандартным правилам, или «протоколам». При этом для каждого уровня строго определено множество услуг, обеспечиваемых нижним по отношению к нему уровнем, и аналогично строго определено множество услуг, предоставляемых данным уровнем верхнему по отношению к нему уровню. Пока сохраняются межуровневые интерфейсы, любые процессы, протекающие в пределах уровня, «прозрачны» для других уровней и не влияют на их работу. Следовательно, любой уровень может быть целиком изменен или удален разработчиком в соответствии с требованиями пользователя (заказчика) или технологическими требованиями без нарушения целостности системы. Если при этом предоставлены интерфейсы соседним уровням, пользователь может взаимодействовать с системой на любом из ее уровней.

На рисунке 3.3 представлена система *TP* в виде семиуровневой иерархической модели, построенной по образцу модели *OSI*.

Из данных рисунка видно, что системы *TU* и *TI* работают совместно и обеспечивают доставку вызова телеизмерения и команды на регуляторы с пункта управления до контролируемого пункта и доставку данных, значений контролируемых параметров и квитанций в обратном направлении.

Следует отметить, что большинство промышленных систем телемеханики поддерживают 1, 2 и 7-й уровни *OSI*-модели: физический, канальный и прикладной.

Уровень	Пункт управления		Контрольный пункт		Услуги, оказываемые уровнем
	Система ТУ	Система ТИ	Система ТУ	Система ТИ	
7 Прикладной (команды ТУ, сбор данных ТИ)					Измерение физических величин, формирование квитанций, формирование команд телемеханики
6 Представительный (телемеханические данные)					Преобразование физических величин и команд в наборы телемеханических сообщений
5 Сеансовый (пакет)					Пакетирование телемеханических сообщений
4 Транспортный (сегмент)					Сегментирование данных пакетированных телемеханических сообщений для последующего мультиплексирования
3 Сетевой (фрейм)					Мультиплексирование пакетов и сегментов во фреймы для передачи по физическому каналу
2 Канальный (битовый поток)					Помехоустойчивое кодирование
1 Физический (радиосигнал)					Физическое соединение оборудования ПУ и КП

Рисунок 3.3 – Иерархическая модель системы телерегулирования

4 БОРТОВАЯ РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА

4.1 Принцип построения

Бортовые радиоэлектронные системы, используемые в настоящее время на летательных аппаратах различных типов, характеризуются высокой сложностью. Это объясняется тем, что резко возросла сложность задач, решаемых бортовыми радиоэлектронными средствами современных летательных аппаратов. Как для беспилотных, так и для пилотируемых летательных аппаратов характерно то, что такие задачи, как управление полетом, наведение, навигация, контроль состояния бортовых систем и управление ими, которые ранее решались на Земле или с ее участием, выполняются непосредственно на борту различными радиоэлектронными системами.

Успешное выполнение задач, стоящих перед бортовыми радиоэлектронными системами летательных аппаратов, возможно при наличии соответствующей бортовой информационно-телеметрической системы (БИТС), которая предназначена для сбора и представления разнообразной информации в процессе полета и ее распределения между подсистемами летательного аппарата, подготовки необходимой информации для передачи на Землю и, если это требуется, для отображения экипажу. При этом число разнообразных источников сообщений, информация с которых контролируется информационно-телеметрической системой, может достигать десятков тысяч, причем эти источники распределены во всем объеме, занимаемом летательным аппаратом [11].

Большое количество и рассредоточенность источников сообщений и бортовых подсистем по всему объему летательного аппарата исключают возможность использования отдельных проводных или кабельных связей для каждого источника и соответствующего потребителя информации прежде всего потому, что объем и вес требуемой кабельной сети становится непомерно большим. Кроме того, применение индивидуальных линий связи в каждой подсистеме затрудняет организацию их взаимодействия, монтаж, отладку и возможную модернизацию оборудования, создает большие трудности в наращивании информационно-телеметрической системы. Поэтому современные информационно-телеметрические системы летательных аппаратов строятся **по магистрально-модульному принципу**. Он состоит в том, что в бортовой части информационно-телеметрической системы используется единая **информационная магистраль** (или несколько магистралей), по которой производится необходимый обмен информацией посредством уплотнения каналов (мультиплексирования) этой магистрали. При этом элементы информационно-телеметрических систем выполняются в виде отдельных модулей, что позволяет упростить их монтаж, отладку, модернизацию и обеспечить легкость наращивания системы. Использование единой информационной магистрали придает гибкость структуре информационно-телеметрической системы, упрощает организацию взаимодействия подсистем, позволяет резко уменьшить вес, количество и суммарную длину провод-

ных соединений. Другим важным принципом, используемым в современных информационно-телеметрических системах, является иерархический принцип. В соответствии с ним отдельные блоки системы объединяются на нескольких (обычно на трех-четырех) уровнях иерархии, причем один блок более высокого уровня иерархии управляет несколькими блоками нижестоящего уровня, собирает от них и передает им необходимую информацию.

Использование иерархического принципа организации преследует несколько целей. Они состоят в том, чтобы наилучшим образом распределить ресурсы системы, обеспечив наименьшую ее сложность, быстродействие и емкость памяти, и вместе с тем обеспечить необходимую оперативность и точность анализа всей собираемой информации. Объем информации, собираемой на борту летательного аппарата информационно-телеметрической системой, весьма велик, и его непосредственная обработка, необходимая для формирования на борту соответствующих управляющих сигналов, не может быть осуществлена. Однако собираемая информация в значительной степени избыточна. Избыточность имеет как статистический, так и программный характер.

Статистическая избыточность вызвана тем, что сообщения, собираемые в процессе полета информационно-телеметрической системой, в большинстве своем нестационарны, и их информативность меняется во времени в довольно широких пределах. Поскольку изменение во времени этой информативности априорно неизвестно, то частота опроса источников сообщений выбирается исходя из их максимальной информативности, что и приводит к появлению статистической избыточности. Программная избыточность возникает тогда, когда информация от какого-либо источника совсем не требуется на данной фазе полета летательного аппарата, но тем не менее используемая программа опроса составлена так, что этот источник опрашивается.

В современных информационно-телеметрических системах используются разнообразные методы уменьшения статистической избыточности, называемые методами сжатия данных, такие как полиномиальное предсказание и интерполяция, адаптивная коммутация и др. В частности, для многих технических параметров, контролируемых на борту летательного аппарата, достаточно осуществлять только текущий допусковый контроль, при котором посредством сравнения текущего значения параметра с его верхним и нижним допуском выносится решение о том, «в норме» или «не в норме» этот параметр. **Программная избыточность** устраняется соответствующим подбором программ коммутации источников.

Использование иерархического принципа построения информационно-телеметрических систем позволяет осуществить устранение указанной выше избыточности непосредственно в местах сбора информации, не загружая информационную магистраль и подсистемы, расположенные на более высоких иерархических уровнях, избыточной информацией. Для этого локальная группа источников, собирающих информацию с какого-либо агрегата или подсистемы летательного аппарата, объединяется в унифицированный блок – локальный элемент. В локальном элементе осуществляется представление информации, собираемой

источниками, в стандартной цифровой форме, сокращение статистической и программной избыточности и уплотнение сообщений, собранных от обслуживаемых источников (рисунок 4.1). Для устранения программной избыточности в блоке памяти локального элемента могут храниться несколько различных программ опроса обслуживаемых источников, предусматривающих различные частоты опроса и различный состав обслуживаемых источников. Выбор той или иной программы опроса может осуществляться по команде с более высокого иерархического уровня либо по команде с Земли. В памяти локального элемента хранятся также различные константы, необходимые для обеспечения его функционирования, такие как допуски на параметры, подвергаемые допусковому контролю; значения апертур на параметры, подвергаемые полиномиальному статистическому сжатию, и т. п.

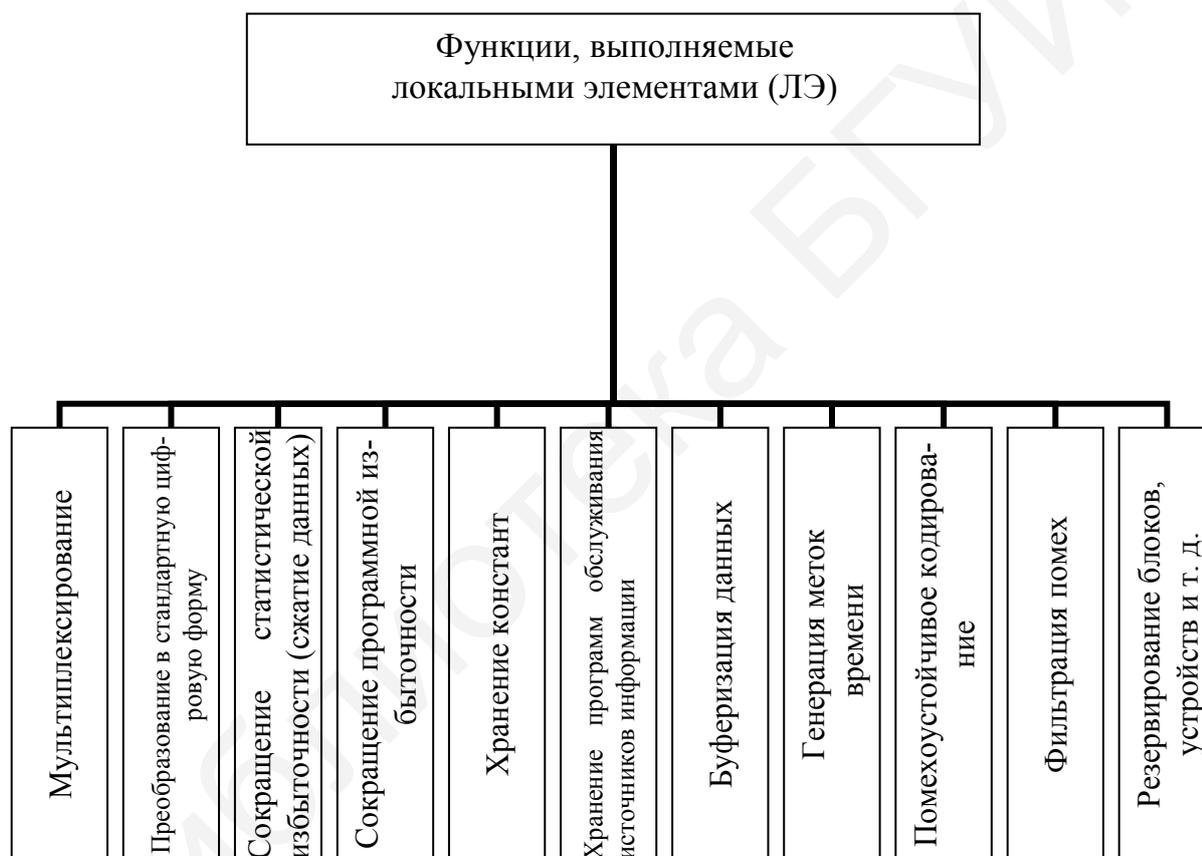


Рисунок 4.1 – Назначение локальных элементов бортовой информационно-телеметрической системы

Как правило, в современных информационно-телеметрических системах используется временное уплотнение с незакрепленными каналами, т. е. временное разделение каналов (ВРК) с кодовым признаком. Для осуществления ВРК с кодовым признаком необходимо разравнивание во времени нерегулярного потока собираемой информации, т. е. буферизация данных, для чего в составе локального элемента имеется соответствующее буферное запоминающее устройство. Кроме того, необходимо датирование собранной информации, для чего в

локальном элементе генерируются соответствующие метки времени, обеспечивающие требуемую точность временной привязки собранной информации.

В локальном элементе может также осуществляться помехоустойчивое кодирование собранной информации, обеспечивающее ее защиту от внутрисистемных помех и возможных сбоев в работе аппаратуры. При этом обычно используются простейшие методы кодирования, позволяющие обнаруживать ошибки посредством контроля кодовых слов на четность (нечетность).

Связь локальных элементов между собой и с вышестоящим иерархическим уровнем осуществляется посредством информационной магистрали. Однотипные источники информации, обслуживаемые одним локальным элементом, могут быть объединены в несколько групп, каждая из которых составляет канальный элемент. Канальные элементы связаны между собой внутри локального элемента местной информационной магистралью. Технической основой для построения локальных элементов в настоящее время являются однородные или унифицированные вычислительные элементы, реализуемые с использованием микропроцессоров.

Таким образом, локальные элементы составляют второй уровень иерархии в системе информационно-телеметрического обеспечения, на котором осуществляется отбор и представление информации, собираемой на первом уровне иерархии – уровне источников информации. При этом объем информации, поступающей с локального элемента на более высокий иерархический уровень, существенно меньше объема поступающей на него информации с низшего иерархического уровня. Тем самым освобождаются ресурсы более высокого иерархического уровня для решения более ответственных задач. На высшем уровне иерархии системы информационно-телеметрического обеспечения находится бортовая вычислительная система (БВС). На основе анализа данных о состоянии контролируемых подсистем и информации, получаемой от экипажа или наземного пункта управления, бортовая вычислительная система управляет информационным потоком в информационной магистрали и организует работу локальных элементов путем задания порядка обмена информацией и программ опроса источников в локальных элементах. В большинстве случаев в бортовых вычислительных системах используются 16-разрядные (реже 32-разрядные) бортовые цифровые вычислительные машины производительностью до 10^6 опер./с. При этом кроме задач информационно-телеметрического обеспечения бортовая вычислительная система выполняет и другие задачи, например: задачи управления полетом, наведения, навигации, диагностики бортовых подсистем и др. По типу организации вычислений бортовые вычислительные системы могут быть централизованными и децентрализованными. Первый тип организации бортовой вычислительной системы предполагает централизацию всех вычислительных функций в одной достаточно мощной бортовой вычислительной машине. Подобная централизация позволяет с максимальной эффективностью использовать имеющиеся вычислительные ресурсы, однако в случае модификации или расширения функций системы требуется радикальный пересмотр используемого математического обеспечения, что сопряжено с большими затратами времени и

средств. Поэтому централизованные бортовые вычислительные системы применяются в основном там, где предполагается одноразовое использование математического обеспечения без модификаций в процессе эксплуатации, например в бортовых системах космических аппаратов.

При организации бортовой вычислительной системы по децентрализованному типу вычислительные функции распределяются между несколькими бортовыми вычислительными машинами, предназначенными для решения вполне определенных задач и работающими независимо. Это позволяет разрабатывать, отлаживать и модифицировать отдельные вычислительные машины одновременно и независимо друг от друга. Распределение задач по машинам производится с учетом свойств задач и требуемой вычислительной мощности, и обычно одной машине поручается ограниченный круг однотипных задач, что позволяет существенно упростить и снизить затраты на математическое обеспечение. Следует отметить, что затраты на математическое обеспечение могут в несколько раз превышать стоимость самих вычислительных машин, поэтому последнее обстоятельство является весьма важным. Кроме того, в децентрализованных бортовых вычислительных системах можно использовать различные методы увеличения надежности и различные кратности резервирования отдельных машин с учетом важности решаемых ими задач. Кроме того, при выходе из строя одной или нескольких бортовых вычислительных машин их функции полностью или частично могут выполнить другие машины, что обеспечивает меньшую уязвимость бортовой вычислительной системы.

Структурная схема, поясняющая принцип построения бортовой информационно-телеметрической системы, представлена на рисунке 4.2.

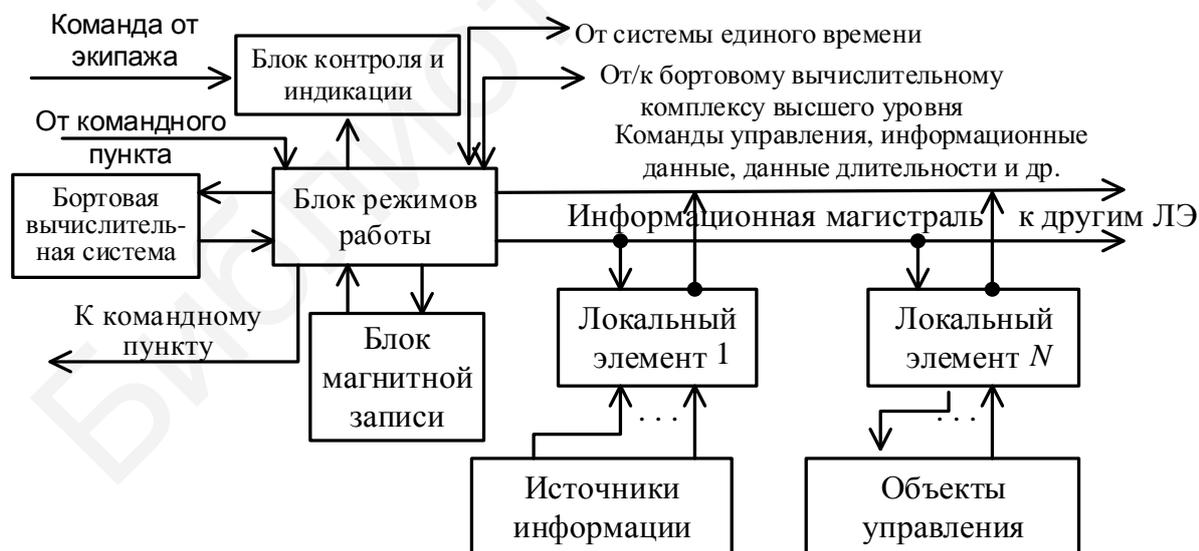


Рисунок 4.2 – Структурная схема бортовой информационно-телеметрической системы

Кроме рассмотренных выше локальных элементов и бортовой вычислительной системы в ее состав входит блок магнитной записи, в котором, в частности, записывается информация, предназначенная для передачи на Землю во время отсутствия радиосвязи летательного аппарата с наземным пунктом управления.

В случае пилотируемого летательного аппарата в состав бортовой информационно-телеметрической системы входит также блок контроля и индикации, который обеспечивает экипажу наблюдение и управление работой отдельных подсистем летательного аппарата, а также проведение необходимых экспериментальных исследований. В современных бортовых информационно-телеметрических системах летательных аппаратов блок контроля и индикации выполняется на многофункциональных дисплеях, что позволяет в значительной степени решить проблему ограниченности объема кабины экипажа и уменьшить нагрузку на экипаж, освобождая его от наблюдения за многими однофункциональными индикаторами.

На экраны дисплеев от бортовой вычислительной системы выводится только та информация, которая имеет существенное значение или необходима в данной полетной ситуации, в частности сигнальная информация о нарушении нормального функционирования отдельных подсистем и информация о наступлении важных событий в процессе полета. Используя органы управления дисплеями, экипаж имеет возможность связаться с любой из подсистем летательного аппарата, ввести в нее информацию, меняющую режим работы данной подсистемы, или вызвать на экран дисплея любую интересующую его информацию. Для привязки протекающих процессов ко времени предусмотрена система единого времени.

Устройство сопряжения обеспечивает совместимость всех подсистем, входящих в состав бортовой информационно-телеметрической системы, а именно: совместимость форматов данных, обрабатываемых в каждой подсистеме, синхронизацию, таймирование и координацию всех переключений.

Таким образом, для выполнения задач информационно-телеметрического обеспечения летательных аппаратов совместно используются аппаратные и программные средства. При этом, несмотря на значительную стоимость математического обеспечения, программная реализация часто оказывается более дешевой, чем то оборудование, которое понадобилось бы для решения аналогичных задач.

Система информационно-телеметрического обеспечения является одной из важнейших систем летательного аппарата, надежная и безошибочная работа которой является необходимым условием для выполнения полетных задач и обеспечения безопасности экипажа. Поэтому обеспечение высокой надежности системы информационно-телеметрического обеспечения представляет важнейшую проблему. Поскольку, несмотря на весьма высокую надежность элементов, всегда существует ненулевая вероятность отказа или сбоя в системе, то система информационно-телеметрического обеспечения должна быть построена таким образом, чтобы она была в достаточной мере нечувствительна к неизбежным отказам и сбоям, или, как говорят, система должна быть толерантной.

Для обеспечения толерантности системы используют разнообразные методы введения в нее избыточности, которую можно классифицировать как аппаратную, программную и временную. При аппаратных методах в аппаратуру вводятся дополнительные элементы, блоки или устройства. К этим методам относятся, например, помехоустойчивое кодирование используемых в системе сигналов, внутрисхемное кодирование, позволяющее реализовать самокорректирующиеся устройства, методы резервирования на различных уровнях (уровне элементов, блоков, устройств и систем), осуществляемое посредством их дублирования, троирования и т. п. Экономически наиболее целесообразно применять, возможно, более низкий уровень введения избыточности, поэтому при создании толерантных систем информационно-телеметрического обеспечения часто используют резервирование на уровне отдельных модулей и троирование модулей с вынесением решения по большинству, т. е. с мажоритарной логикой.

Введение программной избыточности осуществляется дублированием в памяти особенно важных данных и программ, применением различных тестовых и диагностических программ.

Введение временной избыточности осуществляется повторением решения некоторых программ или их части, использованием решающей обратной связи, подтверждающей правильность принимаемой и обрабатываемой информации.

Следует отметить, что рассматриваемый магистрально-модульный принцип построения бортовых систем приемлем для подвижных объектов различного назначения: наземных транспортных средств, аэрокосмических летательных аппаратов, надводных и подводных кораблей.

4.2 Стандартная и иерархическая модели системы

Целью функционирования информационно-телеметрической системы является надежная и достоверная доставка измерительной информации от удаленных бортовых источников потребителям, находящимся в космосе или на Земле. Источниками данных обычно являются научные, инженерные и вспомогательные датчики или подсистемы объектов различного назначения.

Традиционно большая часть ресурсов информационно-телеметрических систем использовалась для решения определенной задачи и полностью состояла в ведении определенной организации.

Отсутствие стандартных решений таких задач приводило к тому, что сеть передачи телеметрических данных «многоразового использования» должна была выполнять самые низкоуровневые функции по передаче информации, т. е. обеспечивать доставку отдельного измерения или бита.

В настоящее время в телеметрии в качестве международных приняты стандарты консультативного комитета по космическим системам передачи данных – *CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems)*.

Целью разработки телеметрических систем *CCSDS* являлась не только автоматизация передачи данных в пределах определенной системы, но и гарантия

поддержки бортовых телеметрических систем, принадлежащих одной организации (стране), наземными телеметрическими системами других организаций (стран).

Понятие телеметрическая система *CCSDS* включает две основных категории: пакетная передача телеметрических данных (пакетная телеметрия) и кодирование телеметрического канала.

Пакетная телеметрия – это стандартизованный и высокоавтоматизированный способ передачи данных, упрощающий процесс доставки потребителям информации от бортовых источников. Она предоставляет механизм, включающий стандартные структуры данных и протоколы, позволяющие упростить разработку и расширить возможности телеметрической системы. Пакетную передачу телеметрических данных можно рассматривать как два процесса:

- «сквозная» передача наборов данных о прикладных процессах, протекающих в космосе, пользовательским распределенным прикладным процессам, протекающим в космосе или на Земле;

- промежуточная передача этих наборов данных через элементы систем передачи данных, такие как, например, бортовые системы передачи данных, радиолинии, станции слежения, центры управления.

Кодирование телеметрического канала – это способ передачи данных по зашумленному радиоканалу, позволяющий безошибочно восстанавливать их на приемной стороне. Дешифровка кодированных данных на приемной стороне позволяет восстанавливать их с низкой вероятностью ошибки и тем самым улучшает характеристики канала.

Совместно пакетная телеметрия и кодирование телеметрического канала обеспечивают надежную и достоверную передачу телеметрической информации.

Как отмечалось в разделе 3, при рассмотрении функционирования систем удобно пользоваться методикой иерархического представления в соответствии с эталонной моделью взаимодействия открытых сред.

Как правило, бортовые телеметрические системы передают информацию в наземные командные пункты (НКП), где она обрабатывается в вычислительных центрах (рисунок 4.3). По результатам обработки формируются команды управления, которые передаются на борт объекта, т. е. система (радиотелемеханическая система) выполняет функции ТИ и ТУ. Таким образом, иерархическая модель рассматриваемой системы полностью совпадает с иерархической моделью системы телерегулирования, приведенной на рисунке 3.3, где под ПУ следует понимать НКП, а под КП – борт объекта.

Следует отметить, что рекомендации комитета *CCSDS* адресованы пяти нижним уровням этой модели, на описании которых остановимся более подробно.

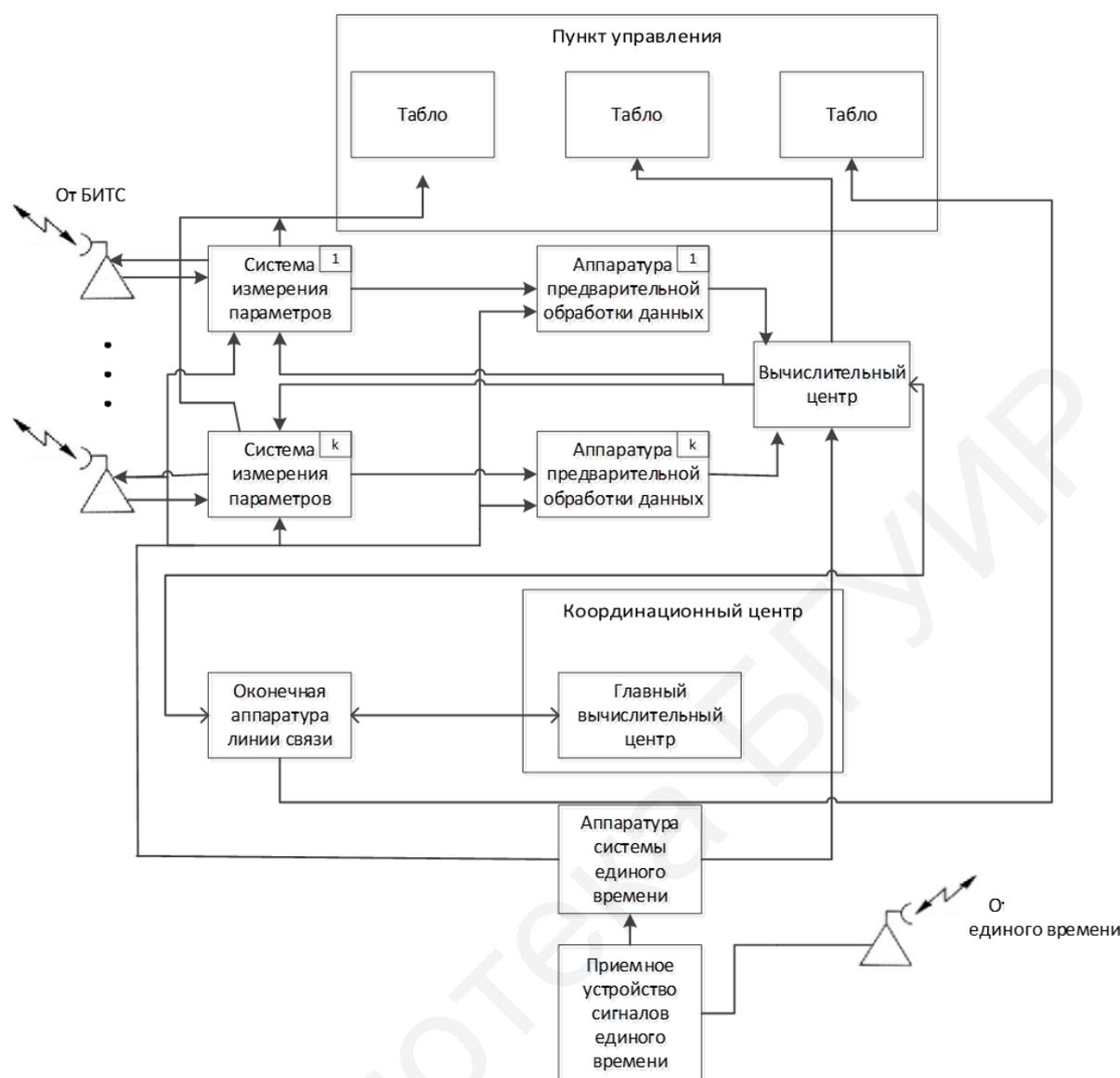


Рисунок 4.3 – Упрощенная структурная схема наземного командного пункта информационно-телеметрической модели

Уровень пакетирования. В рамках концепции пакетной телеметрии данные о процессах на борту телеметрируемого объекта формируются в блоки, называемые «исходный пакет», или «пакет источника». Эти блоки сопровождаются основным заголовком, содержащим поля идентификации пакета, контроля последовательности пакетов, информацию о длине пакета и необязательным конечным полем контроля ошибок. Пакет источника – основной блок данных, телеметрируемый пользователю с объекта. Он обычно содержит значимое количество связанных данных от конкретного бортового источника.

Уровень сегментации. Для управления потоком данных и их передачи по каналам связи предусмотрена возможность сегментации больших блоков данных в меньшие: пакеты источника (формат 1) или сегменты пакетов (формат 2). При этом размер поля данных пакета или сегмента определяется интерфейсом с нижним уровнем.

Уровень фреймов. Фреймы необходимы для достоверной и надежной доставки пакетов источника или сегментов по телеметрическому каналу к сети передачи данных. Предполагается несколько вариантов передачи данных. Один из них – мультиплексирование фреймов в виртуальные каналы. Фрейм начинается с синхромаркера и имеет основной заголовок. Основной заголовок содержит поля идентификации фрейма, номера фрейма и поле, описывающее состояние поля данных фрейма.

Поле данных фрейма может завершаться необязательной областью, включающей поле операционного управления и поле контроля ошибок. Первое из них обеспечивает выполнение некоторых функций обмена данными (например, калибровки бортового времени, подтверждения приема команд и др.). Поле контроля ошибок позволяет обнаруживать и исправлять ошибки, которые могут появиться в процессе обработки и передачи данных.

Передача фреймов требует более низкоуровневых услуг, таких как модуляция/демодуляция и кодирование/декодирование.

Уровень кодирования канала. Так как одно из основных требований, предъявляемых к телеметрической системе, – безошибочная доставка данных (достоверность передачи), для их защиты от ошибок, вызванных шумами радиоканала, используется кодирование канала. Для защиты данных от шумов физического канала битовый поток кодируется одним или обоими следующими кодами:

- блочным кодом Рида – Соломона;
- сверточным кодом.

Благодаря комбинации этих кодов, канал практически освобождается от ошибок. Данные, связывающие уровень кодирования канала со следующим уровнем, – это канальные символы, выводимые кодером, т. е. последовательность информационных битов (битовый поток), в виде которой представлены защищенные фреймы передачи.

Физический уровень. Канальные символы, поступающие на физический уровень, в частности на уровень радиоканала, модулируют радиосигнал. Благодаря кодированию, ошибки, которые возникают в процессе физического распространения радиосигнала, могут быть обнаружены и исправлены получателем. Более подробно ознакомиться с механизмом управления потоком данных и пакетом данных можно в [43].

5 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

5.1 Структурная схема

Современные промышленные объекты, как правило, характеризуются сложностью и комплексностью технологических процессов, а также пространственным разномом отдельных функционирующих блоков и систем по отношению к центру (центрам) управления. Для такого типа объектов очевидна необходимость применения соответствующих автоматизированных систем сбора информации о процессе и оборудовании, замкнутых на системы контроля и управления посредством устройств телемеханики.

Особенно это важно для подвижных и рассредоточенных на больших площадях объектов, а также, если объекты находятся в труднодоступных и вредных для здоровья человека местах. В таком случае обойтись без средств телемеханики практически невозможно.

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) совместно с устройствами телемеханики образуют в итоге систему, которая способна эффективно решать как задачу достоверного контроля состояния технологического процесса и оборудования, так и задачу эффективного управления всем технологическим комплексом.

Система управления технологических комплексов с использованием методов и технических устройств телемеханики может быть представлена как четырехуровневая система (рисунок 5.1).

Уровень 1 (датчиковый уровень) – уровень сопряжения с процессом. На этом уровне находятся датчики и регуляторы. Датчики непосредственно воспринимают параметры телеметрируемого процесса и преобразуют их физические значения в электрические сигналы. На регуляторы поступают управляющие сигналы, обеспечивающие оптимальность процесса.

Уровень 2 (уровень контроллеров) – уровень сбора данных. На этом уровне с помощью микропроцессорных систем осуществляется программный опрос датчиков, первичная обработка данных (фильтрация помех, преобразование аналоговых выходных значений датчиков в цифровой код, сравнение с уставками в случае допускового контроля и т. п.). С этого уровня предварительно обработанные данные по стандартному последовательному каналу (например, RS-485) передаются на третий уровень – уровень телемеханики.

Кроме того, через этот уровень на регуляторы (исполнительные механизмы) первого уровня могут поступать управляющие сигналы.

Информация с контроллерного уровня (уровень 2) посредством устройств телемеханики (уровень 3), где происходит сжатие, помехоустойчивое кодирование, закрытие информации, линейное кодирование и другие преобразования, а также модуляция поступает на верхний уровень (уровень 4).

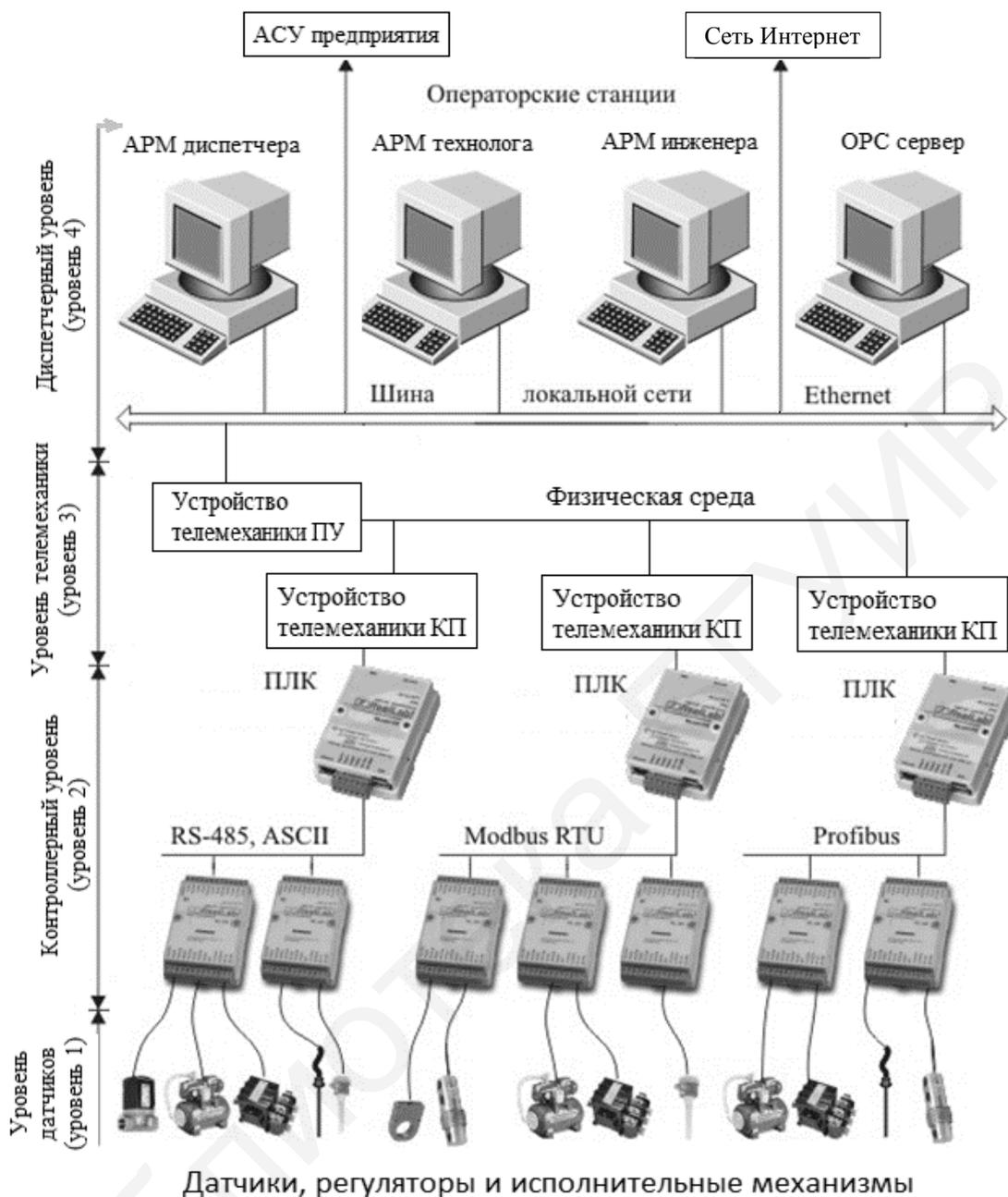


Рисунок 5.1 – Современная распределенная система автоматизации с использованием методов и технических средств телемеханики

Верхний уровень (уровень 4) – диспетчерский пункт (ДП) – включает прежде всего одну или несколько станций управления, представляющих собой автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера/оператора. Здесь же может быть размещен сервер базы данных, рабочие места (компьютеры) для специалистов и т. д. Станции управления предназначены для отображения хода технологического процесса и оперативного управления. Эти задачи и призвана решать SCADA-система. SCADA – это специализированное программное обеспечение, ориентированное на обеспечение интерфейса между диспетчером и системой управления, а также коммуникацию с внешним миром.

Таким образом, диспетчер получает информацию с монитора ЭВМ или с электронной системы отображения информации и воздействует на объекты, находящиеся от него на значительном расстоянии, с помощью телемеханических систем, контроллеров, интеллектуальных исполнительных механизмов.

Функции SCADA-систем следующие:

- прием информации о контролируемых технологических параметрах от контроллеров нижних уровней и датчиков;
- сохранение принятой информации в архивах;
- вторичная обработка принятой информации;
- графическое представление хода технологического процесса, а также принятой и архивной информации в удобной для восприятия форме;
- прием команд оператора и передача их в адрес контроллеров нижних уровней и исполнительных механизмов;
- регистрация событий, связанных с контролируемым технологическим процессом и действиями персонала, ответственного за эксплуатацию и обслуживание системы;
- оповещение эксплуатационного и обслуживающего персонала об обнаруженных аварийных событиях, связанных с контролируемым технологическим процессом и функционированием программно-аппаратных средств АСУ ТП с регистрацией действий персонала в аварийных ситуациях;
- формирование сводок и других отчетных документов на основе архивной информации;
- обмен информацией с автоматизированной системой управления предприятием (или, как ее принято называть сейчас, комплексной информационной системой);
- непосредственное автоматическое управление технологическим процессом в соответствии с заданными алгоритмами.

Связь отдельных устройств в распределенной системе может осуществляться с помощью любой промышленной сети (см. рисунок 5.1).

Локальная сеть может быть подключена не только к одному компьютеру, но и к сети компьютеров, например к локальной сети *Ethernet* (см. рисунок 5.1) или глобальной сети Интернет. Такая архитектура автоматизированной системы удобна при коллективной работе с системой автоматизации или для связи технологического уровня АСУ с управленческим. Например, при использовании системы с архитектурой, показанной на рисунке 5.1, температуру в теплице или в силосах элеватора одновременно могут наблюдать дежурный оператор, главный инженер и директор хозяйства. На алюминиевом заводе информация о ходе протекания процесса электролиза алюминия используется на 50 рабочих местах локальной компьютерной сети.

Доступ любого компьютера сети к устройствам ввода-вывода или контроллерам осуществляется с помощью OPC-сервера. OPC-серверы могут располагаться на нескольких компьютерах или контроллерах, и доступ к любому из них может осуществляться с любого компьютера сети. Пример архитектуры такой

системы показан на рисунке 5.1. Она является достаточно общей и широко используется как для лабораторной автоматизации, так и для автоматизации технологических процессов. Отдельные промышленные сети могут иметь различные протоколы и содержать оборудование разных производителей, а также различную физическую среду передачи данных – оптоволокно, медные провода, радиоэфир и др. Обычно *OPC*-сервер работает только с одним или несколькими портами ввода-вывода компьютера, к каждому из которых подключена одна промышленная сеть, поэтому количество *OPC*-серверов в системе меньше или равно количеству промышленных сетей. Благодаря наличию сети *Ethernet* в систему легко могут быть включены серверы баз данных, коммуникационные серверы, веб-серверы, принтеры, плоттеры, АТС, факсы, технологическое оборудование и другие устройства с *Ethernet*-интерфейсом.

Основой программного обеспечения, установленного на компьютерах сети, являются *SCADA*-пакеты – программные средства диспетчерского управления и сбора данных. В контроллерах исполняются загрузочные модули программ, генерируемые средствами визуального программирования программируемого логического контроллера (ПЛК) на языках стандарта МЭК 61131-3.

Системы управления с многоуровневой архитектурой обычно строятся по объектному принципу, когда структура системы выбирается подобной структуре объекта автоматизации, а каждая подсистема является локальной, т. е. все обратные связи замкнуты в пределах этой подсистемы. Каждая локальная подсистема выполняет отдельную функцию, задаваемую логикой функционирования всей системы. Объектный принцип построения позволяет упростить проектирование многоуровневой системы и обеспечить ее структурную (архитектурную) надежность.

5.2 Иерархия современной системы автоматизации

Анализ сложных систем управления позволяет выделить в них несколько однородных уровней иерархии, показанных на рисунке 5.2. Здесь *WAN* (*Wide Area Network*) – глобальная сеть, *LAN* (*Local Area Network*) – локальная сеть. Первые четыре уровня аналогичны рисунку 5.1, а поэтому остановимся на описании уровней 5 и 6.

Пятый уровень (уровень управления цехом) появляется как средство интеграции системы АСУТП с АСУП – автоматизированной системой управления предприятием. АСУП в зависимости от размеров корпорации может включать еще более высокий (шестой) уровень и обеспечивать интеграцию с высшим руководством, которое может быть расположено в различных странах и на разных континентах земного шара.

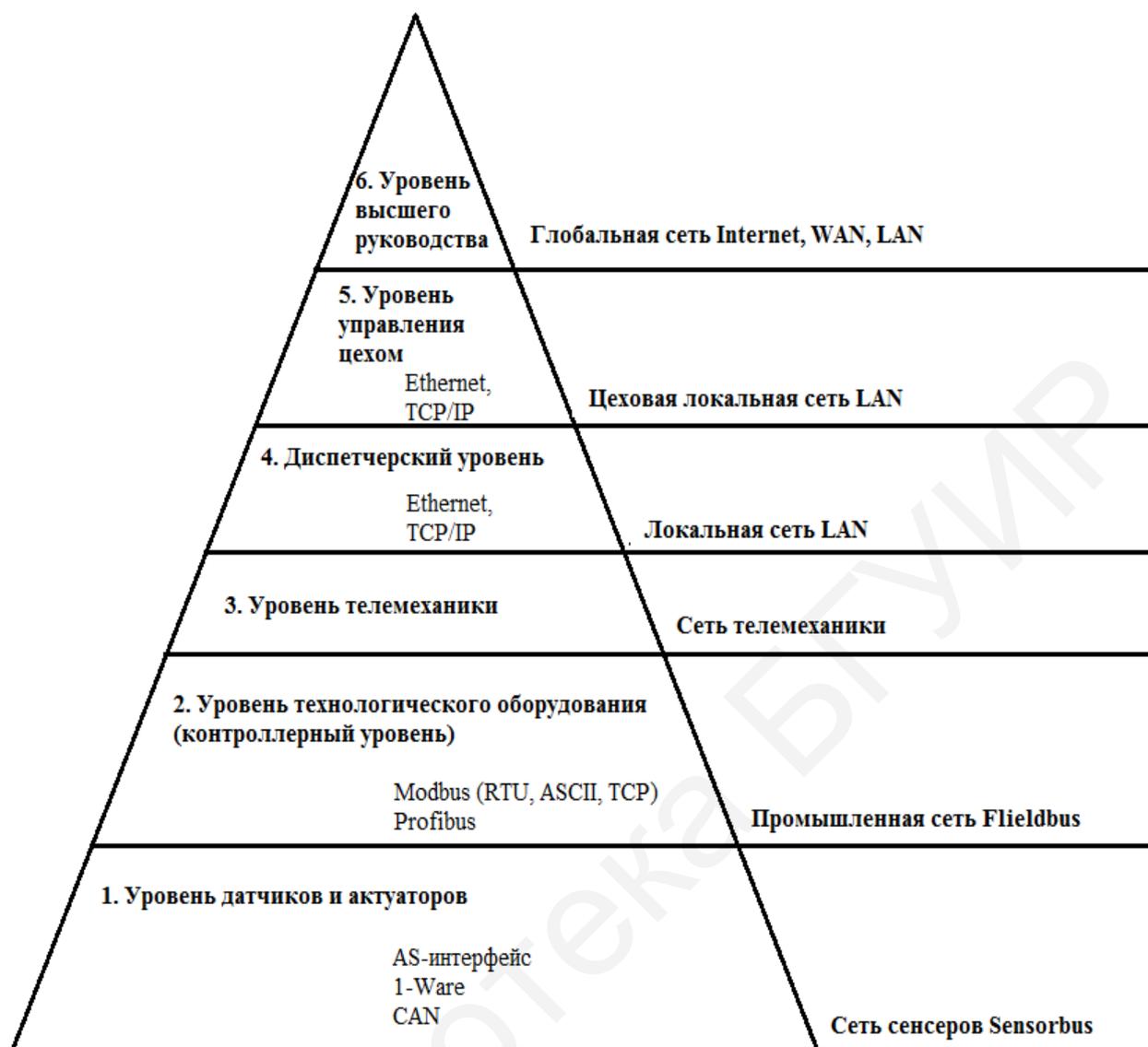


Рисунок 5.2 – Уровни иерархии современной системы автоматизации

На уровне АСУП решаются следующие задачи:

- *ERP (Enterprise Resource Planning)* – планирование ресурсов предприятия;
- *MRP (Manufacturing Resource Planning)* – планирование ресурсов технологических подразделений предприятия;
- *MES (Manufacturing Execution Systems)* – управление производственными ресурсами;
- *HRM (Human Resource Management)* – управление человеческими ресурсами;
- *EAM (Enterprise Asset Management)* – управление основными фондами, техническим обслуживанием и ремонтами.

Количество уровней АСУ зависит от величины предприятия. В последние годы большой интерес вызывало использование интернет-технологий в задачах управления [26], причем не только на уровне корпоративного управления, но даже на уровне технологического оборудования. Для этих целей используются

веб-серверы, которые могут быть расположены как на обычных персональных компьютерах, так и непосредственно в контроллерах или модулях ввода-вывода (так называемые микро-веб-серверы). С помощью любого веб-браузера, например *Internet Explorer*, можно управлять технологическими процессами, открыв на микро-веб-сервере интернет-страничку с мнемосхемой технологического процесса.

5.3 Применение интернет-технологий

Когда часть компонентов системы автоматизации выходит за границы локальной сети и переходит на уровень глобальной сети WAN, стоимость каналов связи резко возрастает вследствие высоких тарифов на дальнюю телефонную связь. В этих условиях наиболее экономически выгодным оказывается применение Интернета [26]. Стоимость его оказывается на порядок ниже благодаря коммутации пакетов, а не каналов, что позволяет существенно улучшить эффективность использования пропускной способности сети связи.

Вторым существенным преимуществом применения интернет-технологий в АСУТП является возможность использования на компьютере диспетчера любого веб-браузера (например, *Internet Explorer*), независимо от его производителя, типа аппаратной платформы или операционной системы. Например, компьютер диспетчера может работать под *Windows, Linux, Unix, QNX* и др.

Управление и мониторинг через Интернет привлекательны еще тем, что могут осуществляться из любой точки земного шара с помощью компьютера или мобильного телефона (коммуникатора). Такая возможность особенно важна для высшего руководства, которое часто бывает в командировках, а также для корпораций, имеющих подразделения в разных городах или странах.

WAN (*Wide Area Network*) – технология построения сетей, которая обеспечивает передачу информации на значительные расстояния с использованием коммутируемых и выделенных линий, специальных каналов связи и Интернета.

Другими достоинствами автоматизированных систем, использующих Интернет, являются:

- снижение стоимости функционирования АСУТП вследствие удаленного управления (отсутствует необходимость присутствия человека на трудно доступном объекте);

- снижение стоимости обслуживания благодаря удаленной диагностике, отладке и обновлению программного обеспечения через Интернет (уменьшаются затраты на командировки);

- возможность контроля состояния производственного или технологического процесса или управления им через мобильный телефон;

- возможность автоматического вызова аварийной службы в случае срабатывания датчиков газа, дыма, пламени, затопления и пр.;

- широкий выбор готовых (имеющихся в продаже) технических решений, аппаратных и программных продуктов для работы с Интернетом.

Этот же подход может использоваться и в Интранете (Интранет – это локальная сеть, которая содержит веб-сервер и работает по тем же протоколам, что и Интернет).

5.3.1 Проблемы применения интернет-технологий и их решение

При коммутации пакетов, используемой в Интернете, необходима промежуточная буферизация данных, которая вносит в процесс доставки сообщений задержку неопределенной величины, а при переполнении промежуточных буферов возможны потери данных. Интернет имеет также низкую надежность связи и плохую защищенность от несанкционированного доступа [26].

В настоящее время активно разрабатываются методы обеспечения качества обслуживания *QoS (Quality of Service)*, призванные ослабить остроту перечисленных проблем. Тем не менее неопределенность времени доставки сообщений и наличие задержки являются основными недостатками связи через Интернет. Частичным решением этой проблемы в системах мониторинга является посылка данных вместе с метками времени. Синхронизировать метки можно с помощью системы *GPS (Global Positioning System)*. Однако это не решает проблемы в задачах с реальным временем, например, когда интернет-канал входит в контур обратной связи.

Существует достаточно много областей, где указанные ограничения не являются существенными. Кроме того, в правильно спроектированной распределенной системе управления интенсивность информационного обмена между ее компонентами спадает по мере удаления компонентов друг от друга, достигая минимума для случая удаленного обмена через Интернет. Обратные связи в такой системе являются только локальными, за исключением контура управления с диспетчером, где время доставки сообщений сравнимо со временем реакции человека.

Примером задачи управления, в которой не требуется гарантированное время доставки сообщений, является дистанционное управление системами вентиляции, кондиционирования и обогрева зданий. В системе устанавливают датчики температуры наружного воздуха, температуры в комнатах, тока исполнительных устройств, влажности и света, а также исполнительные устройства для подачи электроэнергии в здание, для включения/выключения вентиляторов, обогревателей, кондиционеров, осушителей, увлажнителей, приточной вентиляции, вентиляции внутри помещения.

Наиболее безопасным применением Интернета являются системы мониторинга, например публикация на веб-страничке информации о параметрах технологического процесса, действиях оператора, а также сводных отчетов и графиков. Такая интернет-система может быть полностью автономной, поскольку перечисленные данные могут быть взяты непосредственно из базы данных АСУТП без воздействия на сам технологический процесс. Возможность работы с базами данных поддерживается всеми современными веб-серверами.

5.3.2 Примеры применения интернет-технологий

В литературе [26] описаны примеры применения Интернета для удаленного управления и мониторинга. Интерес представляет виртуальная лаборатория в вузе, пользоваться которой студенты могут, не выходя из общежития. Дистанционно можно задать исходные параметры для проведения эксперимента, включить экспериментальную установку и получить результат. Экспериментальная установка подключается к Интернету с помощью веб-сервера, который взаимодействует с управляющим программируемым логическим контроллером (ПЛК). Студенты могут дистанционно загружать в контроллер исполняемый код программы для автоматического выполнения эксперимента.

При дистанционной работе с микроскопом удаленный пользователь через Интернет может наблюдать изображение, передвигать камеру микроскопа, изменять увеличения, подстраивать фокус.

Внимание привлекает система управления катером через Интернет. Управляемыми параметрами являются положение руля, скорость, состояние «включено/выключено» прожектора и гудка. Положение катера находится с помощью *GPS (Global Positioning System)*. Контроллер с беспроводным *Ethernet*-интерфейсом, установленный на катере, и беспроводная *Ethernet*-видеокамера обмениваются информацией по беспроводному *Ethernet*-радиоканалу с веб-сервером, установленным неподалеку на персональном компьютере. Управление катером может осуществляться из любой точки земного шара с помощью обычного браузера *Internet Explorer*.

В последнее время появился термин «интернет вещей» (*Internet of Things, IoT*), под которым следует понимать сеть физических объектов, содержащих встроенную технологию, которая позволит этим объектам измерить параметры собственного состояния или собственной окружающей среды, использовать или передавать эту информацию. На сегодняшний день «интернет вещей» применяется в технологиях «умного дома»: удаленное управление через Интернет домашними устройствами, удаленный мониторинг и управление системами отопления, освещения, медиаустройствами, электронными системами безопасности, оповещениями о вторжениях, противопожарными системами.

Широкое применение технология *IoT* находит в энергетике (смарт-счетчики, системы выявления потерь или краж в электронной сети). В нефтегазовом секторе, например, используется удаленный мониторинг трубопроводов. Множество решений разрабатывается для более безопасной эксплуатации автомобиля. Технология *Connected Cars* (подключенные автомобили) позволяет использовать системы экстренного вызова скорой помощи со встроенной *SIM*-карты. В автостраховании начинает практиковаться расчет страховки, базирующийся на удаленном мониторинге вождения пользователей. На транспорте широко применяются системы отслеживания маршрута автомобиля, мониторинг грузоперевозок, контроль отгрузки и складирования. Эксплуатируются автоматизированные системы контроля воздушного движения. Муниципальные органы власти могут

использовать *IoT*-решения для запуска, эксплуатации и контроля системы общественного транспорта с целью оптимизации расхода топлива. Применяются системы контроля и управления движением поездов. В ритейле развивается автоматизация логических задач, удаленный мониторинг и учет товаров, снабженных *RFID*-метками, инвентаризация в реальном времени, беспроводные платежные решения. В системах общественной безопасности используются системы мониторинга и контроля состояния промышленных объектов, мостов, туннелей и т. д. В промышленном производстве распространены контроль процесса производства, управления роботизированными комплексами, удаленная диагностика, в сельском хозяйстве – удаленное управление системами ирригации, отслеживания состояния и поведения животных, мониторинг уровня воды в водоемах и т. д.

Применяя технологию *IoT* следует помнить о проблемах, указанных в подразделе 5.3.1. Дальнейшее развитие технологии «интернета вещей» будет «интернет всего». При этом произойдут существенные изменения в пирамиде автоматизации (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Перемены в пирамиде автоматизации

Что касается нижнего технологического уровня, то он фактически останется в неизменном виде. Датчики и исполнительные механизмы – это физические интерфейсы технологического процесса, они, конечно, продолжают свое существование, хотя будут автономно выполнять множество операций.

Все функции, локализованные на более высоких уровнях, потенциально будут перенесены в высокопроизводительные серверы, расположенные в серверных кластерах, дата-центрах или «облаках».

6 СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В настоящее время передача информации в дискретной (цифровой) форме находит широкое применение в решении самых различных задач. Особенно важное значение системы передачи цифровой информации приобрели в таких областях, как передача данных, телеметрия, космическая связь и управление, электросвязь.

Система передачи цифровой информации имеет преимущества перед аналоговыми.

Наиболее существенными преимуществами систем передачи цифровой информации (СПЦИ) являются:

- возможность автоматизации обработки информации;
- универсальная форма представления сообщений различной физической природы и, как результат этого, гибкость систем, позволяющая, заменив программу работы, применять одно и то же оборудование для различных целей, ведь бит – это и есть бит;
- высокие качественные показатели работы системы;
- возможность объединения отдельных систем в более крупные системы и комплексы;
- прием сигнала сводится не к измерению его параметров, а к обнаружению единицы и нуля;
- легкая обработка, запоминание, коммутуруемость и регистрация сообщений в цифровой системе;
- возможность многократной передачи без накопления ошибок;
- высокая достоверность передачи сообщений;
- упрощение требований, предъявляемых к радиолиниям в отношении калибровки эталонных уровней;
- улучшение использования каналов связи в случае применения специальных кодов, статистически согласованных с передаваемыми сообщениями;
- возможность применения сетевых технологий;
- использование цифровых сигналов и уплотнения с временным разделением проще применения аналоговых сигналов и уплотнения с частотным разделением;
- применение специальных функций позволяет избавиться от подавления сигнала либо повысить секретность и скрытность передачи.

Чем же мы платим за преимущества цифровых систем? Цифровые системы требуют более интенсивной обработки, чем аналоговые. Кроме того, для цифровых систем необходимо выделение значительной части ресурсов для синхронизации на различных уровнях, ухудшение качества носит пороговый характер. Если отношение сигнал/шум падает ниже некоторого порогового, качество обслуживания может скачком измениться от очень хорошего до очень плохого. В аналоговых системах ухудшение качества происходит более плавно [60].

6.1 Структурная схема системы передачи цифровой информации

Специфика различных областей применения систем передачи цифровой информации требует различного подхода к реализации таких систем. Система передачи данных по телефонным каналам совершенно не похожа на систему космической связи или на цифровую систему тропосферной связи ни по техническому исполнению, ни по параметрам. Однако в принципах построения отдельных устройств (блоков) самых разных систем много общего. Это обстоятельство дает возможность рассматривать цифровые системы связи с общих позиций, отвлекаясь от специфики их применения и конкретных условий работы. Такой подход позволяет выяснить ряд важных положений, характерных для любой системы передачи цифровой информации.

В дальнейшем под системой передачи цифровой информации будем понимать упорядоченную совокупность технических средств, с помощью которых осуществляется передача информации в цифровой форме из одного пункта пространства в другой. Такая система вместе с физической средой, в которой распространяются содержащие передаваемую информацию сигналы, образуют цифровую линию связи, структурная схема которой приведена на рисунке 6.1.

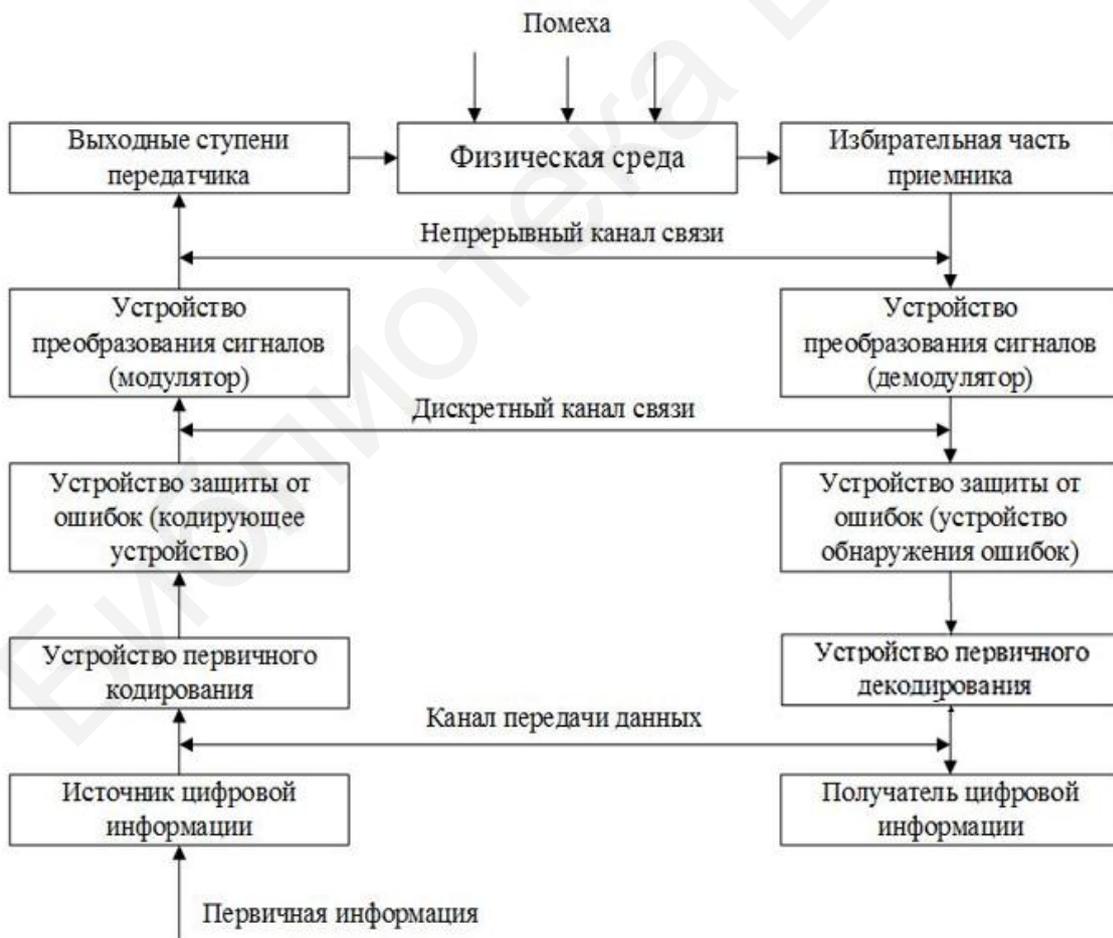


Рисунок 6.1 – Структурная схема цифровой линии связи

По цифровым линиям связи можно передавать сообщения самой различной физической природы: цифровые данные, полученные от ЭВМ, речь, тексты телеграмм, команды управления, результаты измерения различных физических величин, телеметрируемых с объектов, и т. д. Естественно, что все эти сообщения предварительно должны быть преобразованы в электрические колебания, сохраняющие все свойства исходных сообщений, а затем унифицированы, т. е. представлены в цифровой форме, удобной для последующей передачи. Под источником цифровой информации на рисунке 6.1 понимается устройство, в котором выполнены все указанные выше операции. Такой источник создает сообщения, представляющие собой последовательности, образованные элементами, каждый из которых может принимать только конечное число различных значений.

Устройство первичного кодирования (УПК) в общем случае выполняет функции преобразования сообщений, выдаваемых источником, в первичный K -разрядный код, а также статистического кодирования и формирования из отдельных кодовых слов информационных блоков. В простейших случаях УПК может отсутствовать и кодовые слова, выдаваемые источником, будут непосредственно вводиться в устройство защиты от ошибок (УЗО). На приемной стороне устройство первичного декодирования выполняет ответные функции.

УЗО выполняет наиболее ответственную функцию – обеспечение требуемых вероятностно-временных характеристик процесса передачи данных. В этом блоке реализуется тот или иной алгоритм передачи информации, осуществляется избыточное кодирование и декодирование, информационный контроль и резервирование каналов связи, фазирование работы приемной и передающей аппаратуры передачи цифровой информации. Кроме того, в УЗО, как правило, происходит преобразование параллельного кода в последовательный (на передающей стороне) и обратно (на приемной стороне).

С целью согласования УЗО передатчика и приемника с непрерывным каналом связи (средой, в которой, как правило, передаются непрерывные сигналы) используются устройства преобразования сигналов (УПС), включаемые на передаче и приеме. В частном случае – это модулятор и демодулятор (модем). Совместно с каналом связи УПС образуют дискретный канал связи (ДКС), т. е. канал, предназначенный для передачи только дискретных сигналов (цифровых сигналов данных). УПС аппаратуры передачи данных могут выполняться конструктивно в одном корпусе с другими узлами устройства передачи данных (УПД) (например, с УЗО), однако чаще всего УПС выпускается в виде отдельных устройств. При этом УПС помимо своих основных функций обычно выполняют и ряд вспомогательных: автоматическое переключение УПД в режим передачи или приема; обеспечение блокировки УПД и включение сигнализации при понижении или пропадании уровня принимаемого сигнала; коррекцию АЧХ и ФЧХ канала связи; оценку качества принимаемых сигналов; вырабатывают сигналы синхронизации передатчика и приемника. Различают УПС, позволяющие организовать передачу данных по каналам тональной частоты, широкополосным каналам и физическим линиям связи. В настоящее время все чаще применяют по-

нятие «интеллектуальный модем», выполняющий функции УЗО, УПС и устройства сжатия информации [12]. В УПС могут применяться амплитудная, частотная и фазовая манипуляции или комбинированные виды модуляции.

Таким образом, передающая часть цифровой линии связи осуществляет ряд операций, связанных с преобразованием дискретного сообщения в сигнал. Эти операции включают кодирование передаваемой информации (понимаемое в самом широком смысле) и манипуляцию сигнала.

Совокупность операций, связанных с преобразованием передаваемых сообщений в сигнал, называется **способом передачи**.

В общем случае сигналы, излученные в среду распространения, претерпевают в ней ослабление (вследствие поглощения и рассеивания энергии) и искажения (замирания, отражения от неоднородностей среды, препятствий и т. п.). Поэтому сигналы, приходящие в точку приема, могут существенно отличаться от излучаемых передатчиком не только своей энергией, но и статистическими характеристиками и спектральным составом.

В приемной части цифровой линии связи принятая смесь сигнала и помех должна быть преобразована в дискретное сообщение, соответствующее переданному сообщению. Это преобразование состоит из ряда операций, обратных операциям, выполняемым в передающей части цифровой линии связи.

После фильтрации и усиления в избирательной части приемника сигнал демодулируется и на выходе демодулятора (модема) образуется дискретная последовательность, которая должна соответствовать последовательности на выходе устройства защиты от ошибок передатчика. Однако из-за действия помех, влияния среды, погрешностей различных преобразований, вызванных неидеальностью и нестабильностью характеристик отдельных узлов и элементов системы, полного соответствия между ними может и не быть. Последовательность с выхода модема поступает в УЗО, где проверяется на наличие искажений, и в случае необходимости производится ее коррекция. Затем последовательность вводится в декодирующее устройство, которое выполняет операции по ее преобразованию в последовательность, соответствующую переданной цифровой последовательности с выхода устройства первичного кодирования. Полнота этого соответствия зависит от ряда факторов: корректирующих возможностей кодированной последовательности, уровня сигнала и помех и их статистики, свойств декодирующего устройства и т. п. Сформированная в результате декодирования цифровая последовательность поступает к получателю информации.

Таким образом, приемная часть цифровой линии связи осуществляет ряд операций, связанных с преобразованием сигналов, принимаемых на фоне помех, в дискретные сообщения, выраженные в цифровой форме. Совокупность этих операций называется **способом приема**.

В зависимости от режима выдачи информации источником система передачи цифровой информации может работать в спорадическом (сеансовом) и непрерывном режимах.

Обмен информацией между абонентами может производиться по различным алгоритмам. Наибольшее распространение получили следующие алгоритмы:

- однократная передача;
- многократная передача;
- с информационной обратной связью (ИОС);
- с решающей обратной связью (РОС).

Первые два алгоритма широко используются в односторонних системах передачи дискретной информации, в которых для передачи информации в каком-либо направлении используется канал связи только данного направления. В таких системах передатчик не получает информацию об изменении состояния канала связи и поэтому работает в одном заранее заданном режиме. На вход передатчика поступает последовательность двоичных символов, которую он преобразует в избыточную. В системах, использующих блочные коды, избыточность вводится путем преобразования поступающих на вход K -элементных комбинаций в n -элементные ($n \geq K$). При передаче n -элементных комбинаций по каналу связи в них вносятся ошибки. УЗО приемника отождествляет принятую n -элементную комбинацию с одной из 2^K переданных или выдает сигнал стирания.

Оценка системы может быть произведена $P_{\text{ош}}(K)$ – вероятностью ошибочного приема, $P_{\text{ст}}$ – вероятностью обнаружения ошибки и $P_{\text{пр}}$ – вероятностью правильного приема. Методика определения указанных вероятностей приведена в [3].

При исследовании вопросов передачи цифровой информации приходится сталкиваться с двумя различными понятиями скорости передачи: технической и информационной.

Техническая скорость характеризует быстродействие аппаратуры, входящей в состав передающей части системы связи. Она определяется количеством элементов дискретного сообщения, переданных за одну секунду. Эта характеристика была предложена в телеграфии около 100 лет назад французским инженером Ж. Бодо. В его честь единица технической скорости была названа бодом.

Техническая скорость передачи определяется величиной

$$R = \frac{1}{\tau_0}, \quad (6.1)$$

где τ_0 – длительность посылки, соответствующей передаче одного элемента дискретного сообщения.

В литературе техническую скорость передачи иногда называют скоростью манипуляции.

В связи с появлением и быстрым развитием теории информации и ее многочисленных приложений возникла необходимость в широком применении понятия *информационной скорости* передачи. Под этой скоростью понимают количество информации, поступившее от источника информации к получателю за

одну секунду. Информационная скорость измеряется числом переданных двоичных единиц (бит) за одну секунду. Она зависит от ряда факторов: технической скорости передачи, статистических свойств источника, типа канала связи, применяемых сигналов и помех, действующих в этом канале.

Техническую скорость передачи нельзя путать с информационной скоростью, а термин «бод» использовать как синоним термина «бит/с». Количественно эти скорости совпадают только для бинарных симметричных линий связи с высокой достоверностью передачи. Только в этом единственном случае можно принять, что 1 бод равен 1 бит/с. В общем случае информационная скорость не совпадает с технической и может быть как больше, так и меньше ее. К сожалению, в некоторых публикациях иногда указанное обстоятельство игнорируется, что приводит к неверным выводам.

6.2 Этапы обработки и распространения сигнала

Этапы обработки и распространения сигнала в типичной системе передачи цифровой информации иллюстрируются схемой, приведенной на рисунке 6.2.

Блоки с правой стороны отражают преобразование сигнала на пути от источника к передатчику, блоки с левой стороны – преобразование сигнала на пути от приемника к получателю информации, и, по сути, они противоположны блокам с правой стороны [18]. Для беспроводных приложений передатчик состоит из схемы модулятора, усилителя мощности и антенны, а приемник – из антенны, малошумящего усилителя и демодулятора.

Наличие тех или иных блоков и порядок их размещения зависят от назначения и области применения цифровой системы. Необходимыми являются этапы форматирования, модуляции, демодуляции и синхронизации. Остальные этапы обработки сигнала направлены на обеспечение специфических системных нужд.

Рассмотрим более подробно блоки обработки сигналов.

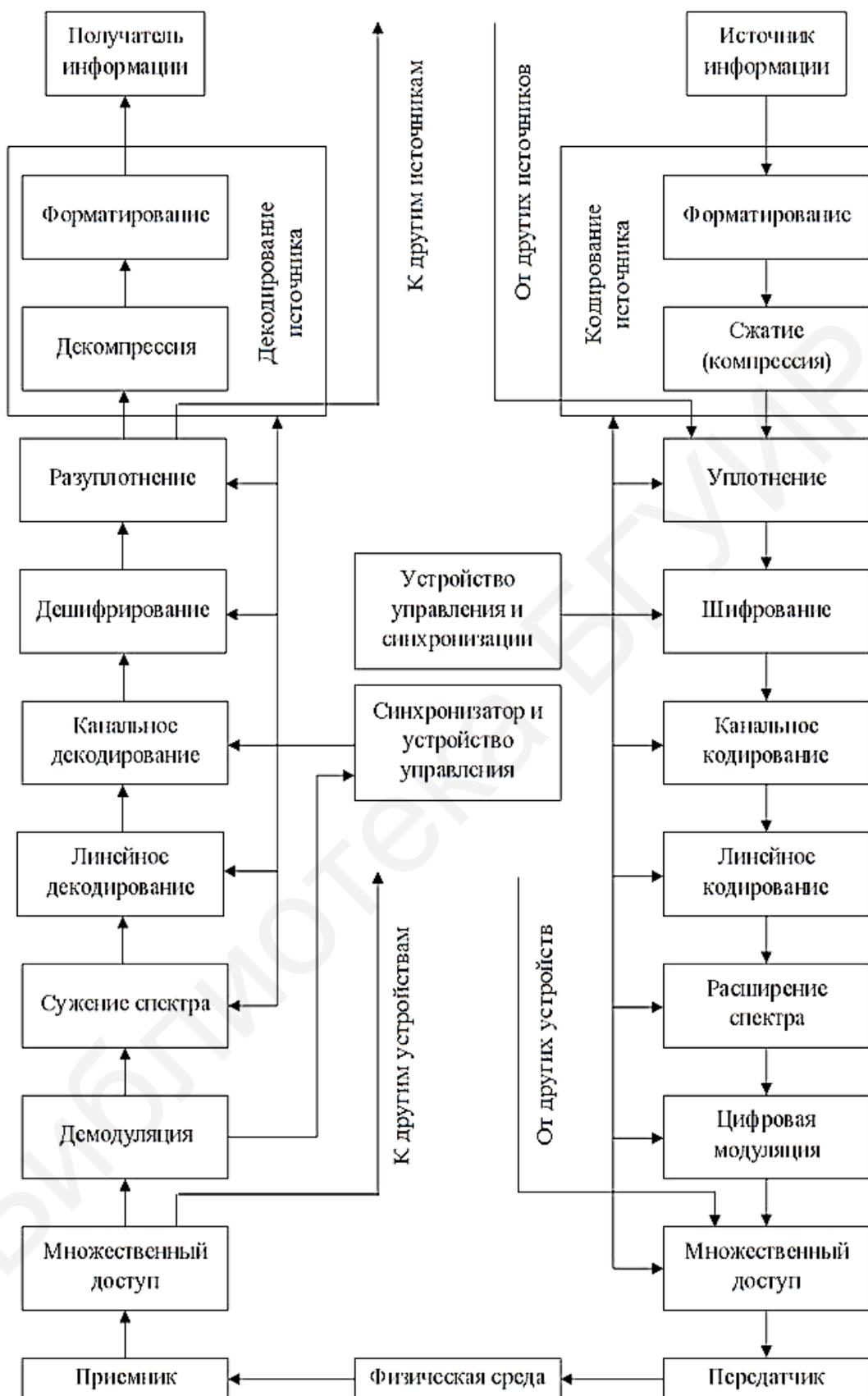


Рисунок 6.2 – Этапы обработки сигналов в системе передачи цифровой информации

6.2.1 Кодирование источника

Кодирование источника включает в себя форматирование и сжатие. Форматирование преобразовывает исходную информацию в биты в три этапа: дискретизации, квантования, кодирования (рисунок 6.3), обеспечивая таким образом совместимость информации и функций обработки сигналов с системой цифровой связи. С выхода блока форматирования (см. рисунок 6.2) и вплоть до блока линейного кодирования информация остается в форме потока битов.

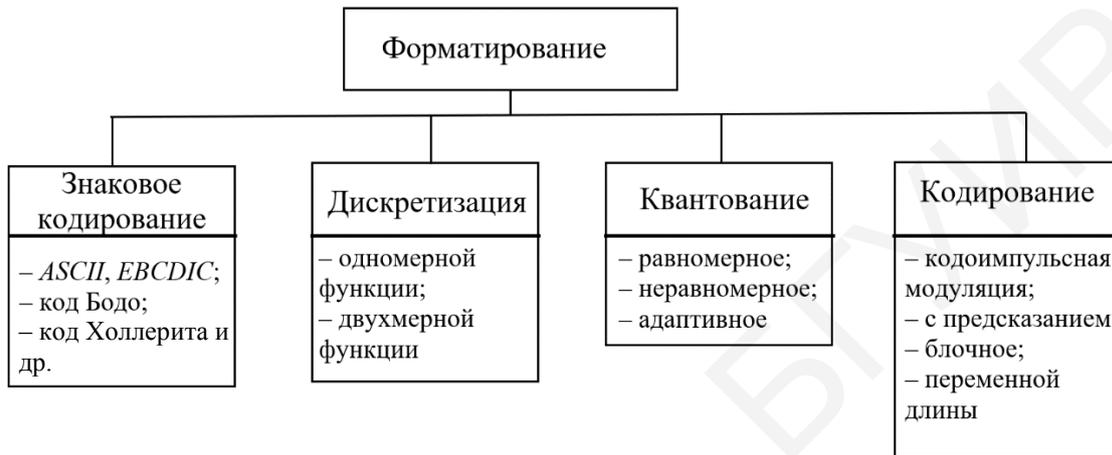


Рисунок 6.3 – Функции форматирования

Структурная схема блока форматирования на передающей и приемной сторонах для различных источников информации приведена на рисунке 6.4.

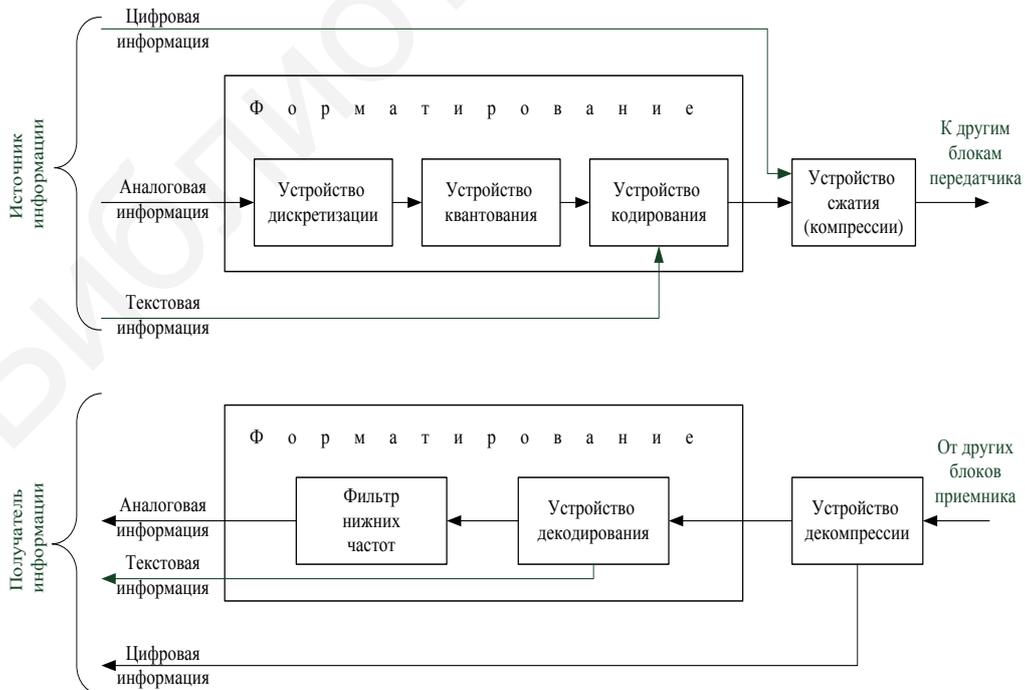


Рисунок 6.4 – Структурная схема блока форматирования

При передаче текстовых сообщений используют метод знакового кодирования *ASCII* (рисунок 6.5).

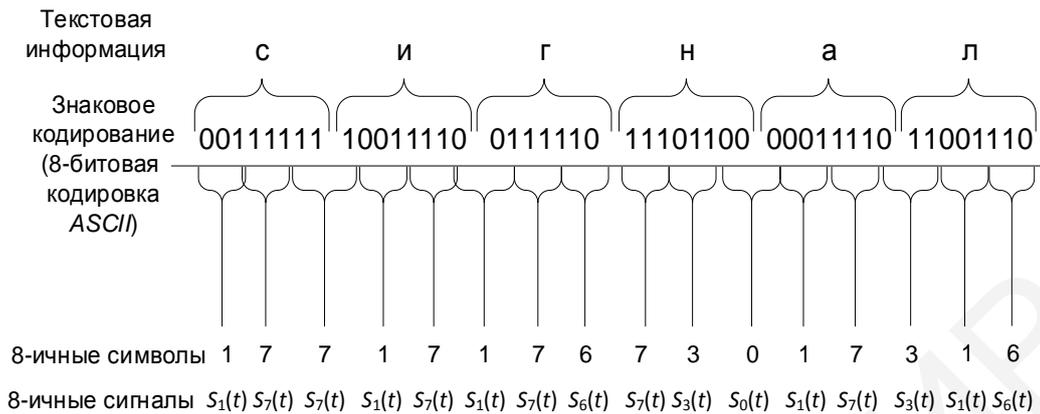


Рисунок 6.5 – Знаковое кодирование

Если помимо форматирования применяют сжатие данных, процесс называется кодированием источника. Поэтому форматирование считается частным случаем кодирования источника.

6.2.2 Сжатие данных

Передача и хранение информации требуют достаточно больших затрат. К сожалению, большая часть данных, которые нужно передать по каналам связи и сохранить, имеют не самое компактное представление. Поэтому сжатие данных – это одно из наиболее актуальных направлений современной телемеханики. Таким образом, цель сжатия данных – обеспечить компактное представление данных, вырабатываемых источником, для их более экономного сохранения и передачи по каналам связи. Основные типы систем сжатия информации приведены на рисунке 6.6.

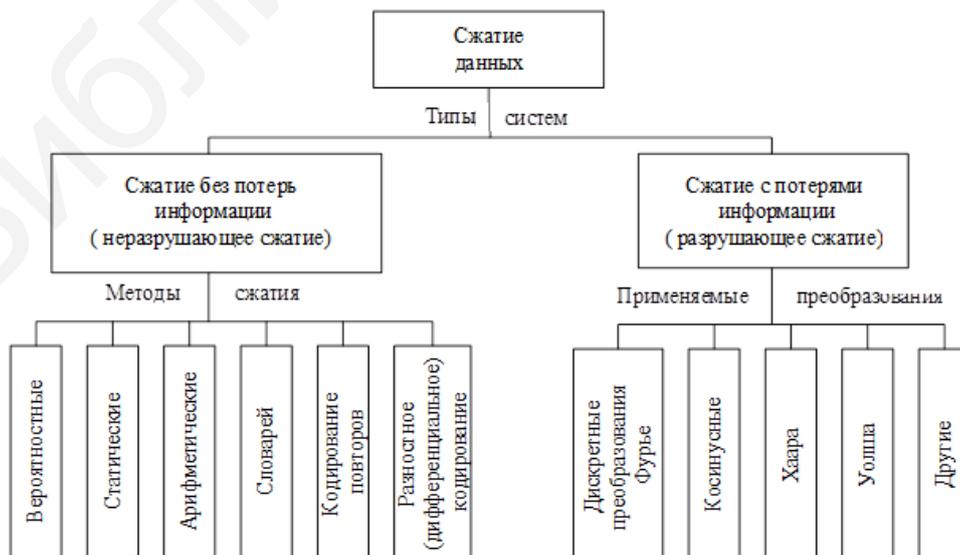


Рисунок 6.6 – Типы систем сжатия информации

В системах сжатия без потерь декодер восстанавливает данные источника абсолютно точно.

В системах сжатия с потерями кодирование производится таким образом, что декодер не в состоянии восстанавливать данные в первоначальном виде.

Сжатие осуществляется либо на прикладном уровне с помощью программы сжатия, либо с помощью устройств защиты от ошибок непосредственно в составе модемов.

6.2.3 Шифрование

Шифрование используется для обеспечения секретности связи, предотвращает понимание сообщения несанкционированным пользователем и введение в систему ложных сообщений. Таким образом, основными задачами шифрования являются аутентификация и обеспечение конфиденциальности связи. Аутентификация подразумевает предотвращение ввода в канал ложных сигналов несанкционированными лицами. Поддержание конфиденциальности означает предотвращение извлечения информации из канала несанкционированными лицами (подслушивание). В связи с этим выделяются два основных направления защиты информации: криптография и стеганография (рисунок 6.7).

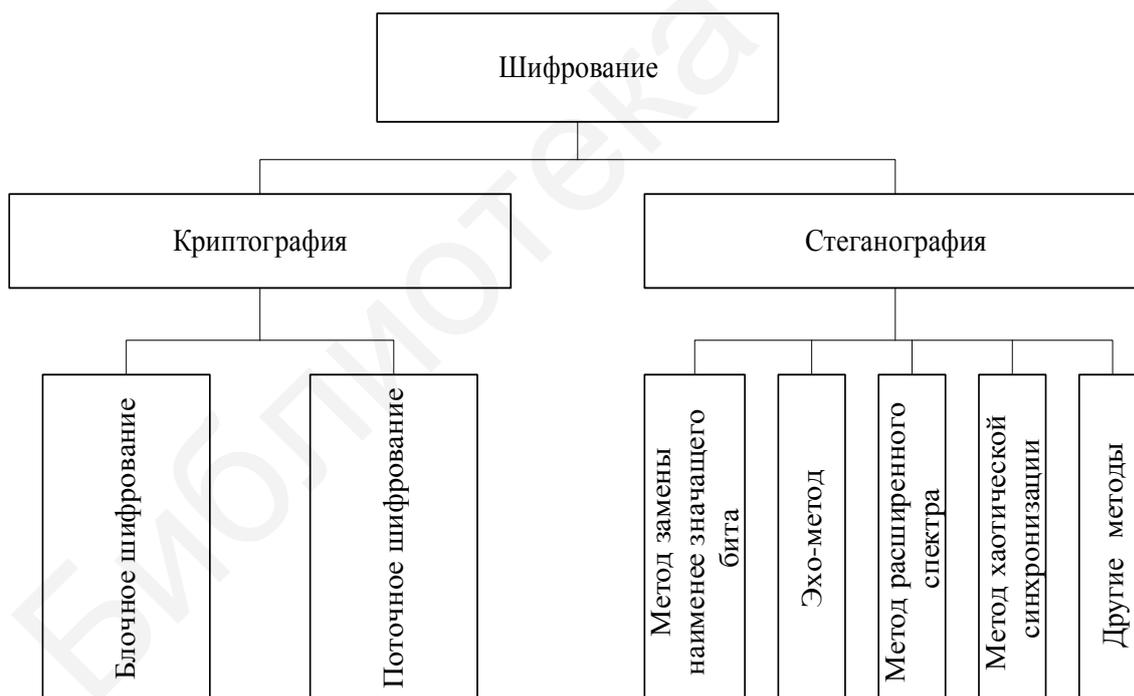


Рисунок 6.7 – Основные направления защиты информации

Целью криптографии является скрытие содержимого сообщений за счет их шифрования. В отличие от этого, при стеганографии скрывается сам факт существования тайного сообщения.

При блочном шифровании весь поток данных делится на блоки фиксированного размера, после чего каждый блок шифруется независимо. При поточном шифровании каждый бит открытого сообщения шифруется с помощью i -го элемента K_i последовательности символов, генерируемой ключом.

6.2.4 Канальное кодирование

Канальное кодирование связано с методами, используемыми для улучшения цифровых сигналов, которые в результате становятся менее уязвимыми к таким факторам ухудшения качества, как шум, замирание и подавление сигнала.

На рисунке 6.8 канальное кодирование разделено на два блока: блок кодирования сигнала и блок структурированных последовательностей.



Рисунок 6.8 – Основные виды канального кодирования

Кодирование сигнала включает использование новых сигналов, приносящих улучшенное качество детектирования по сравнению с исходным сигналом. Структурированные последовательности включают применение дополнительных битов для определения наличия ошибки, вызванной шумом в канале. Одна из таких технологий – автоматический запрос повторной передачи – просто распознает появление ошибки и запрашивает отправителя повторно передать сообщение; другая технология, известная как прямая коррекция ошибок, позволяет автоматически исправлять ошибки.

Чередования (перемежения) битов кодированного сообщения перед передачей и обратная операция после приема приводят к рассеиванию пакета ошибок во времени. Разнесение символов во времени эффективно превращает канал с памятью в канал без памяти и, следовательно, позволяет использовать коды с коррекцией случайных ошибок в канале с импульсными помехами. Идея чередования битов используется во всех блочных и сверточных кодах.

Каскадными называются коды, в которых кодирование осуществляется в два уровня: имеются внутренний и внешний коды, с помощью которых и достигается желаемая надежность передачи сообщений.

На рисунке 6.9 изображен порядок кодирования и декодирования. Внутренний код настраивается для исправления большинства канальных ошибок. Внешний код, чаще всего высокоскоростной (с низкой избыточностью), снижает вероятность появления ошибки до заданного уровня. Основной причиной использования каскадного кода является низкая степень кодирования и общая сложность реализации, меньше той, которая потребовалась бы для осуществления отдельной процедуры кодирования. Между двумя этапами кодирования располагается устройство чередования, рассеивающее пакетные ошибки, которые могли бы появиться в результате внутреннего кодирования. В одной из наиболее популярных систем каскадного кодирования для внутреннего кода применяется сверточное кодирование по алгоритму Витерби, а для внешнего – код Рида – Соломона с чередованием между двумя этапами кодирования.

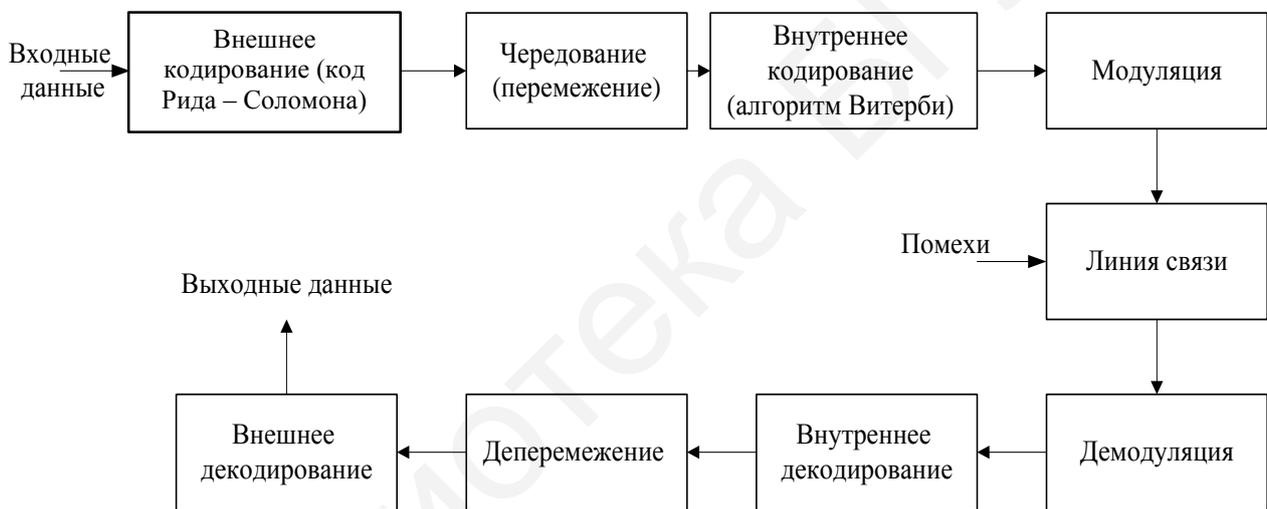


Рисунок 6.9 – Порядок кодирования и декодирования каскадных кодов

Кодирование сигнала означает преобразование сигнала в некий «улучшенный сигнал», позволяющий сделать процесс детектирования менее подверженным ошибкам. Различают два вида сигналов: антиподные и ортогональные. Антиподными сигналами называются сигналы, являющиеся зеркальным отображением друг друга, либо когда один сигнал является отрицательным по отношению к другому, либо они различаются между собой на 180° (противофазные сигналы, рисунок 6.10).

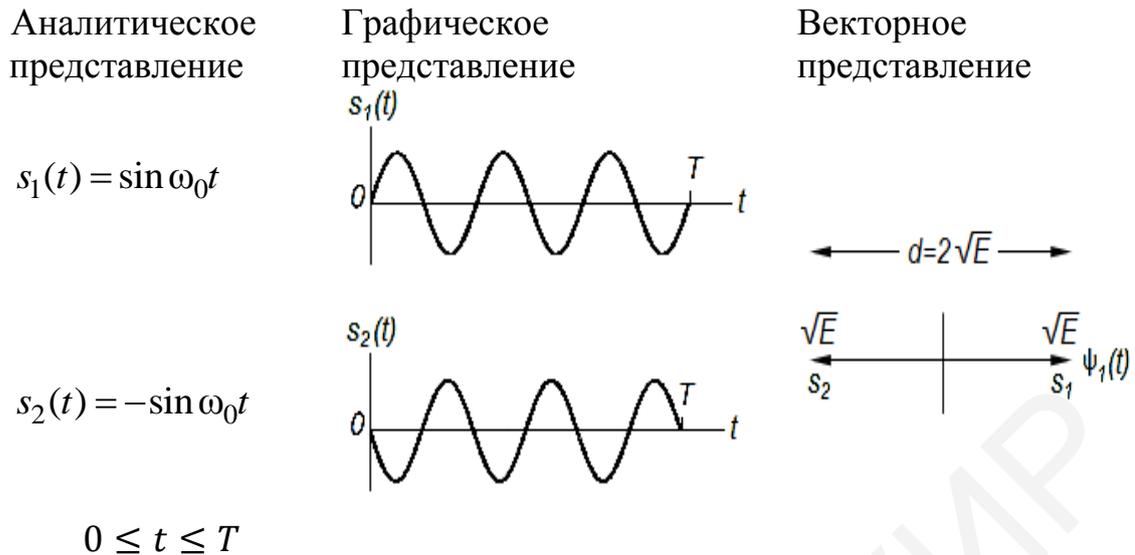


Рисунок 6.10 – Пример антиподного набора сигналов

В примере, приведенном на рисунке 6.11, показан набор ортогональных сигналов, которые имеют вид импульсов, описываемых следующими выражениями:

$$s_1(t) = p(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad \text{и} \quad s_2(t) = p\left(t - \frac{T}{2}\right), \quad 0 \leq t \leq T.$$

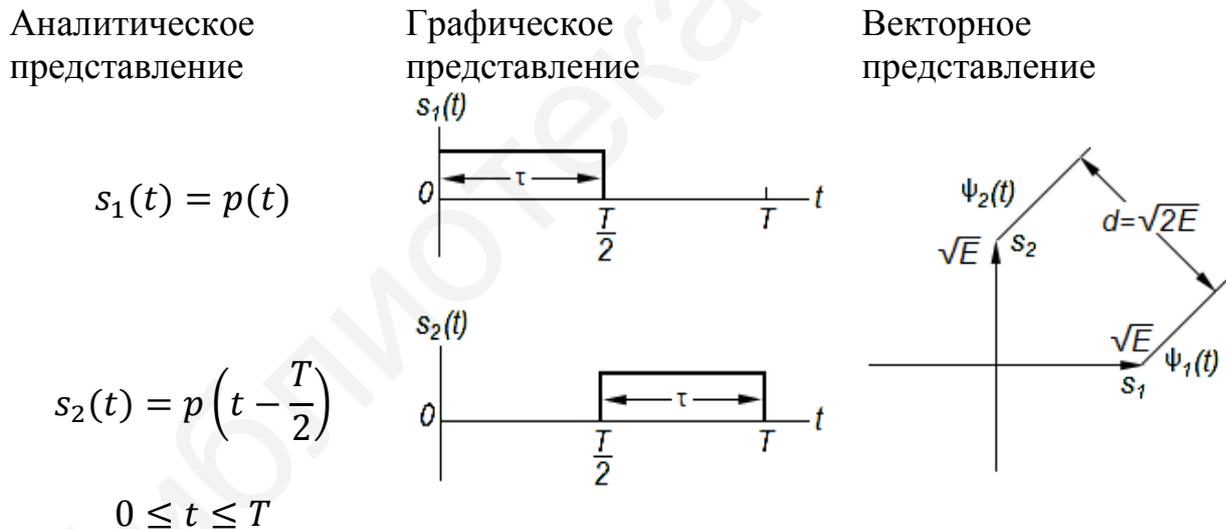


Рисунок 6.11 – Пример двоичного набора ортогональных сигналов

В данном случае $p(t)$ – импульс длительностью $\tau = T/2$, где T – период. В системах связи возможны и другие наборы ортогональных сигналов, например часто используемые $\sin x$ и $\cos x$. Любой набор равноэнергетических сигналов $s_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, M$, будет ортонормированным (ортогональным и нормированным на единицу) тогда и только тогда, когда

$$z_{ij} = \frac{1}{E} \int_0^T s_i(t) s_j(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j, \\ 0 & \text{при } i \neq j, \end{cases}$$

где z_{ij} – коэффициент взаимной корреляции (*cross-correlation coefficient*);
 E – энергия сигнала, выражаемая следующим образом:

$$E = \int_0^T s_i^2(t) dt.$$

Из графического представления на рисунке 6.11 видно, что $s_1(t)$ и $s_2(t)$ не могут взаимодействовать, поскольку они разнесены во времени. Векторное представление показывает, что ортогональные сигналы перпендикулярны (находятся в квадратуре). Посмотрим на другие, альтернативные, определения ортогональных сигналов или векторов. Можно сказать, например, что скалярное произведение двух разных векторов в ортогональном наборе должно быть равно нулю. В двух- и трехмерных декартовых системах координат векторы сигналов можно представить геометрически как взаимно ортогональные друг другу. Можно также сказать, что один вектор имеет нулевую проекцию на другой или один сигнал не может взаимодействовать с другим, поскольку они не принадлежат одному и тому же пространству сигналов.

При M -арной передаче сигналов процессор за один такт работы принимает k бит данных. После этого он указывает модулятору произвести один из $M = 2^k$ сигналов (см. рисунок 6.5), частным случаем $k = 1$ является двоичная передача сигнала. Для $k > 1$ M -арную передачу сигналов можно рассматривать как процедуру кодирования формы сигнала. При ортогональной передаче сигналов увеличение k приводит к повышению достоверности передачи или уменьшению требуемого отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/P_0 за счет увеличения полосы пропускания; при неортогональной передаче сигналов улучшение эффективности использования полосы пропускания происходит за счет снижения достоверности передачи или возрастания требуемого E_b/P_0 . Подходящий выбор формы сигнала позволяет найти компромисс между вероятностью ошибки, E_b/P_0 и эффективностью использования полосы пропускания.

6.2.5 Уплотнение и множественный доступ

Значения этих двух терминов очень похожи; оба связаны с идеей совместного использования ресурсов. Основным отличием является то, что уплотнение реализуется локально (например, на печатной плате, в компоновочном узле или даже на аппаратном уровне), а множественный доступ – удаленно (например, несколькими пользователями требуется совместно использовать спутниковый транспондер). При уплотнении применяется алгоритм, известный априорно, обычно он внедрен непосредственно в систему. Множественный доступ, наоборот, обычно адаптивен и может требовать для работы некоторых дополнений.

На рисунке 6.12 представлены классические способы совместного использования ресурсов связи: частотное, временное и кодовое разделение.



Рисунок 6.12 – Способы совместного использования ресурсов связи

6.2.6 Линейное кодирование

Линейное кодирование применяется при передаче видеосигналов по проводным линиям связи для формирования требуемого энергетического спектра, уменьшения влияния активной линии на соседние линии многожильного кабеля, уменьшения постоянной составляющей, улучшения условий синхронизации, обеспечения постоянного контроля ошибок на уровне физической линии и формирования неполярных сигналов. Линейное кодирование может применяться и при полосовой передаче с целью формирования определенного спектра.

На рисунке 6.13 указаны основные коды, применяемые при линейном кодировании.

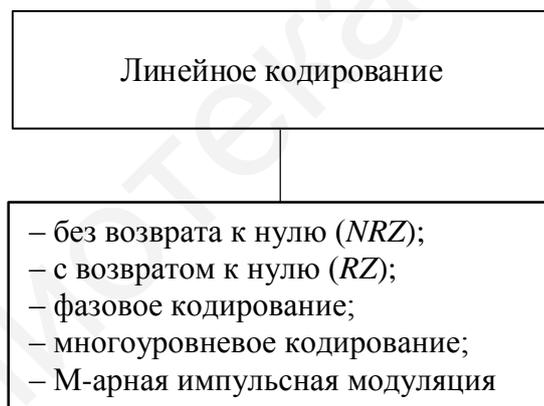


Рисунок 6.13 – Основные коды, применяемые при линейном кодировании

6.2.7 Цифровая модуляция

Цифровая модуляция – это процесс преобразования цифровых символов в сигналы, совместимые с характеристиками канала. Цифровую модуляцию целесообразно применять в следующих случаях: при использовании радиолиний, для уплотнения с частотным разделением, при формировании широкополосных сигналов, для минимизации последствий интерференции, при передаче сигналов в выделенной полосе частот проводной линии связи, а также с целью увеличения помехоустойчивости. Основные виды цифровой модуляции указаны на рисунке 6.14.

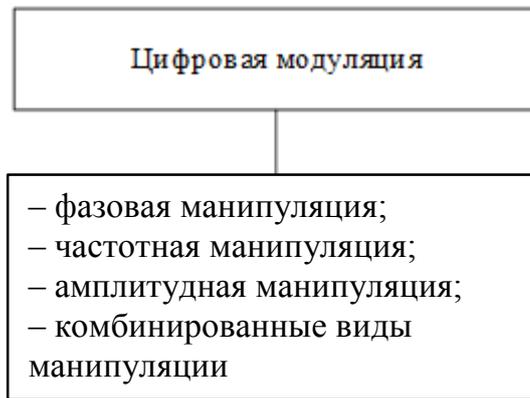


Рисунок 6.14 – Виды цифровой модуляции

Указанные на рисунке 6.14 виды цифровой модуляции подробно рассмотрены в [56].

6.2.8 Расширение спектра сигнала

Широкополосные сигналы служат для защиты от интерференции (как естественной, так и умышленной), обеспечения секретности, кодового разделения абонентов, измерения координат подвижных объектов и обеспечения электромагнитной совместимости.

Основные методы формирования широкополосных сигналов указаны на рисунке 6.15.

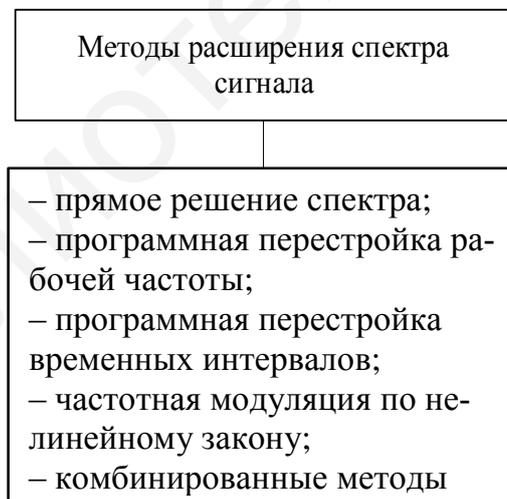


Рисунок 6.15 – Методы формирования широкополосных сигналов

6.2.9 Синхронизация

В цифровой связи синхронизация включает оценку как времени, так и частоты. Как показано на рисунке 6.16, синхронизация выполняется для пяти параметров. Эталонные частоты когерентных систем требуется синхронизировать с

несущей (и возможно, поднесущей) по частоте и фазе. Для некогерентных систем синхронизация фазы не обязательна. Основной процесс синхронизации по времени – это символьная синхронизация (или битовая синхронизация для бинарных символов). Демодулятор и детектор должны знать, когда начинать и заканчивать процесс детектирования символа и бита; ошибка синхронизации приводит к снижению эффективности детектирования. Следующий уровень синхронизации по времени – кадровая синхронизация – позволяет перестраивать сообщения. И последняя – сетевая синхронизация – позволяет скоординировать действия с другими пользователями с целью эффективного использования ресурсов.

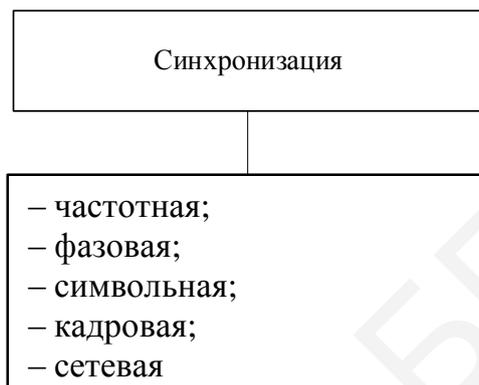


Рисунок 6.16 – Виды синхронизации в цифровых системах передачи сообщений

6.3 Функции, выполняемые отдельными устройствами систем передачи дискретной информации

На рисунке 6.17 указаны основные функции, которые выполняются отдельными устройствами передающей стороны, соответствующие рисунку 6.1. Данный порядок рекомендуется соблюдать при выполнении курсовых проектов. При этом следует указать, что приемная сторона систем передачи дискретной информации представляет собой набор устройств, выполняющих ответные функции в обратном порядке, начиная с выхода сигнала из линии связи.

Все устройства, входящие в состав систем передачи дискретных сообщений, предназначены для повышения показателей качества передаваемой информации.

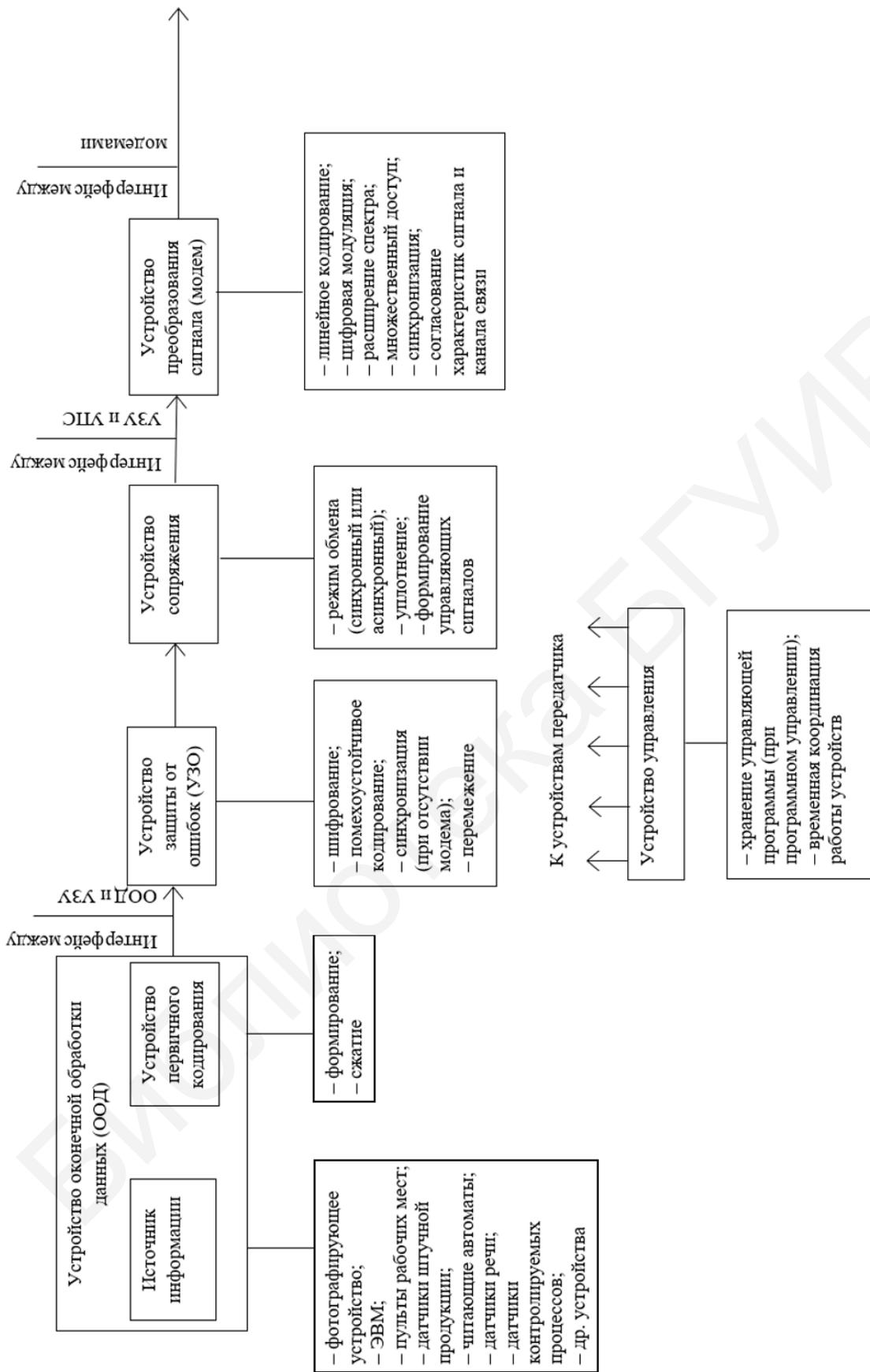


Рисунок 6.17 – Основные функции, выполняемые отдельными устройствами передающей стороны

6.4 Методы повышения качества работы систем передачи дискретных сообщений

При создании систем передачи дискретной (цифровой) информации необходимо учитывать не только ее назначение, условия работы, характер решаемых задач и требуемые показатели качества передаваемой информации, но и ряд других факторов. К их числу относятся неизбежные физические ограничения, связанные с типом используемого канала, шириной выделенного диапазона рабочих частот, техническими возможностями реализации данной системы, экономическими соображениями и т. д.

Полное решение задачи оптимизации системы передачи информации при ряде наложенных ограничений до сих пор не известно. Поэтому на практике обычно стремятся получить требуемые показатели только с учетом тех ограничений, которые наиболее существенны для рассматриваемой системы.

В настоящее время известны следующие пути повышения качества работы системы передачи цифровой информации:

- применение многопозиционных сигналов, эффективно использующих отведенную полосу частот;
- применение многочастотных видов модуляции *DMT* и *OFDM*;
- применение треллис-кодирования (треллис-модуляция);
- применение сложных сигналов, эффективно использующих излучаемую энергию (широкополосные сигналы);
- применение корректирующих кодов;
- применение перемежения;
- применение систем с обратной связью.

При создании систем часто комбинируют указанные выше методы, что позволяет получить высокие качественные показатели работы систем.

Учитывая, что многопозиционные сигналы и корректирующие коды достаточно полно рассмотрены в [61], остальным методам будет уделено внимание в последующих разделах данного учебного пособия.

7 МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

В первых шести разделах были изложены основные принципы построения систем телемеханики, выполняющие одну или две функции. Данный раздел является логическим завершением предыдущих разделов. В нем на примерах промышленных систем телемеханики будет показано, как происходит реализация изложенных принципов в многофункциональных системах. Материалы данного раздела будут полезны при выполнении курсового проекта по телемеханике. Рассмотрим построение телемеханического комплекса, работающего по выделенным проводным линиям связи и по частотно-уплотненным линиям связи произвольной структуры [28].

7.1 Назначение и структурная схема телемеханического комплекса

Комплекс предназначен для управления и контроля объектами магистральных трубопроводов. Такими объектами являются на нефтепроводах насосные, а на газопроводах – компрессорные станции. Комплекс обеспечивает также ретрансляцию командной информации с высшей ступени управления на низшую и известительной информации в обратном направлении. С этой целью осуществляется связь между КП комплекса первого уровня (рисунок 7.1) и ПУ комплекса второго уровня. Последний управляет объектами второго уровня – линейными сооружениями, замерными пунктами и т. п.

С каждого КП, независимо от их числа, может быть передана следующая информация: сигнализация о состоянии двухпозиционных объектов (ТС) – до 256 сигналов (32 группы по 8 сигналов в каждой); телеизмерение текущих значений – до 64 параметров (из них от датчиков с токовым выходом – 32, с кодовым выходом – 32); телеизмерение интегральных значений – до 8 параметров; производственно-статистическая информация (ПСИ) – до 512 десятичных разрядов (цифр). Кроме того, каждый КП может ретранслировать телеизмерения с нижестоящей системы телемеханики, обслуживающей районное диспетчерское управление магистральных трубопроводов. Число ретранслируемых телеизмерений – до 160.

На каждый КП могут быть переданы команды управления двухпозиционными объектами – до 32, кодовые команды телерегулирования – до 8, команда вызова телесигнализации. Кроме того, на каждый КП может быть передано до 128 двухпозиционных команд для ретрансляции на нижестоящую систему телемеханики районного диспетчерского управления.

Комплекс обеспечивает на ПУ ввод в вычислительную машину всей информации, передаваемой с КП, и передачу вырабатываемых машиной команд ТУ.

Комплекс состоит (см. рисунок 7.1) из приемопередающего устройства (ППУ) ПУ1, приемопередающих устройств КП1, устройства воспроизведения телесигнализации (УВТС) на ПУ, каналобразующих приборов (модемов (М)), пультов ввода на КП.

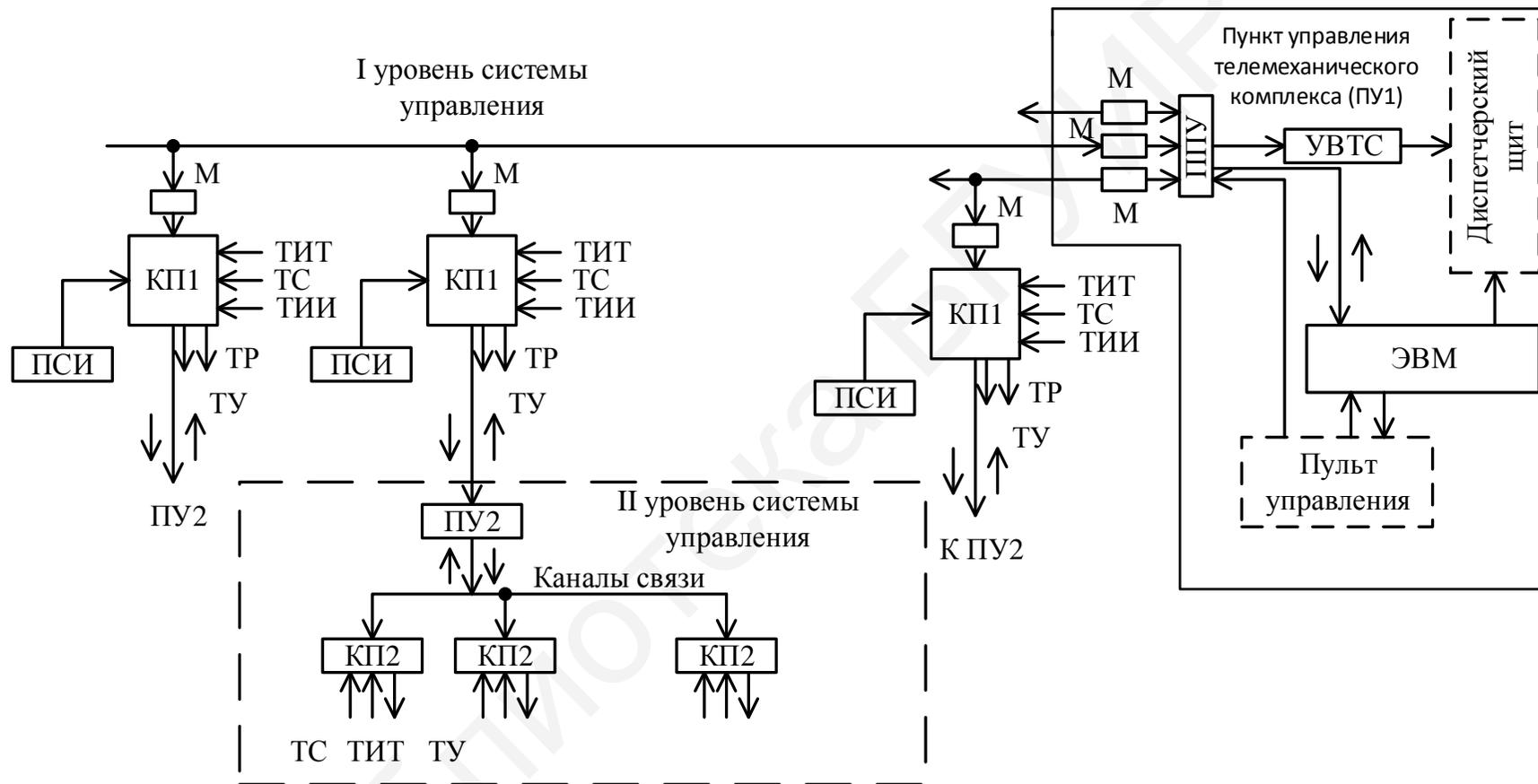


Рисунок 7.1 – Структурная схема телемеханического комплекса

7.2 Структурная схема пункта управления

В комплексе используется кодоимпульсный метод передачи сигналов с временным разделением информационных каналов. Режим работы задается через БРР устройства ПУ (рисунок 7.2) одновременной выдачей на все модемы ($M1-Mn$), т. е. во все каналы связи, кодовых посылок, определяющих функционирование системы. БРР в соответствии с алгоритмом работы осуществляет циклический вызов ТИТ, вызов в установленное время ТИИ и ПСИ. Время вызова последних определяется программой, заложенной в вычислительной машине, которая связана с БРР с помощью интерфейсных карт (ИК). Для выявления заявок на передачу телесигнализации БРР периодически осуществляет опрос КП. Команды управления двухпозиционными объектами и кодовые команды вырабатываются либо диспетчером, либо ЭВМ. Команды поступают в блок задания команд (БЗК) либо от ключей управления, расположенных на пульте диспетчера (ПД), либо от ЭВМ через интерфейсную карту. Правильность передаваемой команды диспетчер контролирует с помощью узла индикации команд (УИК), воспроизводящего команду на пульте диспетчера. Все команды, формируемые диспетчером, вводятся в вычислительную машину. Кроме команд управления двухпозиционными объектами и кодовых команд в БЗК могут быть заданы адреса контрольного вызова ТС.

В режиме приема информации БРР с помощью переключателя каналов приема (ПКП) подключает узел синхронизации (УС) по тактам с инерционным управлением к одному из модемов, образующих каналы обмена информацией между ПУ и КП. Одновременно БРР подключает соответствующий вызванному КП регистр узла памяти рассогласования (УПР). Последний служит для запоминания значений разности фазы между сигналами устройств ПУ и каждого КП. Код значения этой разности поступает в регистр УС, что позволяет уменьшить время вхождения в синхронную работу устройств.

Узел синхронизации, на который кроме сигналов из канала связи поступают тактовые сигналы от генератора тактовых импульсов (ГТИ), подстраивает фазу тактовых импульсов и осуществляет поэлементный прием кода методом стробирования. Кодовая последовательность с выхода УС поступает на кодер-декодер циклического кода, работающий в режиме декодирования, блок режима работы и блок памяти. Генератор тактовых импульсов выдает сигналы, тактирующие работу БРР и других блоков устройства. Связи между ГТИ и этими блоками на рисунке 7.2 не показаны.

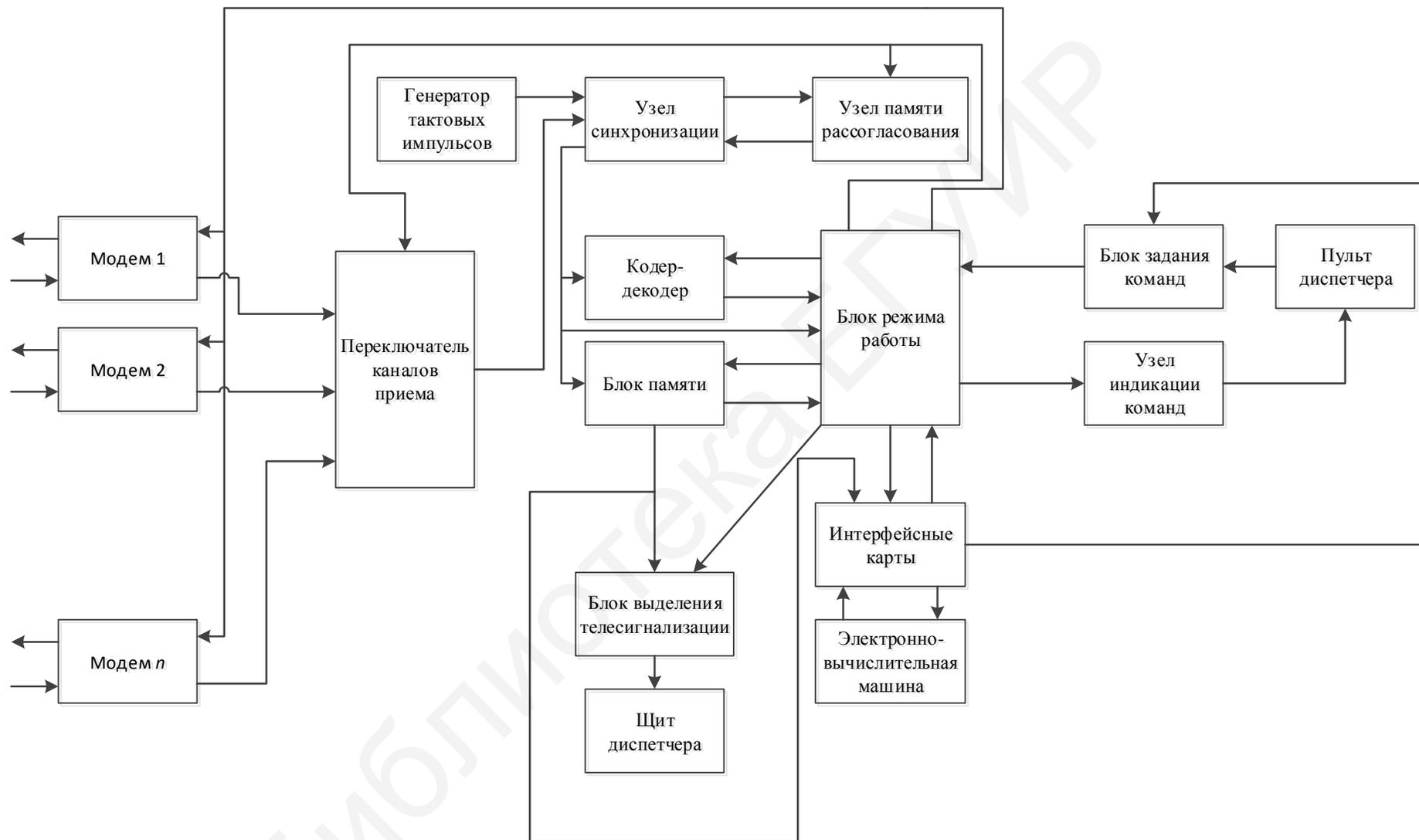


Рисунок 7.2 – Структурная схема устройства ПУ телемеханического комплекса

Обнаружение ошибок в известительных сообщениях осуществляется кодером-декодером, определяющим искажения с помощью циклического кода и контроля по паритету каждого байта. Блок режима работы, принимая с КП адрес передаваемого сообщения, сличает его с адресом вызванного сообщения, т. е. осуществляет проверку адреса при информационной обратной связи. Принимаемые известительные сообщения по мере их поступления, вводятся в БП емкостью на одну группу сообщений. Считывание информации из БП может быть осуществлено в ускоренном темпе. Информация из БП через интерфейсную карту вводится в ЭВМ, а телесигнализация состояний, кроме того, подается на устройство воспроизведения, которое управляет сигналами на щите диспетчера (ЩД).

7.3 Структурная схема контролируемого пункта

На рисунке 7.3 приведена структурная схема устройства КП. Модем (М) обеспечивает преобразование двоичных сигналов в частотно-модулированные при передаче информации с КП на ПУ и обратное преобразование при приеме сигналов из канала связи. Поступающие с ПУ сигналы после модема подаются на узел синхронизации по тактам. На последний также поступают импульсы от генератора тактовых импульсов. Узел синхронизации и ГТИ выполняют на КП те же функции, что и на ПУ. Кодер-декодер циклического кода (К-Д) работает на КП в режиме кодирования информации.

Циклическим кодом защищается вся известительная информация, передаваемая с КП.

Блок управления передачей ТС обнаруживает изменение состояний двухпозиционных объектов, выдает при этом сигнал «запрос связи» БРР и осуществляет передачу ТС по команде от БРР. Вызов ТС с ПУ также осуществляется с помощью блока управления передачей (БУПд) телесигнализации (ТС).

Передача ТИТ от токовых и кодовых датчиков осуществляется после вызова с ПУ посредством соответствующих блоков передачи ТИТ: БУПд ТИТ (АЦП) и БУПд ТИТ (К). Первый содержит аналого-цифровой преобразователь. Токовые датчики коммутируются коммутатором токовых датчиков, кодовые датчики – коммутатором кодовых датчиков.

Передача ТИИ осуществляется по вызову с помощью блока управления передачей БУПд ТИИ, который включает в себя также интеграторы, суммирующие импульсы от числоимпульсных датчиков.

Передача цифровой производственно-статистической информации осуществляется от пульта ввода (ПВ) с помощью БУПд ПСИ.

Команды ТУ и кодовые команды (КК) принимаются соответственно блоками БУПр ТУ и БУПр КК. Эти команды защищаются методом повторения с решающей обратной связью (после правильного приема командной информации с КП на ПУ посылается квитанция).

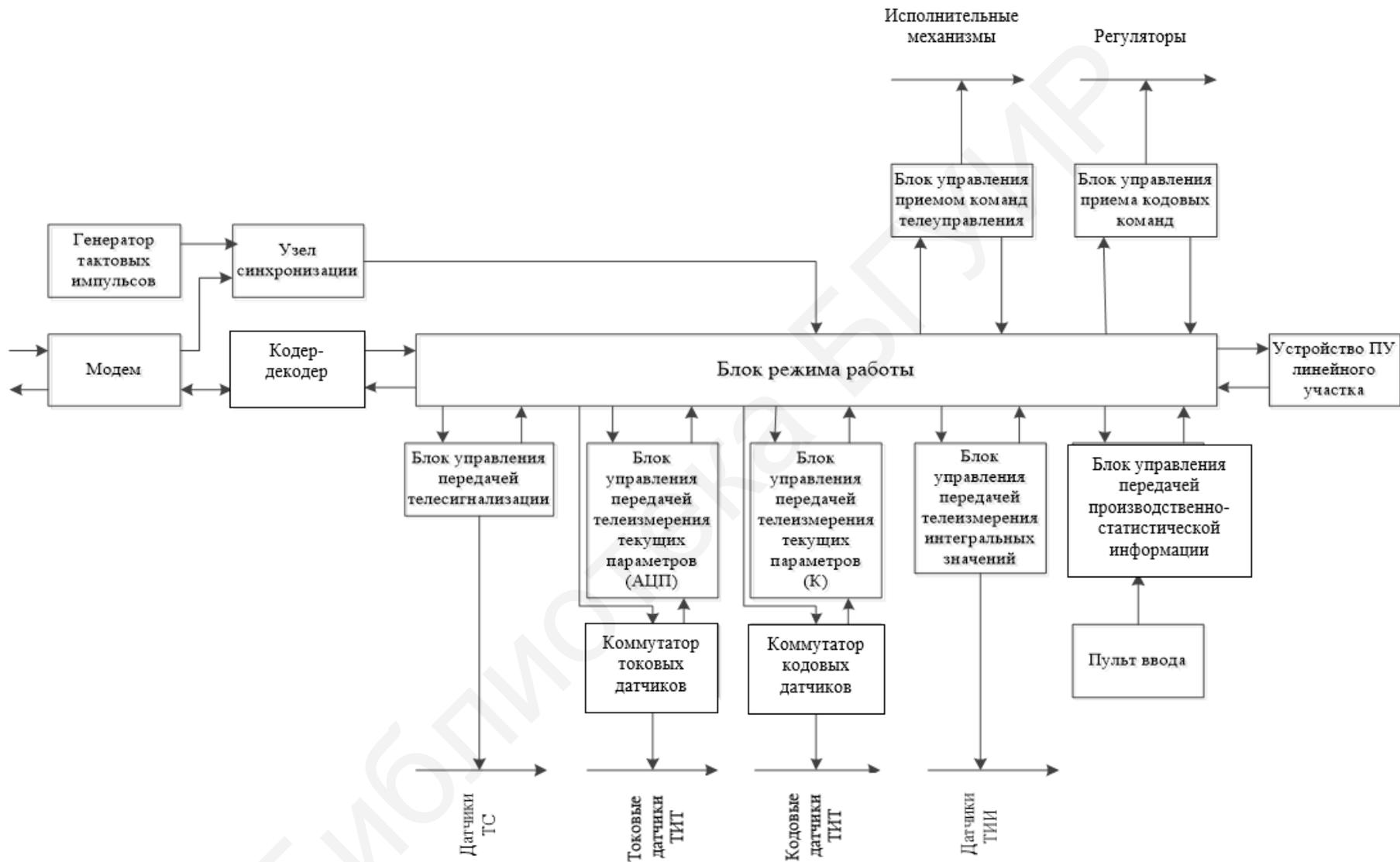


Рисунок 7.3 – Структурная схема устройства КП телемеханического комплекса

Блок режима работы КП связан с устройством ПУ комплекса линейного участка. Как указывалось выше, предусмотрены ретрансляция ТИТ и ТС с линейных участков и передача на линейные участки команд ТУ.

7.4 Структура сигналов

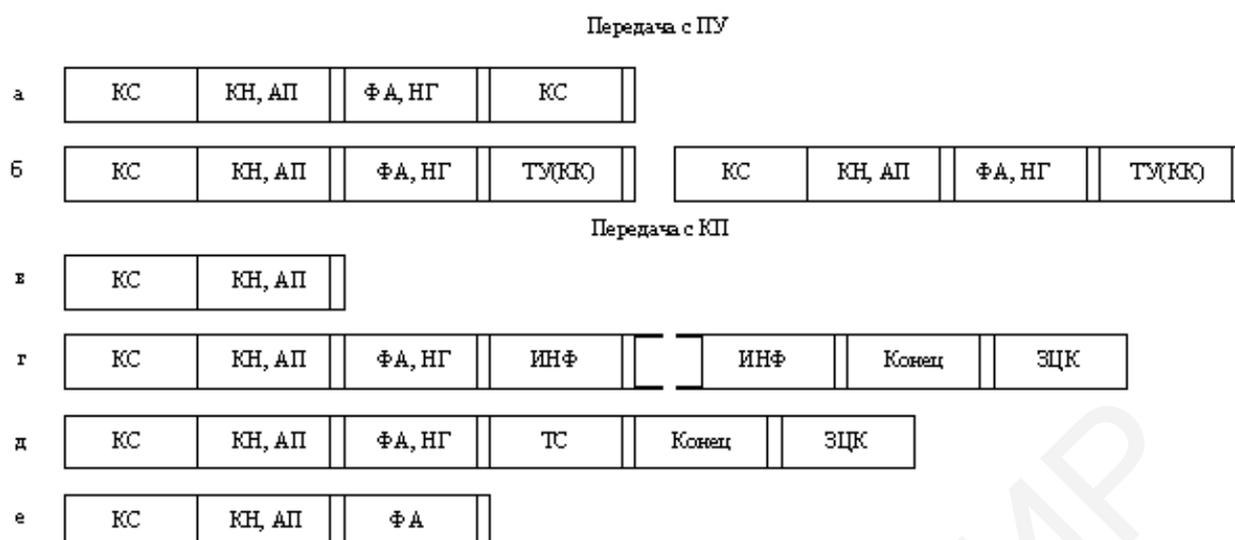
Остановимся более подробно на способах передачи и защиты служебных команд и различных видов информации. Вызов известительной информации (ТИТ, ТИИ, ПСИ, ТС), а также опрос наличия информации на КП осуществляются 4-байтовой кодовой посылкой (рисунок 7.4, а). В первом байте передается код синхронизации (КС), предназначенный для предварительной подстройки генераторов устройств КП. Синхронизация генераторов продолжается также во время передачи трех последующих байтов. Во втором байте три первых бита отведены для кода начала (КН), а остальные – для адреса КП в двоичном коде адреса пункта (АП). Максимальное число адресов равно 30 (две кодовые комбинации не используются). Третий байт содержит четыре бита функционального адреса и четыре бита номера группы. Максимальное число как функциональных адресов, так и номеров групп равно 16. В четвертом байте также передается синхрокод.

Структура передачи команд управления двухпозиционными объектами и кодовых команд приведена на рисунке 7.4, б. Первые три байта по своей структуре аналогичны вызову известительной информации. В четвертом байте вместо кода синхронизации передается позиционный код объекта ТУ в группе или значение кодовой команды (уставки) в двоичном коде.

Через выдержку времени передача команды повторяется. В случае совпадения команд с КП передается сигнал решающей обратной связи в виде двух байтов: синхрокода и адреса КП (рисунок 7.4, в). Таким образом, передача команд кроме паритета защищается методом повторения.

В ответ на вызов известительной информации с КП возвращается адрес, состоящий из трех байтов, и одна группа информационного сообщения ТИТ, ТИИ или ПСИ (рисунок 7.4, г). В первом байте передается синхронизирующий код, во втором – код начала и номер контролируемого пункта, в третьем – функциональный адрес и номер группы. Длина группы может изменяться от 1 до 16 байтов. Группа заканчивается байтом «конец», за которым следует защита циклического кода (ЗЦК). Каждый байт передаваемых сигналов защищается по паритету. Байт «конца» в отличие от других сообщений, защищаемых на нечетное число единиц, дополняется в девятом разряде до четности. На рисунке 7.4, д приведена кодовая посылка передачи ТС.

При опросе требований на передачу ТС с ПУ посылается функциональный адрес «опрос требований» (ФАОТ). Если на КП отсутствуют заявки на передачу информации, устройство КП посылает обратно ФАОТ. При наличии заявки с КП посылается функциональный адрес «запрос требований» (ФАЗТ). Кодовые посылки передачи этих функциональных адресов с КП приведены на рисунке 7.4, е.



- a* – вызов ТИТ, ТИИ, ПСИ, ТС; опрос требований, запрос требования;
б – передача ТУ и КК; *в* – квитанция о приеме ТУ и КК;
г – передача ТИТ, ТИИ, ПСИ; *д* – передача ТС;
е – передача сигналов функциональных адресов (ФАОТ и ФАЗТ)

Рисунок 7.4 – Структура сигналов в телемеханическом комплексе

7.5 Алгоритм функционирования пункта управления

Схема алгоритма работы устройства ПУ в части реализации дисциплины передачи по видам информации приведена на рисунке 7.5.

После включения питания комплекс начинает работать в режиме циклического вызова и приема ТИТ. На ПУ формируется адрес КП АП, функциональный адрес ТИТ (ФАТИТ) и посылается вызов первой группы. Затем устройство ПУ переходит в режим приема информации с КП. Правильность принимаемой информации проверяется циклическим кодом и по паритету. Если информация принята правильно и группа не последняя, то переключается номер группы (НГ) и устройство ПУ аналогично вызывает и принимает остальные группы ТИТ. Когда принята последняя группа, устройство ПУ при работе в режиме известительной передачи переходит к опросу требований (ОТ) на передачу ТС. Если же идет передача информации со всех КП, то происходит переключение адреса пункта (АП) и осуществляется циклическая передача ТИТ со следующего КП. После приема ТИТ со всех КП устройство ПУ приступает к опросу требований на передачу ТС.

Опрос требований осуществляется передачей на контролируемый пункт АП и ФАОТ. При отсутствии заявок, как указывалось выше, КП отвечает ФАОТ, а при наличии – ФАЗТ. Правильность информации проверяется по паритету. При приходе ФАЗТ с ПУ на КП осуществляется обратная передача его же. После этого устройство приступает к приему группы информации ТС. Прием информации осуществляется аналогично приему ТИТ с той лишь разницей, что после правильного приема информации устройство сразу переходит к опросу требований с того же КП.

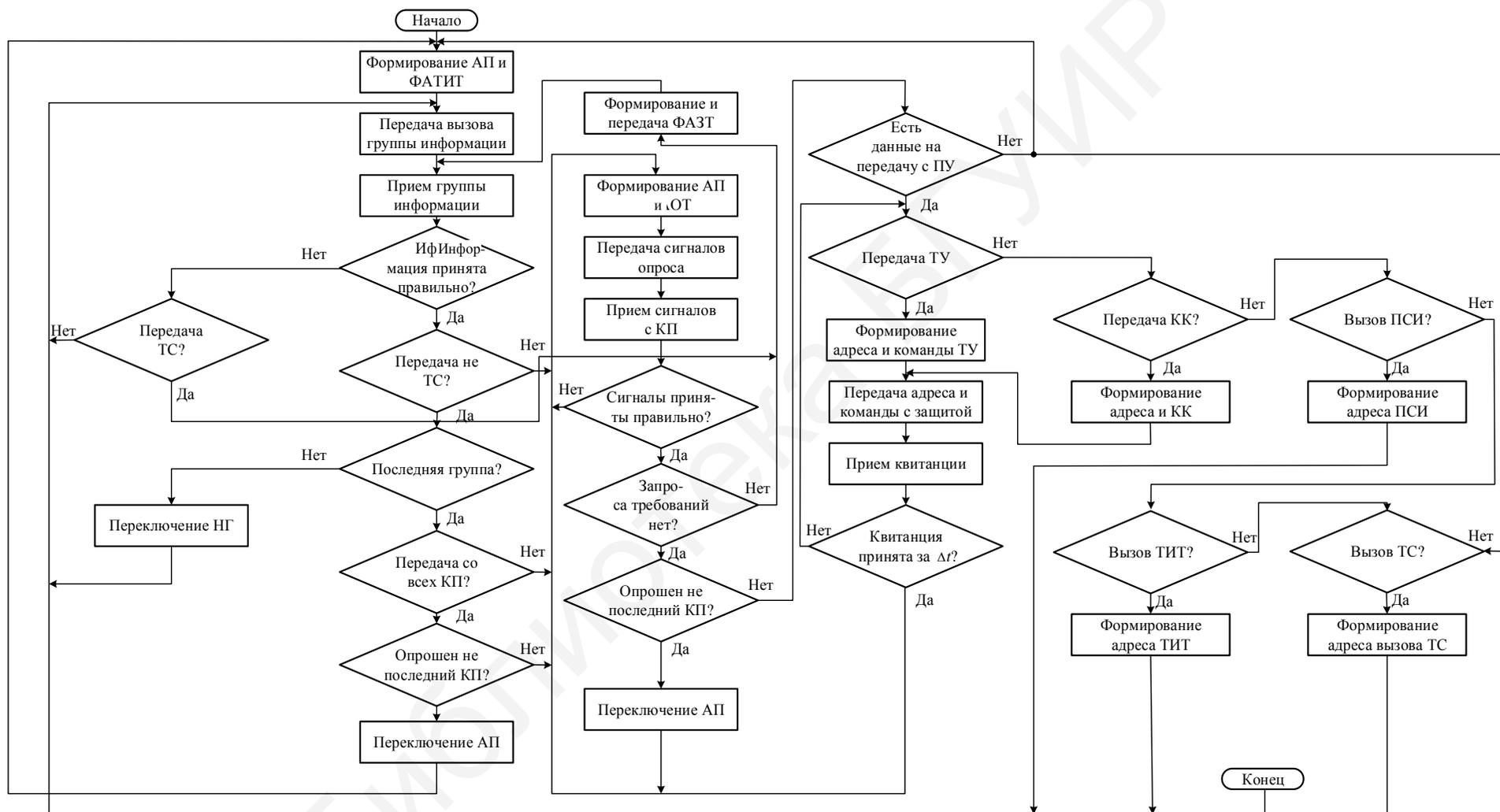


Рисунок 7.5 – Обобщенная схема алгоритма функционирования пункта управления телемеханического комплекса

При неправильном приеме информации устройство ПУ вновь передает на КП ФАЗТ. Если три раза подряд принимаемая информация искажена, то осуществляется сигнализация неисправности данного КП и устройство ПУ переходит к опросу следующего КП. На обобщенной схеме алгоритма последнее не показано. Это относится также к проверке приема других видов информации и служебных сигналов.

Если при повторном опросе КП (после приема группы ТС) вместо ФАЗТ поступает ФАОТ, т. е. запрос требований отсутствует, то осуществляются переключение адреса пункта и переход к опросу следующего КП. При отсутствии заявки на передачу информации с последнего КП устройство проверяет наличие заявок на передачу с ПУ. Если последних нет, то устройство возвращается к вызову и приему ТИТ.

При наличии заявки на передачу определяется ее вид. Передача ТУ и КК осуществляется аналогично – формируются соответствующий адрес и команда, и производится их передача с защитой повторением и по паритету. После этого устройство ПУ приступает к приему квитанции с КП о поступлении команды. Если квитанция пришла за время Δt , устройство переходит к опросу требований на передачу ТС. Если квитанция не пришла, то устройство вновь передает команду по приведенному алгоритму. После трехкратного повторения передачи команды без поступления квитанции выдается сигнал неисправности данного КП. На схеме алгоритма последнее не показано.

При вызове ПСИ и ТИИ также формируется соответствующий адрес и устройство ПУ осуществляет вызов информации аналогично вызову ТИТ. После этого устройство функционирует по описанному алгоритму.

При вызове ТС формируется функциональный адрес вызова ТС. Далее аналогично вызову ТИТ осуществляется вызов первой группы ТС. При получении указанного сигнала устройство КП взводит триггеры наличия информации во всех группах ТС и начинает передавать первую группу ТС. После приема первой группы ТС устройство ПУ переходит в режим опроса наличия требований ТС. Опрашиваются все КП, начиная с первого. При этом, кроме ТС, с вызванного КП будут переданы все изменения состояния объектов.

7.6 Алгоритм функционирования контролируемого пункта

Схема алгоритма работы устройства КП в части реализации дисциплины передачи по видам информации приведена на рисунке 7.6.

Работа КП начинается с приема кода синхронизации (КС) и адреса пункта (АП). Проверяется совпадение присланного с ПУ функционального адреса (ФА) с номером данного КП. Если они совпали, то начинается прием следующего байта сообщения. Если нет, то устройство КП через задержку, определяемую малым циклом работы, возвращается в исходное состояние.

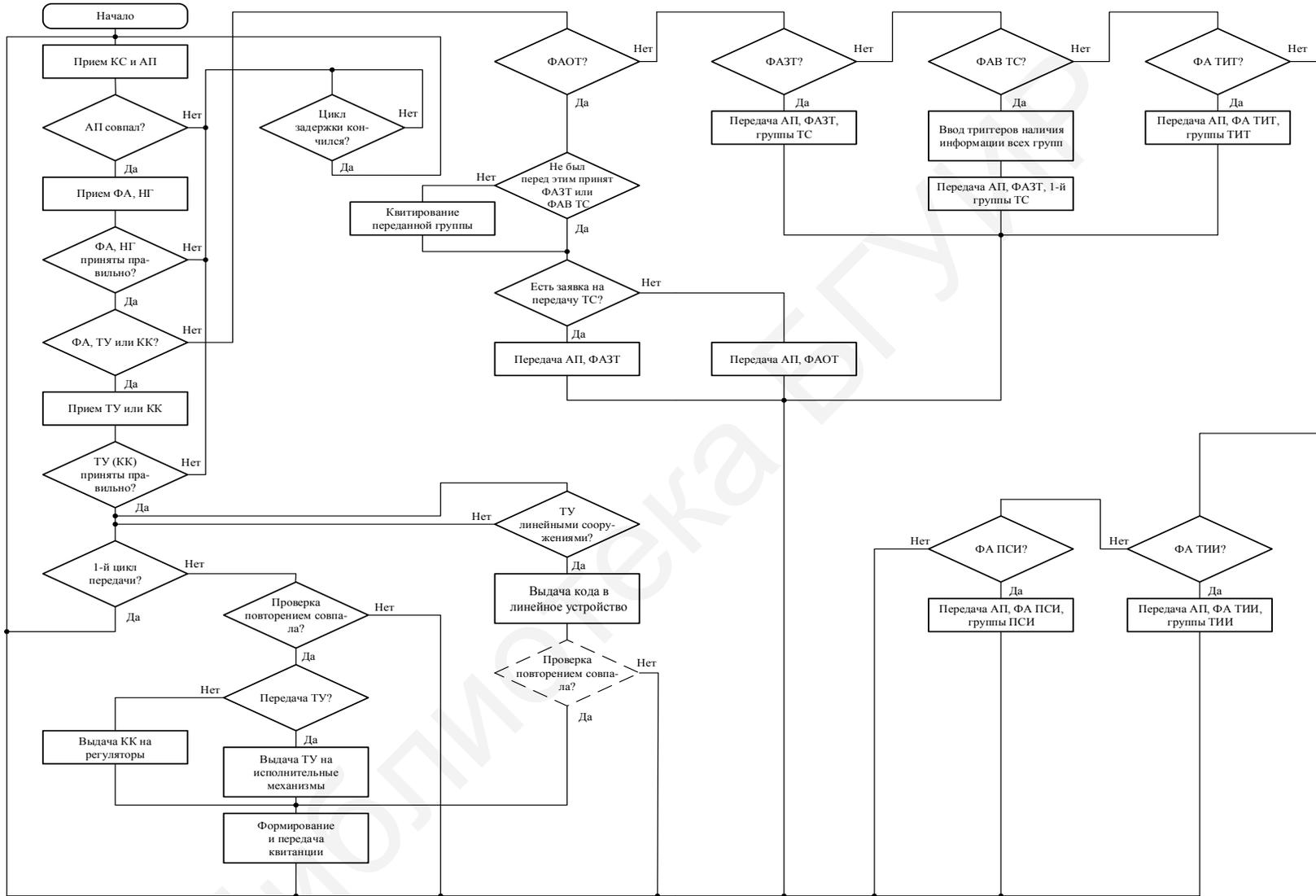


Рисунок 7.6 – Обобщенная схема алгоритма функционирования устройства контролируемого пункта телемеханического комплекса

Далее последовательно принимаются функциональный адрес и номер группы, а затем при передаче функциональных адресов ТУ и КК – код команды. Каждый байт проверяется по паритету. Если имеются искажения, то устройство через указанную выше задержку возвращается в исходное состояние.

Затем по функциональному адресу определяется, не предназначены ли команды ТУ для управления линейными сооружениями трубопровода. Если команды не должны быть ретранслированы на линейные сооружения, выясняется – идет ли первый или второй цикл передачи.

При первом цикле устройство возвращается в исходное состояние и начинает по описанному выше алгоритму принимать повторную передачу команды. При втором цикле выполняется проверка всей команды методом повторения. Если команда принята верно, то при ТУ выходное реле включает исполнительный механизм, а кодовая команда выдается на соответствующий регулятор. После этого устройство КП формирует и передает квитанцию о приеме ТУ или КК. Если коды не совпали, то устройство возвращается в исходное состояние.

При поступлении команды для ретрансляции на линейные сооружения ее код выдается в устройство ПУ комплекса второго уровня, где осуществляется проверка команды методом повторения (на рисунке 7.6 это показано пунктиром). При положительных результатах проверки устройство ПУ второго уровня выдает в устройство первого уровня сигнал для формирования и передачи квитанции, при отрицательных результатах – сигнал для возвращения в исходное состояние.

Если с ПУ передается не ТУ или КК, то определяется, является ли принятый функциональный адрес опросом требований. ФАОТ квитанцией с ПУ о приеме телесигнализации. Если да, то осуществляется квитирование переданной группы, а затем проверяется наличие ТС. Если нет, то сразу проверяется наличие заявки на передачу. При наличии заявки на ПУ передаются АП и ФАЗТ, при отсутствии – АП и ФАОТ, после чего схема приходит в исходное состояние.

При приходе функционального адреса «запрос требований» устройство КП выявляет старшую по приоритету группу из всех групп ТС, выставивших заявку на передачу, и передает ее в канал связи, сопровождая АП и ФАЗТ. Вся передаваемая информация защищается циклическим кодом.

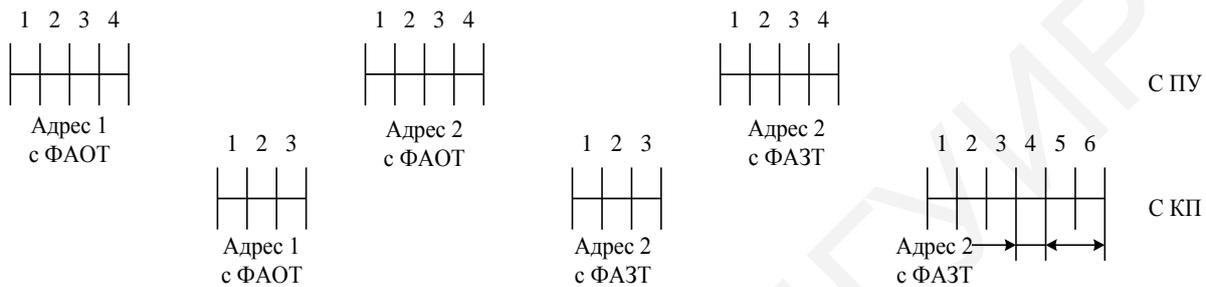
Если пришел функциональный адрес вызова (ФАВ) ТС, то осуществляются взвод триггеров наличия информации всех групп и передача первой группы ТС, сопровождаемой АП и ФАЗТ. Все остальные группы будут передаваться согласно их приоритету при поступлении с ПУ ФАЗТ.

Передача ТИТ, ДНИ, ПСИ осуществляется с КП при принятии КП соответствующего функционального адреса. Передача каждого вида информации сопровождается АП и своим функциональным адресом. После последнего информационного байта передается «конец сообщения», а затем девять разрядов защиты циклического кода (ЗЦК).

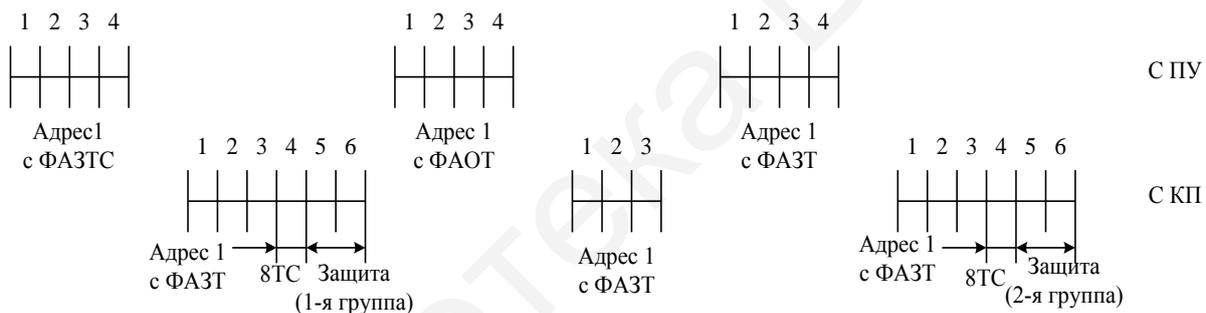
Диаграмма обмена сигналами между устройствами ПУ и КП приведена на рисунке 7.7.



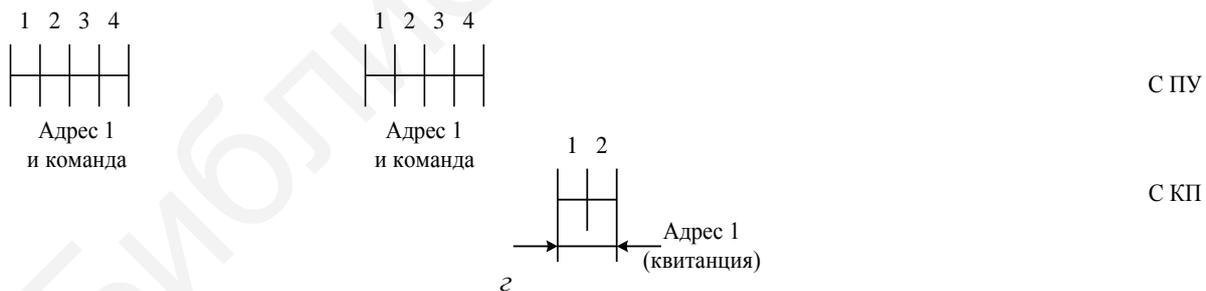
a



б



в



г

a – вызов и прием известительных сообщений ТИТ, ТИИ, ПСИ;
б – опрос требований и прием сообщения ТС; *в* – контрольный вызов и прием сообщений ТС; *г* – передача ТУ и КК

Рисунок 7.7 – Диаграмма обмена сигналами между ПУ и КП первого уровня

При опросе требований (рисунок 7.7, *б*) на первом КП заявки отсутствуют, со второго КП передается заявка на передачу, а затем группа сообщений.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

А – анализатор
АВД – автоматический временной дискретизатор
АИМ – амплитудно-импульсная модуляция
АМ – амплитудная модуляция
АМП – амплитудная манипуляция
АП – адрес пункта
АРМ – автоматизированное рабочее место
АСУП – автоматизированная система управления предприятием
АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом
АТИС – адаптивная телеизмерительная система
АТС – автоматическая телефонная станция
АЦП – аналого-цифровой преобразователь
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
БВМП – блок выделения максимальной погрешности
БВС – бортовая вычислительная система
БЗ – блок запрета
БЗК – блок задания команд
БЗУ – буферное запоминающее устройство
БИТС – бортовая информационно-телеметрическая система
БП – буферная память
БПА – блок памяти адресов
БПУ – блок памяти уставки
БРР – блок режимов работы
БС – блок считывания
БУ – блок управления
БУВ – блок управления вызовом
БУПд – блок управления передачей
БУПр – блок управления приемом
ВИ – восстановитель импульсов
ВИЭ – выходной исполнительный элемент
ВРК – временное разделение каналов
ВТИ – выделитель тактовых импульсов
ВЧ – высокочастотный
ГТИ – генератор тактовых импульсов
ДД – дискриминатор длительности
ДКС – дискретный канал связи
ДМ – демодулятор
ДП – диспетчерский пункт
ДС – датчик сигнализации
ЗУ – запоминающее устройство
ЗЦК – защита циклического кода

ИК – интерфейсная карта
ИОС – информационная обратная связь
КЗП – контроль заполнения памяти
КИМ – кодоимпульсная модуляция
КК – кодовая команда
КН – код начала
КП – контролируемый пункт
КС – код синхронизации
ЛБ – линейный блок
М – модем
МПУ – местное программное устройство
НГ – номер группы
НКП – наземный командный пункт
НЧ – низкочастотный
ОТ – опрос требований
ОФМП – односторонняя фазовая манипуляция
ПВ – пульт ввода
ПД – пульт диспетчера
ПКП – переключатель каналов приема
ПЛК – программируемый логический контроллер
ПО – промышленный объект
ППУ – приемопередающее устройство
ПРД – передатчик
ПРМ – приемник
ПрСИ – приемник синхроимпульса
ПСИ – производственно-статистическая информация
ПУ – пункт управления
ПФ – полосовой фильтр
РИ – распределитель импульсов
РОС – решающая обратная связь
СИ – синхроимпульс
СК – синхрокод
СПЦИ – система передачи цифровой информации
СС – схема сравнения
ССИ – селектор синхроимпульсов
СТИ – система телеизмерений
ТИ – телеизмерение
ТИИ – телеизмерение интегральных параметров
ТИТ – телеизмерение текущих параметров
ТМП – телеметрический параметр
ТР – телерегулирование
ТС – телесигнализация
ТУ – телеуправление
УВТС – устройство воспроизведения телесигнализации

УДД – узел двойной дискриминации
УЗО – устройство защиты от ошибок
УИ – устройство индикации
УПД – устройство передачи данных
УПК – устройство первичного кодирования
УПР – узел памяти рассогласования
УПС – устройство преобразования сигнала
УС – узел синхронизации
УТС – узел тактовой синхронизации
УЦС – узел цикловой синхронизации
ФА – функциональный адрес
ФАВ – функциональный адрес вызова
ФЗТ – функциональный адрес запроса требований
ФАОТ – функциональный адрес опроса требований
ФАП – фазовая автоподстройка
ФИМ – фазоимпульсная модуляция
ФМП – фазовая манипуляция
ФМ – фазовая модуляция
ФНЧ – фильтр нижних частот
ФСИ – формирователь синхроимпульсов
ФУ – формирователь уставок
ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель
ЦААС – цифровой анализатор активности сигнала
ЦАП – цифроаналоговый преобразователь
ЦДП – центральный диспетчерский пункт
ЧВРК – частотно-временное разделение каналов
ЧИМ – частотно-импульсная модуляция
ЧМ – частотная модуляция
ЧМП – частотная манипуляция
ЧРК – частотное разделение каналов
ШИМ – широтно-импульсная модуляция
ЩД – щит диспетчера

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управление в технических системах». В 2 ч. Ч. 1 : Сообщения и сигналы / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2000. – 128 с.
- 2 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управление в технических системах». В 2 ч. Ч. 2 : Коды и кодирование / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2001. – 168 с.
- 3 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управление в технических системах» и «Информационные технологии и управление в технических системах» всех форм обучения. В 4 ч. Ч. 3 : Линии связи и помехозащищенность информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2005. – 132 с.
- 4 Авдеев, Б. Я. Адаптивные телеизмерительные системы / Б. Я. Авдеев, Е. М. Антонюк, С. Н. Долинов. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 248 с.
- 5 ГОСТ 26.205–88. Комплексы и устройства телемеханики. Общие технические условия. – Введ. 1988–12–23. – М. : Изд-во стандартов, 1988.
- 6 ГОСТ 26.014–81. Средства измерений и автоматизации. Сигналы электрические кодированные входные и выходные. – Введ. 1981–02–04. – М. : Изд-во стандартов, 1981.
- 7 ГОСТ 26.013–81. Средства измерения и автоматизации. Сигналы электрические с дискретным изменением параметров входные и выходные. – Введ. 1981–02–20. – М. : Изд-во стандартов, 1981.
- 8 ГОСТ Р 52931–2008. Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия. – Введ. 2008–06–27. – М. : Стандартинформ, 2009.
- 9 ГОСТ 21128–83. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В. – Введ. 1983–11–29. – М. : Изд-во стандартов, 1983.
- 10 Емельянов, Г. А. Передача дискретной информации : учебник для вузов / Г. А. Емельянов, В. О. Шварцман. – М. : Радио и связь, 1982. – 240 с.
- 11 Радиосистемы передачи информации / И. М. Тепляков [и др.]. – М. : Радио и связь, 1982. – 264 с.
- 12 Лагутенко, О. Н. Современные модемы / О. Н. Лагутенко. – М. : Эко-Трендз, 2002. – 344 с.
- 13 Смит, Д. Сопряжение компьютеров с внешними устройствами / Д. Смит. – М. : Мир, 2000. – 266 с.
- 14 Галкин, В. А. Телекоммуникации и сети : учеб. пособие / В. А. Галкин, Ю. А. Григорьев. – М. : МГТУ им. Баумана, 2003. – 608 с.
- 15 Гаранин, М. В. Системы и сети передачи информации : учеб. пособие / М. В. Гаранин, В. И. Журавлев, С. В. Кунечин. – М. : Радио и связь, 2001. – 336 с.
- 16 Маковеева, М. М. Системы и средства связи с подвижными объектами : учеб. пособие / М. М. Маковеева, Ю. С. Шинаков. – М. : Радио и связь, 2002. – 440 с.
- 17 Невдяев, Л. М. Мобильная спутниковая связь : справочник / Л. М. Невдяев. – М. : МЦНТИ, 1998. – 155 с.
- 18 Ратынский, М. В. Основы сотовой связи / М. В. Ратынский ; под ред. Д. Б. Замина. – М. : Радио и связь, 1998. – 248 с.
- 19 Банкет, В. П. Цифровые методы в спутниковой связи / В. П. Банкет, В. М. Дорофеев. – М. : Радио и связь, 1988. – 240 с.
- 20 Феер, К. Беспроводная цифровая связь / К. Феер ; пер. с англ. ; под ред. В. И. Журавлева. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.
- 21 Ицкович, Э. Л. Методы рациональной автоматизации производства / Э. Л. Ицкович. – М. : Инфра-Инженерия, 2009. – 240 с.

- 22 Лопухов, И. Технология питания IP-устройств по сигнальному кабелю «Power over Ethernet» и ее реализация в промышленном сетевом оборудовании / И. Лопухов // Современные технологии автоматизации. – 2009. – №4.
- 23 Контроллеры привязки измеряемых параметров к единому времени / В. Румянцев [и др.] // СТА. – 2016. – №3.
- 24 Лопухов, И. Резервирование промышленных сетей Ethernet на втором уровне OSI: стандарты и технологии / И. Лопухов // СТА. – 2009. – №3.
- 25 Лопухов, И. Обеспечение безопасности OPC для АСУ ТП / И. Лопухов // СТА. – 2014. – №3.
- 26 Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
- 27 Безопасность систем SCADA и АСУ ТП [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа : http://www.securitybridge.com/biblioteka/stati_po_bezopasnosti/bezopasnost_sitem_scada_i_asutp.
- 28 Пшеничников, А. М. Телемеханические системы на интегральных микросхемах / А. М. Пшеничников, М. Л. Портнов. – М. : Энергия, 1977. – 296 с.
- 29 Спутниковый охраняемый комплекс «Эшелон» [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа : <http://www.eshelon.ru/system-5.html>.
- 30 Основы автоматизации технопроцессов : учеб. пособие / А. В. Щагин [и др.]. – М. : Высш. обр., 2009. – 163 с.
- 31 Вулис, А. Основные положения базовых стандартов ГОСТ Р МЭК на устройства и системы телемеханики / А. Вулис, В. Сумительнов // СТА. – 2007. – №4, №3.
- 32 Спринт – РВ – интеллектуальная SCADA-система / А. Башлыков [и др.] // Приборы. – 2006. – №12(78).
- 33 Гобчанский, О. Проблемы создания бортовых вычислительных компьютеров малых космических аппаратов / О. Гобчанский // СТА. – 2001. – №4.
- 34 Рошан, П. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11 / П. Рошан, Дж. Лиэри ; пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2004. – 304 с.
- 35 Кузнецов, Р. Кабели для современных сетей промышленной автоматизации / Р. Кузнецов // Автоматизация в промышленности. – 2005. – №8.
- 36 Смит, Д. Д. Функциональная безопасность / Д. Д. Смит, К. Д. Симсон ; пер. с англ. – М. : Изд. дом «Технологии», 2004. – 208 с.
- 37 Олифер, В. Г. Основы сетей передачи данных : курс лекций / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – М. : ИНТУИТ, 2003. – 248 с.
- 38 ГОСТ Р МЭК 870-5-1-95. Устройства и системы телемеханики. Ч. 5. Протоколы передачи. Раздел 1. Форматы передаваемых кадров. – Введ. 1995-03-25. – М. : Изд-во стандартов, 1995.
- 39 Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
- 40 Нестеров, А. А. Проектирование АСУТП : метод. пособие. Кн. 1 / А. Л. Нестеров. – СПб. : ДЕАН, 2006. – 552 с.
- 41 Столлингс, В. Современные компьютерные сети / В. Столлингс ; пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2003. – 638 с.
- 42 ГОСТ Р МЭК 870-5-2-95. Устройства и системы телемеханики. Ч. 5. Протоколы передачи. Раздел 2. Процедуры в каналах передачи. – Введ. 1995-03-23. – М. : Изд-во стандартов, 1995.
- 43 Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс / А. В. Назаров [и др.]. – СПб. : Наука и техника, 2007. – 672 с.
- 44 Харазов, В. Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами / В. Г. Харазов. – СПб. : Профессия, 2009. – 592 с.

- 45 Жиленков, Н. Новые технологии беспроводной передачи данных / Н. Жиленков // Современные технологии автоматизации. – 2003. – №4.
- 46 Шахнович, И. В. Современные технологии беспроводной связи / И. В. Шахнович. – М. : Техносфера, 2006. – 287 с.
- 47 Половинкин, В. HART-протокол / В. Половинкин // Современные технологии автоматизации. – 2002. – №1.
- 48 Гупта, А. Выбор промышленной сети для автоматизации технологических процессов / А. Гупта, Р. Каро // Современные технологии автоматизации. – 1999. – №3.
- 49 Применение промышленных контроллеров для автоматизации гидрометеорологических измерений / В. Корнеев [и др.] // Современные технологии автоматизации. – 2002. – №1.
- 50 Иванцов, И. Эволюция VDSL / И. Иванцов // Журнал сетевых решений. – 2007. – №12.
- 51 Технология DSL [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа : <http://www.xdsl.ru/faq-php>.
- 52 Интернет-университет информационных технологий [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа : <http://www.INTUIT.ru>.
- 53 Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учебник для вузов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2002. – 606 с.
- 54 Соловьев, В. А. Управление космическими полетами : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 / В. А. Соловьев, Л. Н. Лысенко, В. Е. Любинский ; под общ. ред. Л. Н. Лысенко. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 476 с.
- 55 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.
- 56 Сорока, Н. И. Телемеханика: модуляция и кодирование информации. В 2 ч. Ч. 1 : учеб. пособие / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2020. – 184 с.
- 57 Типугин, В. Н. Радиоуправление / В. Н. Типугин, В. А. Вайцель. – М. : Сов. радио, 1961. – 750 с.
- 58 Сорока, Н. И. Телемеханика: конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управление в технических системах» и «Информационные технологии и управление в технических системах» всех форм обучения. В 4 ч. Ч. 4 : Линии связи и помехозащищенность информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : 2005. – 155 с.
- 59 Слепов, Н. Н. Современные технологии цифровых и оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – М. : Радио и связь, 2000. – 486 с.
- 60 Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр ; пер. с англ. – 2-е изд., испр. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
- 61 Сорока, Н. И. Телемеханика: модуляция и кодирование информации. В 2 ч. Ч. 2 : учеб. пособие / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2020. – 185–376 с.

Учебное издание

Сорока Николай Ильич
Кривинченко Георгий Александрович

**ТЕЛЕМЕХАНИКА.
СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В двух частях

Часть 1

Редактор *Е. С. Юрец*
Корректор *Е. И. Костина*

Компьютерная правка, оригинал-макет *М. В. Касабуцкий*

Подписано в печать 20.05.2020. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л. 11,1. Тираж 150 экз. Заказ 335.

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