

МИНИСТЕРСТВО ПО РАЗВИТИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ИМЕНИ МУХАММАДА АЛ-ХОРАЗМИЙ

**Д.А.Давронбеков, У.Т.Алиев**

**ПЕРЕДАЮЩИЕ И ПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА В  
ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИИ**

Учебник для бакалавров,  
по направлению образования 5350100 – Телекоммуникационные технологии  
(Телерадиовещание)

Ташкент – 2019

УДК 621.396.9

**Д.А.Давронбеков, У.Т.Алиев.**

Передающие и приемные устройства в телерадиовещании. Учебник, Ташкент, 2019-266 с.

Учебник подготовлен в соответствии с рабочей программой курса «Передающие и приемные устройства в телерадиовещании», утвержденной в Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий и состоит из введения, 16 глав, списка использованной литературы.

Учебник предназначен для студентов, изучающих одноименный курс, а также может быть полезен для инженерно-технических специалистов в области телерадиовещания.

Печатается в соответствии с решением Совета Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий от 20 декабря 2018 года, протокол № 6 (118)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	6
1	УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА.....	8
1.1	Основные технические показатели усилителей.....	8
1.2	Схемы включения транзисторов.....	14
1.3	Режимы работы усилителей.....	21
1.4	Особенности усилителей класса D.....	24
2	ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ.....	33
2.1	Назначение радиопередающих устройств.....	33
2.2	Классификация радиопередающих устройств.....	35
2.3	Каскады и блоки радиопередающих устройств.....	38
2.4	Принцип работы радиопередатчика.....	40
3	ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ И УСИЛЕНИЯ ВЧ И СВЧ КОЛЕБАНИЙ.....	43
3.1	Назначение и структурные схемы генераторов высоких и сверх высоких частот.....	43
3.2	Классификация генераторов высоких и сверхвысоких частот.....	44
3.3	Принцип работы генераторов высоких и сверх высоких частот.....	45
3.4	Генератор на биполярном транзисторе.....	49
3.5	Генератор на клистроне.....	50
3.6	Генераторы на лампах бегущей волны (ЛБВ) типа O.....	50
3.7	Магнетрон или приборы M-типа.....	52
4	МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ.....	56
4.1	Назначение и классификация автоматической подстройки частоты.....	56
4.2	Схемотехника АПЧ.....	59
4.3	Способы настройки частоты в радиоприемных устройствах.....	64
5	РАДИОПЕРЕДАТЧИКИ С АМПЛИТУДНОЙ, ОДНОПОЛОСНОЙ, УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ .....	70
5.1	Радиопередатчики амплитудной модуляции.....	70
5.2	Радиопередатчики однополосной модуляции.....	73
5.3	Радиопередатчики угловой модуляции.....	77
6	ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ МОДУЛЯЦИИ В ТЕЛЕВИДЕНИИ И РАДИОВЕЩАНИИ.....	86
6.1	Методы цифровой модуляции.....	86
6.2	Амплитудная манипуляция (АМн).....	89
6.3	Частотная манипуляция (ЧМн).....	90

6.4	Фазовая манипуляция (ФМн).....	91
6.5	Квадратурная амплитудная манипуляция (QAM).....	92
6.6	Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK).....	101
7	<b>ПЕРЕДАТЧИКИ АНАЛОГОВОГО И ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ.....</b>	<b>109</b>
7.1	Требования к вещательным системам цветного телевидения.....	109
7.2	Структурная схема цифровой телевизионной системы.....	113
7.3	Обобщенная структурная схема оптической системы передачи ТВ сигналов.....	118
8	<b>ПЕРЕДАТЧИКИ АНАЛОГОВОГО И ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ.....</b>	<b>120</b>
8.1	Общая структурная схема радиопередачи.....	120
8.2	Обобщенная структурная схема длинно- и средневолновых радиопередатчиков.....	122
8.3	Структурная схема радиопередатчика УКВ ЧМ радиовещания....	123
8.4	Структурная схема радиопередатчика СВЧ диапазона.....	127
8.5	Структурные схемы радиопередатчиков с прямым цифровым формированием высокочастотных сигналов.....	129
8.6	Абонентские передатчики аналоговых и цифровых сотовых систем радиосвязи.....	138
9	<b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ.....</b>	<b>142</b>
9.1	Назначение и классификация радиоприемных устройств.....	142
9.2	Показатели радиоприемных устройств.....	147
10	<b>СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ.....</b>	<b>155</b>
10.1	Простейшая структурная схема радиоприемника.....	155
10.2	Структурная схема радиоприемника прямого детектирования....	155
10.3	Структурная схема радиоприемника прямого усиления.....	156
10.4	Структурная схема супергетеродинного радиоприемника.....	157
10.5	Структурная схема супергетеродинного приемники с двойным преобразованием частоты.....	159
10.6	Примеры реализации простых схем супергетеродинных радиоприемников.....	162
11	<b>УСИЛИТЕЛИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ В РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ.....</b>	<b>166</b>
11.1	Общие понятия об усилителях радиочастоты.....	166
11.2	Требования к усилителям радиочастоты.....	167
11.3	Классификация усилителей радиочастоты.....	168

11.4	Принципиальная схема УРЧ с резонансным контуром.....	169
11.5	Принципиальная схема апериодического УРЧ.....	170
11.6	Каскадная схема усилителя радиочастоты.....	172
11.7	УРЧ на интегральной микросхеме.....	173
11.8	Показатели усилителей радиочастоты.....	174
12	<b>ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ В РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ</b> .....	179
12.1	Общие сведения о преобразовании частоты.....	179
12.2	Диодные схемы смесителей сигналов.....	189
12.3	Транзисторные схемы смесителей сигналов.....	192
13	<b>ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ В РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ</b> .....	195
13.1	Методы детектирования и характеристики детекторов.....	195
13.2	Детектирование амплитудно-модулированных сигналов.....	198
13.3	Синхронное детектирование.....	203
13.4	Детектирование частотно-модулированных сигналов.....	206
13.5	Детектирование фазо-модулированных сигналов.....	209
13.6	Детектирование манипулированных сигналов.....	212
13.7	Детектирование импульсно-модулированных сигналов.....	217
14	<b>ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ПРИЕМНИКАХ</b> .....	221
14.1	Определение технологии SDR.....	221
14.2	Структура приемника с ЦОС по радиочастоте.....	221
14.3	Структура приемника с ЦОС по промежуточной частоте.....	222
14.4	Структура цифрового приемника 1288ХК1Т.....	225
15	<b>ПРИЕМНИКИ АНАЛОГОВОГО И ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ</b> .....	230
15.1	Структура телевизионного приёмника.....	230
15.2	Структурная схема цветного телевизионного приёмника.....	231
15.3	Структурная схема ЖК телевизора.....	233
15.4	Принципы построения абонентских цифровых приставок- декодеров.....	234
16	<b>ПРИЕМНИКИ АНАЛОГОВОГО И ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ</b> .....	240
16.1	Переход от аналогового вещания к цифровому.....	240
16.2	Радиовещательные приемники.....	243
16.3	Стереофоническое радиовещание.....	244
	Список терминов.....	248
	Список использованной литературы.....	264

## **ВВЕДЕНИЕ**

В Республике Узбекистан по итогам комплексного изучения актуальных вопросов, анализа действующего законодательства, правоприменительной практики и передового зарубежного опыта, а также широкого общественного обсуждения принята «Стратегия действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017 - 2021 годах», предусматривающая совершенствование государственного и общественного строительства, обеспечение верховенства закона и дальнейшее реформирование судебной-правовой системы, развитие и либерализацию экономики, развитие социальной сферы, обеспечение безопасности, межнационального согласия и религиозной толерантности, осуществление взвешенной, взаимовыгодной и конструктивной внешней политики.

Одним из приоритетных направлений развития социальной сферы является развитие сферы образования и науки, которая включает в себя осуществление целенаправленных мер по укреплению материально-технической базы образовательных учреждений путем проведения работ по их строительству, реконструкции и капитальному ремонту, оснащению современным учебным и лабораторным оборудованием, компьютерной техникой, учебно-методическими пособиями [1].

Уважаемый читатель! Данная книга является учебником по курсу «Передающие и приёмные устройства в телерадиовещании», который изучается в высших учебных заведениях.

Учебник состоит из двух больших частей: радиопередающие устройства и радиоприёмные устройства.

Часть радиопередающие устройства, в том числе усилительные устройства, включает в себя главы 1-8. Здесь рассмотрены усилительные устройства, общие сведения о радиопередающих устройствах, общие принципы генерирования и усиления ВЧ и СВЧ колебаний, методы автоматической подстройки частоты в приемопередающих устройствах, радиопередатчики с амплитудной, однополосной, угловой модуляцией, цифровые методы модуляции в телевидении и радиовещании, в частности многопозиционные методы манипуляции, передатчики аналогового и цифрового телевидения, передатчики аналогового и цифрового радиовещания.

Часть радиопередающие устройства включает в себя главы 9-16. В этой части рассмотрены общие сведения о радиоприемных устройствах, структурные схемы построения приемников, в частности приемников прямого детектирования, приемников прямого усиления и супергетеродинных приемников, усилители высокой частоты в радиоприемных устройствах, преобразование частоты и детектирование сигналов в радиоприемных устройствах, цифровая обработка сигналов в приемниках, приемники аналогового и цифрового телевидения и радиовещания.

Для глубокого изучения курса в конце каждой главы приведены контрольные вопросы.

# 1. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

## 1.1. Основные технические показатели усилителей

Усилительные устройства применяются в широкой области техники, в том числе в телевидении, радиовещании, в системах автоматического управления, радиотехнике, радиолокации и других системах для усиления сигналов малой мощности, а также в различной радиоэлектронной аппаратуре, персональных компьютерах и т.д.

**Электронным усилителем** называется устройство, позволяющее преобразовывать входные электрические сигналы в сигналы большей мощности на выходе без существенного искажения их формы. Эффект увеличения мощности возможен при наличии в устройстве некоторого внешнего источника, энергия которого используется для создания повышенной мощности на выходе. Этот источник энергии, преобразуемый усилителем в энергию усиленных сигналов, называется **источником питания**.

Энергия источника питания преобразуется в энергию полезного сигнала при помощи усилительных, или активных элементов. Устройство, являющееся потребителем усиленных сигналов, называют **нагрузкой усилителя**, а цепь усилителя, к которой нагрузка подключена, – **выходной цепью**, или **выходом усилителя**. Источник входного сигнала, который нужно усилить, называется **источником сигнала**, или **входным источником** или **генератором**, а цепь усилителя, в которую вводят входной сигнал, называется **входной цепью**, или **входом усилителя**.

Усилительное устройство состоит из усилительного элемента, резистора, конденсатора, источника постоянного тока в выходной цепи и нагрузки.

Цепь, состоящая из одного усилительного элемента, называется **каскадом**.

В настоящее время в самых распространенных усилителях используются транзисторы и интегральные микросхемы (ИМС). Усиление в усилителях осуществляется следующим образом. К входной цепи управляемого элемента (транзистора) подается напряжение входного сигнала. Под действием этого напряжения во входной цепи усилителя создается входной ток. Этот малый входной ток создает в токе выходной цепи усилителя переменную составляющую и в выходной цепи управляемого элемента переменная напряжения большее, чем напряжение во входной цепи усилителя (рис.1.1).



Рис. 1.1. Общий порядок процесса усиления

По диапазону усиления усилители делятся на узкополосные и широкополосные (рис. 1.2). Узкополосные усилители используются не только на низких частотах, но и на высоких частотах в качестве фильтра для выделения нужных диапазонов волн. Поэтому эти усилители называются резонансными. По выполняемым функциям усилители делятся на

предварительный каскад усиления и на выходные усилители. Предварительный каскад усиления используется для усиления напряжения, а выходные усилители служат для повышения мощности.



Рис. 1.2. Виды усилителей

Важнейшими техническими показателями усилителя являются:

- коэффициенты усиления (по напряжению, току и мощности);
- входное и выходное сопротивления;
- выходная мощность;
- коэффициент полезного действия;
- номинальное входное напряжение (чувствительность);
- диапазон усиливаемых частот;
- динамический диапазон амплитуд;
- уровень собственных помех;
- показатели, характеризующие нелинейные, частотные и фазовые искажения усиливаемого сигнала.

Коэффициент усиления – отношение установившихся значений выходного и входного сигналов усилителя. В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления:

- по напряжению  $K_u = \Delta U_2 / \Delta U_1$ ;
- по току  $K_i = \Delta I_2 / \Delta I_1$ ;
- по мощности  $K_p = P_2 / P_1$ .

где  $U_1, U_2, I_1, I_2$  – действующие (или амплитудные) напряжения и токи.

Так как  $P_1 = U_1 I_1$  и  $P_2 = U_2 I_2$ , то коэффициент усиления по мощности  $K_p = K_u K_i$ .

Значение коэффициента усиления  $K$  у различных усилителей напряжения может иметь величину порядка десятков и сотен. Но и этого в ряде случаев недостаточно для получения на выходе усилителя сигнала требуемой мощности. Тогда прибегают к последовательному (каскадному) включению ряда усилительных каскадов (рис.1.3). Для многокаскадных усилителей общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. При последовательном соединении нескольких усилительных устройств, произведение их коэффициентов усиления определяет общий коэффициент усиления системы:

$$K_{общ} = K_1 K_2 \dots K_n \tag{1.1}$$



Рис.1.3. Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления, вычисленный по формуле (1.1), представляет собой безразмерную величину. Учитывая, что в современных усилительных схемах коэффициент усиления, выраженный в безразмерных единицах, получается довольно громоздким числом, в электронике получил распространение способ выражения усилительных свойств в логарифмических единицах – децибелах (дБ). Коэффициент усиления по мощности, выраженный в децибелах, равен:

$$K_P [\text{дБ}] = 10 \lg (P_2/P_1) = 10 \lg K_P \quad (1.2)$$

Поскольку мощность пропорциональна квадрату тока или напряжения, для коэффициентов усиления по току и напряжению можно записать соответственно:

$$K_I [\text{дБ}] = 20 \lg (I_2/I_1) = 20 \lg K_I,$$

$$K_U [\text{дБ}] = 20 \lg (U_2/U_1) = 20 \lg K_U.$$

Обратный переход от децибел к безразмерному числу производится при помощи выражения

$$K_\delta = 10^{K\text{дБ}/N},$$

где  $N = 10$  при расчете коэффициента усиления по мощности и  $N = 20$  – при расчетах по напряжению и току.

Широкому использованию логарифмического представления коэффициентов усиления способствует и то, что многие направления, в

которых применяются усилители, связаны с техникой, воздействующей на чувства человека. А восприятие человека описывается логарифмическими зависимостями. Например, громкость звукового сигнала, по ощущениям человека, увеличится в два раза при увеличении его мощности в 10 раз.

Если принять  $K_u = 1$  дБ, то при определении коэффициента усиления по напряжению

$$K_u = 10^{K, \text{дБ}/20} = 10^{1/20} = 1,12$$

Следовательно, усиление равно одному децибелу, если напряжение на выходе усилителя в 1,12 раза (на 12%) больше, чем напряжение на входе.

Логарифмическая мера оценки удобна при анализе многокаскадных усилителей. Общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя при переходе к логарифмическим единицам измерения определяется в отличие от (1.2) суммой коэффициентов усиления отдельных каскадов, т.е.

$$K_{\text{общ}} [\text{дБ}] = K_1 [\text{дБ}] + K_2 [\text{дБ}] + \dots + K_n [\text{дБ}]$$

Коэффициенты усиления по напряжению и току являются величинами комплексными, что отражает наличие фазовых сдвигов усиливаемого сигнала. Например, для коэффициента усиления по напряжению имеем:

$$\bar{K} = \frac{U_{\text{вых}} \cdot e^{j\varphi_{\text{вых}}}}{U_{\text{вх}} \cdot e^{j\varphi_{\text{вх}}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \cdot e^{j(\varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}})},$$

или

$$\bar{K} = K_m e^{j\varphi},$$

где  $K_m = (U_{вых} / U_{вх})$  – модуль коэффициента усиления;

$\varphi = (\varphi_{вых} - \varphi_{вх})$  – угол сдвига фаз между выходным и входным напряжениями.

Обычно, когда рассматривают коэффициент усиления, имеют ввиду его модуль. Фазовый сдвиг (аргумент коэффициента усиления) анализируют отдельно. Значения, как модуля, так и фазы зависят как от величины параметров схемы усилителя, так и от частоты усиливаемого сигнала. Для их описания используют так называемые амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики.

## 1.2. Схемы включения транзисторов

### Представление усилителя в виде четырехполюсника

Усилитель, каким бы он не был, (усилитель аудио, ламповый усилитель или усилитель радиочастоты) представляет собой четырехполюсник, у которого два вывода являются входом и два вывода являются выходом. Структурная схема включения усилителя приведена на рис.1.4.



Рис.1.4. Структурная схема включения усилителя

Основной усилительный элемент — транзистор имеет всего три вывода, поэтому один из выводов транзистора приходится использовать

одновременно для подключения источника сигнала (как входной вывод) и подключения нагрузки (как выходной вывод).

В зависимости от того, какой вывод транзистора является общим как для входа, так и для выхода усилителя, схемы включения транзистора называются:

- для биполярных транзисторов:
  - схема с общим эмиттером;
  - схема с общей базой;
  - схема с общим коллектором;
- для полевых транзисторов:
  - схема с общим истоком;
  - схема с общим стоком;
  - схема с общим затвором.

### **Схемы включения биполярного транзистора**

#### *Схема с общим эмиттером*

Схема с ОЭ обладает наибольшим коэффициентом усиления по мощности, поэтому остается наиболее распространенным решением для высокочастотных усилителей.

Схема с общим эмиттером — это усилитель, где эмиттер транзистора используется как для подключения входного сигнала, так и для подключения нагрузки. Функциональная схема усилителя с транзистором, включенным по схеме с общим эмиттером, приведена на рис. 1.5.

На данной схеме пунктиром показаны границы усилителя, изображенного на рис. 1.4. На ней не показаны цепи питания транзистора. В настоящее время схема с общим эмиттером практически не применяется в звуковых усилителях, однако в схемах усилителей телевизионного сигнала,

усилителях GSM или других высокочастотных усилителях она находит широкое применение.

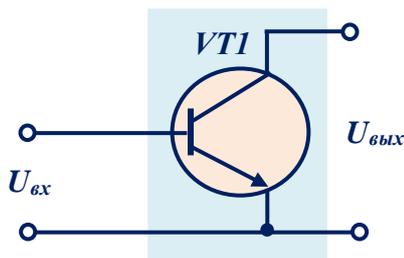


Рис. 1.5. Функциональная схема включения транзистора с общим эмиттером

Входное сопротивление схемы включения транзистора с общим эмиттером определяется входной характеристикой транзистора. Оно зависит от базового, а, следовательно, и коллекторного тока транзистора.

Что касается амплитудно-частотной характеристики схемы с общим эмиттером, то в данном включении транзистора верхняя частота усиления будет минимальная по сравнению с остальными схемами включения транзистора. Верхняя частота усиления транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, ограничена частотой  $f_{\beta}$  ( $f_{h21э}$ ).

#### *Схема с общей базой*

Схема с общей базой обычно применяется на высоких частотах. Коэффициент усиления по мощности данной схемы включения транзистора меньше по сравнению со схемой с общим эмиттером. Это связано с тем, что схема включения транзистора с общей базой не усиливает по току. В данной схеме производится усиление только по напряжению. Функциональная схема включения транзистора с общей базой приведена на рис. 1.6.

На этой схеме цепи питания коллектора и базы тоже не показаны. В качестве входного сопротивления схемы включения транзистора с общей базой служит эмиттерное сопротивление транзистора, поэтому входное

сопротивление схемы с общей базой мало. Её входное сопротивление самое маленькое из всех схем включения транзистора, однако для данной схемы это не является недостатком, т.к. входное сопротивление высокочастотных усилителей должно быть равно 50 Ом.

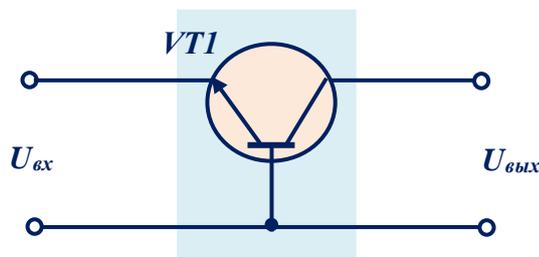


Рис. 1.6. Функциональная схема включения транзистора с общей базой

Амплитудно-частотная характеристика схемы с общей базой — самая широкополосная из всех схем включения транзистора, поэтому она широко используется в высокочастотных усилителях радиочастоты. Частотная характеристика схемы с общей базой ограничивается предельной частотой усиления транзистора  $f_{\alpha}$  ( $f_{h21\delta}$ ).

### ***Схема с общим коллектором***

Схема с общим коллектором обычно применяется для получения высокого входного сопротивления. Коэффициент усиления по мощности данной схемы включения транзистора меньше по сравнению со схемой с общим эмиттером и соизмерим с коэффициентом усиления схемы с общей базой. Это связано с тем, что схема включения транзистора с общим коллектором не усиливает по напряжению. В данной схеме производится усиление только по току. Функциональная схема включения транзистора с общим коллектором приведена на рис. 1.7.

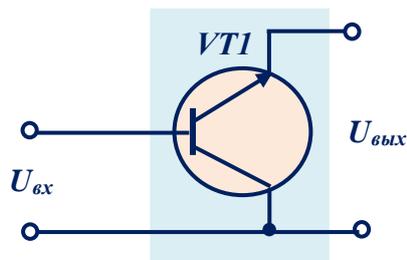


Рис. 1.7. Функциональная схема включения транзистора с общим коллектором

На схеме, приведенной на рис. 1.7, цепи питания коллектора и базы не показаны. В качестве входного сопротивления схемы включения транзистора с общим коллектором служит сумма сопротивления базы транзистора (как в схеме с общим эмиттером) и пересчитанного ко входу сопротивления резистора в цепи эмиттера, поэтому входное сопротивление схемы с общим коллектором очень велико. Её входное сопротивление самое большое из всех схем включения транзистора.

Амплитудно-частотная характеристика схемы включения транзистора с общим коллектором достаточно широкополосна. Однако полоса пропускания усилителя может быть серьёзно ограничена из-за шунтирования высокого входного сопротивления схемы с общим коллектором паразитными емкостями, поэтому в основном схема с общим коллектором применяется в качестве буферного усилителя с высоким входным сопротивлением. Иногда она применяется для ослабления влияния нагрузки на характеристики высокочастотных генераторов и синтезаторов частоты.

На рис. 1.8 приведены схемы реализации каскадов усиления с ОЭ, ОК, ОБ.

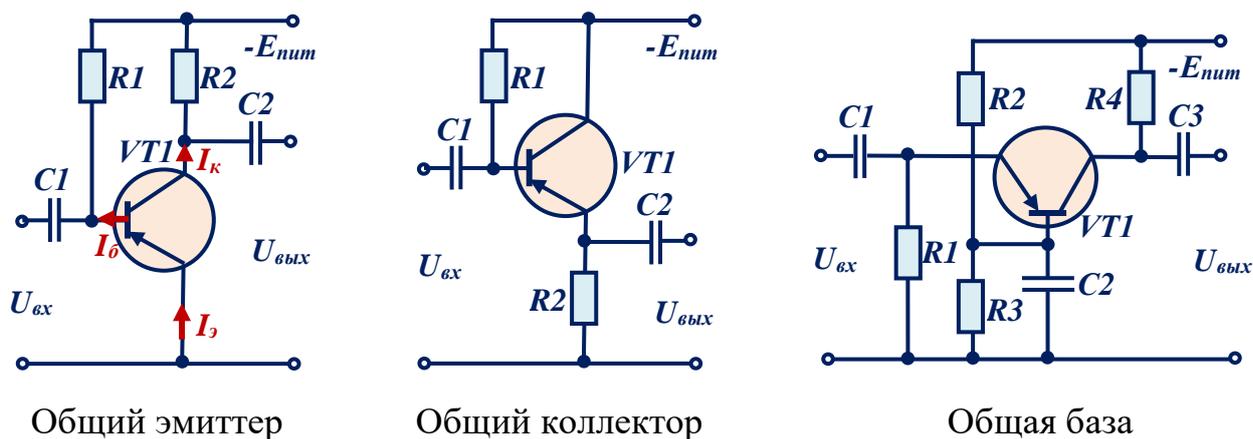


Рис. 1.8. Схемы реализации каскадов усиления с ОЭ, ОК, ОБ

### Схемы включения полевого транзистора

С точки зрения затрат энергии на управление, управление полевым транзистором получается в целом более экономичным, чем управление транзистором биполярным. Это один из факторов, объясняющих нынешнюю популярность полевых транзисторов. Рассмотрим в общих чертах типичные схемы включения полевых транзисторов.

#### *Включение с общим истоком*

Схема включения полевого транзистора с общим истоком является аналогом схемы с общим эмиттером для биполярного транзистора. Такое включение весьма распространено в силу возможности давать значительное усиление по мощности и по току, фаза напряжения цепи стока при этом переворачивается (рис. 1.9).

Входное сопротивление непосредственно перехода затвор-исток достигает сотен мегаом, хотя оно может быть уменьшено путем добавления резистора между затвором и истоком с целью гальванически подтянуть затвор к общему проводу (защита полевого транзистора от наводок).

Величина этого резистора  $R_3$  (от 1 до 3 МОм обычно) подбирается так, чтобы не сильно шунтировать сопротивление затвор-исток, при этом не допускать перенапряжения от тока обратосмещенного управляющего перехода.

Существенное входное сопротивление полевого транзистора в схеме с общим истоком является важным достоинством именно полевого транзистора, при его использовании в схемах усиления напряжения, тока и мощности, ведь сопротивление в цепи стока  $R_c$  не превышает обычно единиц кОм.

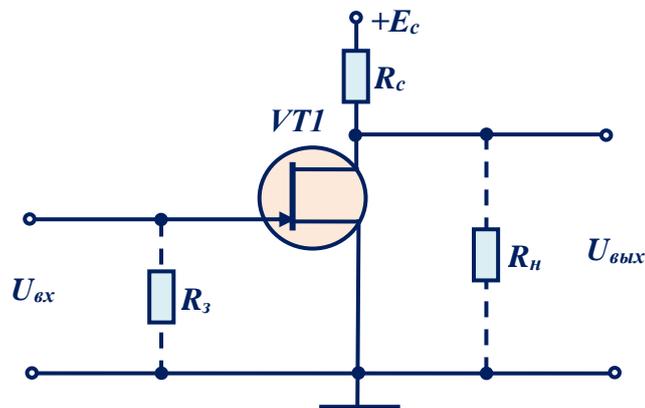


Рис. 1.9. Включение полевого транзистора с общим истоком

#### *Включение с общим стоком*

Схема включения полевого транзистора с общим стоком (истоковый повторитель) является аналогом схемы с общим коллектором для биполярного транзистора (эмиттерный повторитель). Такое включение используется в согласующих каскадах, где выходное напряжение должно находиться в фазе с входным (рис. 1.10).

Входное сопротивление перехода затвор-исток как и прежде достигает сотен мегаом, при этом выходное сопротивление  $R_{и}$  сравнительно

небольшое. Данное включение отличается более высоким частотным диапазоном, чем схема с общим истоком. Коэффициент усиления по напряжению близок к единице, так как напряжение исток-сток и затвор-исток для данной схемы обычно близки по величине.

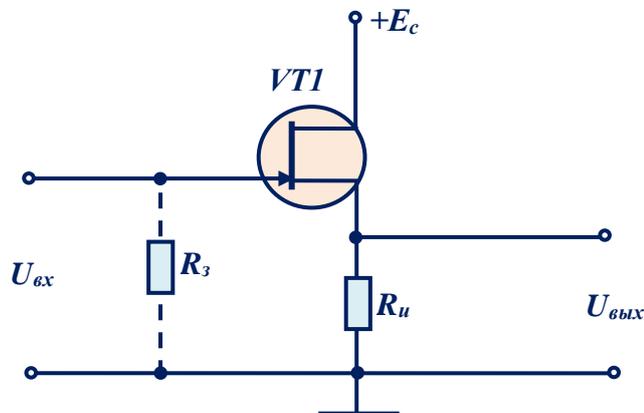


Рис.1.10. Включение полевого транзистора с общим стоком

### *Включение с общим затвором*

Схема с общим затвором — подобие каскаду с общей базой для биполярного транзистора. Усиления по току здесь нет, потому и усиление по мощности многократно меньше, чем в каскаде с общим истоком. Напряжение при усилении имеет ту же фазу, что и управляющее напряжение (рис. 1.11).

Поскольку выходной ток равен входному, то и коэффициент усиления по току равен единице, а коэффициент усиления по напряжению, как правило, больше единицы.

В данном включении присутствует особенность - параллельная отрицательная обратная связь по току, ибо при повышении управляющего входного напряжения, потенциал истока возрастает, соответственно ток стока уменьшается, и снижает напряжение на сопротивлении в цепи истока  $R_и$ .

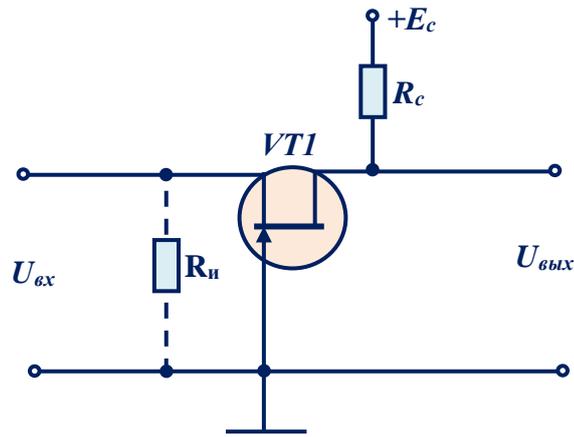


Рис. 1.11. Включение полевого транзистора с общим затвором

### 1.3. Режимы работы усилителей

В зависимости от выбора исходной рабочей точки на передаточной характеристике различают режимы работы: *A*, *B*, *AB*, *C* и *D*.

*Режим A* – это режим, при котором исходная рабочая точка *РТ*, определяющая состояние схемы при отсутствии сигнала и так называемый ток покоя  $I_{РТ}$ , располагается примерно на середине линейного участка характеристики (рис.1.12).

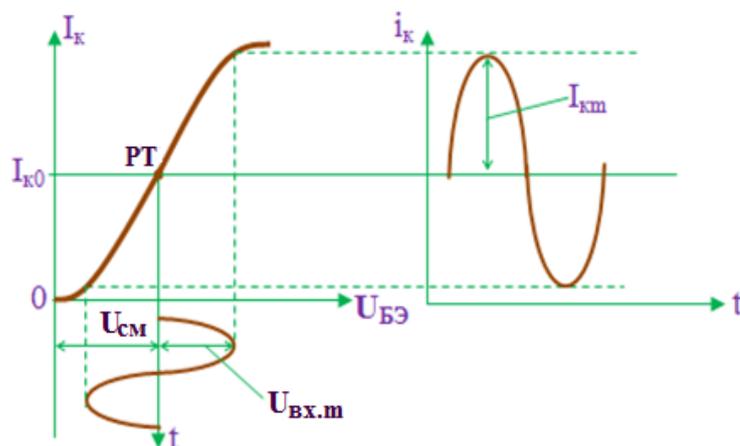


Рис. 1.12. Режим *A* работы усилительного каскада

В этом режиме напряжение смещения  $U_{\delta n}$  всегда больше амплитуды входного сигнала  $U_{\delta n} > U_{вх\ m}$ , а постоянная составляющая коллекторного тока больше или примерно равна амплитуде переменной составляющей  $I_{PT} \geq I_{км}$ . Синусоидальному входному сигналу соответствует синусоидальный выходной ток, нелинейные искажения минимальны, но КПД каскада составляет лишь 20 – 30%.

*Режим В* – это режим, при котором исходная рабочая точка совпадает с началом координат, т.е. ток покоя отсутствует  $I_{PT} = 0$  (рис. 1.13). При подаче на вход синусоидального сигнала ток в выходной цепи протекает лишь в течение половины периода и имеет форму импульсов с углом отсечки  $\theta = \pi/2$ .

КПД каскада, работающего в режиме *В*, достигает 60 – 70%. Однако форма выходного сигнала искажена из-за нелинейного участка передаточной характеристики.

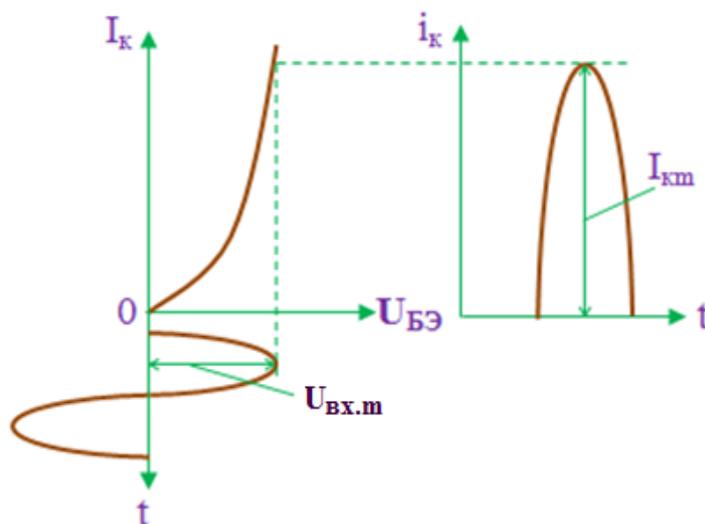


Рис. 1.13. Режим *В* работы усилительного каскада

*Режим АВ*, как видно из рис. 1.14 занимает промежуточное положение.

Угол отсечки в этом режиме несколько больше за счет сдвинутой из нуля исходной, рабочей точки РТ с помощью тока покоя  $I_{кп}$  в начало линейного участка передаточной характеристики.

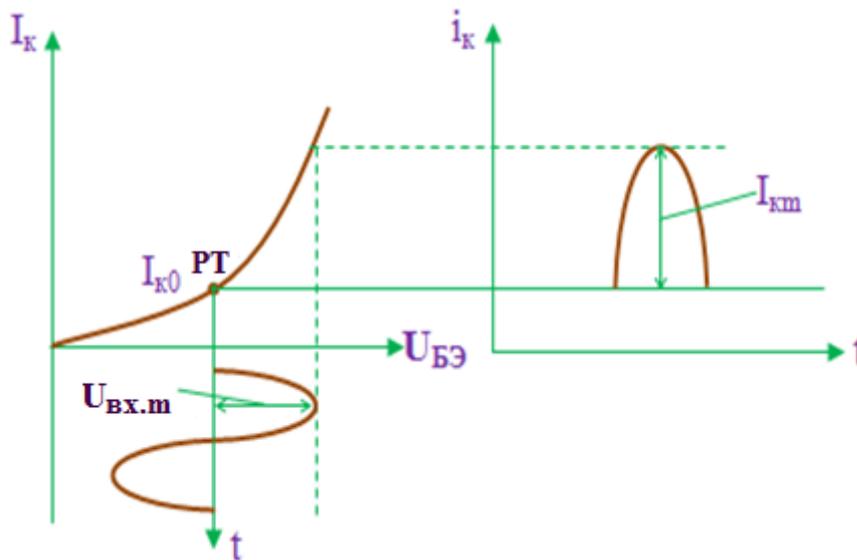


Рис. 1.14. Режим АВ работы усилительного каскада

*Режим С* - это режим, при котором ток  $i_k$  протекает в течение промежутка времени, меньшего половины периода входного сигнала, т.е.  $\theta < \pi/2$ . Ток покоя отсутствует. Этот режим используется в мощных избирательных усилителях, где нагрузкой является колебательный контур.

*Режим D* – это ключевой режим работы, при котором транзистор может находиться только в двух состояниях: или полностью заперт (режим отсечки), или полностью открыт (режим насыщения) (рис. 1.15). Достоинство режима *D* заключается в увеличении КПД. Его недостаток – значительное усложнение схемы усилителя.



Рис. 1.15. Выходная характеристика транзистора при режиме  $D$

#### 1.4. Особенности усилителей класса $D$

В последние годы все большую и большую популярность приобретают усилители класса  $D$  или, как их еще называют, импульсные усилители. Некоторые производители дают им название «цифровые усилители», но оно несколько некорректно, поскольку никакого преобразования звука в двоичный код там нет. В усилителе класса  $D$  звуковой сигнал преобразуется в последовательность импульсов различной ширины в результате широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Частота следования импульсов обычно выбирается в пределах 300-500 кГц, это оптимально для всего аудиодиапазона. Если усилитель сабвуферный и перед ним стоит задача усиливать только диапазон до 100-200 Гц, частоту переключения можно уменьшить до 50-100 кГц.

Раньше импульсные усилители были интересны только за счет своего высокого КПД (обычно более 90%) и применялись только для управления мощными электродвигателями. Этот факт был напрямую связан с отсутствием высокоскоростных мощных переключательных элементов,

способных работать на высоких частотах, вследствие чего высокие нелинейные искажения были просто неизбежны. Однако сейчас многими компаниями-производителями электронных компонентов выпускаются специализированные элементы для построения усилителей класса *D*, способные работать на частотах вплоть до 1 МГц и выше.

Рассмотрим принципы работы выходных каскадов, построенных на биполярных транзисторах.

Выходной каскад усилителя класса *AB*, выполненный на биполярных транзисторах, обладает низким КПД, потому что выходные транзисторы, подобно переменным резисторам, изменяют свое активное сопротивление, тем самым управляя выходным током. В усилителе класса *AB* невозможно получить размах амплитуды выходного напряжения, равный напряжению питания, поскольку даже в полностью открытом состоянии напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{КЭ}$  биполярного транзистора, равняется приблизительно 1-2 В.

В импульсных усилителях силовыми элементами являются мощные полевые транзисторы, у которых существует только 2 состояния - открытое и закрытое. Так как сопротивление открытого канала современных полевых транзисторов очень мало (обычно десятки мОм), следовательно, и падение напряжения на этих элементах незначительное. Меандр, проходя через выходной фильтр, преобразуется в переменный ток звуковой частоты, осциллограмма которого показана на рис.1.16.

Это объясняется тем, что выходной дроссель, который является неотъемлемой частью импульсного усилителя, изменяет свое реактивное сопротивление для сигнала с переменной скважностью. Вместе со

скважностью, которой управляет звуковой сигнал, изменяется и ток, протекающий через нагрузку.

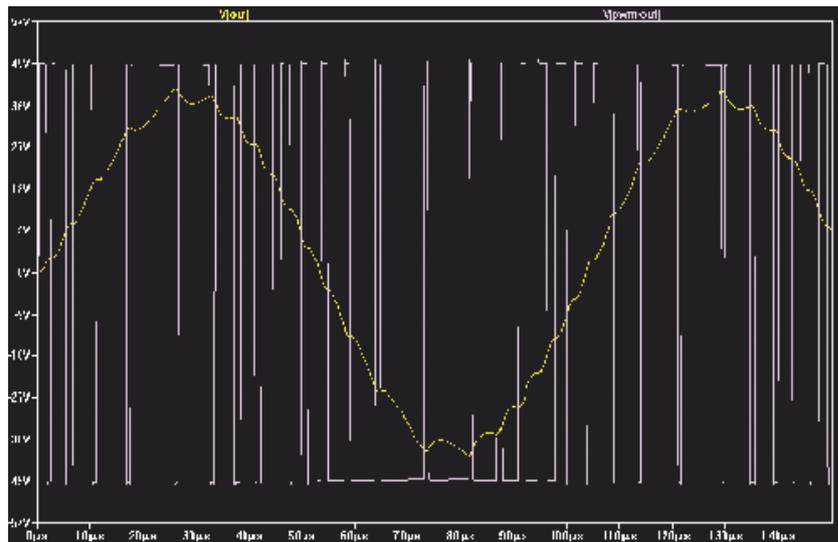


Рис. 1.16. Осциллограмма преобразования сигнала

Значительная часть потерь происходит на фронтах в момент переключения полевых транзисторов, поэтому, снизив частоту преобразования, можно уменьшить количество фронтов за единицу времени и, как следствие, немного увеличить КПД. Именно по этой причине в сабвуферных усилителях класса  $D$  частоту переключения понижают вплоть до 50 кГц.

Как упоминалось выше, современные полевые транзисторы способны переключаться с высокой скоростью, тем самым позволяя разработчику значительно увеличить частоту преобразования и, следовательно, уменьшить габаритные размеры выходного дросселя. В результате сопротивление обмотки постоянному току ( $R_{dc}$ ) будет тоже гораздо меньше, следовательно, немного уменьшится нагрев провода обмотки.

Усилители класса  $D$  делятся на 3 основных типа.

1) Усилители с внешним генератором пилообразного напряжения (рис. 1.17);

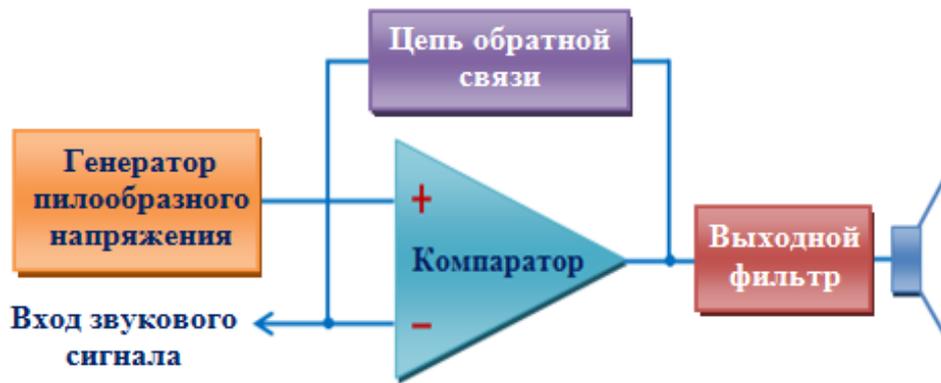


Рис. 1.17. Структурная схема усилителя класса  $D$  с внешним генератором пилообразного напряжения

2) Самоосциллирующие усилители (рис. 1.18).

3) Усилители на основе микроконтроллеров со встроенным АЦП (рис. 1.19).

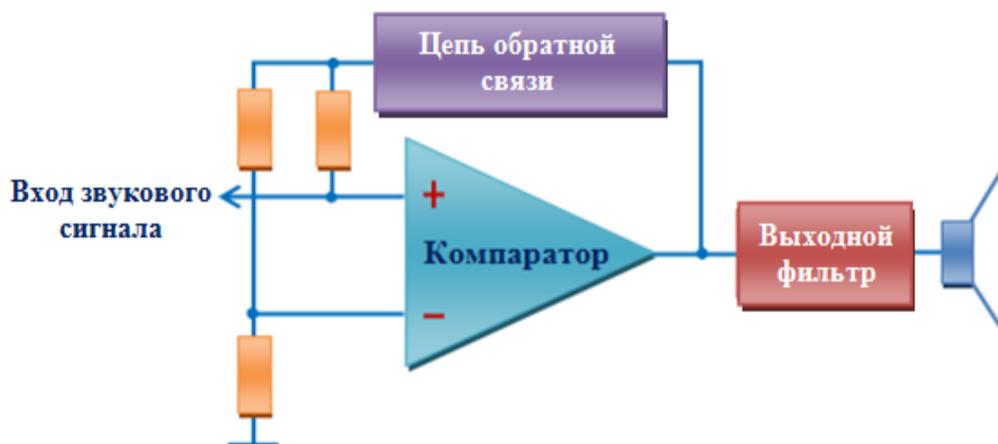


Рис. 1.18. Структурная схема самоосциллирующего усилителя класса  $D$

Усилители с внешним генератором пилообразного напряжения наиболее просты в изготовлении и наладке, обладают меньшими требованиями к топологии печатной платы и компонентам по сравнению с усилителями самоосциллирующего типа. Именно эти усилители в настоящее время являются самыми распространенными среди серийных моделей как

сабвуферных усилителей, входящих в состав автомобильных акустических систем, так и широкополосных профессиональных, эстрадных усилителей.

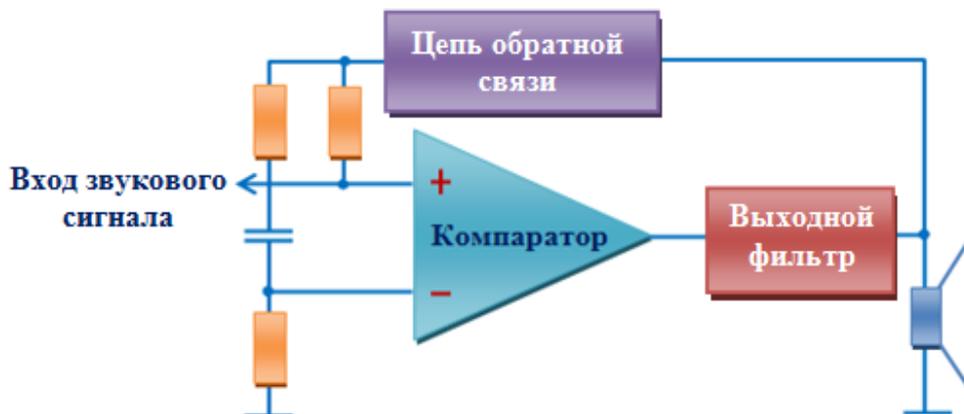


Рис. 1.19. Структурная схема усилителя класса *D*

Самоосциллирующие усилители работают как автогенераторы, в них колебательный процесс проходит и поддерживается за счет использования положительной обратной связи. Этот тип усилителей отличается более высокими требованиями к топологии печатной платы, но при тонком подходе к этому вопросу качество звуковоспроизведения данного типа усилителей значительно превосходит остальные.

В свою очередь, самоосциллирующие усилители делятся на 2 подкласса, в которых обратная связь организована до выходного фильтра и после него. В схемах, где обратная связь организована до выходного фильтра, она исправляет только нелинейности мощного компаратора, а выходной фильтр находится вне контроля.

Такие усилители имеют не очень ровную АЧХ, и выходной импеданс у них сильно растет вместе с частотой.

Усилители, у которых обратная связь берется только после выходного фильтра, лишены всех этих недостатков. Отрицательная обратная связь организована после фильтра и максимально возможно исправляет все

нелинейности, а колебательный процесс начинается за счет того, что на определенной частоте сдвиг фазы составляет 180 градусов, то есть на этой частоте ОС становится положительной, и усилитель работает как генератор.

Фаза сдвигается благодаря задержкам сигнала, которые происходят в самом компараторе, выходном фильтре и специальной фазосдвигающей RC-цепочке.

Рассмотрим общую структурную схему усилителя, без обратной связи приведенную на рис. 1.20.

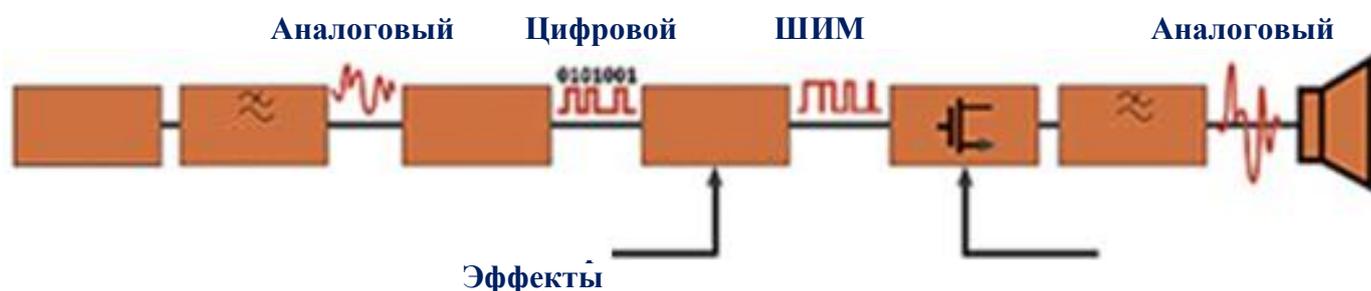


Рис. 1.20. Структурная схема цифрового усилителя

Оцифрованный сигнал поступает на аудио процессор, который в свою очередь с помощью широтно-импульсной модуляции (*PWM - Pulse Width Modulation*) управляет силовыми полупроводниковыми ключами. Можно добавить, что ШИМ-сигнал можно получить и без аналого-цифрового преобразования с помощью компаратора и генератора, например, пилообразного сигнала. Такой метод в усилителях класса *D* также широко применяется, но благодаря развитию цифровой техники постепенно уходит в прошлое. Аналого-цифровое преобразование обеспечивает дополнительные возможности по обработке звука: от регулировки уровня громкости и тембра до реализации цифровых эффектов, таких как реверберация, шумоподавление, подавление акустической обратной связи и др.

Полная структурная схема усилителя класса  $D$  приведена на рис. 1.21, а на рис. 1.22 приведены временные диаграммы мостового усилителя класса  $D$ .

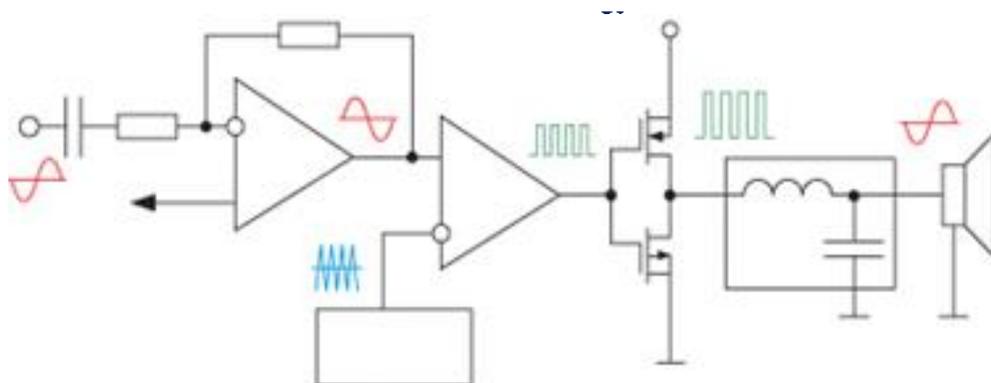


Рис. 1.21. Полная структурная схема усилителя класса  $D$

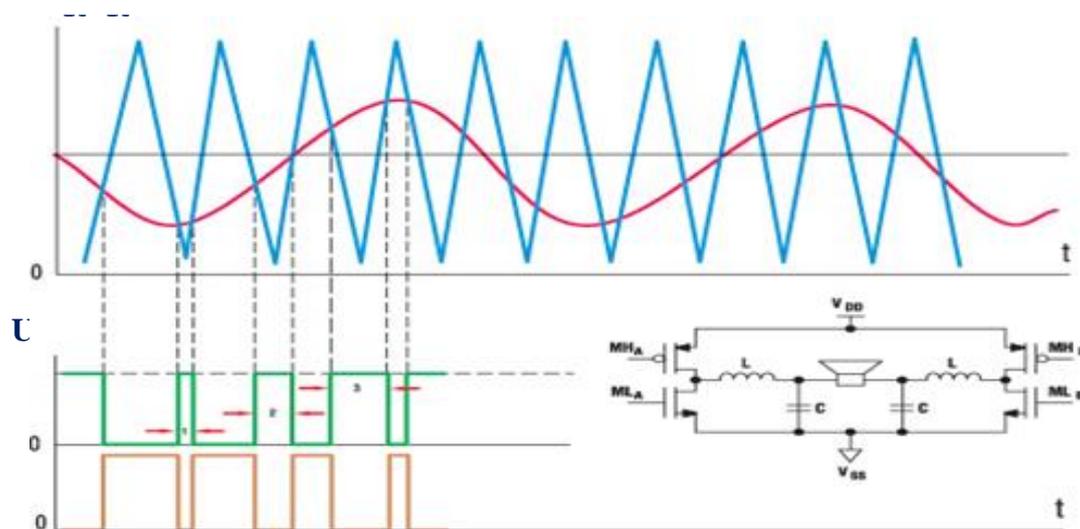


Рис. 1.22. Временные диаграммы работы мостового усилителя класса  $D$

В отличие от аналоговых усилителей, выходной сигнал усилителей класса  $D$  представляет собой импульсы прямоугольной формы. Их амплитуда постоянна, а длительность ("ширина") изменяется в зависимости от амплитуды аналогового сигнала, поступающего на вход усилителя. Частота импульсов (частота дискретизации) постоянна и в зависимости от

требований, предъявляемых к усилителю, составляет от нескольких десятков до сотен килогерц. После формирования импульсы усиливаются оконечными транзисторами, работающими в ключевом режиме. Преобразование импульсного сигнала в аналоговый сигнал происходит в фильтре низких частот на выходе усилителя или непосредственно в нагрузке.

### **Контрольные вопросы**

1. Назначение и принцип работы усилителей.
2. Перечислите технические показатели усилительных устройств.
3. Особенности работы усилителя в режиме *A*.
4. Особенности работы усилителя в режиме *B*.
5. Особенности работы усилителя в режиме *AB*.
6. Особенности работы усилителя в режиме *C*.
7. Особенности работы усилителя в режиме *D*.
8. Принцип работы схемы упрощенного усилителя.
9. Формирование временных диаграмм упрощенного усилителя.
10. Достоинства и недостатки усилителей класса *D*.

## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

### 2.1. Назначение радиопередающих устройств

Радиопередающими устройствами (РПДУ) называются **радиотехнические аппараты**, служащие для генерирования, усиления по мощности и модуляции высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний, подводимых к антенне и излучаемых в пространство.

Три функции - генерация, усиление и модуляция - объединяются общим понятием: формирование сигнала, под которым понимают колебание, несущее информацию. Такой электромагнитный сигнал, излученный в пространство, называется **радиосигналом**. Третья из названных функций - модуляция - есть процесс наложения исходного сообщения (например, речи или телевизионного изображения) на ВЧ или СВЧ колебания.

В технологическом плане радиопередающие устройства представляют собой сборки интегральных микросхем, транзисторов, диодов, электровакуумных приборов, конденсаторов, трансформаторов и множества иных элементов, соединенных между собой согласно определенной электрической схеме. Наиболее совершенные конструкции полностью состоят из полупроводниковых гибридных и интегральных микросхем.

Радиопередатчики служат для передачи информации в рамках определенной радиоэлектронной системы. К их числу относятся следующие системы:

- звукового и телевизионного радиовещания;
- радиосвязи с помощью наземных средств, в частности сотовая радиосвязь;

- глобальные космические радиосвязи, телевизионного радиовещания и радионавигации;
- радиуправления и радиотелеметрического контроля разнообразными объектами;
- радиолокационные, дальнего и ближнего радиуса действия.

В зависимости от назначения радиоэлектронной системы применяют тот или иной тип радиопередатчика: ламповый или полупроводниковый, ВЧ или СВЧ диапазона, небольшой или повышенной мощности, работающий в непрерывном или импульсном режиме.

Определим место радиопередатчика в составе радиоэлектронной системы, которая в целом может быть представлена в виде своеобразной пирамиды (рис.2.1). Нижний уровень «пирамиды» составляет элементная база, включающая транзисторы, диоды, конденсаторы, интегральные микросхемы и десятки иных наименований. Из них составляются звенья, объединяемые в функционально законченные цепи — каскады, такие как автогенератор, преобразователь частоты, модулятор, усилитель мощности колебаний, демодулятор, усилители сверхвысокой, высокой, промежуточной и низкой частоты и т.д.

Следующий уровень — блоки, такие как малошумящий СВЧ усилитель, модем-модулятор и демодулятор сигнала, блок обработки сигнала, блок усиления мощности ВЧ или СВЧ колебаний, линейный тракт радиоприемника, антенно-фидерный тракт и т.д.

Еще более высокий «этаж» пирамиды включает в себя функционально законченные устройства — радиоприемники, радиостанции, радиолокаторы, телевизоры и т.д., которые работают самостоятельно в составе различных

радиотехнических систем. Именно на этом уровне, рассматриваемой «пирамиды» и располагаются радиопередающие устройства.

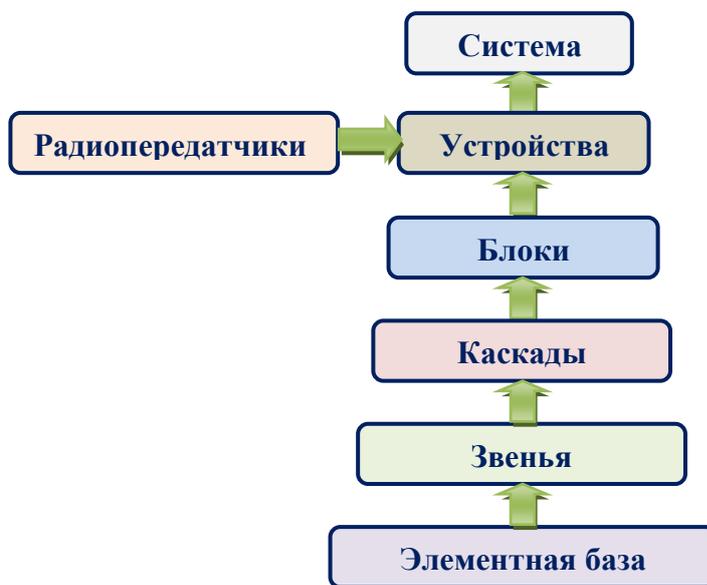


Рис.2.1. Определение места радиопередатчика в составе радиоэлектронной системы

В случае применения в устройствах только интегральных микросхем три нижних уровня объединяются в один.

**Назначение радиопередатчика** определяется радиотехнической системой, в которой он используется, и связано оно с видом передаваемой информации. В этой связи различают: радиосвязные, радиовещательные, телевизионные, радиолокационные, радиотелеметрические, радионавигационные, для радиоуправления и другие типы радиопередатчиков.

## 2.2. Классификация радиопередающих устройств

Радиопередатчики классифицируют по пяти основным признакам: назначению, объекту использования, диапазону частот, мощности и виду излучения.

**Объект использования** определяется местом установки радиопередатчика, что влияет на условия его эксплуатации. По данному признаку различают: наземные стационарные, самолетные, спутниковые, корабельные, носимые, мобильные радиопередатчики, т.е. устанавливаемые на автомобилях, железнодорожном транспорте и иных наземных передвижных объектах.

По **диапазону частот** радиопередатчики различают в соответствии с принятым делением радиочастотного диапазона: сверхдлинноволновые, длинноволновые, средневолновые, коротковолновые, ультракоротковолновые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые. Передатчики пяти первых диапазонов объединяются общим названием — высокочастотные, трех последних — сверхвысокочастотные. Таким образом, границей между радиопередатчиками ВЧ и СВЧ диапазонов является частота 300 МГц. При частоте менее 300 МГц передатчик относится к ВЧ диапазону, выше — к СВЧ диапазону.

По **мощности ВЧ или СВЧ сигнала**, подводимого к антенне, радиопередатчики различают по мощности излучения в непрерывном режиме: малой — до 10 Вт, средней — 10...500 Вт, большой — 500 Вт... 10 кВт, сверхбольшой — выше 10 кВт.

Таблица 2.1

Некоторые типы радиосистем и радиопередатчиков различного назначения с привязкой к диапазонам волн

Наименование диапазона	Длина волны	Частота	Назначение системы и радиопередатчика
Мириаметровые (сверхдлинные волны)	100... 10 км	3... 30 кГц	Дальняя радионавигация
Километровые (длинные волны)	101... 1 км	30... 300 кГц	Радиовещание
Гектометровые (средние волны)	1000... 100 м	0,3...3 МГц	Радиовещание
Декаметровые (короткие волны)	100...10 м	3...30 МГц	Радиовещание Мобильная радиосвязь Любительская радиосвязь (диапазон 27 МГц)
Метровые (ультракороткие волны)	10... 1 м	30...300 МГц	УКВ ЧМ вещание Телевизионное вещание Мобильная радиосвязь Самолетная радиосвязь
Дециметровые (L, S диапазоны)	1 ...0,1 м	0,3...3 ГГц	Телевизионное вещание Космическая радиосвязь и радионавигация Сотовая радиосвязь Радиолокация
Сантиметровые (C, X, K диапазоны)	10... 1 см	3...30 ГГц	Космическая радиосвязь Радиолокация Радионавигация Радиоастрономия
Миллиметровые	10... 1 мм	30...300 ГГц	Космическая радиосвязь Радиолокация Радиоастрономия

По виду излучения передатчики разделяют на работающие в непрерывном и импульсном режимах. В первом случае при передаче сообщения сигнал излучается непрерывно, во втором — в виде импульсов.

Для характеристики типа радиопередатчика следует указать, к какому виду он относится в каждом из пяти названных разрядов.

В таблице 2.1 приведены некоторые типы радиосистем и радиопередатчиков различного назначения с привязкой к диапазонам волн.

### **2.3. Каскады и блоки радиопередающих устройств**

Радиопередатчик представляет собой сборку из отдельных каскадов и блоков, каждый из которых функционирует и самостоятельно, и в сочетании с другими частями всего устройства. Поэтому сначала рассмотрим, какие каскады и блоки могут входить в радиопередатчик и в чем состоит их назначение.

Радиопередающее устройство состоит из следующих каскадов и блоков (рис. 2.2):

- источник колебаний;
- усилитель сигнала по мощности;
- умножитель частоты;
- преобразователь частоты;
- делитель частоты;
- частотный модулятор;
- фазовый модулятор;
- полосовые фильтры;
- сумматор (распределитель) мощностей сигналов;

- устройство согласования;
- аттенюатор;
- фазавращатель;
- ферритовые однонаправленные устройства (циркуляторы и вентили).

Разные виды радиопередающих устройств состоят из комбинации каскадов и блоков.

Возбудитель на рис. 2.2 служит для формирования сеток рабочих частот с требуемой стабильностью. В случае меньшего числа рабочих частот возбудитель строится по принципу “кварц-волна”, при этом каждый из частот будет иметь свои кварцевые автогенераторы. Переход от одной частоты в другую производится с помощью электронного коммутатора.



Рис. 2.2. Структурная схема радиопередающего устройства

При множестве рабочих частот возбудитель становится цифровым синтезатором. В состав его входит кварцевый опорный генератор, делитель с

переменным коэффициентом деления (ДПКД) и устройства автоматической подстройки частоты (АПЧ). Такой генератор может выполняться на большой интегральной микросхеме.

Частота кварцевого автогенератора может быть не достаточно большой. Поэтому если частота РПДУ больше, чем это значение, то к устройству добавляется умножитель частоты, который повышает частоту сигнала до требуемого значения.

Получение требуемой выходной мощности РПДУ осуществляется при последовательном соединении ВЧ генераторов или с помощью усилительной части мощности СВЧ генераторов независимым возбуждением. Если выходная мощность радиопередатчика превышает мощность одного электронного прибора, то во выходном каскаде осуществляется суммирование мощностей генераторов.

Между выходными каскадами и антенной включается антенно-фидерное устройство или антенно-фидерный тракт (АФТ). В состав АФТ входит фильтр для подавления побочных излучений РПДУ, приборы падающих и отражающих волн, согласующие устройства. В диапазоне СВЧ вместо согласующего устройства обычно применяются однонаправленные устройства – вентили и циркуляторы.

Частотная модуляция осуществляется в возбудителе РПДУ или ВЧ умножителе и усилителе, а амплитудная и импульсная модуляция осуществляется в ВЧ умножителях.

С помощью устройства автоматического управления осуществляется автоматическая стабилизация параметров РПДУ (в первую очередь мощности и температурного режима), защита при нарушении условий

нормальной эксплуатации (например, при обрыве антенны) и управления (отключения-включения, перестройка по частоте).

## 2.4. Принцип работы радиопередатчика

Упрощенная структурная схема радиопередатчика приведена на рис 2.3. Входной сигнал подается на вход модулятора и этот сигнал модулирует колебания промежуточной частоты ( $f_{пч}$ ), вырабатываемой в тактовом генераторе.

Усиленный в усилителе промежуточной частоты (УПЧ) радиопередатчика модулированный ПЧ сигнал подается на смеситель, а на второй вход смесителя подается ВЧ сигнал от гетеродина радиопередатчика.

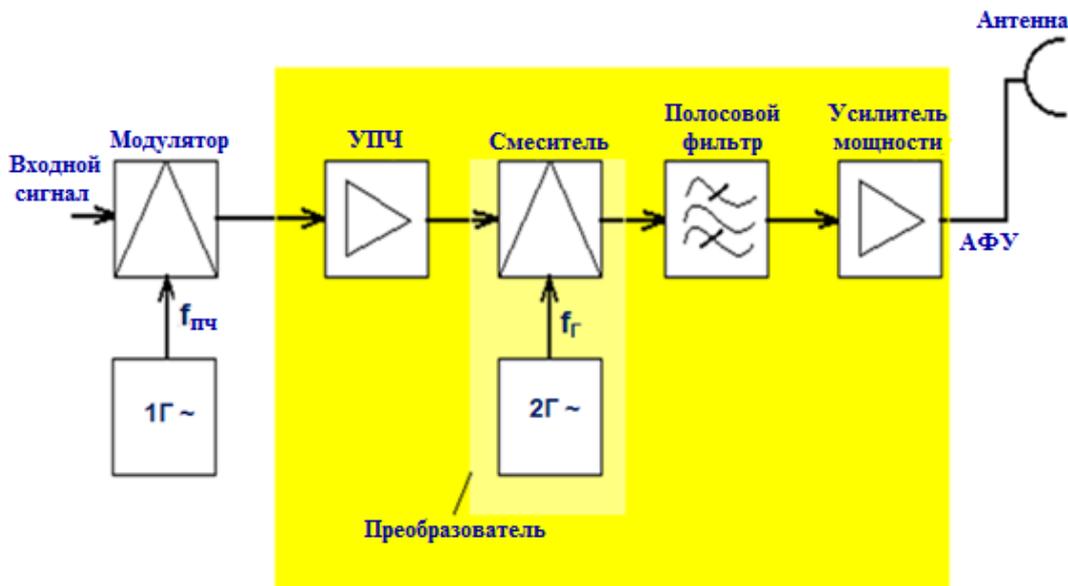


Рис 2. 3. Упрощенная структурная схема радиопередатчика

Смеситель и гетеродин образуют преобразователь частоты, с помощью которого осуществляется перенос спектра сигнала на рабочий диапазон частот (например, в СВЧ диапазон).

На выходе смесителя с помощью полосового фильтра выделяются преобразованные сигналы  $|f_{нч} + f_{гет}|$  или  $|f_{нч} - f_{гет}|$ .

Преобразованный сигнал после усиления в усилителе мощности подается через антенно-фидерное устройство в антенну.

В радиопередатчиках, работающих на длинных, средних и коротких волнах (ДВ, СВ и КВ) используется амплитудная модуляция. В УКВ и СВЧ радиопередатчиках применяется частотная и фазовая модуляция.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит назначение передатчика?
2. На какие диапазоны делятся волны в радиотехнике?
3. Как радиопередатчики подразделяются по мощности?
4. Как радиопередатчики подразделяются по частоте?
5. Перечислите каскады передатчика.
6. Перечислите блоки передатчика.
7. Приведите структурную схему передатчика и объясните принцип его работы?
8. Для чего нужны суммирование и разделение мощностей в радиопередатчиках?
9. Какой вид модуляции используется в радиопередатчиках, работающих в ДВ, КВ и СВ диапазонах.
10. Какой вид модуляции используется в радиопередатчиках УКВ и СВЧ диапазона?

### 3. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ И УСИЛЕНИЯ ВЧ И СВЧ КОЛЕБАНИЙ

#### 3.1. Назначение и структурные схемы генераторов высоких и сверхвысоких частот

Назначение генератора состоит преобразование энергии источника постоянного тока в ВЧ и СВЧ колебаний. Структурная схема простейшего генератора приведена на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Структурная схема простейшего генератора

Схема состоит из усилительного элемента (УЭ - транзистора), его нагрузки – колебательного контура, цепи обратной связи (ЦОС) и источника напряжения. Часть напряжения контура через ЦОС подается на вход УЭ. Это напряжение усиливается и вновь подается на колебательную систему. Данное напряжение после усиления должно быть достаточно для компенсации потерь в контуре. Кроме того, ЦОС должна обеспечить такой сдвиг фаз колебаний, подаваемых на вход УЭ, чтобы контур своевременно, то есть он должен получить энергию при отсутствии колебаний в контуре.

При одновременном выполнении указанных условий, устройство формирует (генерирует) незатухающие колебания, то есть будет работать как автогенератор.

### 3.2. Классификация генераторов высоких и сверхвысоких частот

Генераторы подразделяются на две основные вида (Рис. 3.2):

- 1) автогенераторы (с самовозбуждением);
- 2) генераторы с независимым возбуждением.



Рис. 3. 2. Виды генераторов

Генераторы ВЧ и СВЧ можно классифицировать следующим образом:

- по типу резонансных систем
- по типу замедляющих систем
- по стабилизации частоты и фазы в передатчиках СВЧ:
  - стабилизация частоты с помощью высокочастотных резонаторов;
  - автоматическая подстройка частоты и фазы в СВЧ диапазоне;
  - стабилизация частоты способом синхронизации
- по типу используемого усилительного элемента:
  - генераторы на триодах и тетродах;
  - генераторы на пролетных клистродах;

- генераторы на магнетронах, а они в свою очередь на стабилизированные магнетроны и магнетроны с перестройкой частоты.;
- генераторы на лампах бегущей волны, М-типа и О-типа;
- генераторы на полупроводниковых приборах, транзисторные генераторы СВЧ, генераторы на диодах Ганна, генераторы на лавинно-пролетных диодах.

- по мощности:

- малой мощности;
- средней мощности;
- большой мощности.

- по эксплуатационным требованиям:

- расширение температурного диапазона,
- повышение вибростойкости, ударостойкости.

### **3.3. Принцип работы генераторов высоких и сверх высоких частот**

Принцип работы генераторов СВЧ и ВЧ основаны на факте взаимодействия электромагнитных колебаний резонансных и замедляющих систем с динамически управляемыми потоками электронов, это привело к созданию магнетронных и клистронных генераторов, генераторов на лампах бегущей волны (прямой) и обратной волны, успешно работающих в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах.

Использование физических эффектов, возникающих в твердом теле (туннельного, эффекта Ганна), и лавинно пролетных явлений позволило создать новые типы полупроводниковых генераторных диодов, которые совершенствуются и им, несомненно, принадлежит будущее.

В СВЧ диапазоне, период генерируемых колебаний становится соизмеримым с временем пролета электронами межэлектродных промежутков (электроны проявляют инерционные свойства) резко возрастает вредное влияние собственных емкостей и индуктивностей прибора, его размеры становятся соизмеримыми с длиной генерируемых колебаний. Все это во многом определяет специфику работы приборов СВЧ.

Производная энергии электрона по времени при его движении в межэлектродном пространстве:

$$\frac{dW}{dt} = -e \frac{\partial U}{\partial t},$$

где  $W$  - полная энергия электрона, сумма кинетической и потенциальных энергий;

$U$ - потенциал электрического поля;

$e=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл заряд электрона.

На низких частотах величина  $\partial U/\partial t$  мала, близка к нулю, их полная энергия не изменяется, в СВЧ величина  $\partial U/\partial t$  существенно отличается от нуля и полная энергия электрона может изменяться как за счет изменения его кинетической энергии (ускорения торможения) так и за счет изменения потенциальной энергии, то есть электроны могут отдавать свою кинетическую или потенциальную энергию электромагнитному полю.

В приборах НЧ на пути электронного потока создается быстродействующий локально расположенный затвор, который путем очень малой затраты энергии регулирует плотность потока электронов, при этом период управления много больше времени пролета электронов, поэтому такое управление называют статическим, с увеличением частоты это условие

нарушается и способ становится нереализуем. В приборах СВЧ используют динамическое управление. Этот процесс длится определенное время и не всегда имеет локальный характер, а инертность электронов здесь используется как положительный фактор. При этом происходит взаимодействие электронного потока с электромагнитным полем колебательных систем приборов и модуляция потока по скорости, что приводит к его модуляции по плотности.

Передача энергии электронов электромагнитному полю в электронных приборах СВЧ происходит в результате взаимодействия электронного потока с электрической составляющей поля, касательной к траектории движения электронов. Для эффективного обмена энергией между электронами и полем необходимо, чтобы электроны, находящиеся в пространстве взаимодействия, все время тормозились полем. Для этого в свою очередь необходимо создавать неравномерный (промодулированный) по плотности электронный поток и обеспечить в приборе необходимые «тормозящие» фазовые соотношения как в пространстве, так и во времени. Создание неравномерного по плотности электронного потока является принципиальным условием, так как при равномерном потоке общий энергетический баланс (передача энергии от электронов СВЧ-полю и наоборот) буде равен нулю. Создание электромагнитного потока, промодулированного по плотности и имеющего определенную структуру, называется группировкой или фазовой фокусировкой потока. Механизм группировки определяет принцип работы и классификацию прибора и лежит в основе их работы.

Промодулированный поток состоит из движущихся сгустков электронов. Если обеспечить фазовые соотношения между потоком и СВЧ полем так, чтобы электронные

Сгустки при своем движении оказывались в тех местах пространства и в те моменты времени, где и когда действует тормозящее поле, то общий энергетический баланс будет положительным и энергия электронов будет превращаться в энергию электромагнитных колебаний (рис. 3.3).

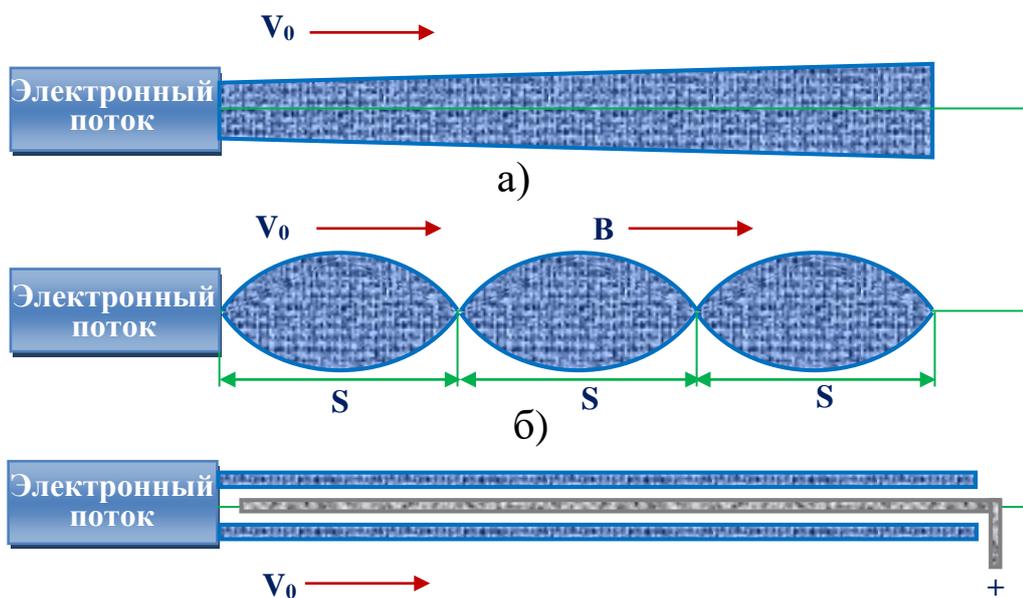


Рис. 3.3. Электронный поток при отсутствии (а) и при наличии (б) фокусирующего магнитного поля, полый электронный поток, фокусируемый электрическим полем.

Электроны могут взаимодействовать с СВЧ полем или только на определенных участках потока (как в пролетных клистронах) или в большей части его длины (как в лампах бегущей волны.). СВЧ колебания создаются в резонансных системах РС или в замедляющих системах ЗС. При этом электронный поток проходит через РС или ЗС обязательно в местах, где касательная к траекториям движения электронов составляющая СВЧ

электрического поля имеет максимальное значение. РС обеспечивают локальное и сравнительно кратковременное взаимодействие электронного потока с электромагнитным полем, а ЗС-распределенное и длительное, очевидно, что оптимальным условием энергообмена является приблизительное равенство средней скорости движения электронов и фазовой скорости используемого типа волны. Это условие называют условием синхронизма.

### 3.4. Генератор на биполярном транзисторе

Схема генератора на биполярном транзисторе приведена на рис. 3.4

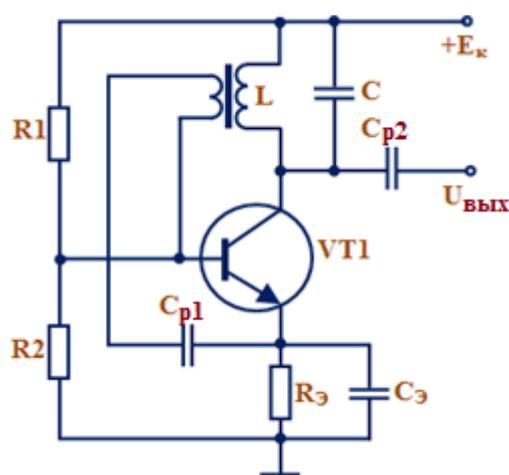


Рис. 3.4. Схема генератора на биполярном транзисторе:  $LC$  – колебательная система,  $VT$  – усилительный элемент,  $W1$  и  $C_p$  – элементы обратной связи

Сигнал обратной связи снимается со вторичной обмотки резонансного контура и через разделительный конденсатор поступает на базу транзистора, тем самым обеспечивает равенство фазового сдвига (фазовый баланс). Для обеспечения равенства баланса амплитуд должно выполняться следующее условие:

$$h \geq \frac{W_1}{W_2} \quad (3.1)$$

Частота генерируемых колебаний будет ближе к резонансной частоте колебательного контура:

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (3.2)$$

### 3.5. Генератор на клистроне

Клистрон используется только в СВЧ диапазоне. Он содержит два резонатора, где на входной резонатор подается входной сигнал, а с выходного резонатора получается сигнал усиленный по мощности (рис. 3.5).

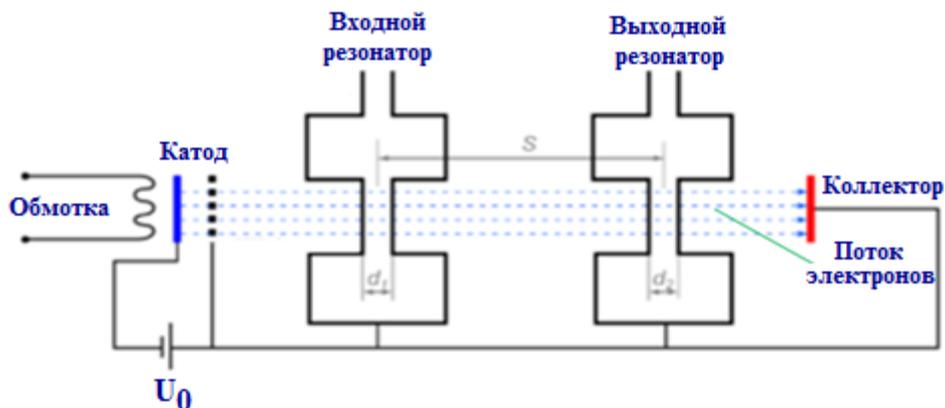


Рис. 3.5. Генератор на клистроне

### 3.6. Генератор на лампе бегущей волны (ЛБВ) типа О

Электривакуумный прибор, в котором для генерирования и/или усиления электромагнитных колебаний СВЧ используется взаимодействие бегущей электромагнитной волны и электронного потока, движущихся в одном направлении. Принцип действия ламп бегущей волны (ЛБВ) основан

на механизме длительного взаимодействия электронного потока с полем бегущей электромагнитной волны. На рис.3.6. схематично представлено устройство ЛБВ.

Электронная пушка формирует электронный пучок с определенным сечением и интенсивностью. Скорость электронов определяется ускоряющим напряжением. С помощью фокусирующей системы, создающей продольное магнитное поле, обеспечивается необходимое поперечное сечение пучка на всем пути вдоль замедляющей системы. В ЛБВ электронная пушка, спиральная замедляющая система и коллектор размещаются в металлоглазном или металлическом баллоне, а фокусирующий соленоид располагается снаружи.

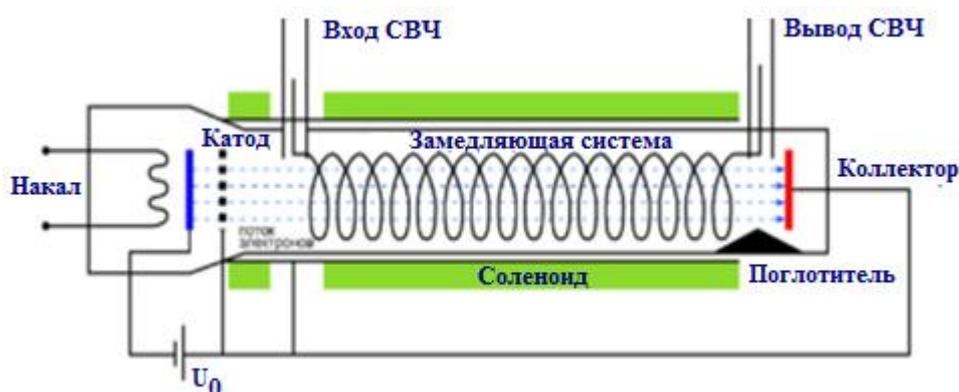


Рис. 3.6. Устройство ЛБВ типа О

Спираль крепится между диэлектрическими стержнями, которые должны обладать малыми потерями на СВЧ и хорошей теплопроводностью. Последнее требование важно для ламп средней и большой выходной мощности, когда спираль нагревается из-за оседания электронов и нужно отводить это тепло, чтобы не было прогорания спирали.

На входе и выходе замедляющей системы есть специальные устройства для согласования её с линиями передачи. Последние могут быть либо

волноводными, либо коаксиальными. На вход поступает СВЧ сигнал, который усиливается в приборе и с выхода передается в нагрузку.

Трудно получить хорошее согласование во всей полосе усиления лампы. Поэтому есть опасность возникновения внутренней обратной связи из-за отражения электромагнитной волны на концах замедляющей системы, при этом ЛБВ может перестать выполнять свои функции усилителя. Для устранения самовозбуждения вводится поглотитель, который может быть выполнен в виде стержня из поглощающей керамики или в виде поглощающих плёнок.

Внутри спирали от катода к коллектору перемещаются носители заряда – электроны со скоростью  $v_э$ . Фазовая скорость  $v_ф$  электромагнитной волны, вектор которого направлен по длине спирали будет в десять раз меньше скорости света. При этом достигается равенство  $v_э = v_ф$  и происходит взаимодействие потока электронов с электромагнитной волны повышающей свою энергию по распространению и идущей по прямому направлению. Усиленный по мощности СВЧ сигнал получится с противоположном конце спирали.

### 3.7. Магнетрон или приборы М-типа

**Магнетрон** – это мощный электронный прибор, генерирующий микроволны при взаимодействии потока электронов с электрической составляющей поля СВЧ в пространстве, где постоянное магнитное поле перпендикулярно постоянному электрическому полю.

Магнетроны бывают как неперестраиваемые, так и перестраиваемые в небольшом диапазоне частот (обычно менее 10 %). Для медленной

перестройки частоты применяются механизмы, приводимые в движение рукой, для быстрой (до нескольких тысяч перестроек в секунду) - ротационные и вибрационные механизмы.

Магнетроны как генераторы сверхвысоких частот широко используются в современной радиолокационной технике (хотя их начинают вытеснять активные фазированные антенные решётки).

*Резонансный магнетрон* состоит из анодного блока, который представляет собой, как правило, металлический толстостенный цилиндр с прорезанными в стенках полостями, выполняющими роль объёмных резонаторов. Резонаторы образуют кольцевую колебательную систему. К анодному блоку закрепляется цилиндрический катод. Внутри катода закреплён подогреватель. Магнитное поле, параллельное оси прибора, создаётся внешними магнитами или электромагнитом (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Конструкция магнетрона

Для вывода СВЧ энергии используется, как правило, проволочная петля, закреплённая в одном из резонаторов, или отверстие из резонатора наружу цилиндра.

Резонаторы магнетрона образуют кольцевую колебательную систему, около них происходит взаимодействие пучка электронов и электромагнитной волны. Поскольку эта система в результате кольцевой конструкции замкнута сама на себя, то её можно возбудить лишь на определённых видах колебаний, из которых важное значение имеет  $\pi$ -вид. Среди нескольких резонансных частот системы (при  $N$  резонаторах в системе возможно существование любого целого количества стоячих волн в диапазоне от 1 до  $N/2$ ) чаще всего используется  $\pi$ -вид колебаний, при котором фазы в смежных резонаторах различаются на  $\pi$ .

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит назначение генераторов высоких и сверх высоких частот?
2. Объясните структурные схемы высоких и сверх высоких частот.
3. Что используется в качестве колебательной системы?
4. На какие виды подразделяются генераторы высоких и сверх высоких частот?
5. Что такое автогенератор?
6. Объясните принцип работы генератора с независимым возбуждением?
7. Объясните принцип работы генератора на биполярном транзисторе?
8. Объясните принцип работы генератора на клистроне?

9. Объясните принцип работы ЛБВ?

10. Объясните принцип магнетрона или прибора М-типа?

## **4. МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ**

### **4.1. Назначение и классификация автоматической подстройки частоты**

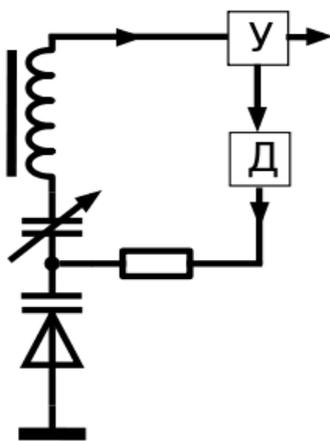
В современных радиотехнических устройствах различного назначения и системах радиоуправления широко применяются автоматические системы, которые называют системами радиоавтоматики (РА). К ним относятся устройства фазовой и частотной автоподстройки частоты, автоматической регулировки усиления, системы измерения координат движущихся объектов, измерители дальности, различные следящие фильтры и другие.

Выделение систем РА в самостоятельный класс обусловлено их особенностями, связанными с условиями работы в составе радиотехнических устройств и систем радиоуправления, в которых осуществляется обработка параметров радиосигнала при действии различного вида помех.

Надежность и качество работы систем РА во многом определяют характеристики радиоаппаратуры и систем радиоуправления. Системы автоматической подстройки частоты применяются в радиоприемных устройствах, доплеровских системах измерения скорости подвижных объектов, устройствах частотной селекции сигналов.

**Автоматическая подстройка частоты (АПЧ)** — устройство или метод автоматического изменения и удержания необходимой частоты электрических колебаний генератора. Метод заключается в автоматической дополнительной регулировке частоты генератора, по информации о рассогласовании частоты из цепи обратной связи. Тем самым осуществляется отрицательная обратная связь по частоте. Сигнал

рассогласования по частоте может вырабатываться дискриминатором по различным характеристикам сигнала, получаемого в радиотехническом устройстве с использованием текущей частоты генератора заданной частоты и сравнения её с опорной частотой, например, несущей частотой сигнала (рис.4.1). Частота генератора может отличаться от необходимой из-за температурного дрейфа номиналов электронных компонентов, входящих в устройство; из-за неточной (например, дискретной) установки частоты генератора; или из-за доплеровского сдвига частот (в системах приёма сигналов со спутников и космических аппаратов).



У — усилительные каскады, Д — дискриминатор

Рис. 4.1. Схема автоматической подстройки частоты приёма с использованием варикапа

Частотный дискриминатор служит для получения напряжения рассогласования с полярностью, зависящей от знака расстройки; величина этого напряжения пропорциональна величине расстройки. Подстройка частоты гетеродина приемника будет осуществляться, если величина расстройки по частоте не превышает зоны захвата. Если расстройка

по частоте будет больше зоны захвата, тогда система АПЧ не будет работать. Для того чтобы система АПЧ работала при любых расстройках частоты, на схему, управляющую частотой гетеродина, подается пилообразное напряжение «поиска» сигнала с периодом следования зондирующих импульсов. Как только частота гетеродина становится такой, что значение промежуточной частоты на выходе смесителя попадает в полосу захвата АПЧ, напряжение на входе управляющей схемы запоминается и начинает работать система АПЧ.

Существующие системы АПЧ можно классифицировать по следующим признакам:

а) По виду дискриминатора:

- система частотной автоподстройки;
- система фазовой автоподстройки.

б) По параметру:

- система автоподстройки разностной частоты;
- система стабилизации абсолютного значения частоты;

с) По типу управителя:

- электронные;
- электрические;

д) По способу настройки стабилизируемого параметра:

- следящие;
- поисковые;

е) По виду эталона частоты:

- с активным эталоном (кварц);
- с пассивным эталоном (резонансные системы).

## 4.2. Схемотехника АПЧ

Традиционно в системы АПЧ входят генератор, управляемый напряжением (ГУН), частотный дискриминатор, в качестве которого обычно используется фазовый детектор и источник опорного сигнала, получаемый от дополнительного генератора, например, высокостабильного по частоте. При радиоприёме в качестве источника опорного сигнала применяется выделенная специальной схемой несущая частота принимаемого сигнала.

Почти всегда на фазовый детектор подают не сами сигналы генераторов, а частоты, получаемые в результате деления или умножения частот генераторов делителями или умножителями частоты, этот метод позволяет складывать и вычитать частоты, умноженные на нужные коэффициенты и используется в синтезаторах частот.

На вход фазового детектора подают сигналы ГУН и сигнал опорной частоты. При отклонении частот сигналов на входе фазового детектора тот вырабатывает напряжение, пропорциональное разности фаз сигналов, подаваемое через фильтр нижних частот на ГУН, тем самым замыкается контур обратной связи и частота ГУН подстраивается под опорную частоту.

АПЧ очень широко применяется в современной электронике:

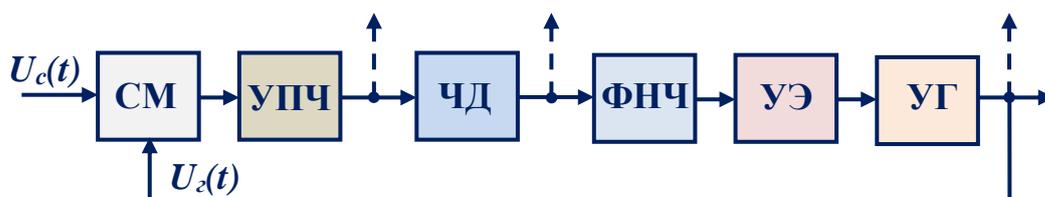
- демодуляции АМ и ЧМ сигналов;
- декодирования тональных сигналов;
- стабилизации и управления скоростью вращения различных электродвигателей, например, в приводах дисковых накопителей;
- измерительных приборах, например, частотомерах;
- синтезаторах частоты и др.

Автоматическая подстройка частоты широко применяется во входных каскадах радиоприёмников, в том числе телевизионных и обычно заключается в автоматическом изменении частоты гетеродина (АПЧГ), в небольшом диапазоне: при уходе частоты гетеродина от необходимой для качественного приёма сигнала (например, вызванное изменением температуры), АПЧГ изменяет управляющий сигнал, подаваемый на гетеродин, таким образом, чтобы частота гетеродина соответствовала наилучшему приёму.

В телевизионных приёмниках также используется автоматическая подстройка частоты и фазы строчной развёртки с синхронизирующими импульсами видеосигнала.

Различают две разновидности систем АПЧ: системы частотной автоподстройки частоты – ЧАПЧ и системы фазовой автоподстройки частоты – ФАПЧ.

Функциональная и обобщенная схемы системы ЧАП имеют вид, изображенный на рис. 4.2.



СМ - смеситель; УПЧ - усилитель промежуточной частоты; ЧД - частотный дискриминатор (может быть выполнен по схеме любого частотного детектора); ФНЧ - фильтр нижних частот; УЭ - управляющий элемент; УГ - управляемый генератор

Рис. 4.2. Функциональная схема системы ЧАП

Рис.4.3 соответствует представлению системы ЧАП в виде обобщенной схемы управления. Объектом управления здесь является управляемый генератор УГ. В состав измерительного элемента входят СМ, УПЧ, ЧД. Функции УПУ выполняет УЭ, преобразующий электрические сигналы в изменения частоты управляемого генератора.

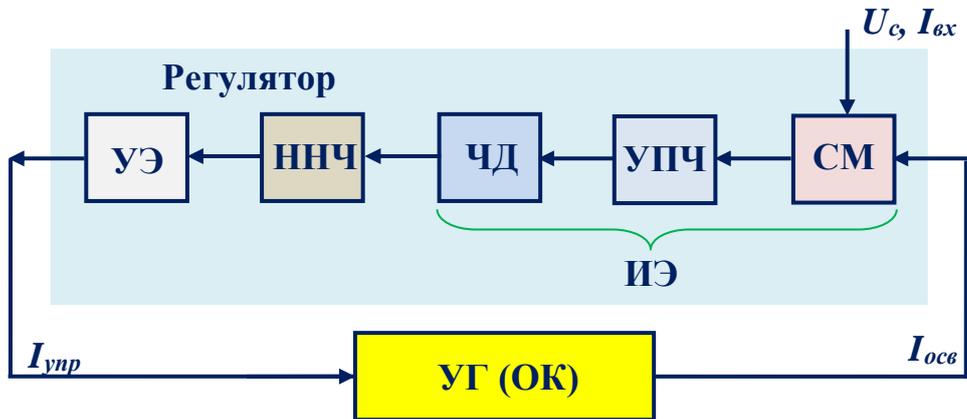


Рис. 4.3. Обобщенная схема системы ЧАП

На вход смесителя поступают сигнал  $U_C$  с частотой:

$$\omega_c(t) = \omega_{0c} + \Delta\omega_c(t), \quad (4.1)$$

и напряжение с выхода управляемого генератора  $U_G$  с частотой:

$$\omega_r(t) = \omega_{0r} + \Delta\omega_r(t) \quad (4.2)$$

**Фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ, англ. PLL)** - система автоматического регулирования, подстраивающая фазу управляемого генератора так, чтобы она была равна фазе опорного сигнала, либо отличалась на известную функцию от времени. Регулировка осуществляется благодаря наличию отрицательной обратной связи. Выходной сигнал

управляемого генератора сравнивается на фазовом детекторе с опорным сигналом, результат сравнения используется для подстройки управляемого генератора.

Система ФАПЧ используется для частотной модуляции и демодуляции, умножения и преобразования частоты, частотной фильтрации, выделения опорного колебания для когерентного детектирования и в других целях.

ФАПЧ сравнивает фазы входного и опорного сигналов и выводит сигнал ошибки, соответствующий разности между этими фазами. Сигнал ошибки проходит далее через фильтр низких частот и используется в качестве управляющего для генератора, управляемого напряжением (ГУН), обеспечивающего отрицательную обратную связь. Если выходная частота отклоняется от опорной, то сигнал ошибки увеличивается, действуя на ГУН в сторону уменьшения ошибки. В состоянии равновесия выходной сигнал фиксируется на частоте опорного (рис. 4.4).

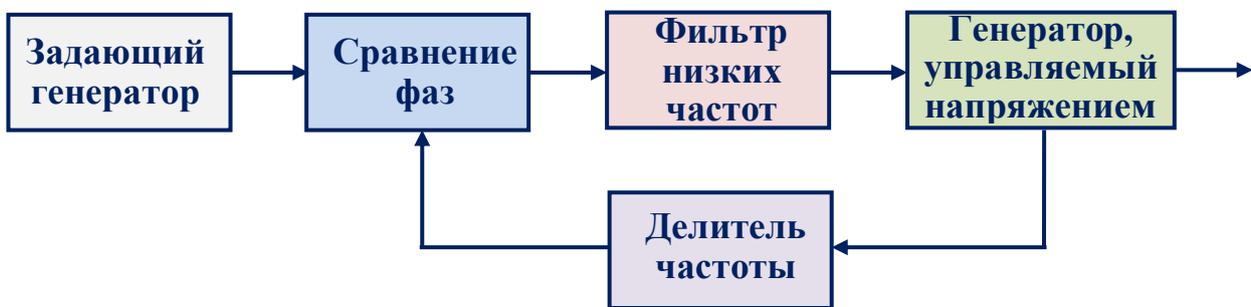


Рис. 4.4. Структурная схема ФАПЧ

ФАПЧ широко используется в радиотехнике, телекоммуникациях, компьютерах и других электронных устройствах. Данная система может генерировать сигнал постоянной частоты, восстанавливать сигнал из зашумлённого коммуникационного канала или распределять сигналы синхронизации в цифровых логических схемах, таких, как микропроцессоры,

программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и т.д. Поскольку интегральная схема может полностью реализовать блок ФАПЧ, этот метод часто используется в современных электронных устройствах с выходными частотами от долей герца до многих гигагерц.

Устройства ФАПЧ могут быть реализованы как аналоговой, так и цифровой схемой. Обе реализации используют одинаковую структурную схему. Как аналоговая, так и цифровая схема ФАПЧ включает в себя 4 основных элемента:

- фазовый детектор;
- фильтр нижних частот;
- регулируемый генератор;
- обратная связь (часто включающая в себя делитель частоты).

**Цифровая фазовая автоподстройка частоты.** Цифровая фазовая автоподстройка частоты (ЦФАПЧ) работает схожим образом с аналоговой, но полностью реализуется с помощью цифровых схем. Вместо ГУН используются системные часы и счётчик-делитель под цифровым управлением. ЦФАПЧ более проста в разработке и реализации, меньше чувствительна к шумам напряжения (по сравнению с аналоговой), однако, обычно она допускает фазовый шум по причине наличия шума квантования при использовании цифрового генератора. Вследствие этого ЦФАПЧ непригодны для работы на высокой частоте или управления высокочастотными опорными сигналами. ЦФАПЧ иногда используются для восстановления данных.

### 4.3. Способы настройки частоты в радиоприемных устройствах

Авто АПЧ должна обеспечить требуемую точность настройки приёмника при воздействии дестабилизирующих факторов. Случайные изменения частоты гетеродина  $f_z$  или частоты принимаемого сигнала  $f_c$  приводят к изменению промежуточной частоты  $f_{np} = f_z - f_c$ . Поэтому задача АПЧ сводится к подстройке частоты гетеродина для точного соответствия промежуточной частоты  $f_{np}$  частоте, на которую настроен тракт ПЧ.

Для АПЧ вводится специальная цепь АПЧ, состоящая из измерительного элемента ИЭ, фильтра и регулятора частоты РЧ. Измерительный элемент вырабатывает напряжение регулировки  $E_{рег}$ . В зависимости от вида ИЭ различают частотную ЧАПЧ и фазовую ФАПЧ. В системе ЧАПЧ измерительный элемент оценивает отклонение частоты напряжения на входе цепи АПЧ от эталонного значения. В качестве ИЭ используется частотный детектор (рис.4.5).

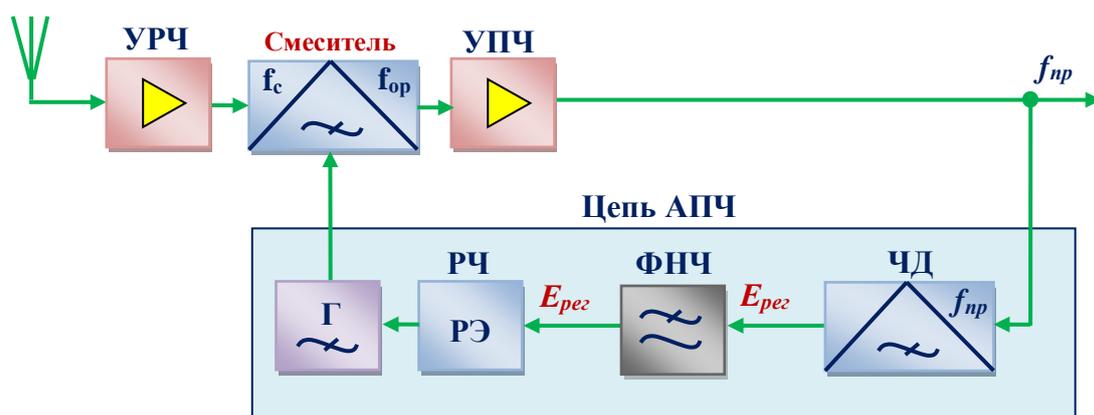


Рис. 4.5. Частотный детектор

Частотный детектор настраивается на номинальное значение промежуточной частоты  $f_{np0}$ . При  $f_{np} = f_{np0}$  на его выходе будет нулевое

напряжение. При отклонении  $f_{np}$  от  $f_{np0}$  на выходе ЧД будет напряжение, пропорциональное величине расстройки, полярность напряжения зависит от направления расстройки. Регулирующее напряжение  $E_{рег}$ , пройдя фильтр нижних частот, воздействует на реактивный элемент (РЭ), который выполняет роль регулятора частоты (РЧ). В качестве РЭ обычно используют варикап, который включается в контур гетеродина. Подстройка ведётся до тех пор пока  $f_{np}$  не станет равной  $f_{np0}$  с некоторой допустимой ошибкой.

Фазовая АПЧ (рис.4.6) позволяет сравнить фазы колебаний гетеродина и опорного генератора (ОГ). В качестве измерительного элемента в ФАПЧ используется фазовый детектор ФД.

Напряжение  $E_{рег}$  в ФАПЧ зависит от сдвига фаз между колебаниями подстраиваемого и опорного генераторов. По сравнению с ЧАПЧ фазовая АПЧ более чувствительна, т. к. реагирует даже на самые малые расхождения частот.

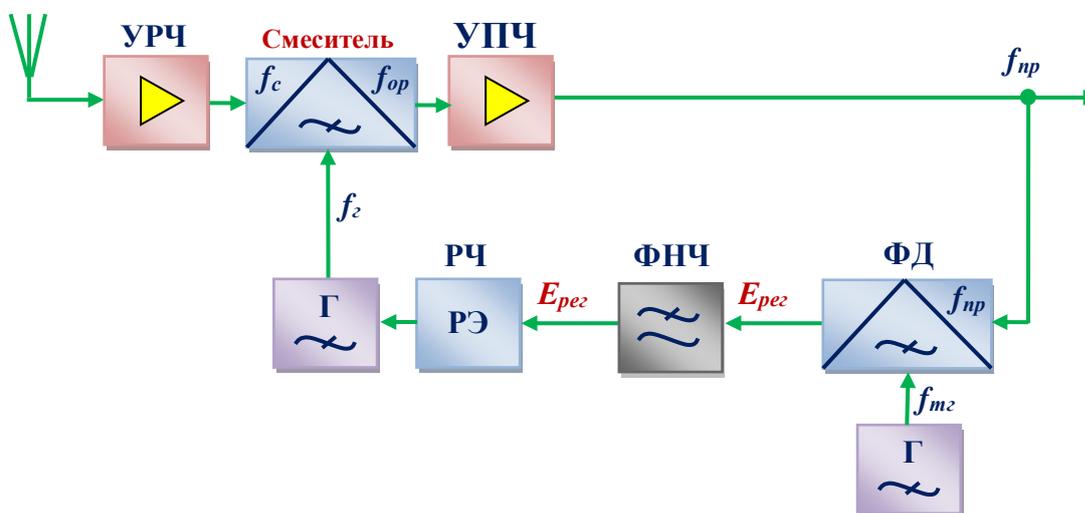


Рис. 4.6. Фазовый детектор

В усилителях звуковых частот в основном применяют плавную потенциометрическую регулировку усиления (рис.4.7)

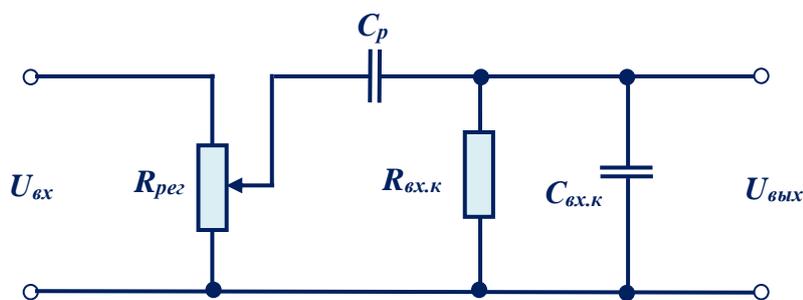


Рис.4.7. Регулировка усиления

Этот вид регулировки называют регулировкой громкости. Регулировочное сопротивление обычно ставится между выходом детектора и входом первого каскада усилителя звуковой частоты.

Наряду с потенциометрической часто осуществляют (особенно широкополосных каскадах усиления видеосигналов) регулировку усиления с помощью регулируемой ООС (рис. 4.8.)

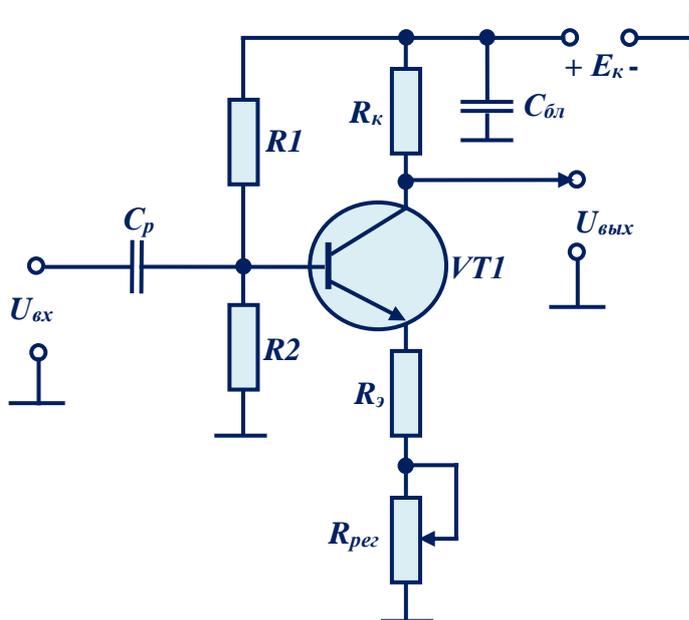


Рис. 4.8. Усиления с помощью регулируемой ООС

Изменяя величину сопротивления резистора  $R_{рег}$ , изменяем глубину ООС и соответственно коэффициент усиления усилителя. При увеличении

сопротивления резистора  $R_{рег}$ . глубина ООС увеличивается, коэффициент усиления усилителя уменьшается, и наоборот.

В усилителях радио и промежуточной частоты (рис.4.9) регулировка усиления изменением глубины ООС осуществляется изменением ёмкости  $C_{рег}$ , роль которой выполняет варикап  $VD1$ . С увеличением регулирующего напряжения  $E_{рег}$  диод  $VD1$  закрывается сильнее, его ёмкость  $C_{рег}$  уменьшается, глубина ООС увеличивается, коэффициент усиления усилителя уменьшается.

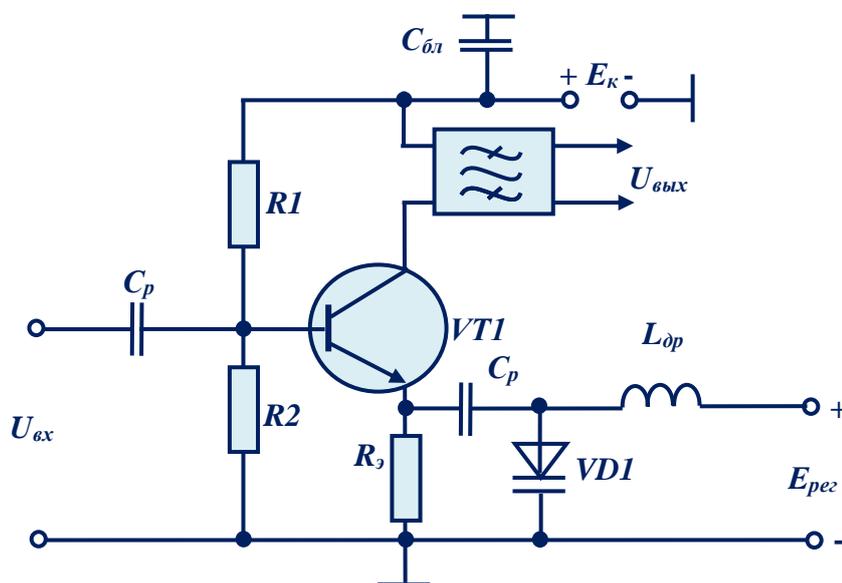


Рис. 4.9. Усилители радио и промежуточной частоты

Чем больше  $U_{унр}$ , тем больше  $I_0$  и тем больше крутизна и следовательно больше  $K_u$ .

Основным показателем цепи с регулируемым коэффициентом усиления служит коэффициент регулирования:

$$\gamma = \frac{K_{max}}{K_{min}}$$

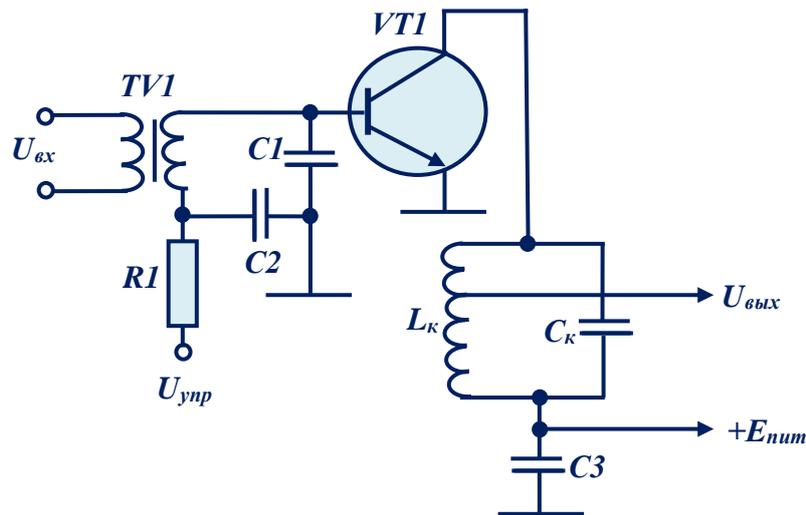


Рис. 4.10 . Схема каскада с изменением крутизны биполярного транзистора

Например, чувствительность приёмника 2 мкВ, а самая мощная радиостанция создаёт на входе напряжение 20 мВ, а допустимое изменение напряжения на выходе не более чем в 2 раза, то

$$\gamma = \frac{20 \text{ мВ}}{2 \text{ мкВ} * 2} = 5000$$

Обычно один каскад не может обеспечить такую глубокую регулировку, и используют несколько УУ, включенных последовательно.

Тогда  $\gamma_{\Sigma} = \gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_n$  схема использует полевой транзистор (ПТ) для регулировки  $K_u$  за счет изменения глубины ОС. При малых напряжениях сток-исток полевой транзистор ведёт себя как резистор, сопротивление которого меняется в зависимости от управляющего напряжения

## Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен и что должна обеспечить частотная автоподстройка частоты?
2. Как классифицируются существующие системы АПЧ?
3. Где применяются частотная автоподстройка частоты?
4. Как осуществляется частотная автоподстройка частоты?
5. Как осуществляется фазовая автоподстройка частоты?
6. Расскажите принцип работы частотного и фазового детектора?
7. Что понимается под плавной потенциометрической регулировке усиления?
8. Как осуществляется регулировка усиления с помощью регулируемой ООС?
9. Для чего используются варикапы в усилителях радио и промежуточной частоты?
10. Что общего между ЧАПЧ и ФАПЧ и чем отличаются эти системы друг от друга?

## 5. РАДИОПЕРЕДАТЧИКИ С АМПЛИТУДНОЙ, ОДНОПОЛОСНОЙ, УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

### 5.1. Радиопередатчики с амплитудной модуляцией

**Амплитудная модуляция (АМ)** — наиболее распространенный тип модуляции. В системе с АМ амплитуда несущей изменяется в соответствии с изменением сигнала или информации (рис.5.1). В отсутствие сигнала амплитуда несущей имеет постоянный уровень. При модуляции синусоидальным сигналом амплитуда несущей увеличивается или уменьшается относительно своего немодулированного уровня по синусоидальному закону в соответствии с нарастанием или спаданием модулирующего сигнала. Чем больше амплитуда модулирующего сигнала, тем сильнее изменяется амплитуда несущей. Амплитудно-модулированная несущая имеет огибающую, в точности повторяющую форму модулирующего сигнала, и при демодуляции именно эта огибающая выделяется как полезный сигнал.

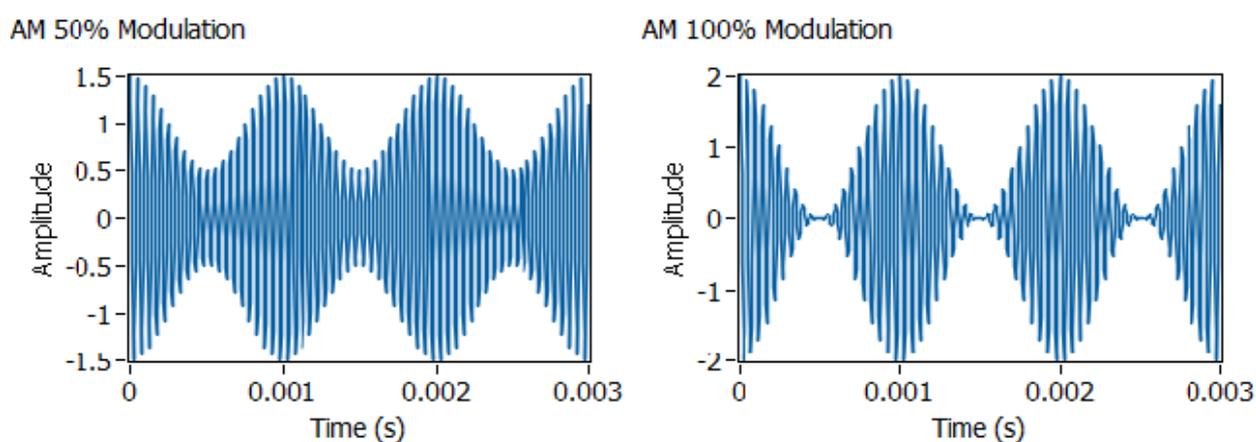


Рис. 5.1. Амплитудно-модулированный сигнал

Пусть

$u_m(t)$  — информационный (модулирующий) сигнал,

$u_c(t)$  — несущий (модулируемый) сигнал (несущее колебание).

Тогда амплитудно-модулированный сигнал  $u_m(t)$  имеет вид:

$$u_{am}(t) = u_c(t) \left[ 1 + m \cdot \frac{u_{am}(t)}{|u_{am}(t)|_{max}} \right] \quad (5.1)$$

Если  $u_c(t) = U_c \cos(\omega_0 t)$ , то (5.1) примет вид:

$$u_{am}(t) = u_c(t) \left[ 1 + m \cdot \frac{u_{am}(t)}{|u_{am}(t)|_{max}} \right] \cos(\omega_0 t) \quad (5.2)$$

здесь  $m$  - некоторая неотрицательная константа, называемая коэффициентом модуляции.

Формула (4.1) описывает несущий сигнал  $u_c(t)$ , модулированный по амплитуде сигналом  $u_m(t)$  с коэффициентом модуляции  $m$ .

Амплитудная модуляция по помехозащищенности передаваемой информации заметно уступает частотной и фазовой модуляции, поэтому применяется только в ДВ, СВ и КВ системах.

Амплитудная модуляция осуществляется на генераторах с самовозбуждением в основном в выходных или промежуточных каскадах, путем преобразования напряжения на одном или нескольких электродах.

В транзисторных радиопередатчиках модулятор используется как управляемое сопротивление, подключенное в цепь коллектора транзистора (рис.5.2).

На рис.5.3 приведена общая структурная схема усилительного тракта радиопередатчика. Здесь передаваемая информация подается на вход модулятора и после усиления, модулирующий сигнал  $P_m$  подается на

выходной усилитель ВЧ. Требуемое значение сигнала  $P_m$  зависит от мощности высокочастотных колебаний  $P_1$ , коэффициента  $m$  и способа модуляции. Требуемое значение мощности источника питания  $P_0$  также определяется этими параметрами.

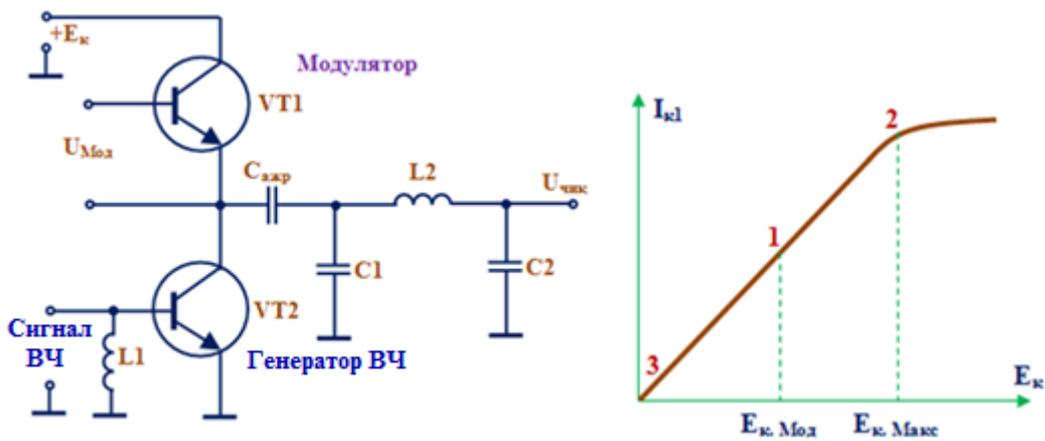


Рис. 5.2. Схема транзисторного АМ передатчика



Рис. 5.3. Общая структурная схема тракта усиления передатчика

Частотный спектр амплитудной модуляции приведен на рис.5.4.

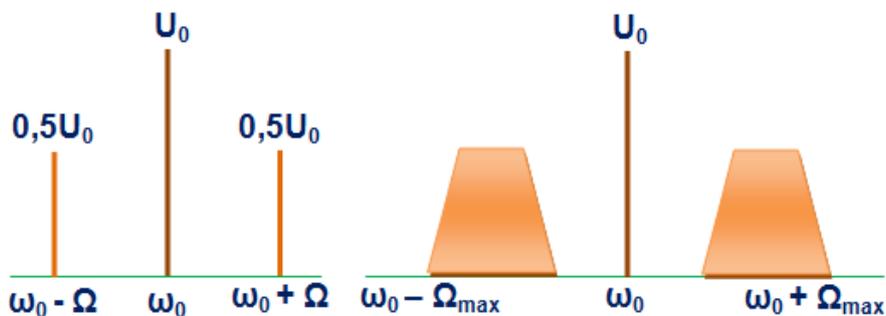


Рис. 5.4. Частотный спектр амплитудной модуляции

## 5.2. Радиопередатчики однополосной модуляции

Одним из недостатков амплитудной модуляции является неэкономичное рассеяние мощности ВЧ генератора. 67% мощности ВЧ генератора расходуется на несущую колебанию, тогда как на боковых составляющих, которые переносят передаваемую информацию, остается 33% мощности. Для более эффективного использования мощности спектра АМ сигнала были предложены следующие решения:

1. Исключить из спектра АМ сигнала несущую и передавать только две боковые полосы частот. При этом реализуется так называемая балансная модуляция (БМ) или передача на двух боковых полосах (ДБП).

2. Из спектра ДБП исключить еще одну боковую полосу частот (верхнюю или нижнюю), поскольку каждая из них содержит полную информацию о модулирующем сигнале  $u_m(t)$ . При этом получается однополосная модуляция (ОМ), т.е. модуляцию с одной боковой полосой – ОБП.

Аналитическое выражение БМ сигнала аналогично выражению для АМ сигнала, но в нем необходимо исключить спектральную составляющую с частотой несущей  $\omega_0$ :

$$S_{\text{БМ}}(u_m, t) = A_0 M u_m(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (5.3)$$

В общем случае, для любого сигнала  $u_m(t)$  математическую модель ОМ сигнала можно представить в виде:

$$S_{\text{ОМ}}(u_m, t) = A_0 M u_m(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \pm A_0 M u_m^*(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (5.4)$$

где знак минус относится к описанию верхней боковой полосы, а знак плюс – нижней боковой полосы;

$u_m^*(t)$  – сигнал сопряженный по Гильберту с сигналом  $u_m(t)$ .

Физический смысл интегрального преобразования Гильберта состоит в следующем:  $u_m^*(t)$  отличается от  $u_m(t)$  тем, что фазы всех его спектральных составляющих повернуты на  $\pi/2$ .

### Спектры БМ и ОМ сигналов

Очевидными достоинствами БМ и ОМ сигналов являются увеличение эффективности использования мощности передатчика и соответственно повышение качества приема таких сигналов. При ОМ вдвое уменьшается ширина спектра модулированного сигнала, что позволяет во столько же увеличить число сигналов, передаваемых в заданной полосе частот. В связи с этим ОМ широко применяется в многоканальной связи с частотным разделением каналов (рис.5.5).

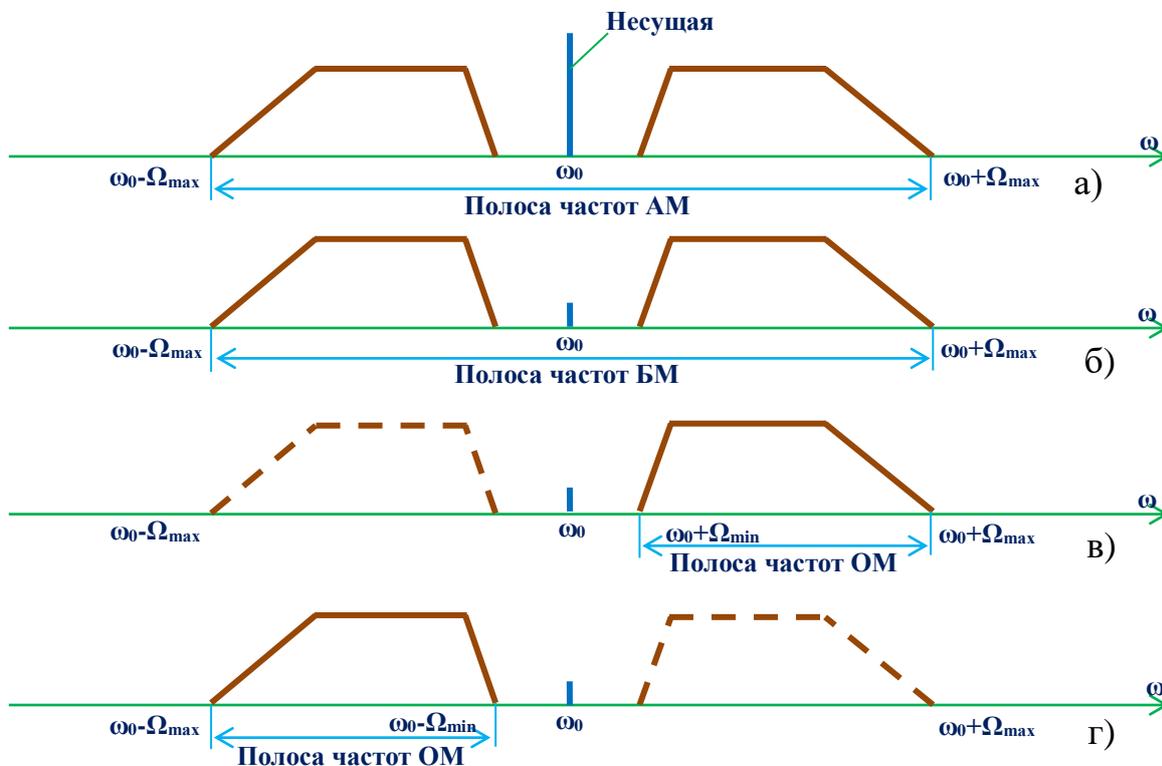


Рис.5.5. Способы получения однополосных сигналов.

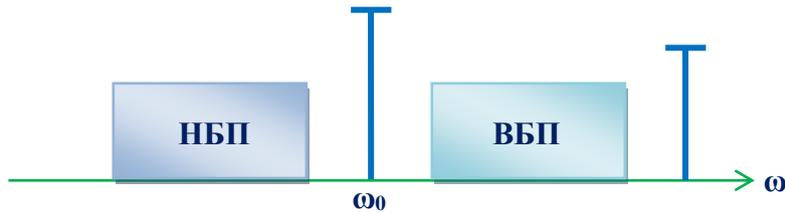


Рис.5.6. Формирование сигнала НБП и ВБП.

1. Амплитуда несущей не нужна, существуют две боковые полосы с АМ без несущей (рис.5.6).

2. Без несущей, одна боковая полоса с АМ.

3. Одна БП с АМ с остатками несущей.

4. ОБП - АМ с пилот-сигналом.

Существует два метода получения сигнала с одной боковой полосой (ОБП):

1. Метод фильтрации.

2. Метод фазирования.

Формирование сигнала однобоковой полосы первым методом в случае, когда модулирующее колебание состоит из суммы гармонических компонентов:

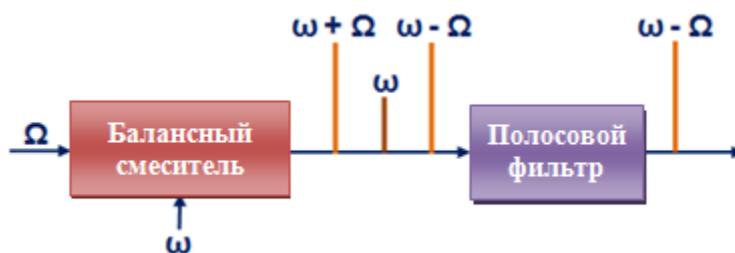


Рис. 5.7. Формирование сигнала ОБП методом фильтрации

Колебание несущей частоты и модулирующий сигнал подаются на балансный модулятор или кольцевой модулятор, на выходе которого создается двухполосный сигнал без несущей (рис. 5.7). Далее ставится фильтр, пропускающий на выходе сигнал ОБП (верхней или нижней).

Структурная схема кольцевого ОБП модулятора приведена на рис. 5.8.

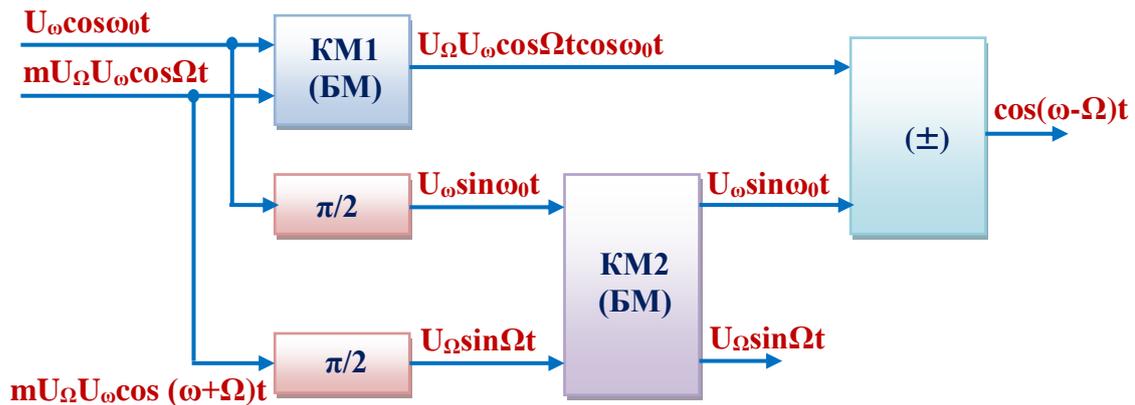


Рис. 5.8. Структурная схема кольцевого ОБП модулятора

Пусть входной сигнал  $u_1 = U_1 \cos \omega_0 t$  и  $u_2 = U_2 \cos \Omega t$ , и требуется получить на выходе, например, только нижнюю боковую частоту  $u_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \cos(\omega_0 - \Omega)t$ . Записав это выражение в виде  $u_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \cos \omega_0 t + U_{\text{вых}} \sin \Omega t \sin \omega_0 t$ , замечаем, что оно может быть сформировано в результате сложения колебаний, получающихся на выходе двух перемножителей колебаний (в качестве которых могут быть использованы БМ или КМ). Подавая на вход  $KM_1$  (рис. 8) сигналы  $u_1$  и  $u_2$ , а на вход  $KM_2$  те же сигналы, предварительно повернутые по фазе на  $90^\circ$  с помощью фазовращателей, получим на выходе каждого перемножителя ( $БМ_1$  и  $БМ_2$ ) напряжения пропорционально произведению двух входных сигналов  $U_{\text{вых}1,2} = a u_{\text{вх}1} u_{\text{вх}2}$ .

На выходе сумматора будет  $u_{\text{вых}} = u_{\text{вых}1} + u_{\text{вых}2} = a U_1 U_2 \cos(\omega_0 - \Omega)t$ .

Для формирования верхней боковой полосы нужно в схеме ОПМ поставить вычитающее устройство вместо суммирующего.

Преимущества ОБП:

- отсутствие потерь мощности на передачу колебаний несущей частоты и одной боковой полосы, за счет этого можно увеличить мощность

колебания, передаваемой боковой полосой, а, следовательно, и дальность действия системы связи;

- при отсутствии модулирующего сигнала (в режиме молчания) мощность передатчика не расходуется, так как колебание несущей частоты отсутствует;

- меньше занимаемая полоса частот, это позволяет увеличить число станций, работающих без взаимных помех в заданном диапазоне волн;

- более узкая полоса пропускания радиоприемных устройств, что дает возможность снизить уровень помех на входе приемника;

- связь с ОБП может применяться при любом виде модуляции (АМ, ЧМ, ФМ).

Основное преимущество ОБП сигналов – двухкратное сокращение полосы занимаемых частот, что оказывается существенным для частотного уплотнения радиоканалов, например, при связи на КВ в условиях предельной загруженности частотного диапазона.

Недостатки:

- связь с использованием сигналов ОБП достигается за счет усложнения передающей и приемной аппаратуры. В приемном устройстве необходимо восстановить несущее колебание, должным образом синхронизированное с несущим (по подавленным) колебанием передатчика.

- огибающая сигнала ОБП не повторяет форму модулирующей функции

### **5.3. Радиопередатчики с угловой модуляцией**

**Угловая модуляция** - вид модуляции, при которой передаваемый сигнал изменяет либо частоту  $\omega$ , либо начальную фазу  $\varphi$ , амплитуда не

изменяется. Подразделяется соответственно на частотную и фазовую модуляцию. Названа так потому что полная фаза гармонического колебания  $\Psi(t) = \omega t + \varphi$  определяет текущее значение фазового угла.

Угловая модуляция обычно применяется, когда требуется обеспечить высокую достоверность приема передаваемого сообщения. Это объясняется тем, что системы с угловой модуляцией обладают повышенной по сравнению с АМ помехоустойчивостью.

Благодаря высокой помехоустойчивости угловая модуляция применяется в системах низовой радиосвязи различных диапазонов частот, в радиовещании в УКВ диапазоне, в звуковом сопровождении телевизионного вещания, в наземной радиорелейной связи прямой видимости, тропосферной и космической связи. Кроме того, УМ используется в радиотелеметрии, системах радиоуправления, некоторых системах радионавигации и радиолокации. Телеграфные сигналы и цифровая информация в настоящее время передаются преимущественно путем частотной и фазовой манипуляций.

Известно, что УМ обеспечивают лучшую помехоустойчивость и более высокие энергетические характеристики, чем АМ, однако для этого ей требуется большая необходимая полоса частот (НПЧ).

Модулирующий сигнал в общем случае имеет сложную форму, и анализ процессов, происходящих в передатчике, затруднен. Многие задачи решаются просто, если считать, что модуляция производится одним тоном. Принимая это упрощение, УМ сигналы будем представлять выражением

$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t) \quad (5.5)$$

где  $\Omega$  - частота модулирующего колебания;

$m$  - индекс модуляции.

**Частотная модуляция.** Модуляция называется *частотной* (ЧМ), если девиация (отклонение) частоты  $\Delta\omega$  от среднего значения  $\omega_0$  пропорциональна  $U_\Omega$  и не зависит от частоты  $\Omega$ , т. е. если индекс модуляции  $m$  пропорционален  $U_\Omega$  и обратно пропорционален  $\Omega$ . Таким образом для ЧМ:

$$m = \kappa U_\Omega / \Omega = \Delta\omega / \Omega, \quad (5.6)$$

где  $\kappa$  - коэффициент пропорциональности.

Мгновенное значение частоты для ЧМ найдем как производную фазы по времени:

$$\omega = d\varphi/dt = d[\omega_0 t + \Delta\omega \sin\Omega t / \Omega] / dt = \omega_0 + \Delta\omega \cos\Omega t, \quad (5.7)$$

Из этих выражений видно, что при неизменной амплитуде модулирующего сигнала девиация частоты при ЧМ неизменна (рис.5.9).

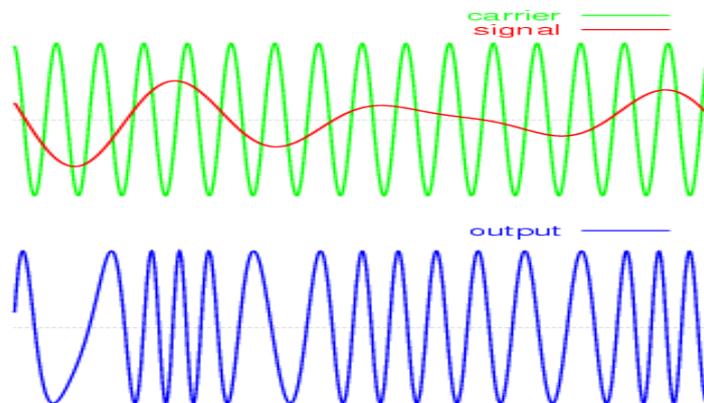


Рис.5.9. Формирование ЧМ сигнала

**Фазовая модуляция (ФМ, *phase modulation - PM*).** При фазовой модуляции значение фазового угла постоянной несущей частоты колебаний  $\omega_o$  пропорционально амплитуде модулирующего сигнала  $s(t)$ . Соответственно, уравнение ФМ – сигнала определяется выражением:

$$u(t) = U_m \cos[\omega_o t + k \times s(t)] , \quad (5.8)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Пример однотонального ФМ – сигнала приведен на рис.5.10.

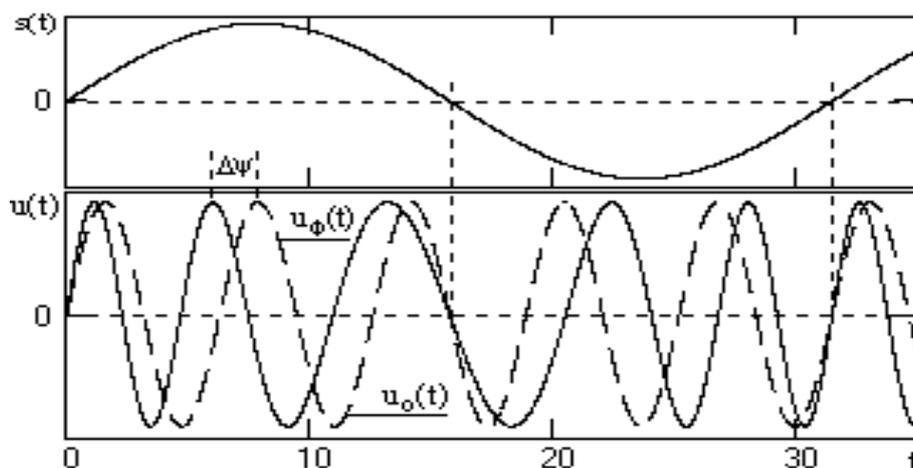


Рис.5.10. Формирование ФМ сигнала

**Частотные и фазовые модуляторы.** В настоящее время широко применяются частотные и фазовые модуляторы на основе варикапа. Варикап является диодом, который изменяет свою ёмкость в зависимости приложенного на него напряжения.

Типичная вольт-фарадная характеристика варикапа приведена на рис.5.11.

При отсутствии внешнего приложенного к электродам напряжения в  $p$ - $n$ -переходе существуют потенциальный барьер и внутреннее электрическое

поле, возникновение которого обусловлено контактной разностью потенциалов между полупроводниками  $p$ -типа и  $n$ -типа.

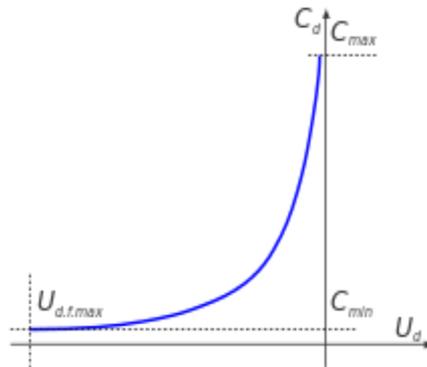


Рис. 5.11. Типичная вольт-фарадная характеристика варикапа

Нормальный режим работы варикапа - с обратным смещением. Если к диоду приложить обратное напряжение (то есть катод должен иметь положительный потенциал относительно анода), то высота этого потенциального барьера увеличится.

Внешнее обратное напряжение отталкивает электроны в глубь  $n$ -области, в результате чего происходит расширение обеднённой области  $p$ - $n$ -перехода, то есть слой полупроводника, лишенный носителей заряда и по сути являющийся диэлектриком. При увеличении обратного напряжения толщина обеднённого слоя увеличивается. Это можно представить в виде плоского конденсатора, в котором обкладками служат обеднённые зоны полупроводника и с переменной толщиной слоя диэлектрика.

В соответствии с формулой для ёмкости плоского конденсатора, с ростом расстояния между обкладками (вызванной ростом значения обратного напряжения) ёмкость  $p$ - $n$ -перехода будет уменьшаться. Это уменьшение ограничено толщиной базы, далее которой толщина обеднённого слоя увеличиваться не может, по достижении этого минимума ёмкости с ростом обратного напряжения ёмкость не изменяется. Другой

ограничивающий фактор управляемого снижения ёмкости - электрический лавинный пробой обеднённого слоя.

Принципиальная схема одного из вариантов модулятора на варикапе, обеспечивающего частотную модуляцию сигнала  $LC$ -генератора, выполненного по схеме емкостной трехточки на биполярном транзисторе  $p-n-p$ -проводимости, приведена на рис.5.12.

В рассматриваемой схеме активный элемент  $LC$ -генератора выполнен на транзисторе  $VT1$ . Этот транзистор по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером, а по переменному току – по схеме с общей базой, поскольку электрод базы подключен к шине корпуса через конденсатор  $C2$ . Положение рабочей точки транзистора  $VT1$  определяется величинами и соотношением сопротивлений делителя, в состав которого входят резисторы  $R3$  и  $R4$ . Эти же резисторы совместно с резистором  $R5$  образуют схему стабилизации положения рабочей точки.

Варикап  $VD1$  подключен параллельно катушке индуктивности  $L1$  и подстроечному конденсатору  $C5$ , которые входят в состав резонансного контура. Напряжение смещения подается на варикап через резисторы  $R1$  и  $R2$ . Конденсатор  $C1$  большой емкости обеспечивает развязку варикапа  $VD1$  и коллектора транзистора  $VT1$  по постоянному току. Модулирующий НЧ-сигнал подается на варикап через резистор  $R2$ . Модулированный сигнал снимается с эмиттера транзистора  $VT1$ .

При использовании в качестве источника НЧ-сигнала электретного микрофона величина сопротивления резистора  $R1$  выбирается такой, чтобы напряжение питания, подаваемое на микрофон, соответствовало его паспортным данным. После этого подбирается величина сопротивления резистора  $R2$  таким образом, чтобы падение напряжения на варикапе  $VD1$

было равно выбранному напряжению смещения, обеспечивающему работу в так называемом режиме молчания. При этом параллельно микрофону рекомендуется подключить шунтирующий конденсатор емкостью около 1000 пФ.

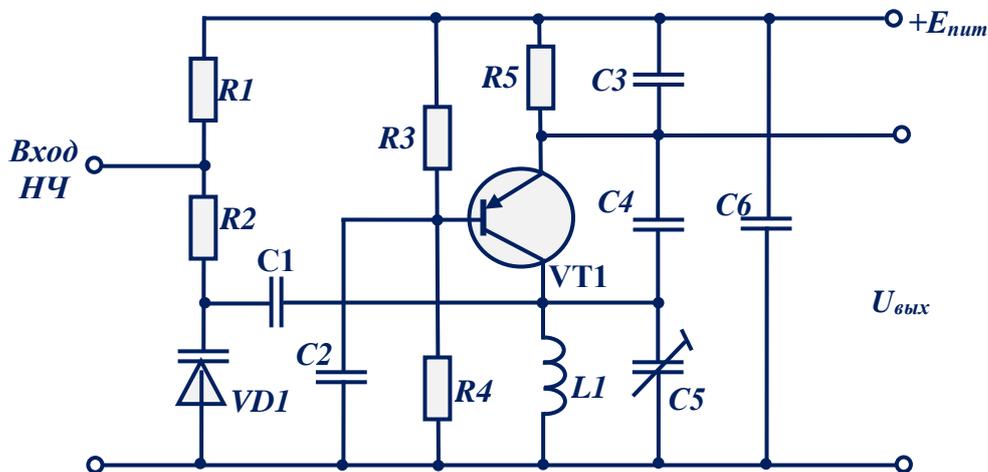


Рис. 5.12. Принципиальная схема модулятора на варикапе для  $LC$ -генератора, выполненного по схеме емкостной трехточки на биполярном транзисторе  $p$ - $n$ - $p$ -проводимости

Если же на варикап  $VD1$  предполагается подавать модулирующий сигнал, снимаемый с выхода микрофонного усилителя, то резистор  $R1$  одновременно может использоваться в качестве коллекторной нагрузки транзистора усилительного каскада. При этом величина его сопротивления определяется выбранным режимом работы этого транзистора.

Следующим каскадом в нашем передатчике является фазовый модулятор, в котором ФМ осуществляется в контурах усилительного каскада путём управления его расстройкой с помощью модулирующего сигнала. В качестве управляемого реактивного элемента здесь используется варикап. Для увеличения индекса модуляции варикапы подключены ко всем контурам усилителя. Изменение резонансной частоты контура усилителя изменяет

фазу высокочастотных колебаний в контуре в соответствии с его фазовой характеристикой. Схема имеет вид на рис.5.13.

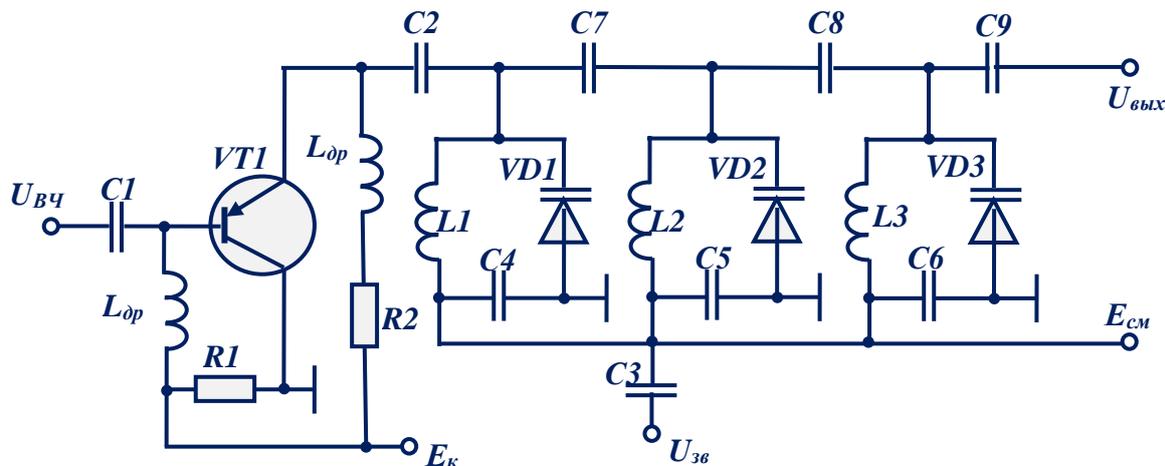


Рис. 5.13. Схема фазового модулятора

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит сущность процесса модуляции?
2. Чем отличается немодулированный сигнал от модулированного?
3. Перечислите основные виды модуляции.
4. Объясните принцип амплитудной модуляции?
5. Объясните принцип работы схемы транзисторного передатчика?
6. Объясните структурную схему однополосной модуляции?
7. Как осуществляется частотная модуляция?
8. Как осуществляется фазовая модуляция?
9. Применение конденсаторов и варикапов в частотной модуляции.
10. Объясните принцип работы схемы частотного модулятора на варикапе.

## **6. ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ МОДУЛЯЦИИ В ТЕЛЕВИДЕНИИ И РАДИОВЕЩАНИИ**

### **6.1. Методы цифровой модуляции**

В технике цифровой связи методы модуляции играют весьма значительную роль.

Помимо своей основной функции преобразования символ сигнал процесс модуляции является составной частью общего процесса согласования сигнала с характеристиками канала. Современные методы многопозиционной модуляции в полном соответствии с теоремой Шеннона могут рассматриваться и как способ кодирования данных сообщений в символы канала. Специфика выбора тех или иных методов модуляции в системах цифрового телевидения обусловлена заданностью сетки каналов эфирного вещания, т.е. использованием уже существующих частотных планов. В разных странах доступными являются радиоканалы с полосами частот 6, 7 или 8 МГц. Цифровой поток различных служб, который должен передаваться в этих полосах в нормальных условиях составляет в разных системах вещания около 20 Мбит/с и выше.

Как и в аналоговых видах модуляции, при цифровой модуляции изменяемыми параметрами могут быть амплитуда, частота и фаза гармонического колебания. Ключевым отличием цифровых методов модуляции от аналоговых является дискретное изменение этих параметров по заданному правилу в соответствии с передаваемым дискретным информационным сообщением. Из-за дискретности изменения параметров сигнала цифровую модуляцию часто называют манипуляцией.

В общем виде процесс обмена информацией в цифровых сетях выглядит следующим образом. Звуковая информация (голос) преобразуется в цифровой формат модулируется высокочастотным сигналом и передается в эфир по традиционным физическим законам. На приемной стороне происходит обратная процедура восстановления цифрового сигнала в первоначальный аналоговый вид (рис.6.1). Если исходная информация изначально цифровая (терминал данных, компьютер, сеть цифровой связи, Интернет и т.п.), то этап аналого-цифрового преобразования пропускается. Кроме непосредственно кодирования/декодирования сигнал подвергается ряду манипуляций, призванных предотвратить потери информации. Это так называемые процедуры коррекции ошибок.

Процесс оцифровки и кодирования голоса осуществляется специальным устройством – вокодером. Именно от него зависит алгоритм кодирования. Разные системы цифровой связи используют различные алгоритмы и соответственно строятся на разных вокодерах.

Процесс аналогово-цифрового преобразования включает процедуру квантования – дискретизация непрерывной величины по времени, уровню или по обоим параметрам одновременно и кодирование (рис.6.1). При квантовании непрерывная величина преобразуется в последовательность ее мгновенных значений, выделенных по определенному закону и в совокупности отображающих исходную величину. При кодировании выделенные в процессе квантования мгновенные значения исходной величины измеряются и результаты фиксируются в виде цифрового, в данном случае двоичного, кода. При попадании в приемник цифровой сигнал декодируется и, с помощью процедуры цифро-аналогового преобразования, восстанавливается исходный аналоговый сигнал.

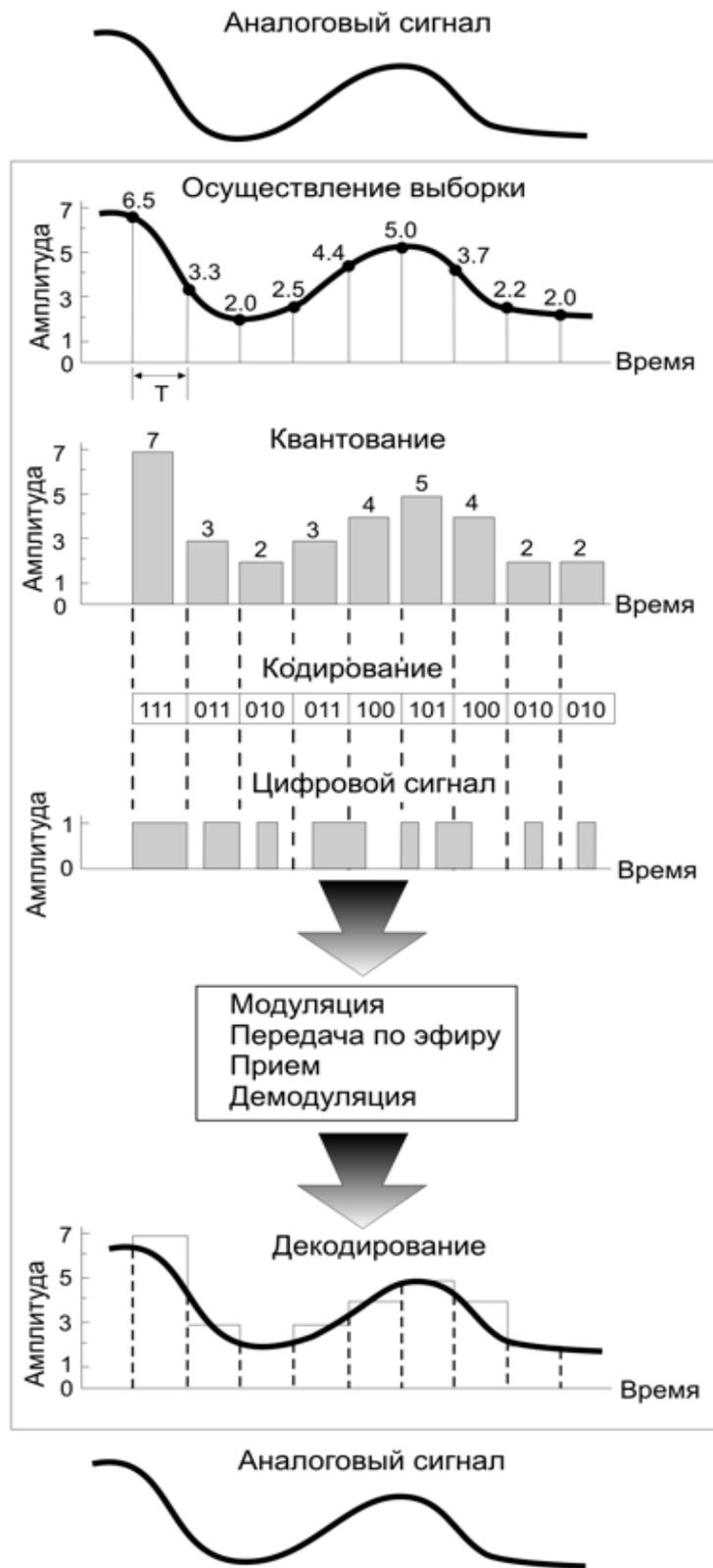


Рис.6.1. Принцип преобразования и передачи аналоговых сигналов в цифровых системах связи

Для передачи цифрового сигнала по радиоканалу необходимо преобразовать его в высокочастотный вид. Для этого, как и в аналоговых системах связи, служит процедура модуляции или, применительно к цифровым преобразованиям, манипуляция. Цифровой сигнал, представляющий поток двоичных символов 0 и 1 накладывается на несущую – аналоговый высокочастотный сигнал постоянной амплитуды и частоты и затем уже передается по эфиру. Наиболее часто применяют три метода манипуляции (рис.6.2.).

При *амплитудной манипуляции (ASK amplitude-shift keying)*, модулируемая волна изменяет амплитуду сигнала (например, с высокого уровня на низкий) в соответствии с двоичной информацией. При *частотной манипуляции (FSK frequency-shift keying)*, поток битов представлен изменениями между двумя частотами. При *фазовой манипуляции (PSK phase-shift keying)*, амплитуда и частота остается постоянной, а поток битов представлен изменениями фазы модулированного сигнала.

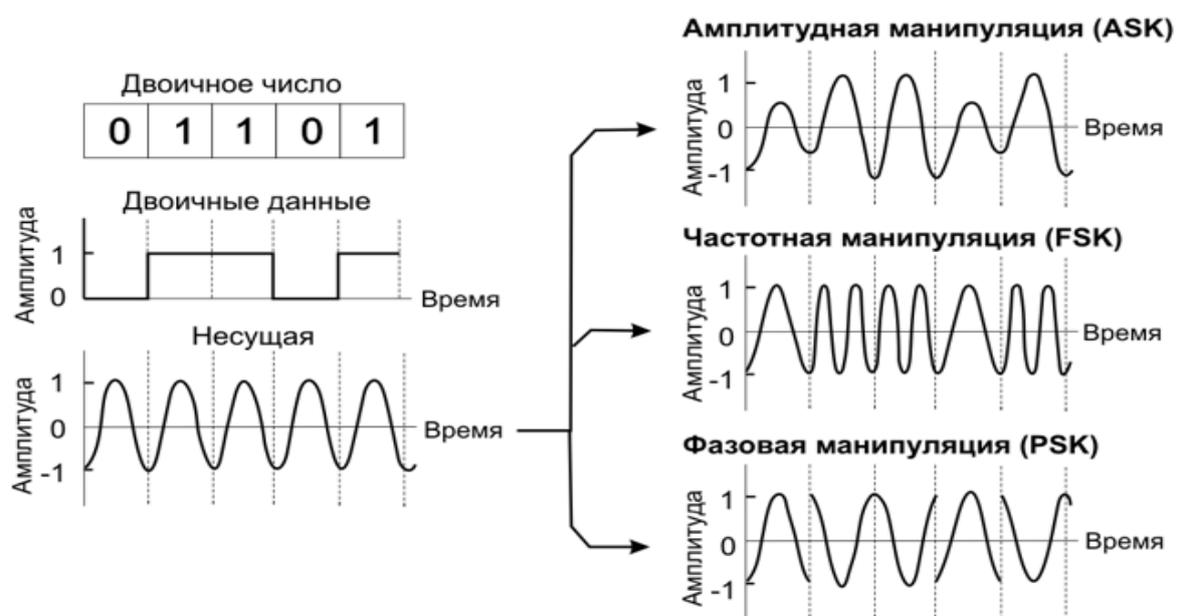


Рис.6.2. Три метода манипуляции цифрового сигнала

Фундаментальным отличием аналоговых систем связи от цифровых является только метод подготовки и кодирования исходной информации. Высокочастотная же часть радиостанций, отвечающая за прием и передачу радиоволн, остается практически идентичной во всех видах радиосвязи. Причем ситуация не меняется уже свыше 100 лет со времен демонстрации первой системы связи в 1895 году. При всех достижениях технологии, фундаментальным физическим законам альтернативы пока нет.

## 6.2. Амплитудная манипуляция (АМн)

Одним из самых простейших видов манипуляции сигнала является амплитудная манипуляция (АМн), на рис.6.3 приведен пример четырехпозиционной амплитудной манипуляции.

При АМн модулированный сигнал имеет вид:

$$M(t) = D(t) \cdot A_0 \sin 2\pi f_0 t + \varphi_0 \quad (6.1)$$

где  $M(t)$  – модулированный сигнал;

$D(t)$  – данные для передачи;

$A_0$  – амплитуда несущего колебания;

$f_0$  – частота несущего колебания;

$\varphi_0$  – начальная фаза несущего колебания.

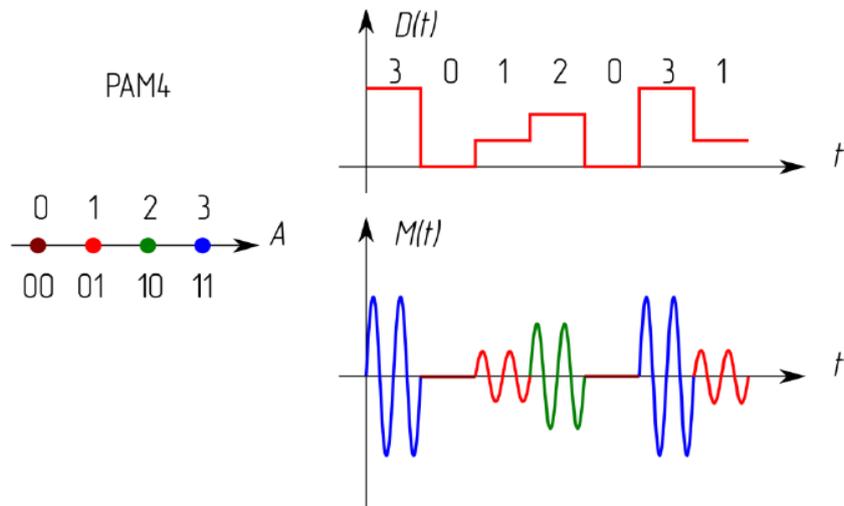


Рис.6.3.Четырехпозиционная амплитудная манипуляция

### 6.3. Частотная манипуляция (ЧМн)

Другой разновидностью цифровой манипуляции является частотная манипуляция (ЧМн). В этом случае изменяемым параметром является частота гармонического колебания (рис.6.4).

При ЧМн модулированный сигнал имеет следующий вид:

$$M(t) = A_0 \sin 2\pi f_0 + 2\pi f_d D(t) + \varphi_0 \quad (6.2)$$

где  $M(t)$  – модулированный сигнал;

$A_0$  – амплитуда несущего колебания;

$D(t)$  – данные для передачи;

$f_0$  – частота несущего колебания;

$\varphi_0$  – начальная фаза несущего колебания;

$f_d$  – девиация частоты.

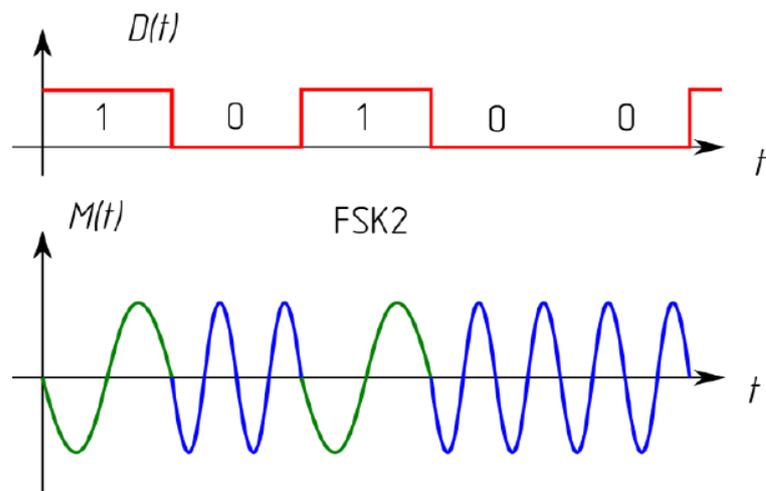


Рис.6.4. Двоичная частотная манипуляция

#### 6.4. Фазовая манипуляция (ФМн)

При *фазовой манипуляции* (ФМн) изменяемым параметром является фаза гармонического колебания (рис.6.5). При двоичной фазовой манипуляции модулированный сигнал имеет вид:

$$M(t) = A_0 \sin 2\pi f_0 t + \varphi_0, \quad \text{при } D(t) = 0 \quad (6.3)$$

$$M(t) = A_0 \sin 2\pi f_0 t + \varphi_0 + \pi, \quad \text{при } D(t) = 1 \quad (6.4)$$

где  $M(t)$  – модулированный сигнал;

$A_0$  – амплитуда несущего колебания;

$D(t)$  – данные для передачи;

$f_0$  – частота несущего колебания;

$\varphi_0$  – начальная фаза несущего колебания.

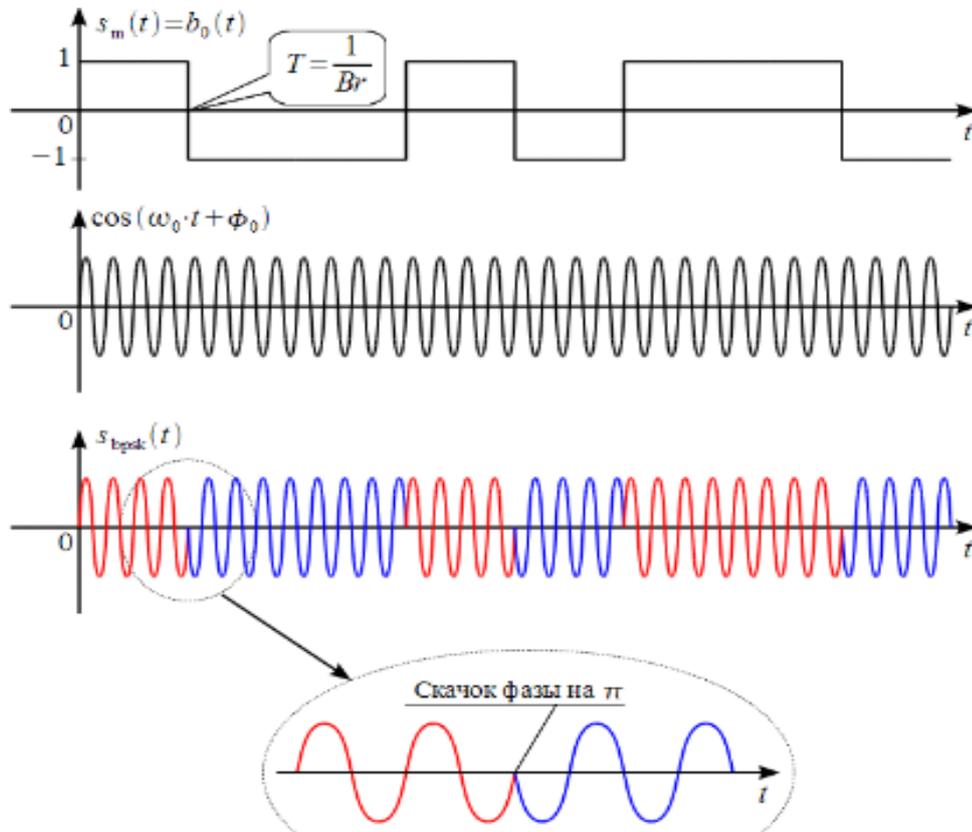


Рис.6.5. Двоичная фазовая манипуляция

## 6.5. Квадратурная амплитудная манипуляция (QAM)

Для разных видов манипуляции существуют методы, позволяющие передавать не только 0 и 1 в рамках одного сигнала, такие методы получили название многопозиционные. Суть этих методов в том, что один элемент линейного сигнала несет информацию о большем числе битов, чем в обычных двухпозиционных методах. Работает это очень просто. Например, в многопозиционной амплитудной манипуляции зададим не 2 амплитуды, которые будут кодировать 0 или 1, а 4, которые будут соответствовать 00, 01, 10, 11 по мере увеличения амплитуды. Для многопозиционной частотной манипуляции используется больше частот, а для многопозиционной фазовой манипуляции, соответственно, больше сдвигов. Да, это действительно

позволяет повысить удельную скорость передачи информации, но при этом начинают возникать ошибки, связанные с погрешностью передачи.

Наибольшее распространение на сегодняшний день получили различные виды *квадратурной амплитудной манипуляции* (КАМ, англ. *QAM*). Доказано, что квадратурная амплитудная манипуляция является наиболее эффективным видом модуляции. В современных системах подвижной связи, начиная с поколения *2.75G (EDGE)*, произошел переход к фазовым видам манипуляции и квадратурным видам амплитудной манипуляции высоких порядков.

Удобным средством анализа характеристик модулированных сигналов является отображение их с помощью квадратурных диаграмм в виде сигнальных созвездий.

Отображение комплексного экспоненциального сигнала на реальную и мнимую ось получили название квадратур *I* и *Q*. Квадратурный сигнал *I* представляет собой проекцию на реальную (косинусоидальную) ось. На рис.6.6 представлен принцип формирования результирующего колебания *Z* путем суммирования вектора квадратурной составляющей *Q* с вектором синфазной составляющей *I*. Амплитуда вектора *Z* определяется соотношением  $A_m$ , а угол, который этот вектор образует с осью абсцисс, определяется соотношением  $\varphi_m$ .

Для данного алгоритма существенно, что при модулировании синфазной и квадратурной составляющей несущего колебания используется одно и то же значение шага изменения амплитуды. Поэтому окончания векторов модулированного колебания образуют прямоугольную сетку на фазовой плоскости действительной -  $Re\{Z\}$  и мнимой -  $Im\{Z\}$  составляющих вектора модулированного сигнала. Число узлов этой сетки определяется

типом используемого алгоритма *QAM*. Схему расположения узлов на фазовой плоскости модулированного *QAM* колебания принято называть созвездием (*constellation*).

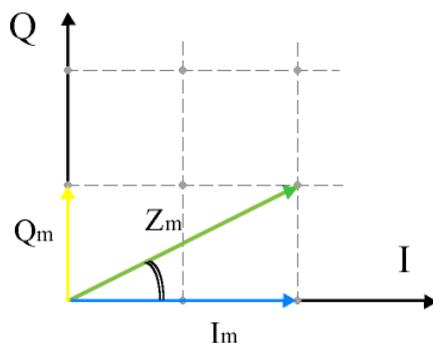


Рис.6.6. Графическое представление квадратурного сигнала в осях *I* и *Q*

Современные модуляторы для цифровых систем передачи строятся, как правило, по квадратурной схеме. В таком модуляторе выходной сигнал образуется суммированием двух различных модулированных сигналов, несущие которых имеют между собой фазовый сдвиг  $90^\circ$ .

Входы двух модулирующих сигналов квадратурного модулятора обозначаются *I* и *Q*:

*I* (синфазный) относится к каналу, в котором начальный фазовый сдвиг несущей принимается равным  $0^\circ$ ,

*Q* — к каналу, несущая в котором сдвинута на  $90^\circ$  (рис. 6.7).

Для упрощения рисунка квадратурной диаграммы, особенно при отображении сигналов современных многопозиционных видов модуляции, обычно изображают только конечные точки векторов, исходящих из начала координат, а сами векторы, как правило, опускают. Часто опускают и сами оси *I* и *Q*, подразумевая, что они проходят через центр симметрии фигуры. Полное множество модулированных сигналов, изображенных на квадратурной диаграмме в виде точек, называют **сигнальным созвездием**, а

сами сигналы — **точками созвездия**. Форма сигнального созвездия соответствует виду модуляции, а расстояния между точками созвездия характеризуют помехоустойчивость при приеме сигнала.

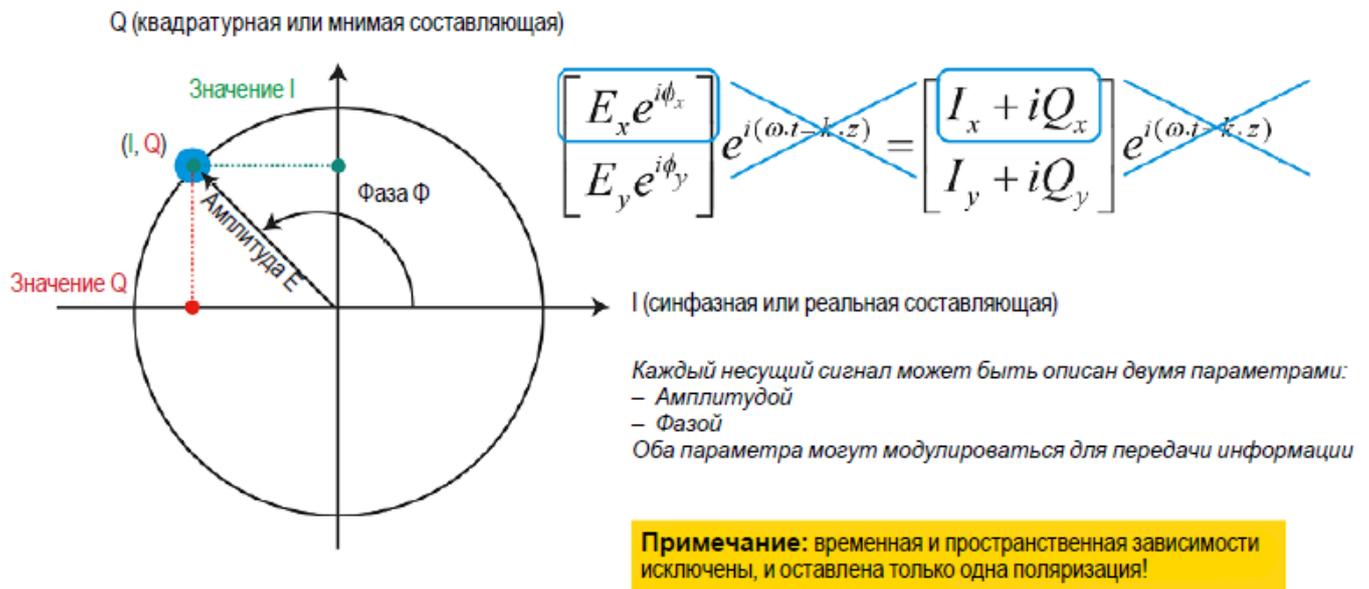


Рис.6.7. Отображение электрического поля модулированного сигнала на комплексной плоскости с помощью  $I/Q$ -диаграммы

Обычная амплитудная манипуляция (АМн) также может быть представлена с помощью диаграммы сигнального созвездия. Поскольку информация содержится только в амплитуде, единичное значение бита может быть в любой точке окружности с радиусом (равным амплитуде)  $E$  (рис. 6.8).

В качестве примера на рис.6.9 показаны несколько простых созвездий: одномерных для амплитудной модуляции (АМ) и двумерных для фазовой модуляции (ФМ), геометрическим местом точек которых являются соответственно прямая и окружность.



противоположную и фазу сигнала. Поэтому такая АМ может рассматриваться и как разновидность ФМ.

Соответствие гармонического сигнала на созвездие приведена на рис.6.10.

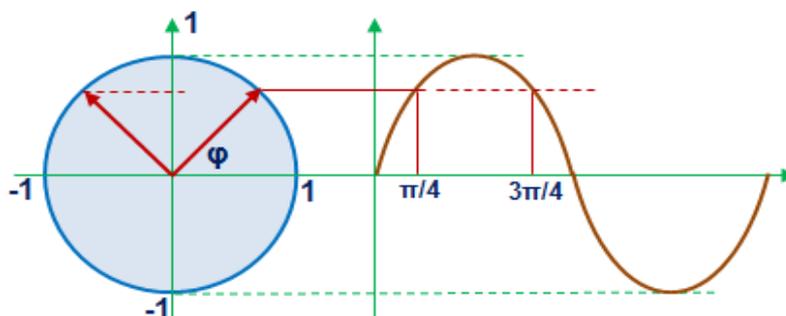


Рис.6.10. Соответствие гармонического сигнала на созвездие

Синусоидальный сигнал можно модулировать полезным низкочастотным сигналом по амплитуде, частоте и фазе. Было разработано огромное количество амплитудных, частотных и фазовых модуляторов, отличающихся друг от друга схемами и качественными характеристиками. Это разнообразие не позволяет сравнивать данные модуляторы между собой, не позволяет улучшать характеристики всех модуляторов одновременно, и что самое важное, трудно реализуется в цифровой форме. Представление сигнала в виде двух квадратурных сигналов позволяет легко реализовать универсальный модулятор, который может быть одновременно и амплитудным и частотным и фазовым модулятором в зависимости от взаимного соотношения низкочастотных квадратурных сигналов  $I$  и  $Q$ .

Схема модулятора, позволяющего получать узкополосный высокочастотный радиосигнал (или сигнал промежуточной частоты) получила название квадратурный модулятор. Структурная схема квадратурного модулятора приведена на рис.6.12.

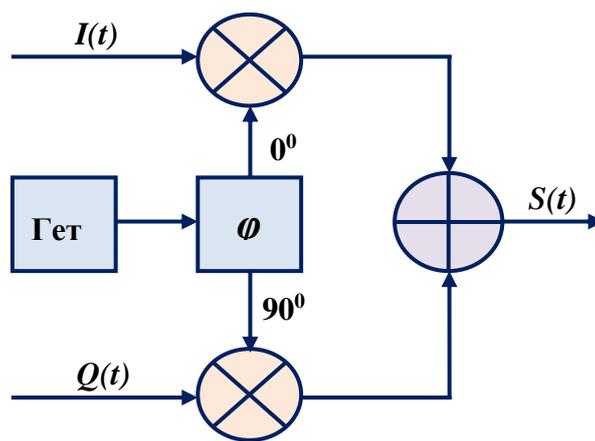


Рис. 6.12. Структурная схема квадратурного модулятора

В данной схеме главным узлом являются аналоговые умножители, которые переносят квадратурный сигнал на высокую частоту. После суммирования результирующего сигнала в аналоговом сумматоре на выходе остается узкополосный высокочастотный процесс, промодулированный по заданному закону.

*QAM* модуляция используется в микроволновой цифровой связи, *DVB-C* (кабельное широкополосное цифровое телевидение) и модемах. В 16 – позиционной *QAM* (*16QAM*) имеются 4 значения *I* и 4 значения *Q* (рис.6.13).

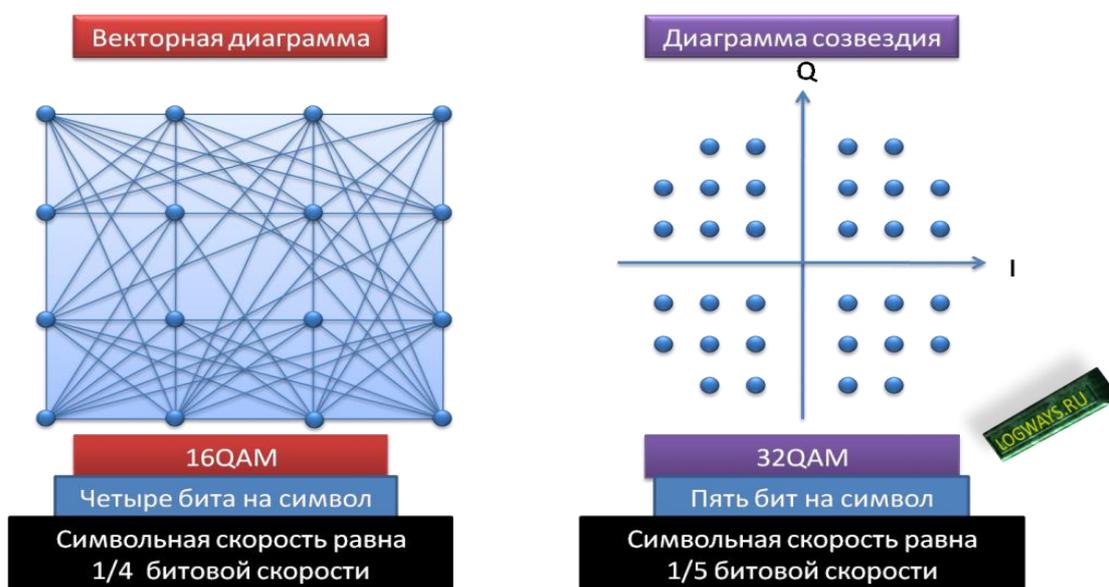


Рис. 6.13. Сравнение *16QAM* и *32QAM*

В результате это дает 16 возможных состояний сигнала. За каждое время символа сигнал может переходить из одного состояния в другое. Поскольку  $16 = 2^4$ , то в одном символе могут быть переданы 4 бита (таблица 6.1). *QAM* имеет 2 бита для *I* компоненты и 2 бита для *Q* компоненты. Этот формат модуляции обладает большей спектральной эффективностью передачи. Он более эффективен в этом плане, чем *BPSK*, *QPSK*, или *8PSK*. Заметим, что *QPSK* – то же самое, что и *4QAM*.

Таблица 6.1

Сравнительны данные различных методов манипуляции

Амплитудная ( <i>ASK - Amplitude Shift Keying</i> )	Частотная ( <i>FSK - Frequency Shift Keying</i> )	Фазовая ( <i>PSK - Phase Shift Keying</i> )	Квадратурно-амплитудная ( <i>QAM - Quadrature Amplitude Modulation</i> )
Изменяется амплитуда колебаний	Изменяется частота импульсов	Изменяется фаза колебаний	Одновременно изменяются амплитуда и фаза
Для передачи “1” используется большая амплитуда, для передачи “0” низкая амплитуда	Для передачи “1” используются колебания высокой частоты, для передачи “0” колебания меньшей частоты	Для передачи “1” используется сдвиг фаз на $90^0$	Для передачи “1” используется большая амплитуда и сдвиг фаз на $90^0$

На рис.6.14 приведена симуляция работы  $16QAM$ , в котором на одном сигнале передаются 4 бита информации (например, при амплитуде 25% и фазе  $225^\circ$ , передаются информация 1100).

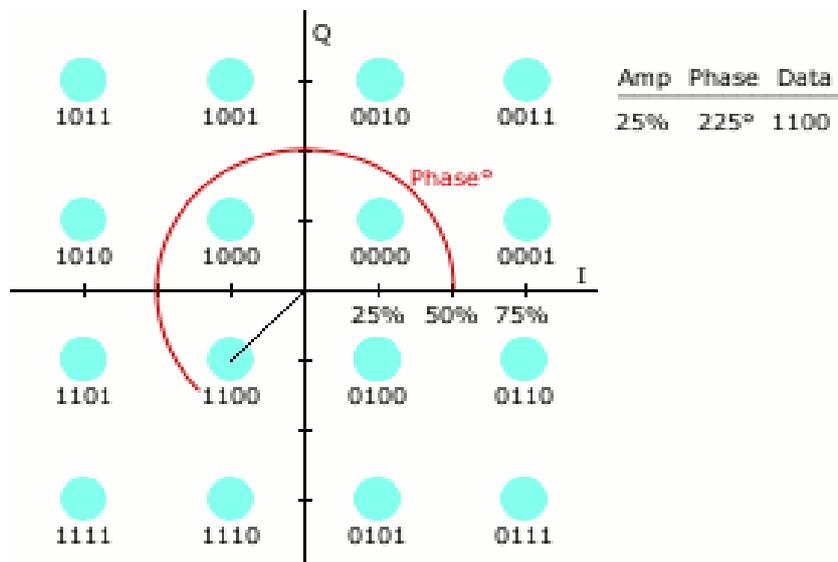


Рис.6.14. Симуляция принципа работы  $16QAM$

Структурная схема модулятора  $16QAM$  показана на рис.6.15. Входной поток данных вначале подвергается необходимой цифровой обработке в процессоре данных: выделению тактовой частоты, скремблированию, дифференциальному кодированию, последовательно параллельному преобразованию.

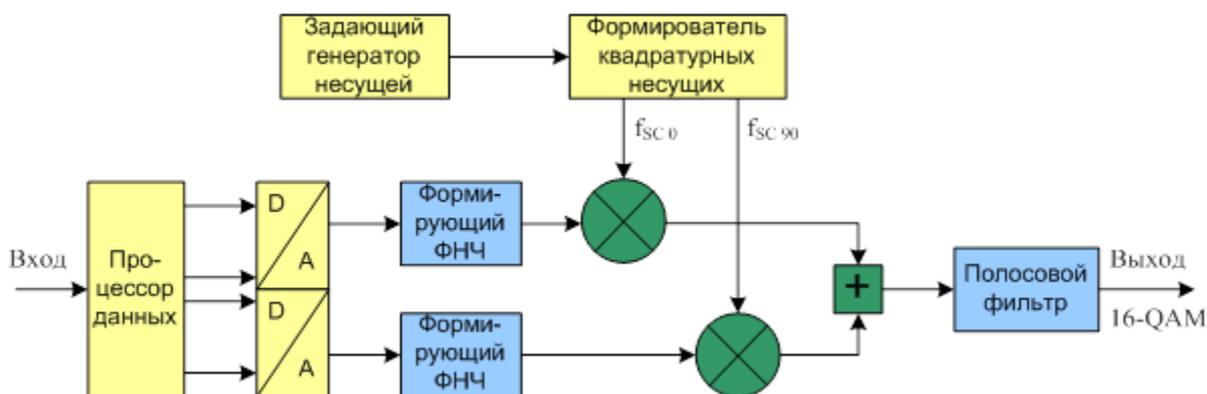


Рис.6.15. Структурная схема  $16QAM$  модулятора

Так как модуляция *16QAM* обеспечивает удельную скорость передачи 4 бит/(с·Гц), то для последующей модуляции поток данных в ходе его цифровой обработки разделяется на 4 подпотока с соответственно сниженными скоростями. Затем производится цифро-аналоговое преобразование двух двоичных подпотоков в один четырехуровневый с одновременным формированием их спектра в ЦТФ, где импульсам придается сглаженная форма.

Четырехуровневые сигналы в каналах *I* и *Q* управляют работой балансных модуляторов, выходные сигналы которых складываются, образуя сигнал *16QAM* с двумя полосами и подавленной несущей. На балансные модуляторы несущая поступает со сдвигом  $\pi/2$ , т.е. в квадратуре.

Выходной сигнал модулятора на промежуточной частоте несущей проходит через полосовой фильтр, ограничивающий внеполосные излучения, и может быть конвертирован в полосу любого вещательного канала.

Квадратурная модуляция применяется для передачи сигналов цветности в телевизионном стандарте *PAL* и *NTSC*, в стереофоническом радиовещании, в системах программно-определяемого радио (ПОР, *SDR*) (рис.6.16).

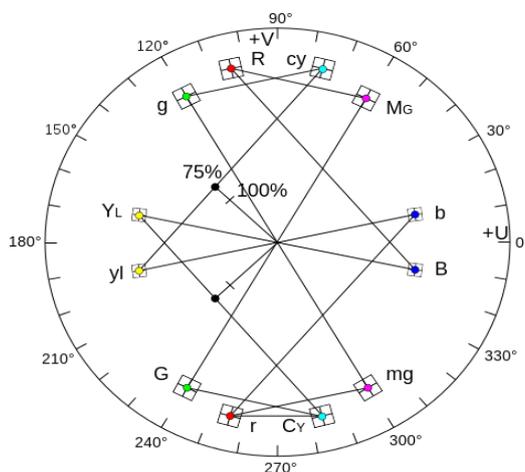


Рис.6.16. Квадратурная модуляция: вид сигнала цветности *PAL* на экране векторного анализатора

## 6.6. Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK)

Существуют *BPSK*, *QPSK*, *8PSK* и другие виды фазовой манипуляции. Их сравнительные характеристики приведены в таблице 6.2. Векторные диаграммы *BPSK*, *QPSK*, *8PSK* сигналов показаны на рис.6.17.

Таблица 6.2

Сравнительные характеристики *BPSK*, *QPSK*, *8PSK*

<i>BPSK</i>	<i>QPSK</i>	<i>8PSK</i>
<i>Binary Phase Shift Keying</i> – является простейшая бинарная фазовая манипуляция и позволяет в одном сигнале кодировать 1 бит информации	Квадратурная фазовая манипуляция (Quadrature Phase Shift Keying) делится на четыре фазы и позволяет в одном сигнале кодировать 2 бита информации	<i>8 Phase Shift Keying</i> манипуляция делится на четыре фазы и позволяет в одном сигнале кодировать 3 бита информации

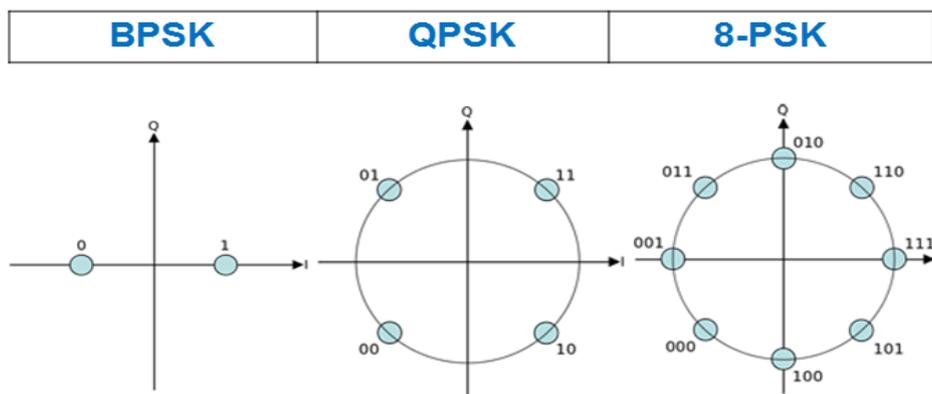


Рис. 6.17. Векторные диаграммы *BPSK*, *QPSK*, *8PSK* сигналов

Один символ *BPSK* кодирует один бит информации, при этом на векторной диаграмме *BPSK* всего две точки на синфазной оси  $I(t)$ , соответствующие нулю и единице передаваемой информации. Квадратурный

канал  $Q(t)$  в случае с  $BPSK$  всегда равен нулю. Точки на векторной диаграмме образуют созвездие фазовой манипуляции.

Для того чтобы осуществить кодирование одним символом двух бит информации, необходимо, чтобы созвездие состояло из четырех точек, как это показано на векторной диаграмме  $QPSK$  рис. 6.17. Тогда мы получим, что и  $I(t)$  и  $Q(t)$  отличны от нуля, все точки созвездия расположены на единичной окружности. Тогда кодирование можно осуществить следующим образом: разбить битовый поток на четные и нечетные биты, тогда  $I(t)$  будет кодировать четные биты, а  $Q(t)$  – нечетные.

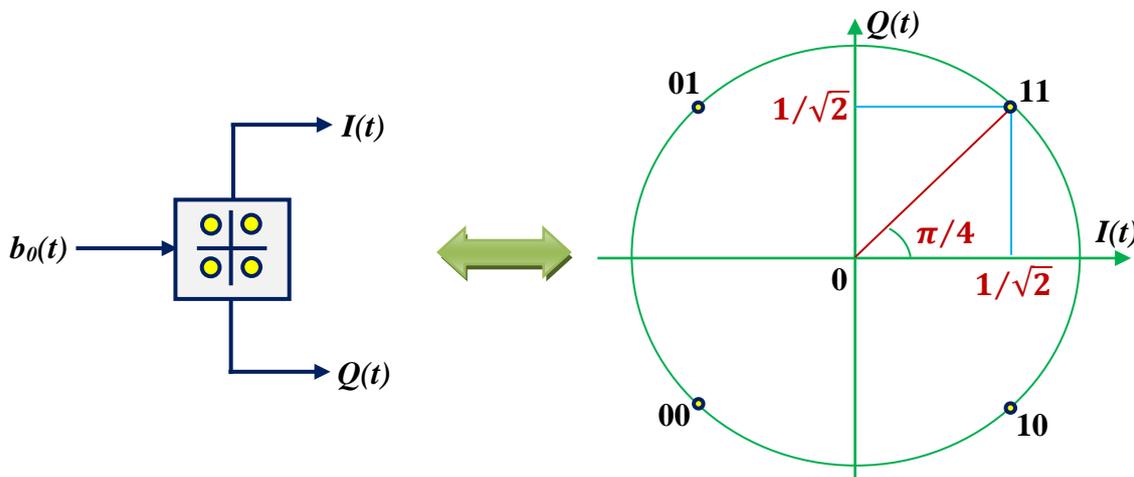


Рис. 6.18. Условное устройство кодирования синфазных и квадратурных составляющих и векторная диаграмма  $QPSK$ -сигнала

Два последовательно идущих друг за другом бита информации кодируются одновременно синфазным  $I(t)$  и квадратурным  $Q(t)$  сигналами. Это наглядно показано на осциллограммах, приведенных на рис. 6.20 для информационного потока «1100101101100001».

На верхнем графике входной поток разделен на пары бит, соответствующих одной точке созвездия  $QPSK$ , показанного на рис. 6.17. На втором графике показана осциллограмма  $I(t)$ , соответствующая передаваемой

информации.  $I(t) > 0$ , если четный бит равен 1 (обратите внимание что биты нумеруются с нуля, а не с единицы, поэтому первый в очереди бит имеет номер 0, а значит он четный по порядку), и  $I(t) < 0$  если четный бит 0 (т.е.  $b(t) < 0$ ). Аналогично строится квадратурный канал  $Q(t)$  но только по нечетным битам. Длительность одного символа  $T = 1/Sr$  в два раза больше длительности одного бита исходной информации.

**Информация «1100101101100001»**

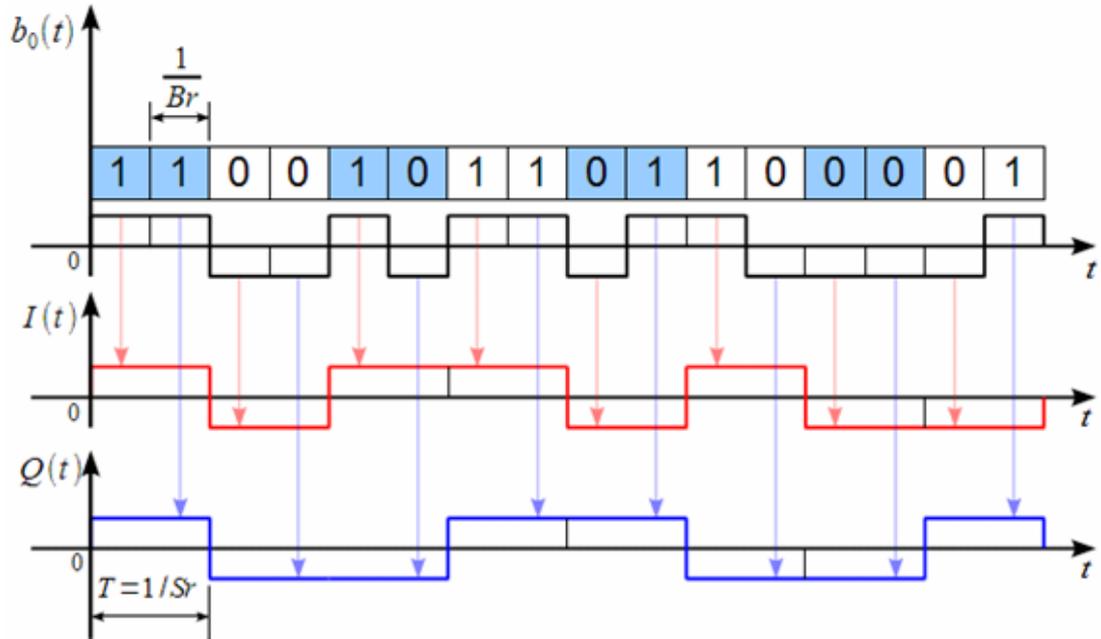


Рис. 6.20. Формирование синфазных и квадратурных составляющих QPSK-сигнала

Устройство выполняющее такое кодирование  $I(t)$  и  $Q(t)$  согласно созвездию QPSK условно показано на рис. 6.18.

На рис. 6.21 показана структурная схема устройства кодирования синфазных и квадратурных составляющих QPSK-сигнала.

В зависимости от пары бит  $b(t)$  на входе на выходе получаем постоянные в пределах длительности этой пары бит сигналы  $I(t)$  и  $Q(t)$ ,

значение которых зависит от передаваемой информации. Пример получения кодированного сигнала приведен на рис. 6.22.

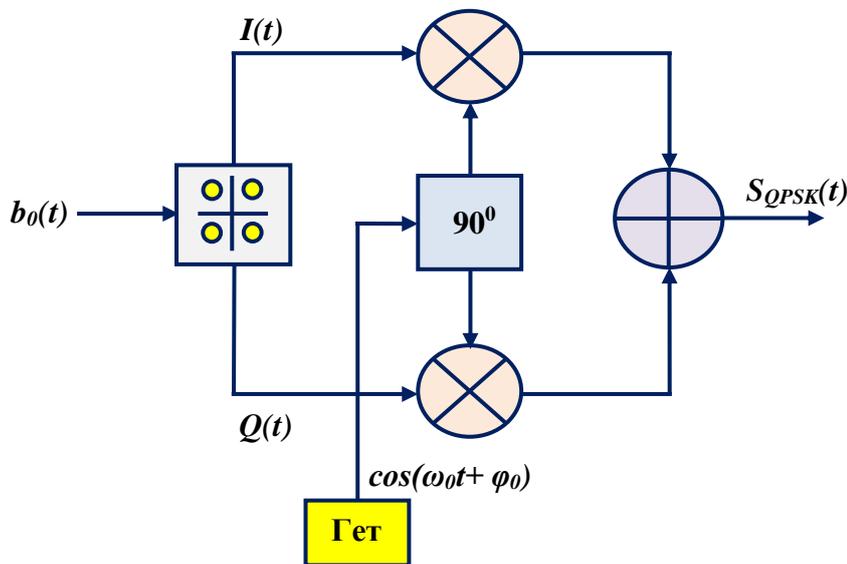


Рис. 6.21. Структурная схема устройства кодирования синфазных и квадратурных составляющих  $QPSK$ -сигнала



Рис. 6.22. Пример получения кодированного сигнала

Остановимся на условии ортогональности (рис.6.23).



Рис. 6.22. Выполнение условия ортогональности

Вид фазовой огибающей  $\Phi(t)$  для информационного потока «1100101101100001» показан на рис.6.24.

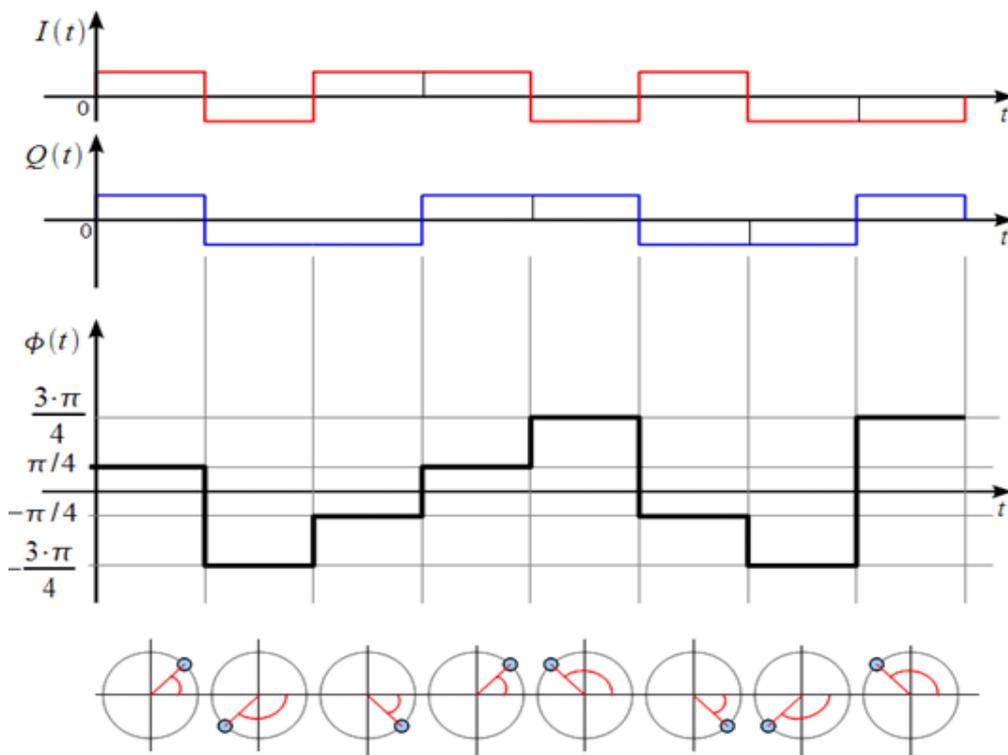


Рис. 24. Фазовая огибающая QPSK сигнала

Фазовая огибающая представляет собой ступенчатую функцию времени, претерпевающую разрывы в моменты смены символа *QPSK* (напомним, что

один символ *QPSK* несет два бита информации). При этом в пределах одного символа векторная диаграмма *QPSK* находится всегда в одной точке созвездия, как это показано внизу, а при смене символа – скачкообразно переходит в точку соответствующую следующему символу. Поскольку у *QPSK* всего четыре точки в созвездии, то фазовая огибающая может принимать всего четыре значения:  $\pm\pi/4$  и  $\pm3\pi/4$ .

Амплитудная огибающая *QPSK* сигнала  $\phi(t)$  также может быть получена из комплексной огибающей  $z(t)$ :

$$\phi(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}$$

Отметим, что амплитудная огибающая *QPSK* сигнала равна единице всюду, за исключением моментов смены передаваемых символов, т.е. в моменты перескока фазы и перехода очередной точки созвездия.

На рис.6.25 приведены векторные диаграммы видов манипуляции используемых в системах *DVB-S2*.

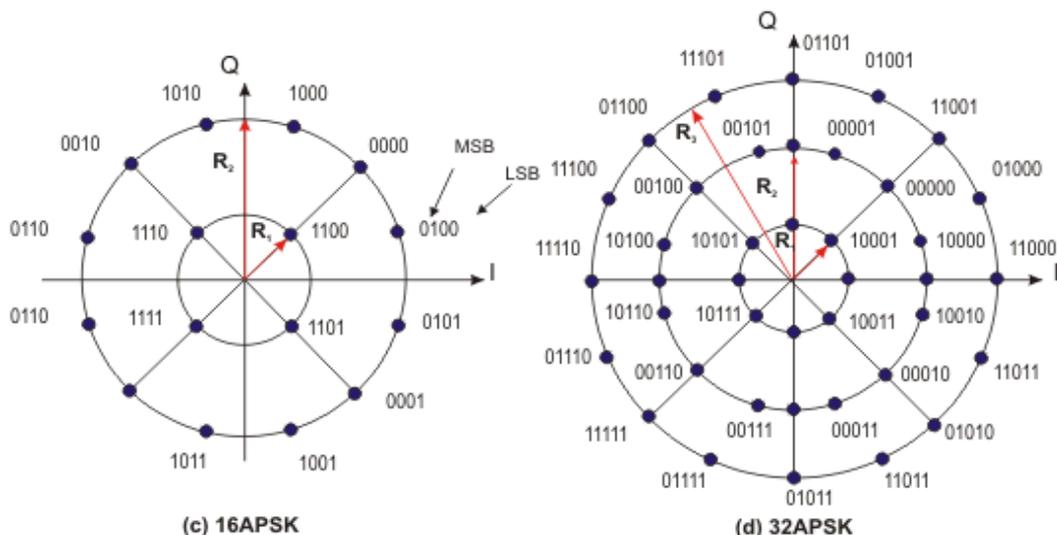


Рис.6.25. Векторные диаграммы видов манипуляции используемых в системах *DVB-S2*

## Контрольные вопросы

1. В чём заключается процесс манипуляции?
2. Объясните процесс преобразования исходного сигнала в цифровой сигнал?
3. Объясните различие трёх методов видов манипуляции?
4. Как осуществляется амплитудная манипуляция?
5. Как осуществляется частотная манипуляция?
6. Как осуществляется фазовая манипуляция?
7. Как осуществляется квадратурная амплитудная манипуляция?
8. Как осуществляется квадратурная фазовая манипуляция?
9. Как осуществляется получение кодированного сигнала?
10. Как осуществляется формирование синфазных и квадратурных составляющих *QPSK*-сигнала?

## 7. ПЕРЕДАТЧИКИ АНАЛОГОВОГО И ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

### 7.1. Требования к вещательным системам цветного телевидения

Основная задача телевидения состоит в том, чтобы зритель увидел изображение объекта таким, каким он воспринимался бы им в натуре, т. е. цветным и объемным. Цветное телевидение (ЦТВ) является еще одним шагом на пути к полному решению этой задачи.

Комплекс технических средств, предназначенных для электрической передачи подвижных и неподвижных цветных изображений, называется системой ЦТВ. В этот комплекс входит вся телевизионная аппаратура – от телевизионной передающей камеры до приемника.

Каковы же требования, которым должна удовлетворять вещательная система ЦТВ? Первое из них таково: полоса частот, занимаемая сигналом ЦТВ ( $\Delta F_{\text{ЦТВ}}$ ) должна равняться полосе частот, занимаемой сигналом черно-белого телевидения ( $\Delta F_{\text{ЧТВ}}$ ), т. е.,

$$\Delta F_{\text{ЦТВ}} = \Delta F_{\text{ЧТВ}} = 8 \text{ МГц}$$

Это условие диктуется необходимостью использовать для передачи сигналов ЦТВ уже существующие телевизионные каналы связи.

В наземном вещании передача изображений и звукового сопровождения осуществляется радиосигналами вещательного телевидения (РСВТ), каждый из которых представляет совокупность радиосигнала изображения (РСИ) и радиосигнала звукового сопровождения (РСЗС).

Радиосигналом изображения называется несущая изображения, модулированная полным видеосигналом  $U_{\Sigma}(t)$  или полным цветным видеосигналом  $U_{ПЦТС}(t)$ , радиосигналом звукового сопровождения – несущая звукового сопровождения, модулированная сигналом звукового сопровождения. При этом во всех странах для передачи видеосигнала используется амплитудная модуляция (АМ) с целью сокращения полосы занимаемых радиосигналом частот и упрощения построения ТВ передатчиков и телевизоров, для передачи звукового сопровождения – частотная модуляция (ЧМ) и только в стандарте  $L$  – АМ (рис.7.1).

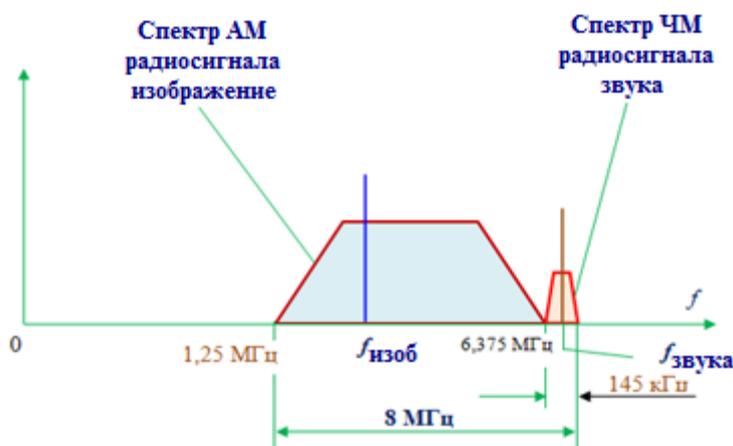


Рис.7.1. Полный телевизионный сигнал

На входе ТВ передатчика производится восстановление постоянной составляющей в видеосигнале, т.е. фиксация уровня гасящих или синхронизирующих импульсов. Это позволяет более эффективно использовать активные элементы (лампы и транзисторы) в каскадах передатчика, так как линейный участок модуляционной (амплитудной) характеристики значительно уменьшается, при этом выигрыш по потребляемой мощности составляет примерно 2,5 раза. На модулятор ТВ передатчика видеосигнал подается в негативной или позитивной (в стандарте  $L$ ) полярности, в результате образуется РСИ с негативной или позитивной

модуляцией. При негативной модуляции уровень синхроимпульса соответствует максимальному, уровень белого – минимальному значениям радиосигнала изображения (рис.7.2).

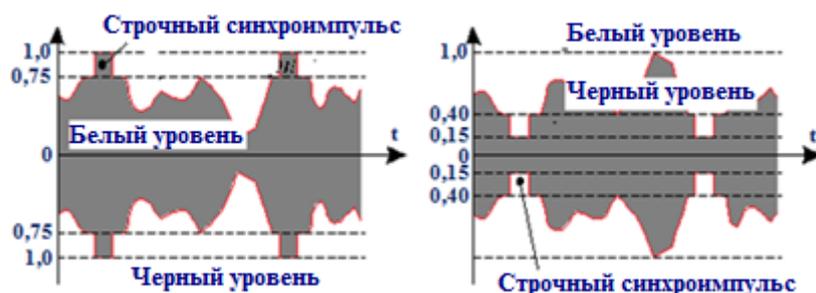


Рис.7.2. РСИ с негативной и позитивной модуляцией

При негативной модуляции максимальная мощность излучения приходится на импульсы синхронизации и уровни чёрного в изображении. Уровень белого передаётся в пределах 15% от максимального уровня излучения.

При позитивной модуляции, наоборот, максимальный уровень излучения приходится на уровень белого в изображении.

В обоих случаях всегда фиксируется значение уровня черного, то есть уровень гасящих импульсов.

Рассмотрим обобщенную структурную схему радиотракта вещательного телевидения (рис. 7.3).

Если на вход амплитудного модулятора  $UB1$  подать сигнал  $U_{ПЦТС}(t)$  с условно равномерным спектром (рис. 7.4, а), на выходе образуются две боковые полосы частот и несущая изображения  $f_{Н.И}$  (рис. 7.4, б). При верхней граничной частоте спектра видеосигнала  $F_B = 6$  МГц ширина полосы частот, которую займет двухполосный АМ сигнал, составит 12 МГц. Но поскольку полная информация о модулирующем сигнале содержится в каждой из боковых полос, то достаточно передавать только одну из них. Поэтому в

передатчике одна боковая полоса (чаще всего нижняя) частично подавляется в фильтре  $Z1$ , на выходе которого образуется радиосигнал изображения  $U_{РСИ}$ .

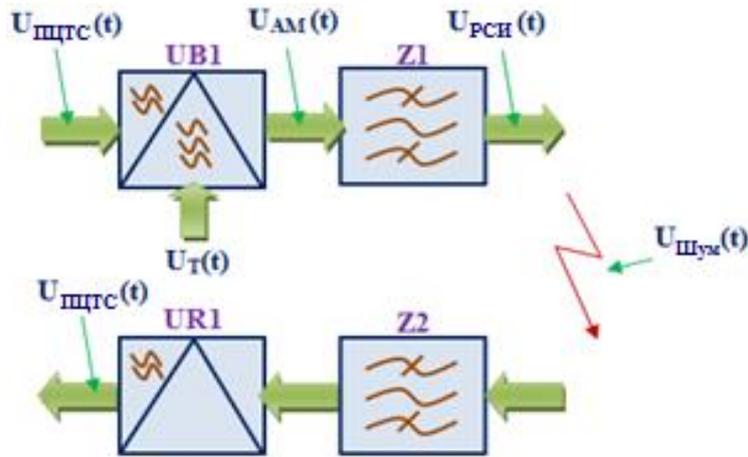


Рис. 7.3. Обобщенная структурная схема телевизионного радиотракта передачи

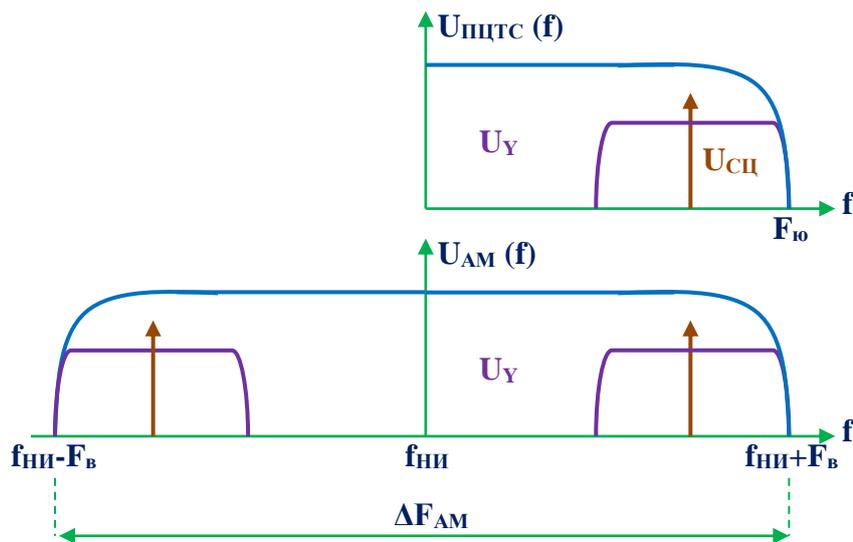


Рис. 7.4. Спектры сигналов на входе и на выходе модулятора ТВ передатчика

Полностью подавить боковую полосу невозможно, так как в видеосигнале нижняя граничная частота  $F_H = 0$ , следовательно, между боковыми полосами отсутствует частотный промежуток для их разделения. При этом идеализированная АЧХ передатчика строится так, что коэффициент передачи фильтра  $Z1$  в области частот  $(f_{ни} + 6) \dots (f_{ни} - 0,75)$  МГц равен 0 дБ, а участок  $(f_{ни} - 0,75) \dots (f_{ни} - 1,25)$  МГц имеет линейно

спадающий склон с подавлением на границе не менее чем на 20 дБ (рис.7.4,а).

## 7.2. Структурная схема цифровой телевизионной системы

Структурная схема цифровой телевизионной системы показана на рис.

7.5.

Источник аналоговых телевизионных сигналов формирует яркостный сигнал  $E^*_Y$  и цветоразностные сигналы  $E^*_{R-Y}$ ,  $E^*_{B-Y}$ , которые поступают на АЦП. где преобразуются в цифровую форму. В следующей части системы, называемой кодером изображения или кодером видео, осуществляется эффективное кодирование видеоинформации с целью уменьшения скорости передачи двоичных символов в канале связи. Как будет показано далее, эта операция является одной из наиболее важных, так как без эффективного кодирования невозможно обеспечить передачу сигналов цифрового телевидения по стандартным каналам связи.

Сигналы звукового сопровождения также преобразуется в цифровую форму. Звуковая информация сжимается в кодере звука. Кодированные данные изображения и звука, а также различная дополнительная информация объединяются в мультиплексоре в единый поток данных. В кодере канала выполняется ещё одно кодирование передаваемых данных, имеющие целью повышение помехоустойчивости. Полученным в результате цифровым сигналом модулируют несущую частоту используемого канала связи.

В приёмной части системы осуществляется демодуляция принятого высокочастотного сигнала и декодирование канального кодирования. Затем

в демультимплексоре поток данных разделяется на данные изображения, звука и дополнительную информацию. После этого выполняется декодирование данных. В результате на выходе декодера изображения получают яркостный и цветоразностные сигналы в цифровой форме, которые преобразуются в аналоговую форму в ЦАП и подаются на монитор, на экране которого воспроизводится изображение. На выходе декодера звука получают сигналы звукового сопровождения, также преобразуемые в аналоговую форму. Эти сигналы поступают на усилители звуковой частоты и далее на динамики.

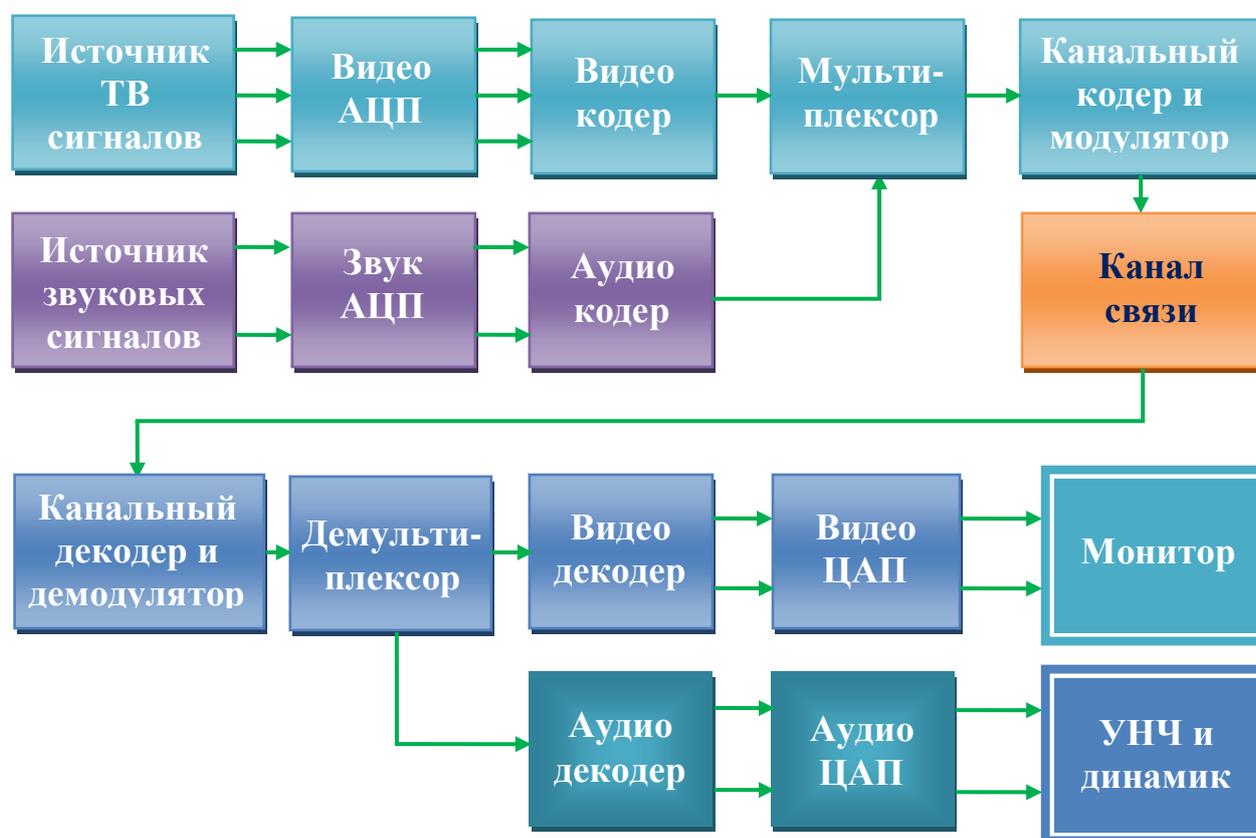


Рис. 7.5. Структурная схема цифровой телевизионной системы

Структурная схема передающей части цифровой телевизионной системы показана на рис. 7.6.

Цифровая информация при передаче с целью повышения помехоустойчивости системы связи и обеспечения вероятности битовой ошибки при приёме в заданных пределах подаётся на каналный кодер. На выходе цифрового модулятора формируется комплексный поток сигнала и подаётся на фильтр, ограничивающий выходной спектр сигнала.

Двойной ЦАП преобразует дискретизированный по времени сигнал в аналоговый сигнал. Аналоговый квадратурный модулятор переносит спектр сигнала на заданную несущую или промежуточную частоту. Далее сигнал усиливается и передаётся на антенно-фидерное устройство (АФУ).



Рис. 7.6. Структурная схема передающей части цифровой телевизионной системы

Структурная схема передатчика с аналоговой квадратурной обработкой сигнала приведена на рис. 7.7.

Достоинством такого подхода является относительно низкие частоты тактирования квадратурных ЦАП, поскольку преобразование осуществляется на нулевой промежуточной частоте. Как правило, частота тактирования ЦАП выбирается в диапазоне от 2 до 8 отсчетов на символ.



Рис. 7.7. Структурная схема передатчика с аналоговой квадратурной обработкой сигнала

Недостатком данной схемы является аналоговая квадратурная обработка сигнала, которая принципиально не позволяет создать смесители с одинаковыми характеристиками, строгую разность фаз выходов квадратурного гетеродина, фильтры низких частот с одинаковыми АЧХ и т. д. Эти недостатки приводят к искажению формы передаваемого созвездия, которое необходимо компенсировать на передающей стороне при помощи введения обратной связи, либо на приемной стороне, при помощи адаптивных эквалайзеров.

Структурная схема передающей части цифровой системы связи с цифровой квадратурной обработкой сигнала приведена на рис. 7.8.

Достоинством второго подхода является полное избавление от проблем аналоговой квадратурной обработки сигнала, так как цифровая обработка сигналов позволяет создать квадратурный гетеродин с идеальной разностью фаз и одинаковой амплитудой выходных сигналов, а операции перемножения и фильтрации в цифровом виде выполняются абсолютно идентично для квадратурных каналов. Платой за преимущества является требование к высокой частоте работы ЦАП.

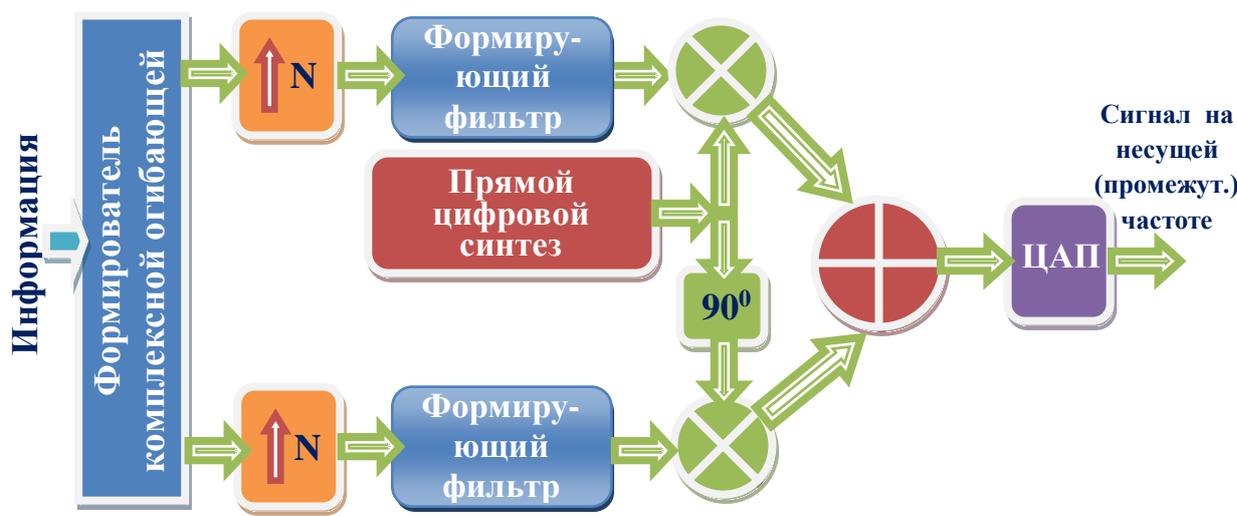


Рис. 7.8. Структурная схема передающей части цифровой системы связи с цифровой квадратурной обработкой сигнала

В некоторых случаях реализации сверхширокополосных систем связи может возникнуть ситуация, когда спектр сигнала не помещается в первой зоне Найквиста даже самых современных ЦАП, и данный подход неприемлем.

### 7.3. Обобщенная структурная схема оптической системы передачи ТВ сигналов

Обобщенная структурная схема оптической системы передачи ТВ сигналов приведена на рис. 7.9.

Групповой электрический ТВ-сигнал подается через коаксиальный кабель на вход ОП. После усиления в линейном усилителе (ЛУ) через направленный ответвитель (НО) сигнал подается в корректор нелинейных искажений (КНИ). Здесь в сигнал вносятся искажения, форма которых вырабатывается в блоке управления (БУ), представляющем собой микропроцессорную систему.

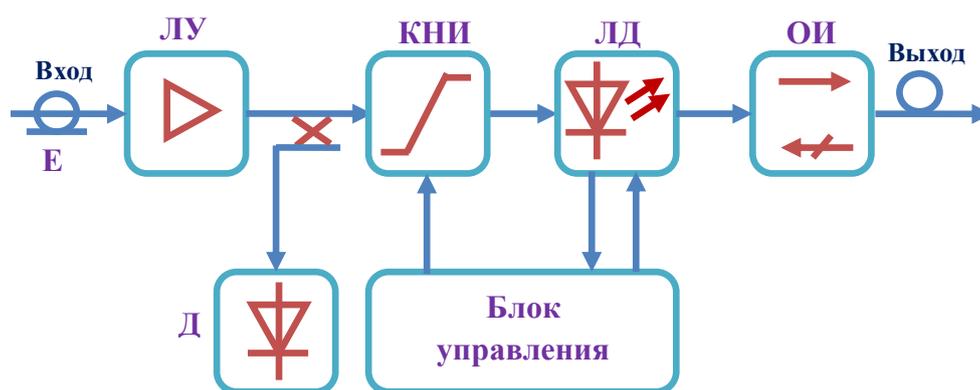


Рис. 7.9. Обобщенная структурная схема оптической системы передачи ТВ сигналов

Корректированный ТВ-сигнал управляет током ЛД. На выходе ЛД получается модулированный оптический сигнал. Между ЛД и выходом ОП может устанавливаться оптический изолятор (ОИ), который поглощает оптическую мощность, возвращающуюся к ЛД в результате отражений, неизбежно возникающих в оптическом тракте. Это позволяет избежать

значительного повышения шумов, являющихся результатом влияния отраженной мощности на процесс генерирования оптической несущей [3.4].

Приведенная схема на рис. 7.9 является обобщенной и может иметь различные вариации в зависимости от места установки ОП и выполняемых задач. Например, может быть применена система АРУ, в ЛУ могут быть предусмотрены предварительный аттенюатор и эквалайзер. НФС-сети строятся, как правило, с обратным каналом. Передатчик обратного канала выполняется в виде вставки в оптический приемник.

### **Контрольные вопросы**

1. Из чего состоят требования к системе передачи телевидения?
2. Как выглядит полезный телевизионный сигнал?
3. Нарисуйте структурную схему радиовещательного передатчика
4. Объясните обобщенную структурную схему радиотракта телевизионной передачи?
5. Как выглядят спектры сигналов на входе и на выходе модулятора ТВ передатчика?
6. Объясните структурную схему цифровой телевизионной системы?
7. Из каких блоков состоит передающая часть цифрового ТВ системы?
8. Объясните принцип работы структурной схемы передатчика с аналоговой квадратурной обработкой сигнала
9. Объясните принцип работы структурной схемы передатчика с цифровой квадратурной обработкой сигнала?
10. Объясните принцип работы обобщенной структурной схемы оптической системы передачи ТВ сигналов?

## 8. ПЕРЕДАТЧИКИ АНАЛОГОВОГО И ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ

### 8.1. Общая структурная схема радиопередачи

Радиопередатчик это устройство формирования сигнала, подаваемого на вход передающей антенны. (рис.8.1). Обычно содержит возбуждатель (генератор колебания необходимой частоты с высокой стабильностью), усилитель мощности и модулятор (блок, модулирующий несущее колебание по заданному закону). Радиопередатчики широко применяются во всех видах радиосвязи, радиолокации, радиопеленгации, звукового и телевизионного вещания, службы точного времени и т.д.

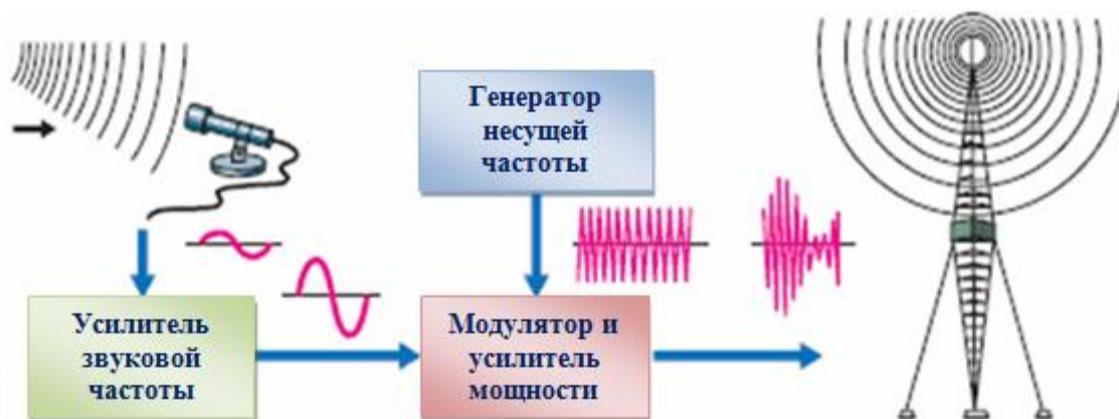


Рис.8.1. Упрощенная общая схема построения радиовещания

Для радиовещания предусмотрены следующие полосы частот, мощности излучения на несущей частоте и вид модуляции:

150...285 кГц - в километровом диапазоне волн (иное название - длинные волны), мощность - до 500 кВт, модуляция - амплитудная;

525...1605 кГц - в гектометровом диапазоне волн (средние волны), мощность - до 500 кВт, модуляция - амплитудная;

3,95...26,1 МГц (отдельные участки) - в декаметровом диапазоне волн (короткие волны), мощность - до 500 кВт, модуляция - амплитудная;

66...73 и 87,5...108 МГц - в метровом диапазоне (УКВ ЧМ вещание), мощность - до 15 кВт, модуляция - частотная.

Радиовещание относится к глобальным радиотехническим системам, охватывающим огромные территории на Земном шаре. Распределение частот и время работы радиовещательных передатчиков в разных странах регламентируются международными соглашениями в рамках Международного союза электросвязи, членом которой является и Узбекистан. Благодаря таким соглашениям понижается возможность взаимных радиопомех при приеме радиостанций слушателями. Никто в мире не имеет права заниматься радиовещанием без согласования с международными и государственными органами.

Принципиальная схема простейшего маломощного передатчика приведена на рис. 8.2, а расположение элементов принципиальной схемы приведены на рис. 8.3. Здесь ВЧ и НЧ части передатчика разделены разными цветами.

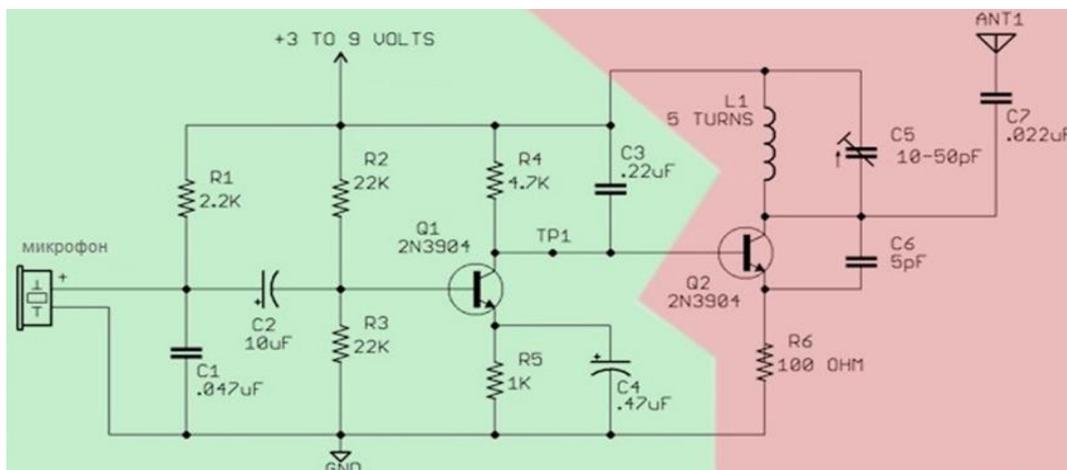


Рис. 8.2. Принципиальная схема простейшего маломощного передатчика

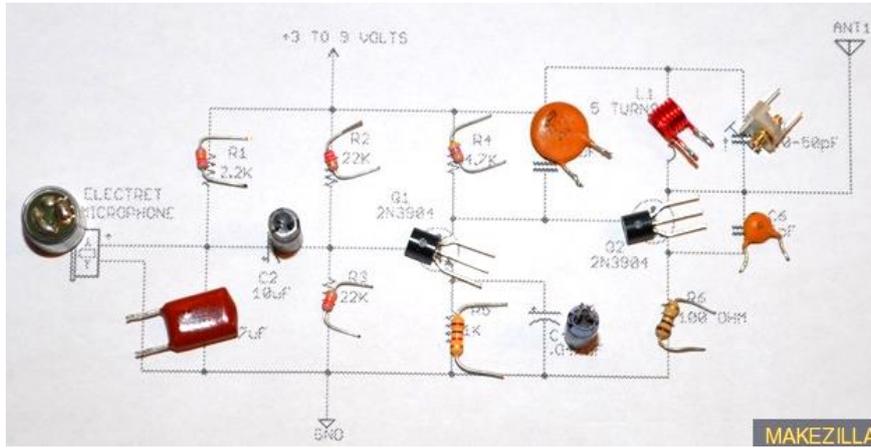


Рис. 8.3. Расположение элементов принципиальной схемы простейшего маломощного передатчика

## 8.2. Обобщенная структурная схема длинно- и средневолновых радиопередатчиков

Такая схема радиопередатчика с амплитудной модуляцией и мощностью до 500 кВт приведена на рис. 8.4.



Рис. 8.4. Обобщенная структурная схема длинно- и средневолновых радиопередатчиков

Радиопередатчик состоит из двух полукомплектов, мощности которых суммируются с помощью мостового устройства. В предварительных ВЧ широкополосных каскадах, не требующих перестройки при изменении частоты возбудителя, обычно применяют мощные транзисторы. В выходном ВЧ усилителе мощности используется несколько мощных генераторных ламп, суммируемых по параллельной или двухтактной схеме. В выходном каскаде и согласующем устройстве с антенной при изменении частоты возбудителя осуществляется автоматическая настройка контуров.

В РПДУ с помощью специальных датчиков осуществляется автоматический контроль нормальной работы всех его каскадов и звеньев и немедленной сигнализации в случае нарушения штатного режима. В возбудителе применяется синтезатор, создающий сетку частот с требуемым шагом. Нестабильность частоты, обеспечиваемая возбудителем, не превышает 10 Гц, а в синхронном режиме работы - 0,01 Гц. (Синхронным называется режим, при котором все радиостанции передают одно и то же сообщение на одной и той же несущей частоте, стабилизация которой осуществляется по принимаемому сигналу «единого времени»).

АМ осуществляется одновременно в нескольких каскадах: в выходном и предварительных ВЧ усилителях мощности. АМ обеспечивает полосу частот от 50 до 10000 Гц и малый коэффициент нелинейных искажений.

### **8.3. Структурная схема радиопередатчика УКВ ЧМ радиовещания**

С помощью такого радиопередатчика обеспечивается высококачественное радиовещание в зоне прямой видимости передающей антенны, которую устанавливают на высокой башне или вышке. Радиус зоны

прямой видимости для идеализированной модели Земли в форме шара, км:

$$R = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (8.1)$$

где  $h_1, h_2$  - высота поднятия передающей и приемной антенн, м.

Так, при  $h_1=200$  м и  $h_2=10$  м получим  $R=14,5$  км. Поскольку зона радиовидимости при УКВ радиовещании сравнительно невелика, то нет смысла особенно увеличивать мощность РПДУ, которая обычно не превышает 1 кВт. И только в особых случаях мощность излучения увеличивают до 15 кВт. Качественное вещание в УКВ диапазоне обеспечивается за счет расширенного диапазона частот модулирующего сигнала в пределах 30...15000 Гц, высокой линейности характеристик частотного модулятора и применения широкополосной частотной модуляции с общей шириной полосы излучаемого сигнала в 145 кГц. При мощности до 1 кВт радиопередатчик можно выполнить полностью на транзисторах согласно, например, структурной схеме, приведенной на рис. 8.5.

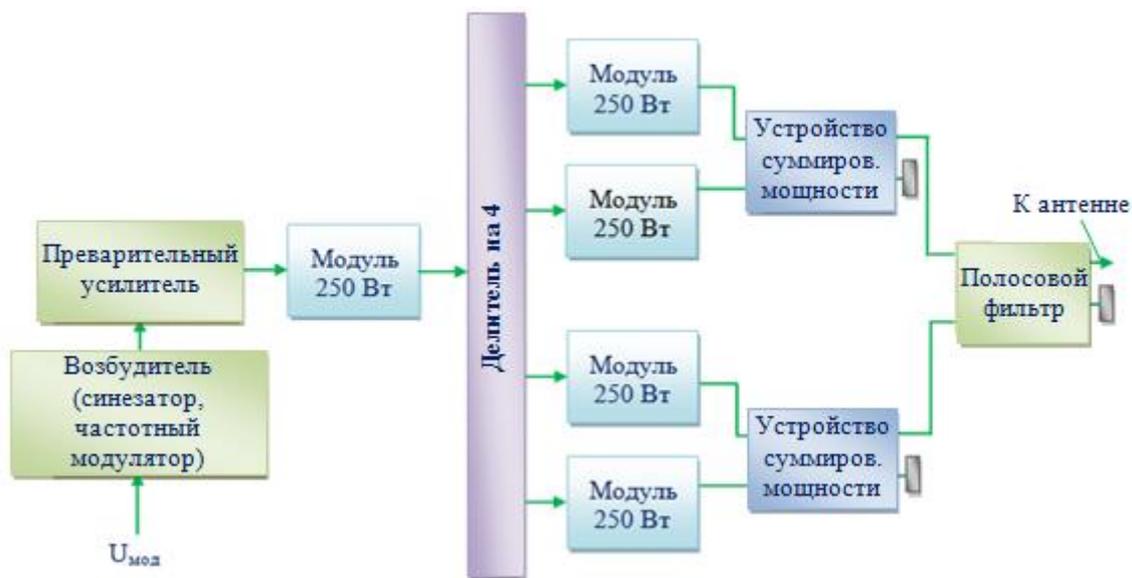


Рис. 8.5. Структурная схема РПДУ УКВ ЧМ радиовещания

Основой радиопередатчика являются модули мощностью по 250 Вт, суммируемые с помощью трех мостовых устройств коаксиального типа. Каждый модуль, в свою очередь, представляет собой сборку из восьми СВЧ транзисторов мощностью по 50 Вт, также суммируемых с помощью мостовых устройств. Широкополосная линейная ЧМ осуществляется в возбuditеле, в который также входит синтезатор частот, позволяющий менять частоту излучаемого сигнала.

Структурная схема передатчика с микропроцессорным управлением для таких задач приведена на рис. 8.6.



Рис.8.6. Структурная схема передатчика с микропроцессорным управлением

В передатчике осуществляется двухступенчатая модуляция ЧТ–ИМ.

Управляет работой передатчика микропроцессор. С его помощью производятся:

- автоматическое включение и выключение передатчика;
- выбор частоты несущей передатчика;

- кодирование дискретных и аналоговых сигналов, поступающих с контроллера и компьютера;
- ввод в память информации, формируемой с помощью клавиатуры;
- первая ступень модуляции, состоящая в формировании сигналов поднесущих частот - в присваивании логической 1 частоты  $F_1$ , а логическому 0 - частоты  $F_2$ ;
- контроль за работой всех блоков передатчика;
- управление устройствами электронной защиты.

С помощью цифрового синтезатора частот, построенного по схеме с ФАП и делителем с переменным коэффициентом деления (ДПКД), осуществляется:

- формирование рабочей сетки частот с заданным шагом;
- вторая ступень модуляции - частотная модуляция сигналами поднесущих (частоты  $F_1$  и  $F_2$ ) несущей частоты передатчика с девиацией  $\Delta f_{\text{дев}}$ .

Сформированный сигнал с двойной ЧМ усиливается сначала предварительным ВЧ усилителем, а затем выходным усилителем мощности ВЧ сигнала - блоком УМ - ВЧ. Предварительный усилитель может представлять собой ВЧ интегральную схему с коэффициентом усиления в 20...30 дБ. На выходе передатчика устанавливается полосовой фильтр, обеспечивающий подавление побочных составляющих до уровня -60 дБ.

С помощью модуля индикации - символьного цифробуквенного индикатора - осуществляется отображение всей передаваемой информации и выполняемых операций.

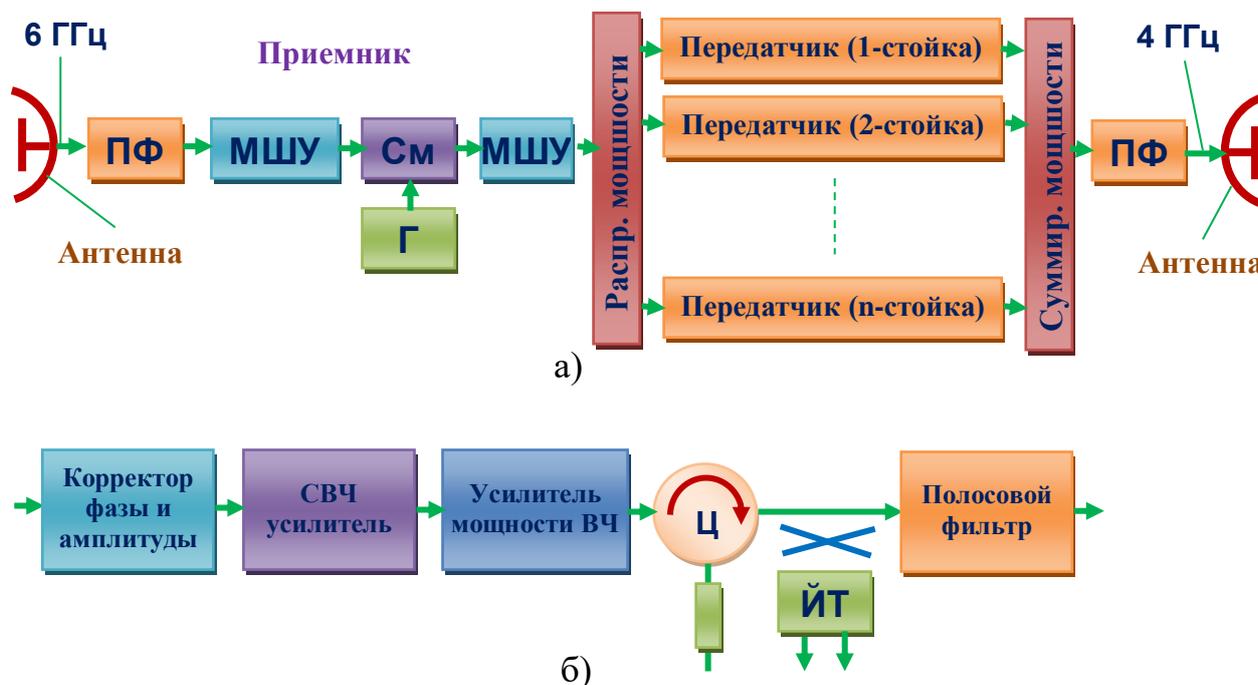
## 8.4. Структурная схема радиопередатчика СВЧ диапазона

Спутниковый приемо-передатчики строят по принципу перенесения всего спектра частот из одного диапазона в другой, например, из диапазона 6 ГГц - в 4 ГГц или 14 ГГц - в 11 ГГц, без демодуляции сигнала. Радиоприемный тракт в таком ретрансляторе является общим для всех стволов, в нем обеспечивается большой линейный диапазон усиления СВЧ сигнала. Для уменьшения перекрестных помех между стволами радиопередающий тракт выполняют по принципу закрепления за каждым из них отдельного тракта усиления сигнала по мощности. Возможная структурная схема такого приемо-передатчика, называемого «прозрачным», приведена на рис. 8.7,*а*, структурная схема радиопередатчика одного ствола - на рис. 8.7,*б*.

Принятый сигнал в диапазоне 6 ГГц усиливается в общем радиоприемнике с полосой пропускания до 500 МГц, а затем весь спектр переносится в диапазон 6 ГГц. С помощью мультиплексора - многополосного фильтра - сигнал разводится по стволам, каждый из которых имеет полосу пропускания до 35...40 МГц. После усиления сигналы всех стволов вновь объединяются с помощью мультиплексора и подводятся к общей антенне. В состав ретранслятора входят также блоки питания и резервные комплекты. Возможно разведение выходного СВЧ сигнала по нескольким антеннам - с широко- и узкополосной диаграммой направленности.

В передатчике (рис. 8.7,*б*) с помощью корректора амплитуды добиваются линеаризации амплитудной характеристики, а с помощью корректора фазы - независимости фазы сигнала от амплитуды. Сначала

сигнал усиливается в предварительном СВЧ транзисторном усилителе, а затем в СВЧ усилителе мощности. В качестве последнего на первой стадии создания подобных систем радиосвязи использовались лампы бегущей волны, а в настоящее время - биполярные и полевые транзисторы с суммированием их мощностей.



ПФ - полосовой фильтр, МШУ - малошумящий усилитель, См - смеситель, Г - гетеродин, ШУ - широкополосный усилитель, НО - направленный ответвитель.

Рис. 8.7. Структурная схема приемо-передатчика СВЧ РРЛ

На выходе передатчика включается циркулятор Ц, обеспечивающий устойчивую работу выходного СВЧ усилителя мощности и развязку с другими стволами, и направленный ответвитель НО для измерения мощности падающей и отраженной волны. Полоса пропускания одного радиопередатчика составляет обычно до 35...40 МГц, мощность - не более 100 Вт.

## 8.5. Структурные схемы радиопередатчиков с прямым цифровым формированием высокочастотных сигналов

Современные средства цифрового формирования и обработки сигналов позволяют получать цифровые модулированные ВЧ или ПЧ сигналы с частотами до сотен МГц. Существуют высококачественные быстродействующие ЦАП, позволяющие перевести цифровой сигнал в аналоговую форму для подачи (через фильтр) на вход усилителя мощности передатчика, либо на вход смесителя, повышающего частоту сигнала до необходимого значения перед его усилением по мощности. Такой вариант имеет свои преимущества - возможность формировать сложные многочастотные сигналы (например, 8 модулированных несущих с разносом частот в 100 кГц одновременно), позволяют менять все параметры излучения, в том числе и стандарт связи путем смены только программного обеспечения. Недостатком их можно считать относительно низкую экономичность и наличие заметных паразитных составляющих в спектре сигнала.

Наиболее простым вариантом цифрового передатчика с цифровым выходом на ПЧ/ВЧ можно считать комбинацию из цифрового сигнального процессора (*DSP*) и прямого цифрового синтезатора частоты (*DDS*), рис. 8.8. При этом *DDS* должен иметь одиночный (не квадратурный) выход, как, например, *AD7008*, *AD9830*. Такой передатчик может формировать сигналы с амплитудно-фазовыми видами модуляции (*AM*, *ЧМ*, *SSB*, *PSK*, *FSK*, *QAM*) на частотах до десятков МГц.

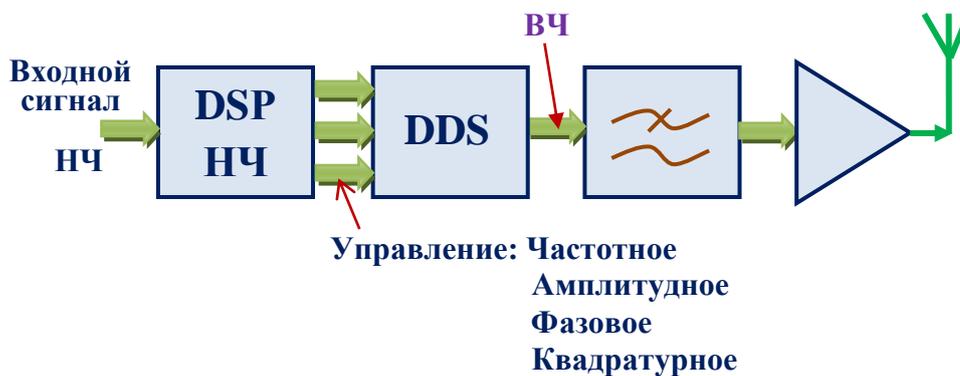


Рис. 8.8. Структурная схема цифрового передатчика с цифровым выходом на ПЧ/ВЧ

Так как тактовые частоты современных *DDS* не превышают сотен МГц, а максимальная рабочая частота *DDS* может быть около 0,4 от тактовой (а для улучшения спектральной чистоты сигнала желательно, чтобы рабочая частота не превышала 0,1 значения тактовой частоты), то для повышения несущей частоты требуются дополнительные меры. Здесь имеются в виду способы переноса сигнала, сформированного с помощью *DDS*, из области 1...100 МГц в активно использующийся ныне в телекоммуникационных приложениях участок спектра 1...10 ГГц и выше.

Повышение рабочей частоты с помощью квадратурного аналогового модулятора (точнее, смесителя) в интегральном исполнении позволяет решить проблему подавления зеркального канала за счет использования фазового метода подавления нерабочей частоты. Внутренняя структура такого квадратурного смесителя и способ подключения к нему источника модулированного радиосигнала, частоту которого требуется перенести вверх, показаны на рис. 8.9 и рис. 8.10 [16].

От источника сигнала – *DDS* или ЦАП требуется наличие отдельных квадратурных ВЧ выходов, так называемых *I/Q* выходов, т.е. в ИМС

синтезатора или ЦАП не должно быть внутреннего объединения квадратур (AD9854).

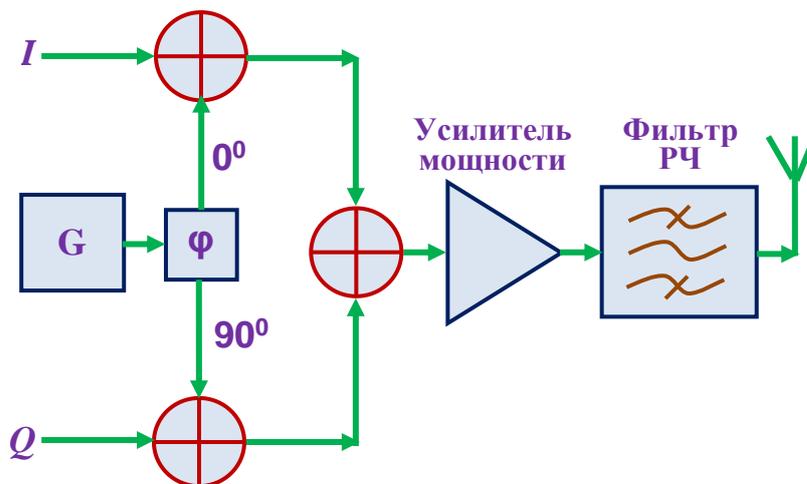


Рис. 8.9. Внутренняя структура квадратурного смесителя

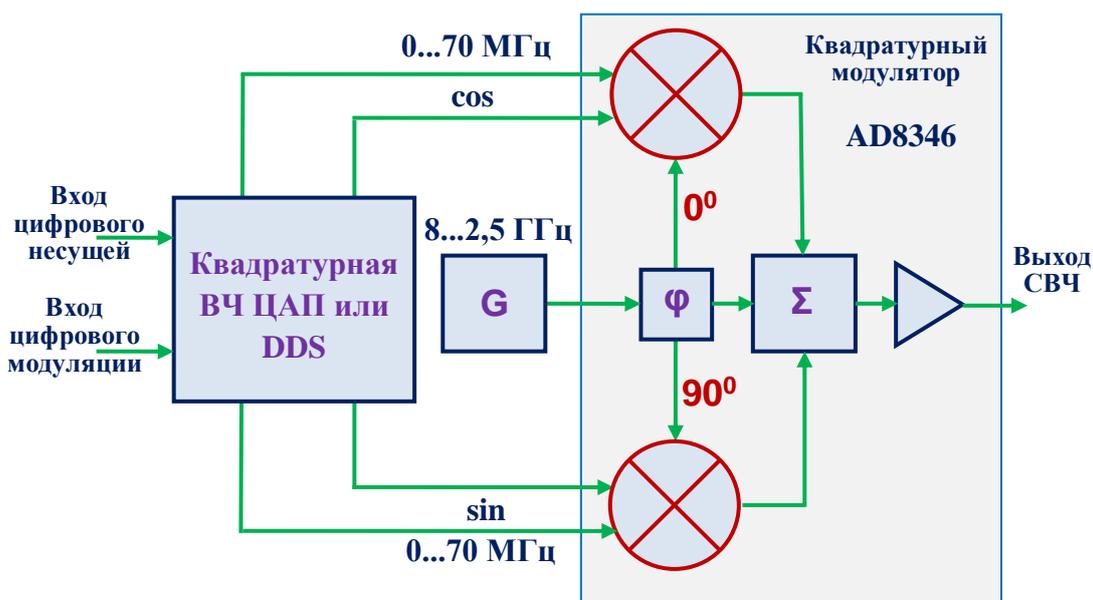


Рис. 8.10. Способ подключения к квадратурному смесителю источника модулированного радиосигнала

Работу квадратурного смесителя можно пояснить следующим образом. Для упрощения записи рассмотрим случай немодулированного сигнала  $DDS$ , тогда на нижний смеситель подается сигнал  $U_{mDDS} \sin(\omega_{DDSt})$ , а на верхний – сигнал  $U_{mDDSCOS}(\omega_{DDSt})$ . На другие входы этих смесителей от

широкополосного внутреннего фазовращателя подаются колебания гетеродина, также имеющие разность фаз  $90^\circ$ :  $U_{mLO}\sin(\omega_{LO}t)$  и  $U_{mLOCOS}(\omega_{LO}t)$ .

Идеальные балансные смесители выполняют операцию перемножения поступающих на них сигналов; после перемножения, суммирования и усиления с коэффициентом  $K$  получаем выходное колебание микросхемы:

$$u_{OUT}(t) = KU_{mDDS}U_{mLO}(\sin(\omega_{DDSt})\sin(\omega_{LO}t) + \cos(\omega_{DDSt})\cos(\omega_{LO}t)) = U_{mOUT}\cos((\omega_{LO} - \omega_{DDS})t)$$

Таким образом, подавляется составляющая спектра с суммарной частотой; чтобы подавлялась составляющая с разностной частотой, нужно поменять местами выходы  $I$  и  $Q$  DDS, подключенные к квадратурному модулятору (смесителю). Типичное подавление зеркального канала в интегральном квадратурном модуляторе около 35 дБ. Подавляется также и сигнал гетеродина (не хуже 30 дБ), поскольку смесители являются балансными.

Структурная схема цифрового передатчика, использующего принцип повышения рабочей частоты с использованием квадратурного интегрального модулятора и способного работать на частотах до 2.5 ГГц, показана на рис. 8.11.

Типовая структурная схема более совершенного цифрового приемопередатчика показана на рис. 8.12. Она является стандартной для современных цифровых приемопередатчиков и может быть реализована, в зависимости от требований к частотному диапазону и к алгоритму обработки сигнала, на различной элементной базе.

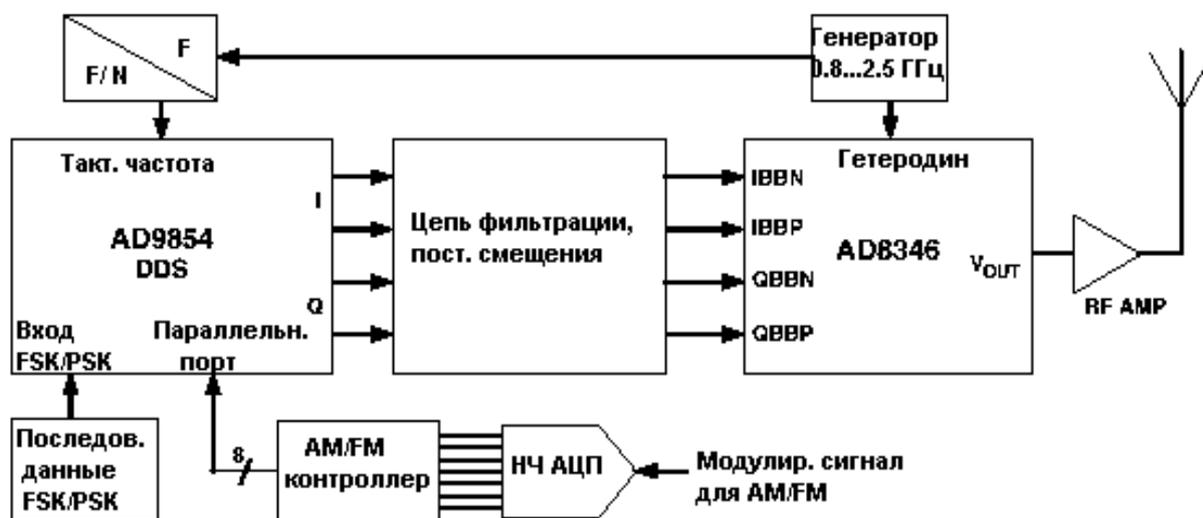


Рис. 8.11. Структурная схема цифрового передатчика, использующего принцип повышения рабочей частоты с использованием квадратурного интегрального модулятора

В частности, ядро формирования цифровых ВЧ сигналов может быть выполнено на основе:

- стандартного цифрового сигнального процессора (*DSP*) - если требуется сигнал с относительно невысокой частотой - до 1 МГц;
- ПЛИС (*FPGA*) очень высокой степени интеграции, т.е. с эквивалентным количеством вентилях, исчисляемым миллионами;
- стандартных ИМС нескольких типов - цифрового сигнального ВЧ процессора приемника (*RSP*) в приемном тракте; цифрового сигнального ВЧ процессора передатчика (*TSP*) в передающем тракте, который может быть заменен (как вариант исполнения передающего тракта без отдельного ВЧ ЦАП) на цифровой модулятор, модулируемый *DDS* или цифровой преобразователь частоты вверх (*QDUC*).

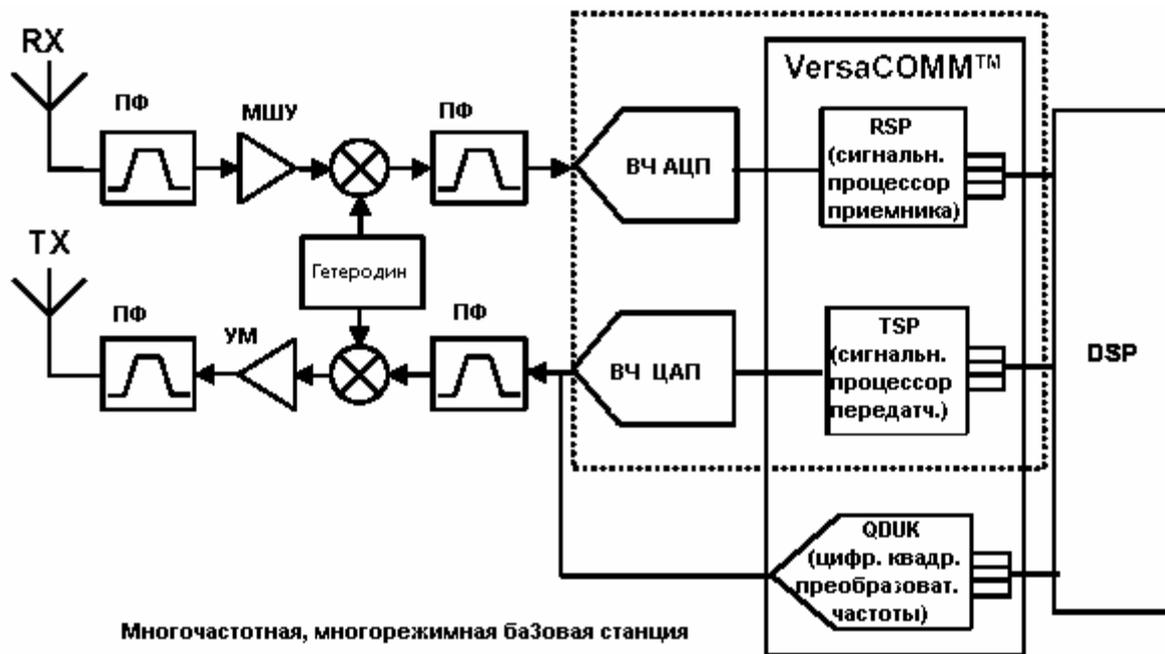


Рис. 8.12. Типовая структурная схема более совершенного цифрового приемопередатчика

Структура цифрового сигнального процессора передатчика (*TSP*) *AD6622* показана на рис. 8.13. Она включает четыре идентичных цифровых канала с последовательными трехпроводными информационными входами, цифровыми интерполяционными фильтрами (*RCF* и *CIC* фильтрами) и цифровым преобразованием частоты с помощью *NCO*. *RCF* фильтры являются интерполяционными КИХ фильтрами с коэффициентами, хранящимися в ОЗУ, что позволяет сменить частотные характеристики фильтров путем простой смены коэффициентов через управляющий порт *TSP*. *CIC*-фильтры являются гребенчатыми фильтрами, подавляющими «образы» цифровых сигналов перед подачей их на *NCO* для модуляции параметров вырабатываемых цифровых ВЧ сигналов. Прямые цифровые синтезаторы (*NCO*) выполнены квадратурными с цифровыми перемножителями-модуляторами *I/Q* и цифровыми сумматорами для объединения квадратур. Сигналы всех четырех каналов суммируются в

цифровом сумматоре и подаются на вход внешнего ВЧ ЦАП. Предусмотрена и возможность каскадирования, т.е. подключение к цифровому сумматору данной ИМС внешнего цифрового сигнала от аналогичной ИМС для наращивания числа каналов передачи. Такая архитектура позволяет получать как узкополосные, так и широкополосные модулированные ПЧ колебания для цифровых и аналоговых стандартов радиосвязи.

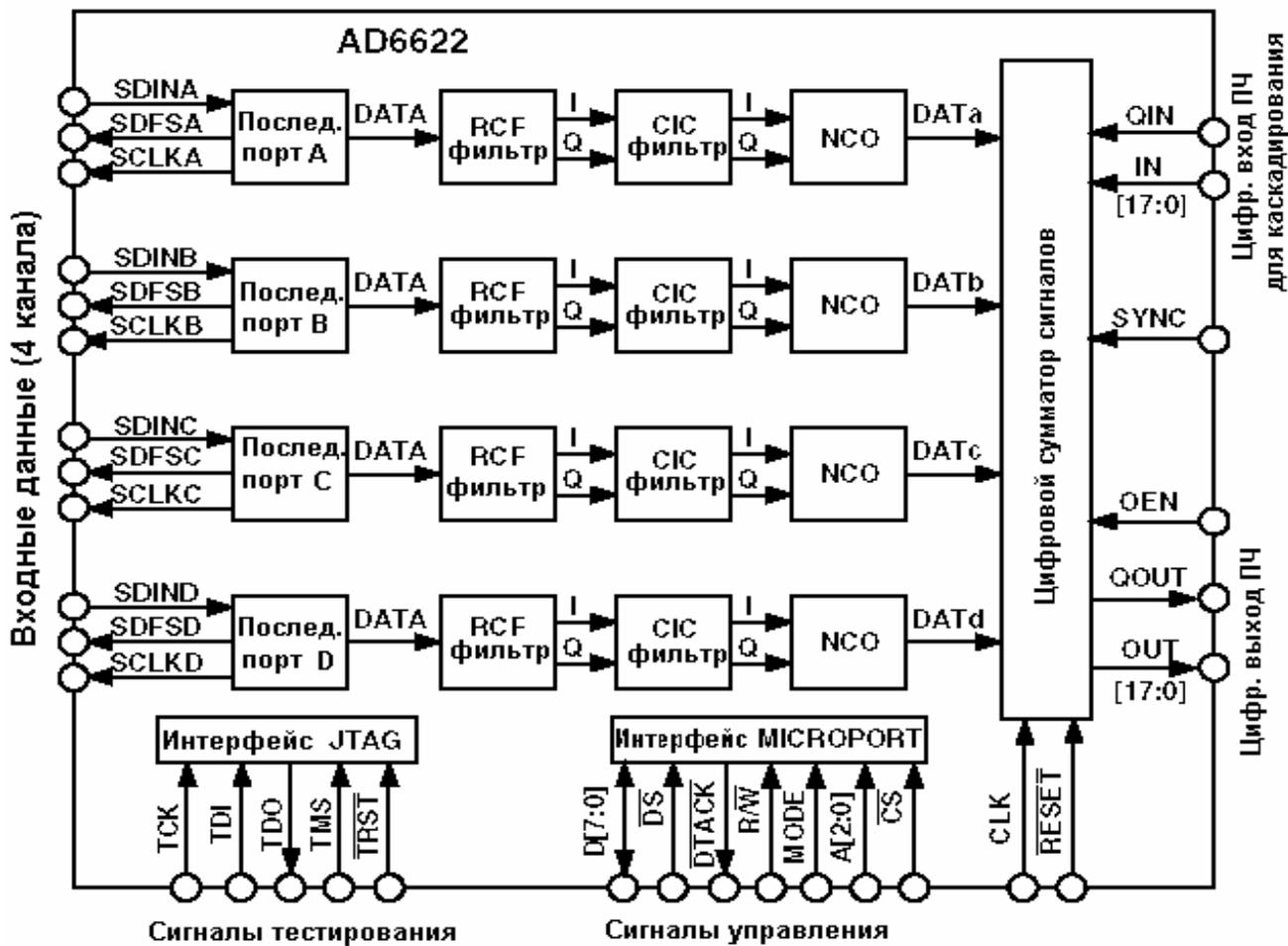


Рис. 8.13. Структура цифрового сигнального процессора передатчика (*TSP*)  
*AD6622*

Таким образом, благодаря тому, что современные ВЧ ЦАП имеют высокую частоту выборки и широкий динамический диапазон, удастся выполнить всю ПЧ часть телекоммуникационного многоканального передатчика в цифровом виде. При этом *TSP* является «мостом» между *DSP*

и ВЧ ЦАП. Цифровая обработка ПЧ сигнала передатчика обеспечивает высокую повторяемость параметров при производстве, высокую точность и большую гибкость при смене параметров сигнала и даже стандартов, чем сравнимые аналоговые устройства.

В случае использования в качестве ядра цифрового формирования ВЧ сигналов ПЛИС надо учитывать, что ей необходимы, в отличие от *DSP*, некоторые внешние элементы: память данных и память программ, тактовый генератор, формирователь шины или схема управления загрузкой и т.п.

Пример реализации цифрового приемопередатчика фирмы *EnTegra* концепции «*Software Designed Radio*» (SDR модуль) на ПЛИС (*FPGA*) *Virtex XCV2000E* фирмы *Xilinx* (2 миллиона вентилей) упрощенно показан на рис. 8.14. Приемопередатчик выполнен в виде карты, вставляемой в слот «материнской» *DSP*-карты, которая, в свою очередь, имеет *PCI*-разъем для подключения к материнской плате персонального компьютера. Тактовая частота примененных ЦАП составляет 100 МГц, а у АЦП – 200 МГц.

Передающая часть устройства, включая «прошивку» ПЛИС, имеет структуру, частично показанную на рис. 8.15. Она выполняет следующие операции:

- прием данных от *DSP*;
- формирование восьмиканального сигнала стандарта *WCDMA*;
- обработка сигнала в интерполяционных фильтрах;
- перенос в цифровом перемножителе с встроенным *NCO* частоты сигнала вверх;
- коррекция сдвига постоянной составляющей для ЦАП;
- преобразование квадратурных сигналов в аналоговую форму с помощью размещенных на плате ВЧ ЦАП;

- аналоговая фильтрация нежелательных продуктов преобразования («образов») и усиление по мощности полезного сигнала

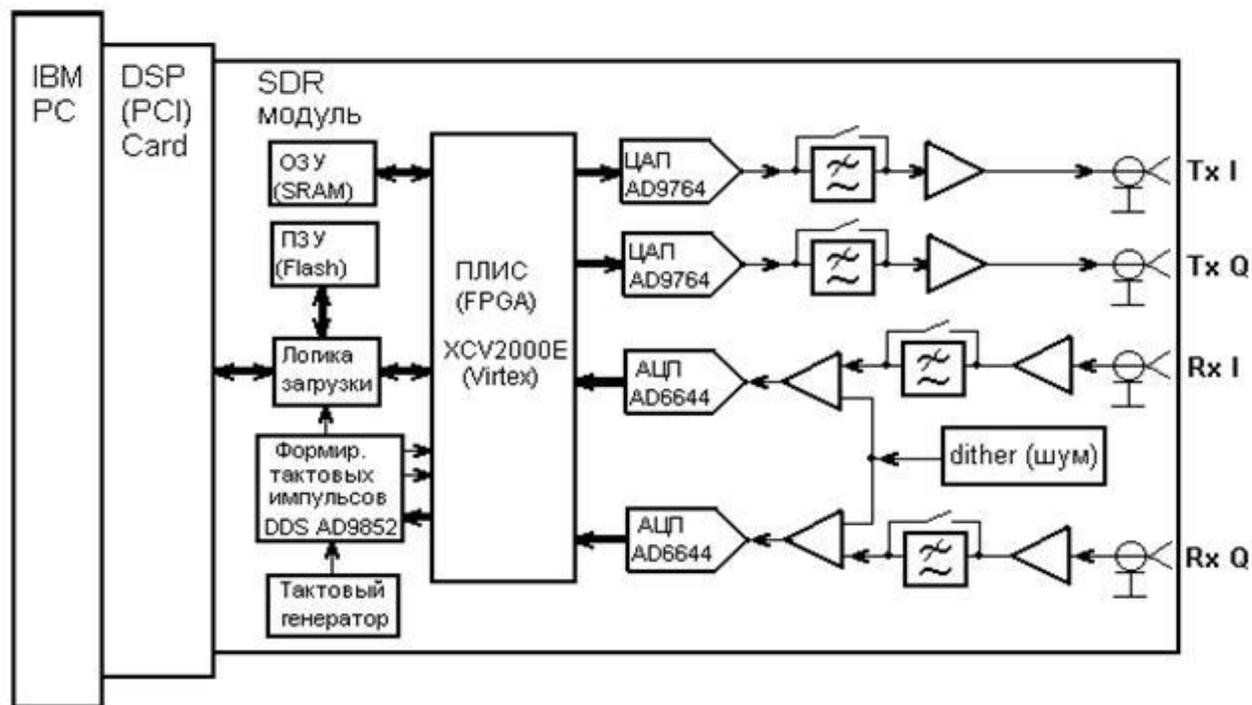


Рис. 8.14. Пример реализации цифрового приемопередатчика фирмы *EnTegra* концепции «*Software Designed Radio*» (SDR модуль) на ПЛИС (FPGA) *Virtex XCV2000E* фирмы *Xilinx* (2 миллиона вентилей)

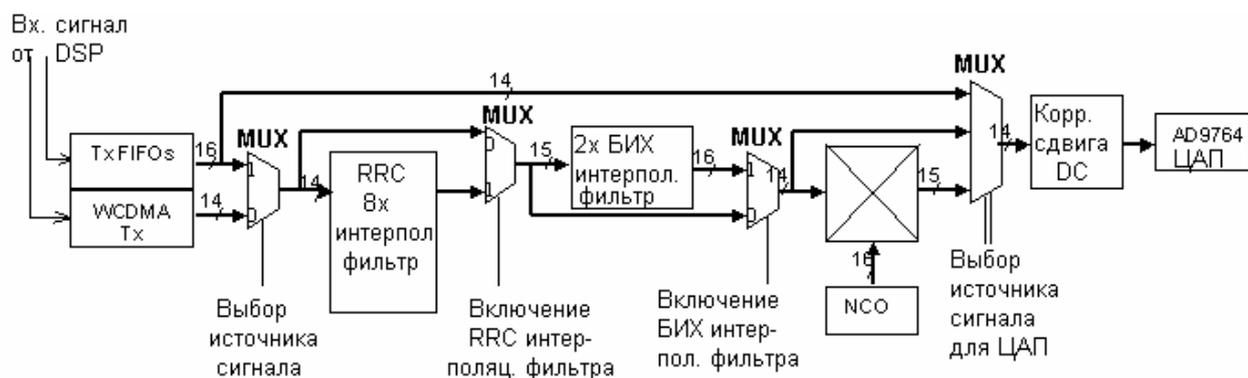


Рис. 8.15. Структурная схема передающей части устройства

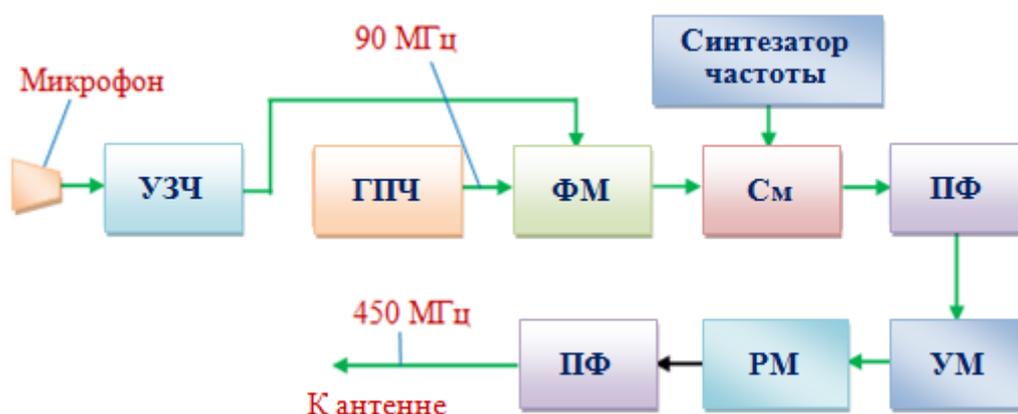
Часть структуры приемного тракта, выполненная в виде «прошивки» ПЛИС, содержит понижающий преобразователь частоты (DDC) и некоторые вспомогательный блоки.

Встроенная память программ и память данных позволяют использовать такой приемопередатчик в самых разнообразных применениях для различных стандартов связи второго и третьего поколения.

Передатчики с прямым цифровым формированием сигналов на ПЧ и ВЧ являются наиболее перспективными устройствами для создания на их основе базовых станций систем радиосвязи с множественным доступом, систем передачи данных по радиоканалам и других областей применения.

## 8.6. Абонентские передатчики аналоговых и цифровых сотовых систем радиосвязи

**Абонентский радиопередатчик сотовой системы радиосвязи аналогового типа.** Структурная схема такого радиопередатчика, входящего в состав абонентской радиостанции, приведена на рис. 8.16.



УЗЧ - усилитель звуковой частоты, ГП - генератор промежуточной частоты (90 МГц), ФМ - фазовый модулятор, См - смеситель, ПФ - полосовой фильтр, УМ - усилитель мощности СВЧ сигнала (450 МГц), РМ - регулятор мощности

Рис. 8.16. Структурная схема абонентского радиопередатчика сотовой системы радиосвязи аналогового типа

В схеме фазовая модуляция производится на промежуточной частоте (90 МГц). После смешения с частотой синтезатора и фильтрации сигнал основной частоты (450 МГц) усиливается по мощности. В радиостанции для обеспечения дуплексного режим работы, т.е. одновременной передачи и приема сообщений, передатчик и приемник имеют разные частоты. Передатчик полностью выполняется на микросхемах, и поэтому он имеет весьма малые размеры.

**Абонентский передатчик сотовой системы радиосвязи цифрового типа.** Структурная схема такого передатчика, входящего в состав абонентской радиостанции и выполняемого на микросхемах, приведена на рис. 17.



УЗЧ - усилитель звуковой частоты, АЦП - аналого-цифровой преобразователь, ГП - генератор промежуточной частоты, ФМ - фазовый модулятор, См - смеситель, ПФ - полосовой фильтр, УМ - усилитель мощности СВЧ сигнала (900 МГц), РМ - регулятор мощности

Рис. 8.17. Структурная схема абонентского радиопередатчика сотовой системы радиосвязи цифрового типа

Радиопередатчик работает следующим образом. С помощью АЦП

речевой сигнал преобразуется в цифровой двоичный сигнал, проходит обработку в микропроцессоре и поступает на фазовый модулятор.

После смешения с частотой синтезатора и фильтрации сигнал основной частоты (900 МГц) усиливается по мощности, величина которой автоматически регулируется в зависимости от расстояния до базовой станции. Выбор частоты также осуществляется в автоматическом режиме по команде с базовой радиостанции, предоставляющей абоненту свободный канал. Как и в предыдущем случае, передатчик полностью выполняется на микросхемах, и поэтому он имеет весьма малые размеры.

### **Контрольные вопросы**

1. Из каких частей состоит общая структурная схема радиопередачи?
2. Из каких элементов состоит принципиальная схема передатчика малой мощности? Объясните принцип работы НЧ и ВЧ частей передатчика?
3. Объясните принцип работы обобщенной структурной схемы длинно- и средневолновых радиопередатчиков?
4. Из каких частей состоит общая структурная схема РПДУ УКВ ЧМ радиовещания? Принцип работы.
5. Объясните принцип работы структурной схемы передатчика с микропроцессорным управлением?
6. Объясните принцип работы схемы радиопередатчика СВЧ диапазона РРЛ?
7. Объясните принцип работы структурной схемы цифрового передатчика с цифровым выходом на ПЧ/ВЧ
8. Объясните принцип работы квадратурного смесителя?

9. Объясните принцип работы структурной схемы аналогового мобильного телефона?

10. Объясните принцип работы структурной схемы цифрового мобильного телефона?

## 9. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

### 9.1. Назначение и классификация радиоприемных устройств

Радиоприемное устройство - одно из важнейших и необходимых элементов любой радиотехнической системы передачи сообщений. Оно обеспечивает:

- улавливание энергии электромагнитного поля, несущего полезное сообщение;
- усиление мощности полезного радиосигнала;
- детектирование радиосигнала;
- усиление мощности сигнала и преобразование его в сообщение, поступающее к получателю.

В месте приема существуют посторонние электромагнитные поля, создаваемые источниками радиопомех естественного и искусственного происхождения. Эти электромагнитные поля искажают полезный сигнал и вызывают ошибки при приеме сообщений.

Прием и передача радиосигналов основаны на колебательном контуре.

При воздействии на контур внешней энергией, например, переменным электрическим током, в нем возникают так называемые вынужденные колебания. Если частота сигналов совпадет с частотой колебаний контура, возникнет явление резонанса – амплитуда колебаний достигает наибольшей величины. При этом не надо увеличивать амплитуду подводимого колебания, нужно только, чтобы частота этих колебаний равнялась частоте настройки контура.

Именно это явление и позволяет настраивать приемник на определенную частоту и выделять нужную станцию среди множества других.

Чтобы настроить контур в резонанс необходимо менять его частоту. Как уже было сказано, это достигается изменением параметров индуктивности или емкости. Технологически менять емкость проще, чем индуктивность, поэтому в основном применяют именно изменение емкости. Классическим элементом, позволяющим изменять емкость, является конденсатор переменной емкости (КПЕ), которым и осуществляют настройку на частоту резонанса (рис.9.1). Как правило, с помощью его производится настройка на нужную частоту (т.е. настройка резонансной частоты контура) (рис.9.2).

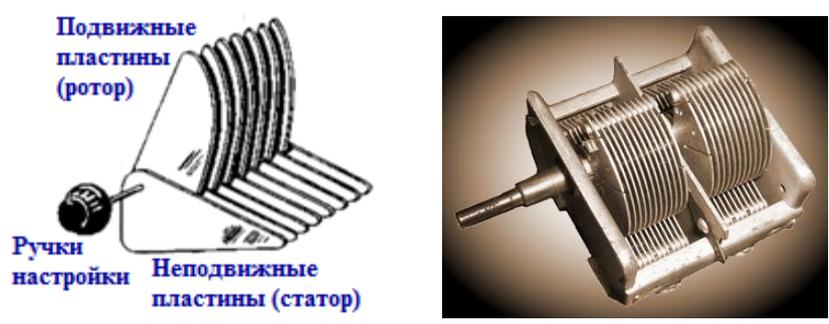


Рис.9.1. Схематическое устройство (слева) и внешний вид (справа) КПЕ

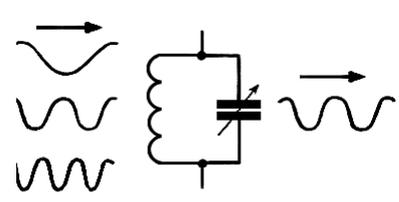


Рис.9.2. Выделение колебаний с помощью колебательного контура

Раньше механический КПЕ был единственным устройством настройки, но в процессе развития радио появились более удобные и надежные

элементы. Например, варикап – полупроводниковый элемент у которого емкость меняется изменением управляющего напряжения. Или так называемый электронный эквивалент конденсатора, который представляет собой не традиционное устройство с двумя пластинами, а интегральную схему, функционально выполняющую те же задачи (рис.9.3).



Рис.9.3. Обозначение на схеме (слева) и внешний вид (справа) варикапа

В приемнике предусматриваются автоматические регулировки усиления, избирательности, формы характеристик, обеспечивающие адаптацию приемника к изменяющимся условиям приема сигналов.

Необходимое усложнение приемника обусловлено повышенными требованиями к качеству приема сообщений. Это усложнение особенно характерно для профессиональных приемников связных, радиолокационных, радионавигационных, телеметрических и других специальных систем.

Таким образом, современное профессиональное радиоприемное устройство представляет собой адаптивный комплекс элементов, обеспечивающий оптимальную обработку смеси полезного сигнала и радиопомех.

В соответствии с указанным структурная схема любого радиоприемного устройства содержит приемную антенну, приемник выходной прибор (рис.9.4).

Рассмотрим классификацию радиоприемных устройств.

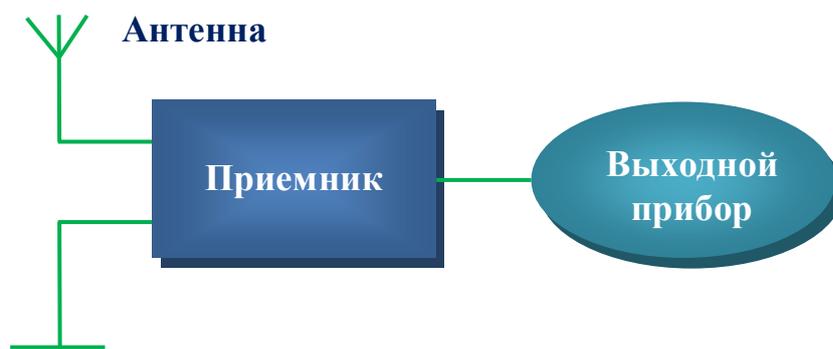


Рис. 9.4. Общая структурная схема радиоприемного устройства

На рис. 9.5 приведена структура деления приемных устройств.

1. По основному назначению - радиовещательные и профессиональные.

Группа радиовещательных приемных устройств отличается относительно простыми техническими решениями задач приема сообщений, ибо массовый выпуск радиовещательных приемников с особой остротой диктует экономическую целесообразность подобного подхода к разработкам.

Группа профессиональных приемных устройств отличается более сложными техническими решениями, так как эти устройства работают преимущественно с одним радиопередатчиком и затраты на приемное и передающее оборудование могут быть равноценными. Типичным примером реализации подобного подхода являются системы космической связи или связи через искусственные спутники земли (ИСЗ).

Каждая из групп, в свою очередь, делится на подгруппы, каждая из указанных подгрупп может быть разделена на подгруппы и т. д. (рис. 9.5).

Связные приемные устройства делятся на приемные устройства низовой, областной, магистральной и космической связи.

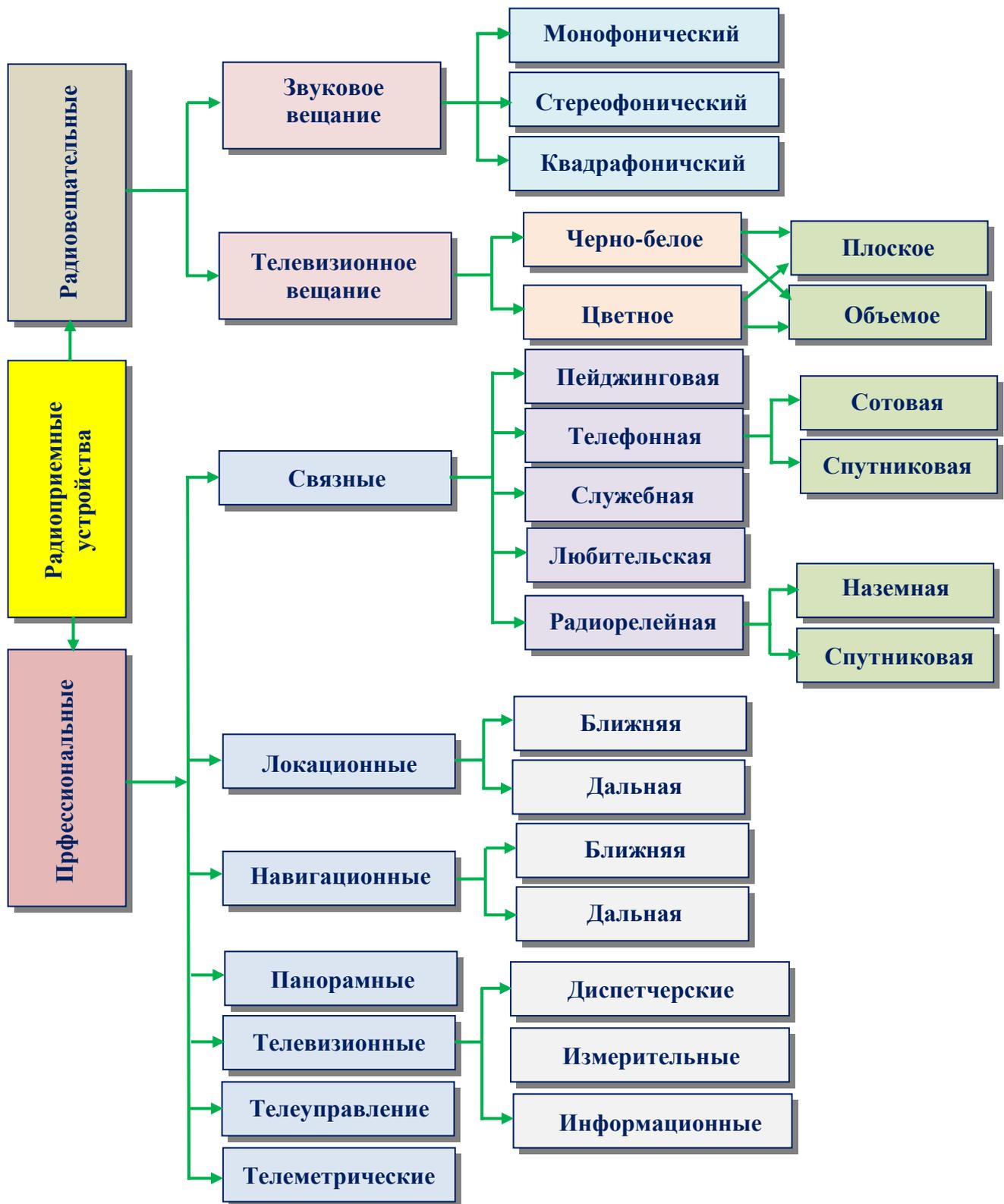


Рис.9.5. Структура деления приемных устройств

2. По роду работы - радиотелефонные; радиотелеграфные - слухового, пишущего или буквопечатающего приема; фототелеграфные и др.

3. По виду модуляции, используемой на линии связи (приемники амплитудно-модулированных, частотно-модулированных, фазо-модулированных, импульсно-модулированных, однополосных и комбинированных сигналов).

4. По диапазону принимаемых волн приемники бывают: мириаметровых волн (100-10 км), километровых (10-1 км), гектометровых (1000-100 м), декаметровых (100-10 м), метровых (10-1 м), дециметровых (100-10 см), сантиметровых (10- 1 см), миллиметровых (10-1 мм), децимиллиметровых (1- 0,1 мм) и т. д. Приемник, включающий несколько из указанных диапазонов, называют всеволновым.

5. По способу построения тракта усиления сигналов до детектора существуют приемники (прямого усиления и супергетеродинные с однократным, двухкратным либо многократным преобразованием частоты).

6. По способу питания - с автономным питанием от аккумуляторных или сухих батарей; сетевые, питаемые от сети постоянного или переменного тока; с универсальным питанием.

7. По месту установки - стационарные, передвижные, самолетные, корабельные, автомобильные и др.

## 9.2. Показатели радиоприемных устройств

Диапазон рабочих частот определяется двумя граничными частотами  $f_{min}$  и  $f_{max}$  и коэффициентом перекрытия диапазона по частоте

$$K_f = f_{max} / f_{min}$$

В пределах диапазона приёмник может перестраиваться плавно или дискретно с интервалом между соседними частотами  $\Delta f_{рч}$ . В последнем случае общее количество частот, на которых может быть настроен радиоприёмник, рассчитывается по формуле:

$$N_{рч} = \frac{(f_{max} - f_{min})}{\Delta f_{рч}}$$

**Чувствительность радиоприёмника** характеризует его способность обеспечивать нормальный приём слабых сигналов. Количественно чувствительность радиоприёмника оценивается либо минимальной величиной ЭДС в антенне  $E_A$ , либо минимальной мощностью радиосигнала в антенне  $P_A$ , при которых обеспечивается требуемая мощность сигнала на выходе радиоприёмника при заданном отношении:

$$q = \frac{U_{с.в.ых}}{U_{ш.в.ых}} = \sqrt{\frac{P_{с.в.ых}}{P_{ш.в.ых}}}$$

$$E_A = 2 \sqrt{kT \Delta F_{пр} N q^2 r_A} = 2q \sqrt{kT \Delta F_{пр} N r_A},$$

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

$T$  – абсолютная температура;

$\Delta F_{пр}$  – полоса пропускания приёмника;

$N$  – коэффициент шума линейного тракта приёмника;

$r_A$  – сопротивления антенны.

Коэффициент шума  $N$  показывает, во сколько раз реальный приёмник ухудшает отношение  $U/U_{ш}$  на выходе линейной части приёмника по сравнению с идеальным приёмником, который дополнительных шумов не создаёт, а только усиливает сигнал + шум, создаваемый в антенне.

**Избирательность (селективность)** приемника – это способность приемника отделять полезный сигнал от мешающих. Она основана на использовании тех или иных различий полезных и мешающих сигналов: направления прихода (пространственная избирательность), времени действия (временная), поляризации (поляризационная), амплитуды (амплитудная), частоты (частотная), фазы (фазовая).

Пространственная и поляризационная избирательности реализуются приемной антенной; временная (при приеме импульсных сигналов) достигается отпиранием приемника только на время действия полезного сигнала. Основное значение имеет частотная избирательность, реализуемая с помощью резонансных цепей и фильтров. Различают односигнальную и многосигнальную (эффективную, реальную) частотную избирательность.

Односигнальная избирательность определяется АЧХ фильтров радиотракта приемника без учета нелинейных явлений при действии на входе одного сигнала (либо полезного, либо мешающего) (рис.9.6, а). Количественно односигнальная избирательность оценивается отношением уровня испытательного сигнала на частоте помехи  $f_n$  к его значению на частоте полезного сигнала при неизменной настройке и одинаковом выходном напряжении, то есть отношением соответствующих коэффициентов усиления:

$$Se_{f_n} = \frac{K_0}{K(f_n)} = \frac{1}{\gamma_{f_n}}$$

Следовательно характеристика односигнальной избирательности или кривая селективности (рис.9.6, б), оценивающая ослабление помехи в зависимости от частоты расстройки  $\Delta f = f - f_0$  обратна соответствующей АЧХ (рис.9.6, а). При этом учтено, что в отличие от АЧХ УНЧ для резонансных усилителей радиотракта приемника при построении АЧХ по оси частот удобнее откладывать не абсолютное значение частот, а значение расстройки частоты относительно настройки приемника  $\Delta f = f - f_0$ .

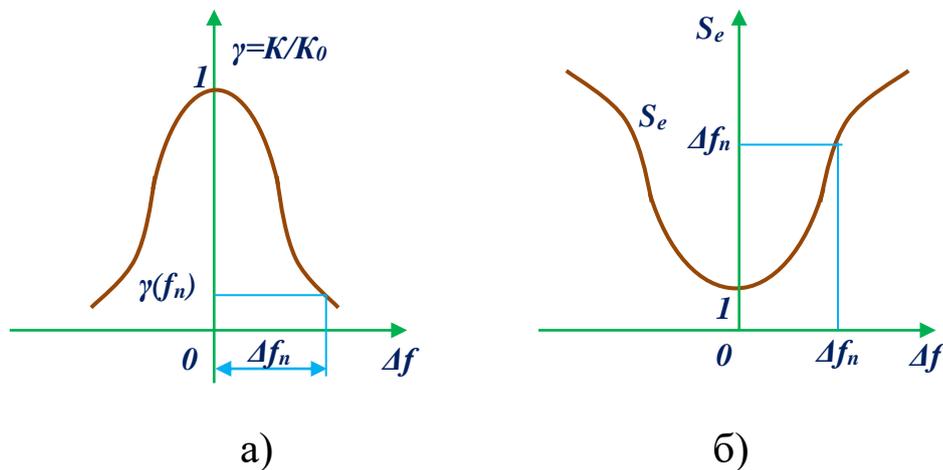


Рис.9.6. Характеристика односигнальной избирательности

Для повышения реальной избирательности приёмника необходимо:

- уменьшать уровень помехи путём включения на входе приёмника избирательного фильтра;
- применять в усилительных каскадах УЭ с большой протяжённостью линейного участка проходной характеристики.

**Частотная точность приёмника** определяет его способность устанавливать и поддерживать с допустимой погрешностью заданное

значение частоты. Она определяет возможность вхождения в связь без поиска и ведение связи без подстройки. Количественно оценивается, как и в передатчиках относительной нестабильностью,  $\delta_{\text{пр}} = \Delta f_{\text{пр}} / f_c$ .

Для повышения надёжности радиосвязи погрешность установки частоты и её изменение в процессе работы компенсируется расширением полосы пропускания приёмника

$$\Delta F_{\text{пр}} = \Delta F_c + \Delta f_{\text{пр}},$$

где  $\Delta F_c$  – спектр принимаемого сигнала;

$\Delta f_{\text{пр}}$  – абсолютная расстройка приёмника, определяемая его частотной точностью.

Расширение полосы пропускания для компенсации частотной нестабильности приводит к уменьшению чувствительности приёмника, т. к. при этом увеличивается его уровень шумов на выходе.

**Искажения сигналов** определяют качество воспроизведения первичных сигналов на выходе приёмника.

Различают нелинейные, амплитудно-частотные и фазо-частотные искажения.

**Нелинейные искажения** вызываются нелинейностью характеристик элементов приёмного тракта. Они проявляются в искажении формы первичных сигналов. Количественно они оцениваются коэффициентом гармоник.

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1},$$

где  $U_2, U_3, \dots, U_n$  – амплитуды высших гармоник на выходе приёмника;

$U_1$  – амплитуда первой гармоники на выходе приёмника.

**Амплитудно-частотные искажения** обусловлены различием в коэффициенте усиления для различных составляющих спектра первичного сигнала. Они оцениваются амплитудно-частотной характеристикой АЧХ, представляющей собой график зависимости амплитуды первичного сигнала  $U_F$  на выходе приёмника от частоты  $F$  (рис. 9.7).

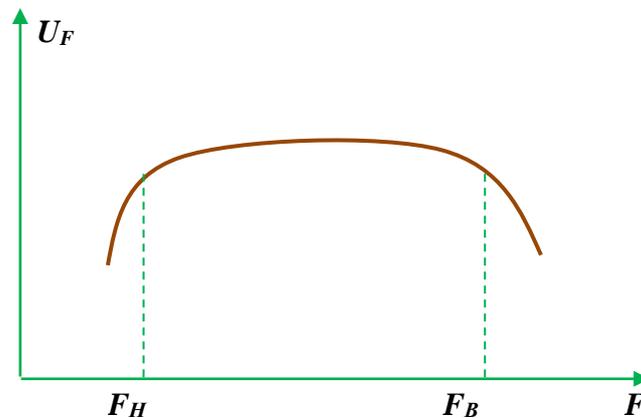


Рис. 9.7. График зависимости амплитуды первичного сигнала  $U_F$  на выходе приёмника от частоты  $F$

Часто для количественной оценки амплитудно-частотных искажений вместо АЧХ пользуются коэффициентом частотных искажений.

$$M_H = \frac{U_{Fmax}}{U_{F_H}} \text{ и } M_H = \frac{U_{Fmax}}{U_{F_B}},$$

где  $U_{F_H}$  и  $U_{F_B}$  – амплитуда первичного сигнала на выходе приёмника на нижней и верхней частотах спектра первичного сигнала;

$U_{Fmax}$  – максимальное значение амплитуды первичного сигнала на выходе приёмника на средней частоте спектра.

Фазо-частотные искажения обусловлены нелинейностью фазовой характеристики приёмника, под которой понимается зависимость фазы  $\varphi$  первичного сигнала на выходе приёмника от частоты  $F$  (рис.9.8).

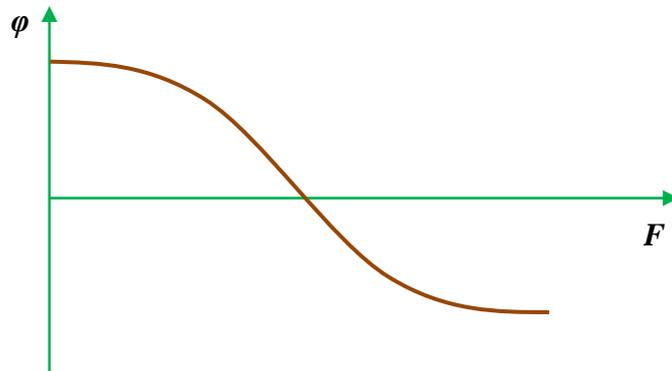


Рис.9.8. Зависимость фазы  $\varphi$  первичного сигнала на выходе приёмника от частоты  $F$

Различные виды искажений по-разному влияют на различные виды принимаемых сигналов. Например, при приёме телефонных сигналов большое значение имеют нелинейные искажения, тогда как фазочастотные не существенны, поскольку человеческое ухо не реагирует на изменение фазы звуковых колебаний. В то же время при приёме радиоимпульсных сигналов фазочастотные искажения очень существенно искажают выходные видеоимпульсы.

Время перестройки приёмника определяет надёжность радиосвязи. В настоящее время перестройки исчисляется долями секунды.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит назначение радиоприемника?
2. Из каких элементов состоит колебательный контур? Назначение контура.

3. Как происходит выделение нужной частоты контура?
4. Приведите классификацию РПрУ.
5. Какие операции выполняет профессиональное радиоприемное устройство?
6. Дайте определение диапазона рабочих частот.
7. Что характеризует чувствительность приемника?
8. Что такое избирательность приемника?
9. Дайте определение частотной точности приёмника.
10. Опишите особенности нелинейных, амплитудно-частотных и фазо-частотных искажений.

## 10. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ

### 10.1. Простейшая структурная схема радиоприемника

Простейшая структурная схема радиоприемника представлена на рис. 10.1. Принятый антенной радиосигнал с частотой  $f_c$  поступает в тракт высокой частоты (ТВЧ), в котором осуществляются частотная избирательность и усиление, возможно преобразование частоты, амплитудная и временная избирательность. Детектор (Д) преобразует принимаемые модулированные сигналы в напряжение, соответствующее передаваемому сообщению, в тракте частоты модуляции FM (ТЧМ) реализуется последетекторная обработка сигналов: усиление, дополнительные преобразования для ослабления действия помех, декодирование и разделение сообщений (в многоканальных системах).



Рис.10.1. Простейшая структурная схема радиоприемника

### 10.2. Структурная схема радиоприемника прямого детектирования

Структурные схемы радиоприемников различаются прежде всего построением ТВЧ. Наиболее простым является принцип построения приемника прямого детектирования (детекторного), структурная схема которого представлена на рис.10.2.

Входная цепь (ВЦ) в виде резонансной системы или фильтра обеспечивает частотную избирательность РПрУ, настройка на частоту

принимаемого сигнала осуществляется перестройкой или переключением ВЦ. Принципиальным является отсутствие усиления сигнала до детектора, ведущее к серьезному упрощению устройства приемника, но одновременно обуславливающее его низкую чувствительность и избирательность. Указанные недостатки такой схемы не устраняются наличием усилителя частоты модуляции (УЧМ). Вследствие этого в настоящее время РПрУ прямого детектирования применяются практически лишь в миллиметровом, децимиллиметровом и оптическом диапазонах волн.

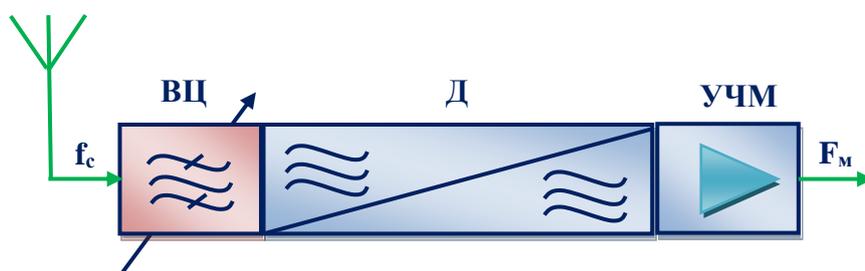


Рис. 10.2. Структурная схема радиоприемника прямого детектирования

### 10.3. Структурная схема радиоприемника прямого усиления

Структурная схема приемника прямого усиления представлена на рис. 10.3. От описанного выше этот приемник отличается наличием усилителя радиочастоты (УРЧ) и, как следствие, значительно большими чувствительностью и избирательностью. Входная цепь и избирательные цепи УРЧ настроены на частоту принимаемого радиосигнала, на которой и осуществляется усиление, причем ВЦ обеспечивает предварительную, а УРЧ основную частотную избирательность и значительное усиление сигнала. В диапазонах, в которых определяющую роль в чувствительности РПрУ играют его собственные шумы, в качестве УРЧ используют малошумящий

усилитель (МШУ). Перестройка такого приемника по частоте требует согласованной перестройки всех резонансных систем ВЦ и УРЧ.

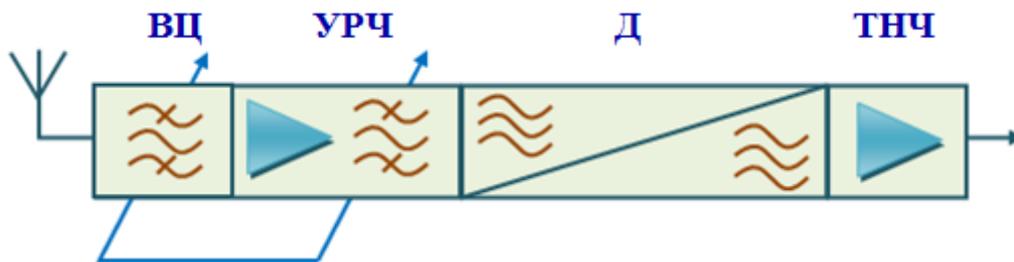


Рис. 10.3. Структурная схема радиоприемника прямого усиления

### 10.4. Структурная схема супергетеродинного радиоприемника

Революция произошла в 1913 году, когда гениальный американский изобретатель Эдвин Армстронг предложил схему супергетеродинного приемника. Схема оказалась настолько удачной, что до настоящего времени девять из десяти приемников работают на этом принципе.

Смысл загадочного слова супергетеродин заключается в том, что выделенный входным контуром высокочастотный сигнал сначала преобразуется в другую частоту, постоянную для данного типа приемника, а затем на этой, так называемой промежуточной частоте, производится усиление основного сигнала и ослабление мешающих (рис.10.4).

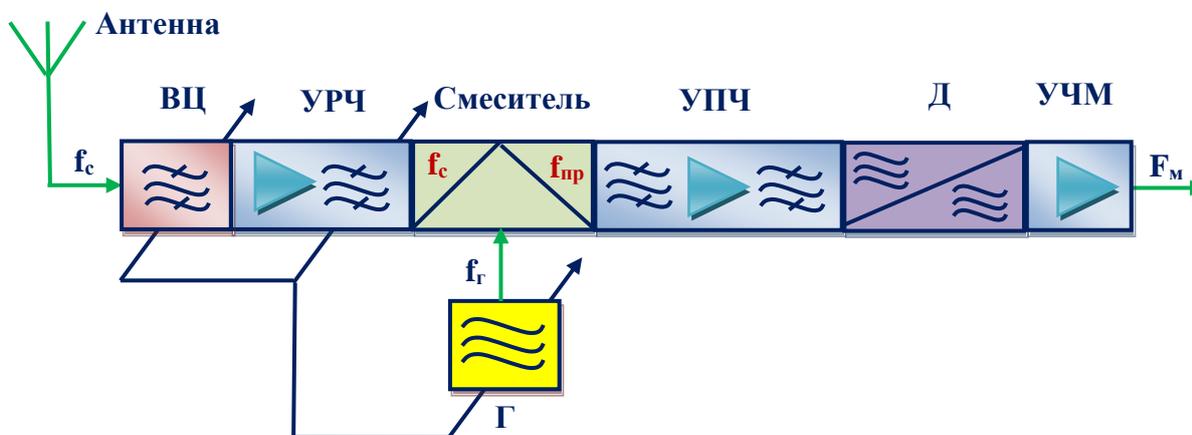


Рис.10.4. Структурная схема супергетеродинного приемника

Таким образом, существенное улучшение большинства показателей приемника достигается на основе принципа преобразования частоты принимаемого сигнала — переноса его в частотную область, где он может быть обработан с наибольшей эффективностью. Самое широкое распространение во всех радиодиапазонах получила построенная на этом принципе схема супергетеродинного приемника. В таком приемнике сигналы частоты  $f_c$  преобразуются в преобразователе частоты (ПЧ), состоящем из смесителя (См) и генератора вспомогательных колебаний - гетеродина (Г), в колебания фиксированной, так называемой промежуточной частоты  $f_{np}$ , на которой и осуществляются основное усиление и частотная избирательность.

Наиболее полная структурная схема супергетеродинного приемника с однократным преобразованием частоты приведена на рис. 10.5.

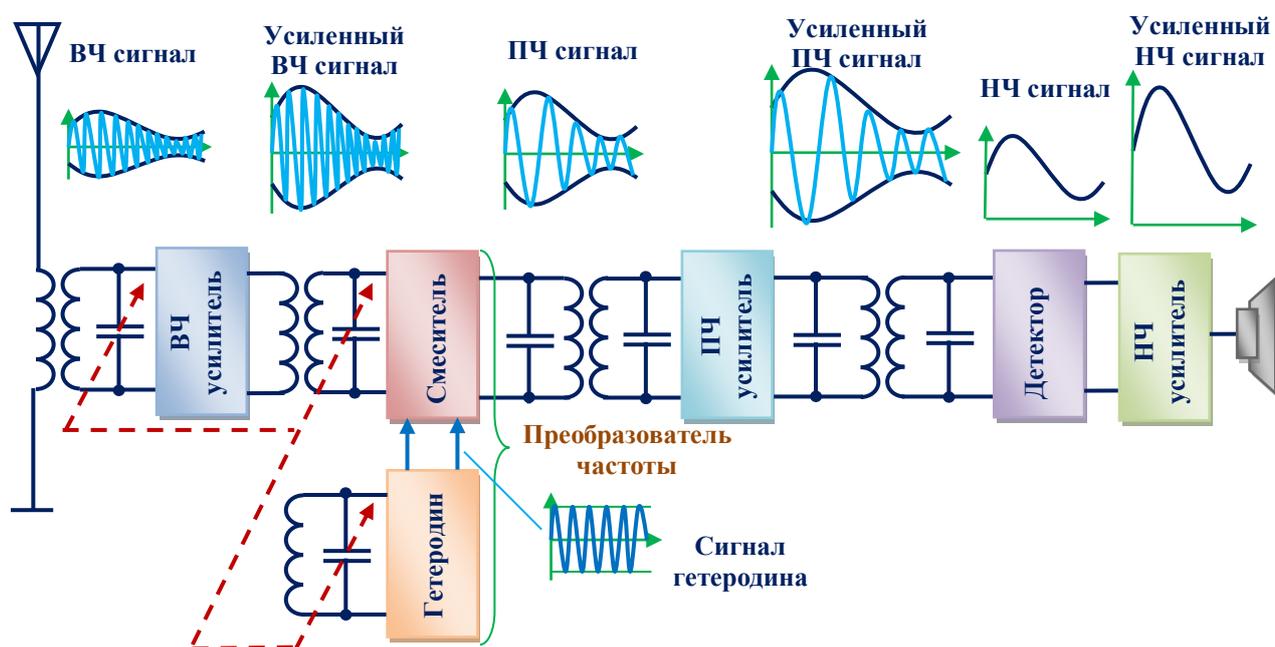


Рис. 10.5. Полная структурная схема супергетеродинного приемника

Гетеродин — это маломощный перестраиваемый генератор. Оказывается, генератор применяется во всех современных приемниках, но его функции отличаются от функций выполняемых в радиопередатчиках.

В приемнике генератор вырабатывает колебания, которые в дальнейшем складываются с радиочастотой. Причем, как видно из схемы, частота гетеродина синхронно изменяется вместе с настройкой входного контура (с помощью многосекционного КПЕ). Это нужно для того, чтобы частота сигнала, полученная после сложения, всегда оставалась постоянной. Это будет промежуточная частота (ПЧ). Она не зависит от выбранного диапазона настройки и от частоты принимаемой радиостанции.

Постоянство ПЧ, получаемой на выходе смесителя, позволяет гораздо эффективней отфильтровать нежелательные сигналы (радиочастоты соседних радиопередатчиков, эфирные помехи и т.п.). Это связано с тем, что конструктивно легче создать качественный фильтр на постоянную частоту, нежели на меняющуюся. Промежуточная частота выбирается таким образом, чтобы ее значение не попадало в область частот передающих радиостанций (обычно 465 кГц в отечественной аппаратуре и 455 кГц – в импортной). Кроме того, относительно низкая ПЧ не так требовательна к качеству применяемых элементов (транзисторов, микросхем, фильтров, конденсаторов). Они могут быть низкочастотными и, следовательно, более дешевыми.

### **10.5. Структурная схема супергетеродинного приемника с двойным преобразованием частоты**

В приемной части современных радиостанций в большинстве случаев применяется более сложный вид супергетеродинной схемы. Так называемый супергетеродин с двойным преобразованием частоты. От обычного супергетеродина он отличается наличием второго преобразователя и второй

промежуточной частоты. Это позволяет обеспечить еще большую чувствительность, избирательность и помехозащищенность. Схема супергетеродина с двойным преобразованием похожа на схему обычного супергетеродина, но с добавлением еще одного гетеродина, смесителя, а также соответствующих каскадов усиления и фильтрации. Первая промежуточная частота обычно более высокая (10.7, 17, 21, 45... МГц), а вторая более низкая (455 МГц).

В отличие от сравнительно простой схемы приемника прямого преобразования, супергетеродинный приемник, как правило, содержит несколько каскадов преобразования частоты, которые, в свою очередь, содержат фильтры, усилители, смесители и гетеродины (рис. 10.6).

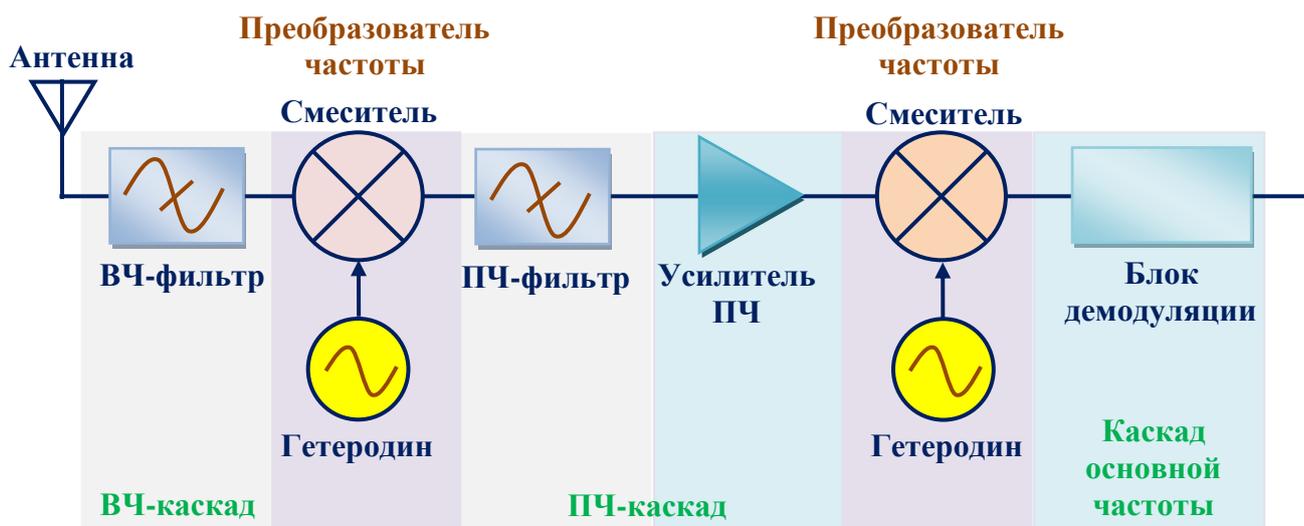


Рис. 10.6. Блок-схема супергетеродинного приемника с двойным преобразованием частоты

Такая архитектура приемника обеспечивает превосходную избирательность и чувствительность. В отличие от приемника прямого преобразования, в котором частоты гетеродина синхронизированы с частотой входного ВЧ-сигнала, супергетеродинный приемник использует

частоту гетеродина, которая смещена на фиксированную величину относительно частоты полезного сигнала. Такое смещение частоты позволяет получить промежуточную частоту, сгенерированную путем смешивания сигнала гетеродина с ВЧ-сигналом с помощью нелинейного устройства — диодного или FET-смесителя.

В качестве гетеродина часто используется синхронный генератор, управляемый напряжением (ГУН), работающий в диапазоне частот преобразования входного ВЧ-сигнала в сигнал ПЧ. В последнее время для генерирования сигналов гетеродина в беспроводных приемниках используется и ряд других методов стабилизации частоты, включая прямой цифровой синтез (*direct-digital-synthesis* — *DDS*), а также применение аналоговых синтезаторов с дробным (*fractional-N*) и целочисленным (*integer-N*) коэффициентом деления. Любой метод построения гетеродина должен обеспечивать необходимый частотный диапазон сигналов с возможностью ступенчатого повышения частоты в полосе частот системных каналов. Гетеродин должен обеспечивать достаточную мощность сигнала, подаваемого на смеситель. В некоторых случаях на выходе гетеродина включают буферный усилитель, который обеспечивает уровень выходного сигнала, достаточный для компенсации потерь на преобразование в смесителе. Смесители являются интегральной частью ВЧ-тракта любого современного приемника. Частотные смесители могут быть основаны на различных нелинейных устройствах, таких как диоды и полевые транзисторы.

## 10.6. Примеры реализации простых схем супергетеродинных радиоприемников

Принципиальная схема УКВ ЧМ приемника приведена на рис. 10.7.

На транзисторе  $VT1$  собран каскад детектора с фазовой автоподстройкой частоты. Данный каскад представляет собой приемник прямого преобразования (по аналогии с супергетеродином). Входной контур настраивается на среднюю частоту принимаемого диапазона радиоволн. Контур  $L2C4$  - контур гетеродина. Входной и гетеродинный сигналы смешиваются, разностная (звуковая) частота выделяется на резисторе нагрузки транзистора ( $R3$ ). Конденсатор  $C6$  фильтрует вредную высокочастотную составляющую сигнала. Сигнал звуковой частоты поступает на усилительный каскад на транзисторе  $VT2$ . Нагрузкой усилителя ЗЧ служат миниатюрные телефоны "затычки" от плеера, включенные последовательно.

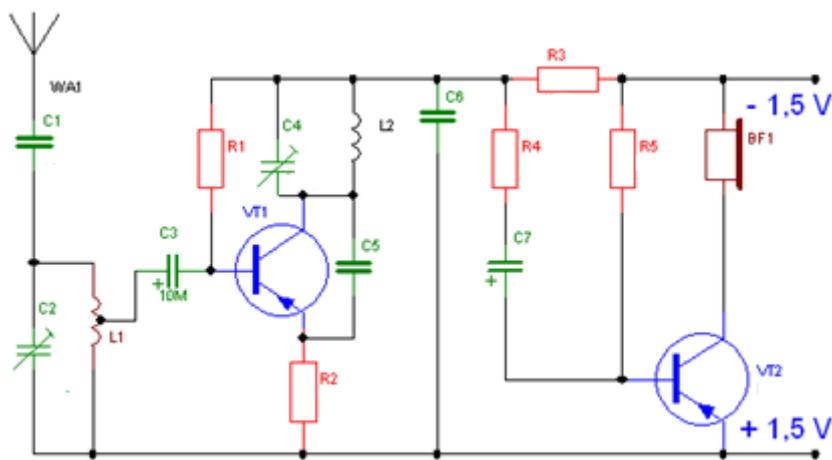


Рис. 10.7. Принципиальная схема УКВ ЧМ приемника

Схема приемника на ИМС серии  $K174$  показана на рис. 10.8. В серии  $K174$  имеется интересная микросхема, содержащая все узлы стандартного супергетеродинного радиовещательного приемника: преобразователь

частоты, УПЧ и УЗЧ с выходной мощностью до 0,5 Вт. Это *МС К174ХА10*, работоспособная при напряжении питания от 3 до 9 В и потребляющая (при малой громкости) 8-10 мА. Используя часть ее узлов, можно собрать и простой приемник прямого усиления. Преобразователь частоты в этом варианте не используется, УПЧ служит как УРЧ, а детектор и УЗЧ работают по прямому назначению.

Для повышения чувствительности использован истоковый повторитель на транзисторе *VT1*. Продетектированный сигнал ЗЧ подается через фильтрующую цепочку *C8 - R3 - C9* на регулятор громкости *R4* и далее, на вход УЗЧ.

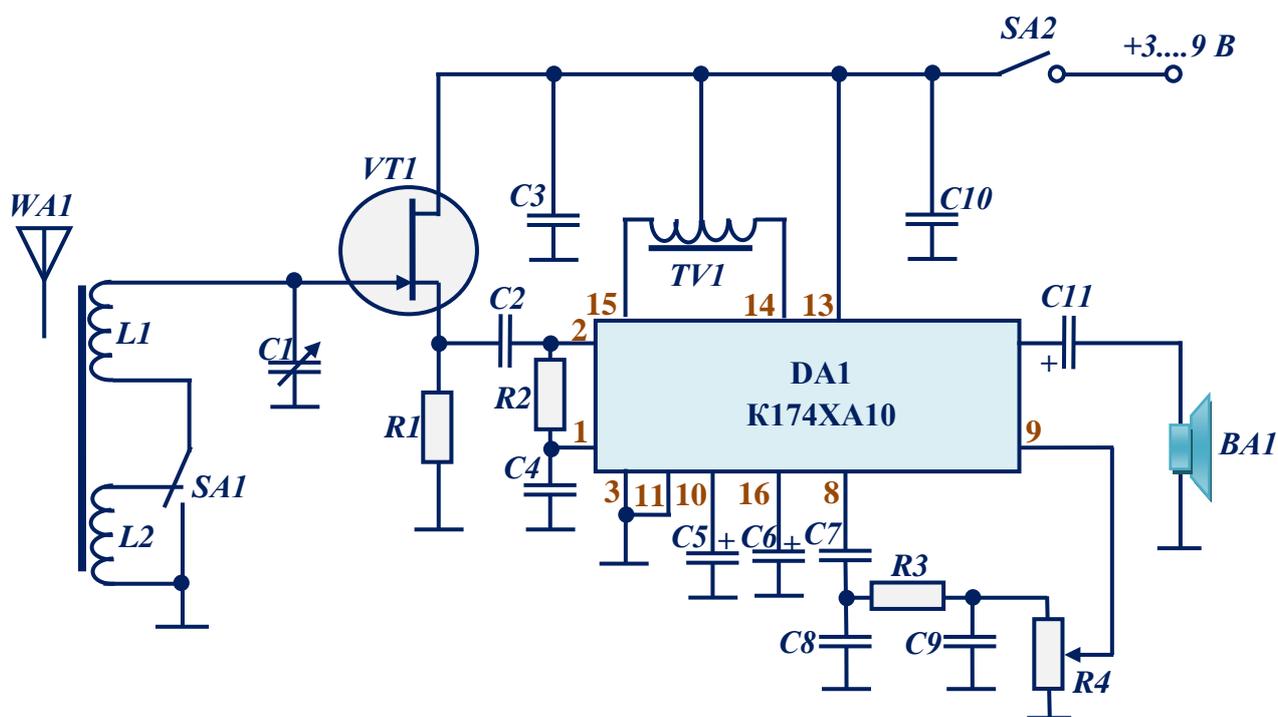


Рис. 10.8. Схема приемника на ИМС серии *К174*

## Контрольные вопросы

1. Приведите простейшую структурную схему радиоприемника и объясните принцип его работы?
2. Приведите структурную схему радиоприемника прямого детектирования и объясните принцип его работы?
3. Приведите принципиальную схему и формы сигналов на различных точках радиоприемника прямого детектирования и объясните принцип его работы?
4. Приведите структурную схему радиоприемника прямого усиления и объясните принцип его работы?
5. Приведите структурную схему радиоприемника с преобразованием частоты и объясните принцип его работы?
6. Приведите полную структурную схему супергетеродинного радиоприемника и объясните принцип его работы?
7. В чем состоит назначение гетеродина?
8. Приведите простейшую принципиальную схему УКВ ЧМ приемника и объясните принцип его работы?
9. Приведите принципиальную схему приемника на ИМС и объясните принцип его работы?
10. Приведите структурную схему супергетеродинного радиоприемника с двойным преобразованием частоты и объясните принцип его работы?

# 11. УСИЛИТЕЛИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ В РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

## 11.1. Общие понятия об усилителях радиочастоты

Электронные устройства, служащие для усиления сигналов высокой частоты называются радиочастотными (или высокочастотными) усилителями. Усилители радиочастоты осуществляют усиление радиосигнала на принимаемой частоте. УРЧ выполняют в приёмнике важнейшие функции:

Во-первых, УРЧ должны обеспечить усиление принимаемых радиосигналов при незначительном добавлении собственных шумов. Этим самым улучшается реальная чувствительность приёмника. Для её улучшения необходимо на входе приёмника использовать каскады, обладающие малыми собственными шумами и возможно большим коэффициентом усиления по мощности.

Во-вторых, совместно с входными цепями обеспечивают избирательность по внеполосным каналам приёма и защиту цепи антенны от проникновения сигнала собственного гетеродина, который может создать помеху соседним радиоприёмным устройствам.

В качестве усилительных приборов в УРЧ используют: транзисторы (биполярные и полевые), ЛБВ, туннельные, параметрические диоды и т. д. Вследствие того, что некоторые усилительные приборы (биполярные транзисторы) обладают большой входной и выходной проводимостью, поэтому непосредственное их подключение к избирательной цепи привело бы к сильному её шунтированию и ухудшению усилительных и

избирательных свойств усилителя. Для ослабления шунтирующего действия этих проводимостей осуществляется неполное включение избирательной цепи к выходу усилительного прибора и к входу следующего каскада (рис. 11.1).

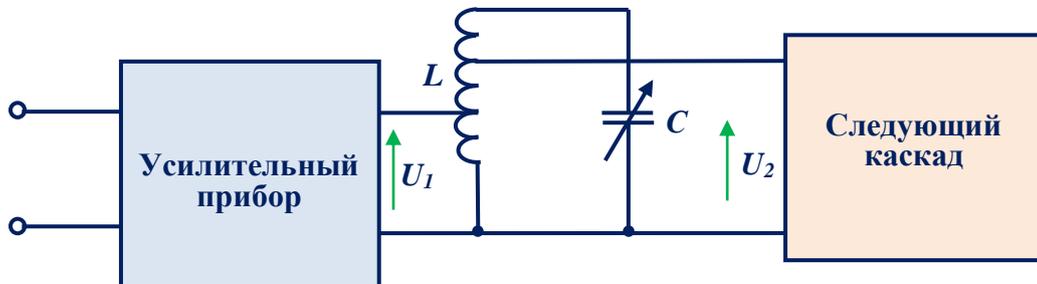


Рис. 11.1. Неполное включение избирательной цепи к выходу усилительного прибора и к входу следующего каскада

## 11.2. Требования к усилителям радиочастоты

В качестве избирательной системы используется колбательный контур. В некоторых случаях применяются и взаимосвязанные колбательные контуры. Избирательные цепи и цепи связи образуют межкаскадные цепи связи и к этим цепям возлагаются следующие задачи:

- согласование выходного сопротивления усилительного элемента и входного сопротивления следующего каскада;
- передачи энергии от усилительного элемента к нагрузке;
- обеспечение нужной частоты, способа передачи и избирательности.

При этом к цепям связи предъявляются следующие требования:

- согласование выходного сопротивления УРЧ и входного сопротивления следующего каскада;
- передачи энергии усилительного элемента к нагрузке;

- обеспечение нужной частоты, способа передачи и избирательности.

К УРЧ предъявляются следующие требования:

- снижение собственного шума и обеспечение большого коэффициента передачи;
- обеспечение большого коэффициента избирательности не только по основному каналу, но и по каналам промежуточной частоты;
- не допустить проход сигнала гетеродина к цепи антенны и др.

### 11. 3. Классификация усилителей радиочастоты

Усилители радиочастоты по своим специфичным признаками подразделяются на следующие виды:

- по виду используемого усилительного элемента: ламповые, транзисторные, тиристорные, квантовые, парамагнитные (на СВЧ вакуумных приборах – клистронах, магнетронах, лампах бегущей волны – ЛБВ) и другие;

- по виду схемы включения усилительного элемента: усилители с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК), общим затвором (ОЗ), общим стоком (ОС) и общим истоком (ОИ) функционирующие в режимах А, В, АВ, С и других;

- по виду избирательной системы: непосредственная, трансформаторная, автотрансформаторная и емкостная;

- по числу каскадов в составе: однокаскадные и многокаскадные;

- по виду нагрузки: резонансные или апериодические.

Так как усилитель радиочастоты находится на входе радиоприемного устройства, то его шумовые характеристики и динамический диапазон в

основном определяют характеристики всего устройства в целом. Именно коэффициент шума усилителя радиочастоты определяет чувствительность радиоприемника.

В связи с микроминиатюризацией современной элементной базы и связанной с ней миниатюризацией узлов радиоприемного устройства сейчас на СВЧ возможно применение схемотехнических решений, которые ранее применялись на значительно более низких частотах. Это связано с тем, что размеры блока относительно длины волны рабочего колебания становятся меньше одной десятой длины волны и в результате при разработке этого блока можно пренебречь волновыми эффектами при распространении колебаний.

#### **11.4. Принципиальная схема УРЧ с резонансным контуром**

Усилители, нагрузкой которых является колебательный контур называются резонансными усилителями. При этом колебательный контур настраивается на заранее определенную частоту полезного сигнала и на этой частоте переходит в состояние резонанса. А в резонансном состоянии колебательный контур пропускает только полезный сигнал.

Принципиальная схема УРЧ с резонансным контуром приведена на рис.11.2.

В схеме сигнал с входной цепи подается на усилительный элемент. Согласно теории электрических цепей при резонансе сопротивление колебательного контура будет активное и будет иметь большое значение. Поэтому сигнал, поступающий на усилительный элемент создает на большом сопротивлении большое падение напряжение. Значит радиосигнал

усиливается. Кроме того, радиосигнал усиливается на основе особенностей усилительных элементов. При таком усилении есть доля и источника напряжения. Обычно при таком способе усиления сигнал усиливается не только по напряжению, но и по мощности.

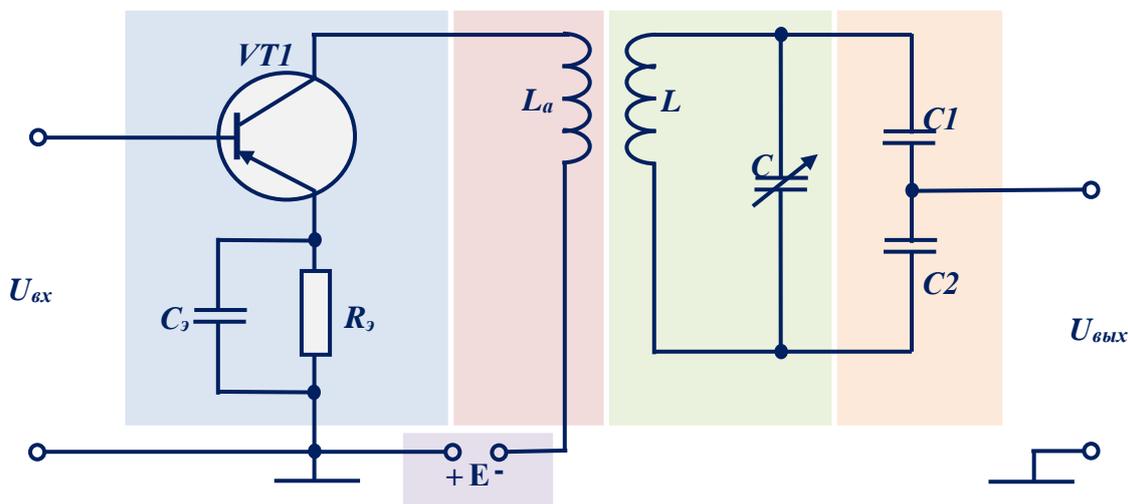


Рис. 11.2. Принципиальная схема УРЧ с резонансным контуром

### 11.5. Принципиальная схема апериодического УРЧ

Усилители, нагрузкой которых является активное сопротивление называются апериодическими усилителями. Коэффициент усиления апериодических усилителей всегда меньше коэффициента усиления резонансных усилителей.

На высоких частотах наилучшими характеристиками обладает схема включения транзистора с общей базой. В этой схеме транзистор обладает лучшей линейностью за счет внутренней обратной связи. Кроме того, расширяется его частотная характеристика. Малая проходная емкость коллектор-эмиттер не создает условия для паразитного самовозбуждения схемы усилителя.

Дополнительное повышение устойчивости схемы достигается включением фильтров нижней частоты на входе и выходе транзисторного каскада. Эти фильтры рассчитываются на всю полосу частот, в которой транзистор сохраняет усилительные свойства. В результате во всем диапазоне частот не выполняется баланс фаз и самовозбуждение становится невозможным. Этот же фильтр осуществляет преобразование входного и выходного сопротивления транзистора к стандартному сопротивлению 50 Ом. Входная и выходная емкость включается в состав фильтра. Пример подобной схемы усилителя радиочастоты приведен на рис.11.3.

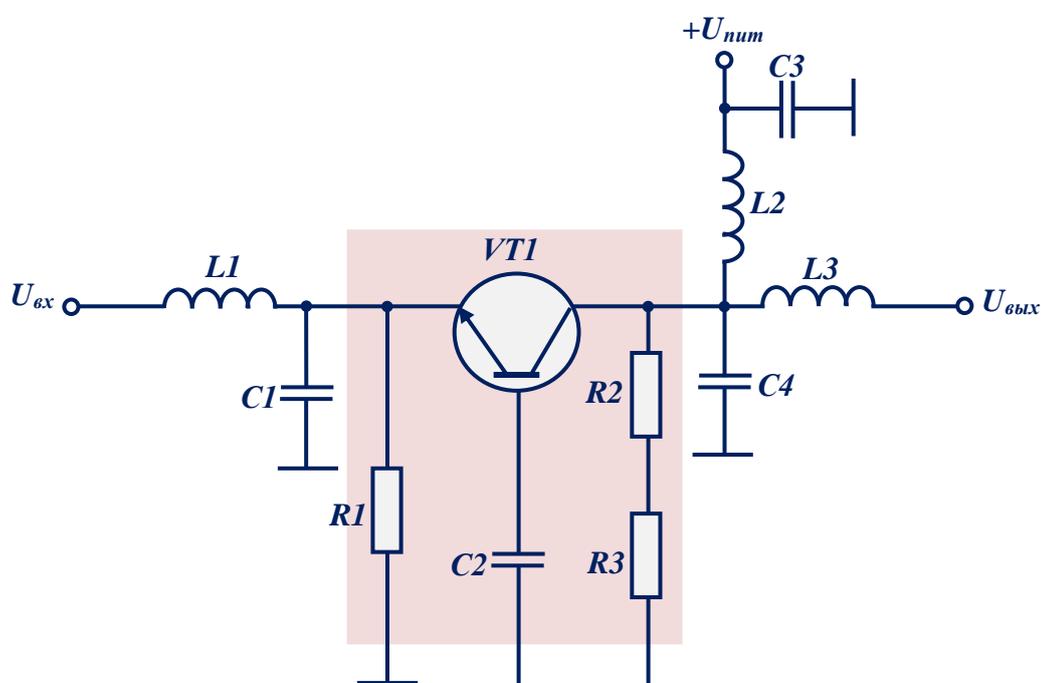


Рис.11.3. Принципиальная схема усилителя радиочастоты с входным и выходным сопротивлением 50 Ом на транзисторе с общей базой

В данной схеме резисторы  $R1...R3$  реализуют эмиттерную стабилизацию режима работы транзистора по постоянному току. Конденсатор  $C2$  обеспечивает заземление базы транзистора по высокой частоте, а конденсатор  $C3$  фильтрует цепи питания от помех. Дроссель  $L2$

является нагрузкой коллектора транзистора  $V_{T1}$ . Он пропускает ток питания в цепь коллектора  $V_{T1}$ , но при этом развязывает источник питания по переменному току радиочастоты. Фильтры низкой частоты  $L1$ ,  $C1$  и  $C4$ ,  $L3$  обеспечивают трансформацию входного и выходного сопротивления транзистора в 50 Ом. Примененная схема фильтра низкой частоты позволяет включить в его состав входную или выходную емкость транзистора. Входная емкость транзистора  $V_{T1}$  совместно с емкостью  $C1$  образует входной фильтр усилителя, а выходная емкость этого же транзистора совместно с емкостью  $C4$  образует выходной фильтр низкой частоты.

### **11.6. Каскадная схема усилителя радиочастоты**

Еще одной распространенной схемой усилителей радиочастоты является схема каскадного усилителя. В этой схеме последовательно соединяются два транзисторных каскада с общим эмиттером и с общей базой. Подобное решение позволяет дополнительно уменьшить значение проходной емкости усилителя. Наиболее распространенной схемой каскадного усилителя является схема с гальванической связью между транзисторными каскадами. Пример схемы каскадного усилителя радиочастоты, собранной на биполярных транзисторах, приведен на рис.11.4.

В данной схеме, точно так же как и в схеме, приведенной на рис.11.3, применена схема эмиттерной стабилизации рабочей точки транзистора  $V_{T2}$ . Конденсатор  $C6$  обеспечивает устранение отрицательной обратной связи на частоте принимаемого сигнала. В ряде случаев этот конденсатор не ставится для увеличения линейности усилителя и для того, чтобы уменьшить коэффициент усиления усилителя радиочастот.

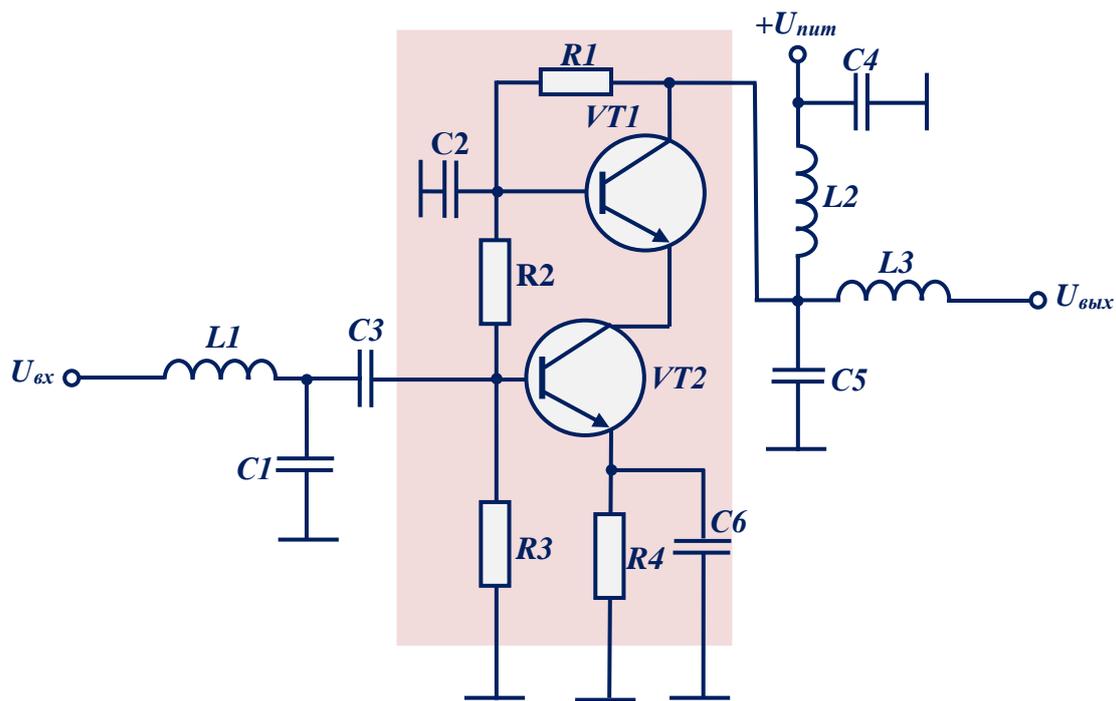


Рис. 11.4. Принципиальная схема каскодного усилителя радиочастоты

Конденсатор  $C2$  обеспечивает заземление базы транзистора  $VT1$  по переменному току. Конденсатор  $C4$  осуществляет фильтрацию источника питания по переменному току. Резисторы  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  определяют рабочие точки транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ . Конденсатор  $C3$  развязывает базовую цепь транзистора  $VT2$  по постоянному току от предыдущего каскада (входного полосового фильтра). Нагрузкой цепи коллектора по переменному току служит дроссель  $L2$ . Как и в схеме усилителя радиочастоты с общей базой на входе и выходе каскадного усилителя применены фильтры низкой частоты. Основное их назначение - обеспечить трансформацию входного и выходного сопротивления в значение 50 Ом.

## 11.7. УРЧ на интегральной микросхеме

В настоящее время схемы усилителей радиочастоты выпускаются рядом фирм в виде готовых микросхем. Для примера можно назвать такие микросхемы как *RF3827*, *RF2360* фирмы *RFMD*, *ADL5521* фирмы *Analog Devises*, *MAALSS0038*, *AM50-0015* фирмы *M/A-COM*. В данных микросхемах применяются арсенид-галлиевые полевые транзисторы. Верхняя усиливаемая частота может достигать значения 3ГГц. При этом коэффициент шума колеблется в пределах от 1,2 до 1,5 дБ. Пример принципиальной схемы усилителя радиочастоты с применением интегральной микросхемы *MAALSS0038* фирмы *M/A-COM* приведен на рис.11.5.

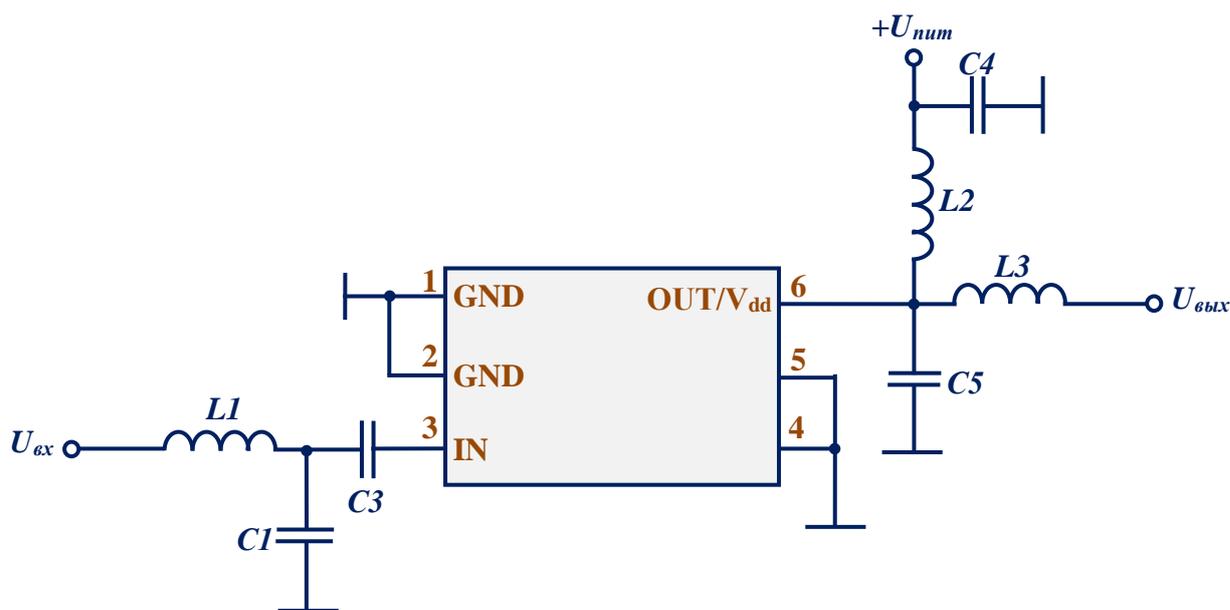


Рис.11.5. Принципиальная схема усилителя радиочастоты с применением интегральной микросхемы *MAALSS0038*

## 11.8. Показатели усилителей радиочастоты

Качественные показатели усилителей радиочастоты следующие:

### **Коэффициент усиления по напряжению:**

$$K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$$

### **Коэффициент усиления по мощности:**

$$K_P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$$

Резонансные УРЧ имеют максимальное усиление  $K_0$  на резонансной частоте избирательной цепи. На частотах, отличных от резонансной, коэффициент усиления будет меньше  $K_0$ . Зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты называется его амплитудно-частотной характеристикой. Важным параметром является постоянство  $K_U$  и  $K_P$  по диапазону частот.

**Коэффициент шума** характеризует шумовые свойства усилителя. Источниками флуктуационных шумов в усилителе являются входное сопротивление усилителя, колебательные контуры, электронные и полупроводниковые приборы. Шумы входного сопротивления усилителя образуют входные шумы, а шумы, возникшие в элементах усилителя, называют собственными шумами. Для характеристики шумовых свойств усилителей с малым уровнем собственных шумов ( $N_{ш} < 2$ ) используют параметр шумовая температура ТШ. Под шумовой температурой ТШ понимают такую температуру, при которой сопротивление входа усилителя  $R_{ВХ}$  создаёт на выходе усилителя шумы, мощность которых равна мощности собственных шумов усилителя.

$$T_{Ш} = T_0(N_{Ш} - 1)$$

**Избирательность УРЧ** определяется избирательностью резонансной системы, входящей в его состав. Количественно избирательность  $\sigma_U$  характеризуется числом, показывающим, во сколько раз уменьшается коэффициент усиления  $K_{\Delta f}$  по сравнению с резонансным  $K_0$  при заданной расстройке  $\Delta f$

$$\sigma_U = K_0 / K_{\Delta f}$$

**Коэффициент прямоугольности  $K_n$**  равен отношению полосы пропускания на уровне 0,707 к полосе пропускания при заданном ослаблении  $a$ . Значение ослабления обычно выбирают кратным десяти (10, 100, 1000, и т. д. или 20, 40, 60 дБ).

Коэффициент прямоугольности равен отношению полосы пропускания на уровне 0,707 к полосе на уровне 0,1 (рис. 11.6)

$$K_{n0.1} = \Delta F_0 / \Delta F_{0.1}$$

Подобным же образом можно определить другие коэффициенты прямоугольности.

$$K_{n0.01} = \Delta F_0 / \Delta F_{0.01}; K_{n0.001} = \Delta F_0 / \Delta F_{0.001}$$

**Искажения сигнала.** В УРЧ, собственно как и в радиоприёмнике в целом, возможны три вида искажения: амплитудно-частотные искажения,

полностью определяемые формой избирательной системы; фазо-частотные искажения являются следствием нелинейности ФЧХ, нелинейные искажения, вследствие низкого уровня полезного сигнала, определяются в основном внеполосной сильной помехой.

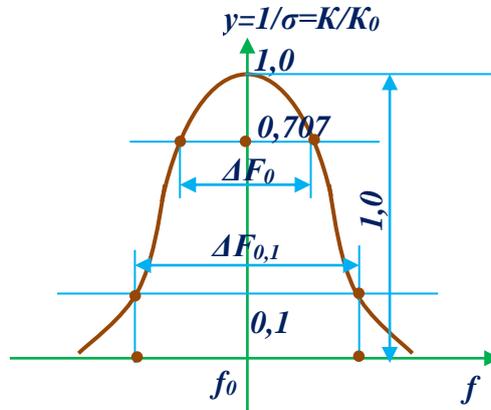


Рис. 11.6. Отношение полосы пропускания на уровне 0,707 к полосе на уровне 0,1

**Динамический диапазон** оценивается по амплитудной характеристике УРЧ (рис. 11.7).

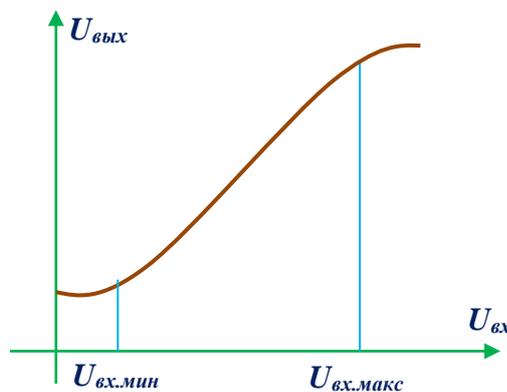


Рис. 11.7. Амплитудная характеристика УРЧ

Количественно динамический диапазон выражается в логарифмических величинах

$$D = 20 \lg(U_{вх.макс}/U_{вх.мин})$$

$U_{вх.мин}$  – ограничивается уровнем собственных шумов,

$U_{вх.макс}$  – допустимыми нелинейными искажениями.

**Устойчивость работы** – сохранение всех параметров от всевозможных возмущений, допустимых в условиях эксплуатации.

**Перекрытие заданного диапазона частот** с сохранением всех параметров в допустимых пределах.

### Контрольные вопросы

1. Назначение усилителей радиочастоты.
2. Какие требования предъявляются к усилителям радиочастоты?
3. Как классифицируются усилители радиочастоты?
4. Из каких элементов состоят усилители радиочастоты?
5. В чём состоит назначение межкаскадных цепей связи?
6. Приведите схему апериодического усилителя радиочастоты и объясните принцип его работы?
7. Приведите схему усилителя радиочастоты с резонансным контуром и объясните принцип его работы?
8. Перечислите основные показатели усилителей радиочастоты?
9. Что характеризует собой коэффициент прямоугольности?
10. Приведите схему каскадного усилителя радиочастоты и объясните принцип его работы?

## 12. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ В РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

### 12.1. Общие сведения о преобразовании частоты

Преобразование частоты сигнала – это процесс, который обеспечивает линейный перенос спектра сигнала на оси частот без изменения его структуры (рис. 12.1). Огибающая сигнала и его начальная фаза при этом не изменяются. Другими словами, преобразование частоты не искажает закон изменения амплитуды, частоты или фазы модулированных колебаний.

**Сигнал:**  $f_{c. пр.} = |f_c - f_r| = f_{п}$

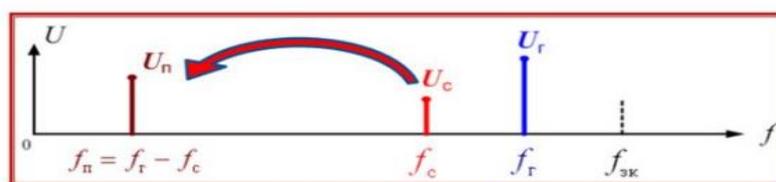


Рис. 12.1. Преобразование частоты сигнала

Преобразование частоты сигнала осуществляется преобразователями частоты. Преобразователь частоты применяется в радиоприемниках, построенных по супергетеродинной схеме, в устройствах генерирования и формирования сигнала (в радиопередатчиках, синтезаторах частот), различных радиоизмерительных приборах (селективных вольтметрах, анализаторах спектра, модулометрах и девиометрах, установках для измерения ослаблений).

Например, в супергетеродинном радиоприемнике с фиксированным значением промежуточной частоты перенос полосы радиочастот сигнала вниз (реже - вверх) позволяет применять неперестраиваемый сложный

фильтр основной селекции с высокой прямоугольностью частотной характеристики для подавления помех по соседнему каналу (то есть качественно улучшить частотную избирательность по сравнению с радиоприемником прямого усиления), а также использовать усилитель промежуточной частоты, более эффективный по сравнению с диапазонным усилителем радиочастоты. Перестройка частот такого радиоприемника осуществляется изменением частоты входящего в состав преобразователя частоты гетеродина.

Таким образом, преобразователь частоты – это радиотехническое устройство, осуществляющее процесс переноса спектра радиосигнала из одной области радиочастотного диапазона в другую при сохранении структуры сигнала. В состав преобразователя входят: смеситель, гетеродин и нагрузка для сигнала промежуточной частоты. Процесс преобразования происходит в смесителе (шестиполоснике), содержащем нелинейный элемент, периодически изменяющий один из параметров (рис.12.2).

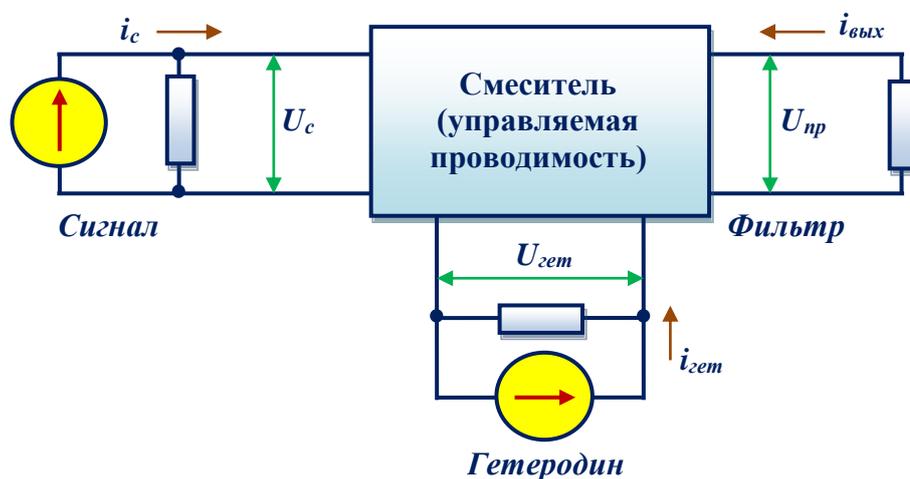


Рис.12.2. Эквивалентная схема преобразователя частоты

В качестве таких элементов используют транзисторы, варикапы и диоды. Если к нелинейному элементу, например к полупроводниковому диоду или

электронной лампе, одновременно подвести два электрических сигнала с разными частотами, то в цепи этого элемента появятся самые различные составляющие каждого из этих сигналов. Среди них будет и переменная составляющая с разностной или, как ее еще называют, промежуточной частотой. Такое название эта составляющая получила потому, что ее частота численно равна разности частот двух сигналов, подведенных к нелинейному элементу. Так, например, если к диоду подвести сигналы с частотами  $f_1=1800$  кГц и  $f_2=1300$  кГц, то в цепи диода появится новая переменная, составляющая с разностной (промежуточной) частотой:

$$f_{np}=1800 - 1300=500 \text{ (кГц)}.$$

Выделить эту составляющую можно с помощью обычного колебательного контура  $L_{np}C_{np}$ , настроенного на частоту 500 кГц.

Появление сигнала промежуточной частоты можно упрощенно объяснить с помощью графиков (рис.12.3, 12.4). Протекая в общей цепи, переменные токи  $I_1$ , и  $I_2$  различных частот  $f_1$  и  $f_2$  суммируются. В некоторый момент времени  $t_1$  оба тока протекают в одном и том же направлении, и амплитуды их складываются. Но постепенно положительная амплитуда тока  $I_2$  с меньшей частотой  $f_2$  будет все больше и больше «запаздывать», и наконец наступит момент  $t_2$ , когда оба тока будут протекать в разных направлениях, а амплитуда общего тока  $I_{общ}$  будет равна разности  $I_1$  и  $I_2$ . Дальнейшее «запаздывание» тока  $I_2$  приведет к тому, что в момент  $t_3$  направления обоих токов вновь совпадут, и общий ток возрастет. Таким образом, амплитуда общего тока  $I_{общ}$  будет периодически изменяться, чем-то

напоминая модулированный сигнал (рис.12.3). Частота изменения амплитуды общего тока как раз и равна разности частот  $f_2-f_1$ .

Это легко доказывается простейшим примером: если частота  $f_1$  равна 10 Гц, а частота  $f_2=8$  Гц, то в течение каждой секунды второе колебание «отстает» от первого на два полных периода, или, иными словами, в течение каждой секунды второе колебание дважды отстает от первого на целый период. Это значит, что дважды в течение каждой секунды амплитуды токов  $I_1$  и  $I_2$  совпадут, и амплитуда общего тока достигнет наибольшей величины. Таким образом, частота изменения амплитуды общего тока равна 2 Гц, то есть равна разности  $f_1$  и  $f_2$  ( $10-8=2$  Гц).

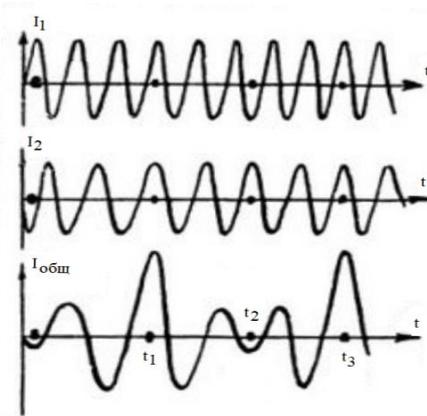


Рис. 12.3. Суммирование двух колебаний тока (без диода)

Рассмотренный нами пример относится к низким частотам, но совершенно то же самое произойдет, если  $f_1$  и  $f_2$  будут измеряться килогерцами или мегагерцами.

Если в общую цепь, где протекает суммарный ток  $I_{общ}$ , включить детектор, то переменный ток будет преобразован в пульсирующий (рис.12.4) и можно будет выделить сигнал с разностной частотой, подобно тому как выделялась низкочастотная составляющая протектированного сигнала. Напомним, что без детектора или другого нелинейного элемента получить

сигнал промежуточной частоты невозможно, точно так же как без детектора из модулированного сигнала невозможно получить низкочастотную составляющую. Объясняется это тем, что сигнал промежуточной частоты, как и низкочастотная составляющая, при детектировании появляется лишь в результате изменения формы сигнала, то есть в результате нелинейных процессов.

До того как модулированный сигнал попал на детектор, это был только высокочастотный сигнал, не содержащий никакой низкочастотной составляющей. Да это и понятно. Ведь низкая частота, если бы она даже поступила в антенну передатчика, не образовала бы радиоволн и тем более не прошла бы через контуры приемника. Точно так же без нелинейного элемента в общей цепи двух генераторов протекал суммарный ток, который с помощью фильтров можно только разделить на две составляющие  $I_1$  и  $I_2$ . Выделив эти две составляющие, не было бы обнаружено в цепи никаких признаков сигнала промежуточной частоты. Этот сигнал может появиться только после включения в цепь нелинейного элемента.

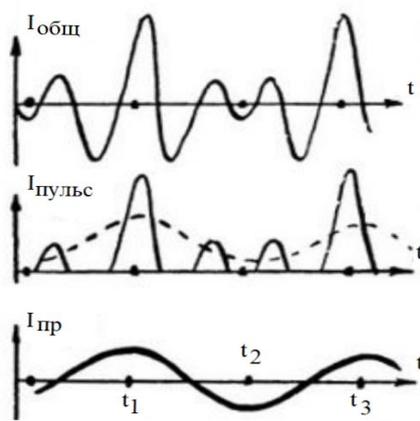


Рис. 12.4. Добавление диода в цепь

Сигнал промежуточной (разностной) частоты несет на себе следы каждого из «породивших» его двух сигналов: если один из этих двух

сигналов будет модулированным, то и сигнал промежуточной частоты окажется промодулированным точно так же.

Как было сказано выше, процесс преобразования частоты реализуется путем умножения преобразуемого сигнала на вспомогательное гармоническое колебание с последующим выделением необходимой области частот. Это можно сделать двумя способами, которые положены в основу построения практических схем преобразователей частоты:

1. Сумма двух напряжений (полезного сигнала и сигнала гетеродина) подается на нелинейный элемент с последующим выделением необходимых составляющих спектра тока. В качестве нелинейных элементов используются диоды, транзисторы и другие элементы с нелинейной характеристикой.

2. Напряжение гетеродина используется для изменения какого-либо параметра смесителя (крутизны ВАХ транзистора, реактивного параметра цепи). Полезный сигнал, подаваемый на вход такого смесителя, преобразуется с соответствующим обогащением спектра.

Классическая *система преобразования частоты* состоит из входного фильтра, гетеродина, смесителя, выходного фильтра промежуточной частоты (ПЧ) (рис. 12.5).

Назначение входного фильтра – ограничить полосу частот входного сигнала. Для упрощения примем, что этот сигнал синусоидальный с частотой  $f_1$ , заданный функцией:

$$X(t) = \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1)$$

где  $f_1$  - частота входного сигнала,

$\varphi_1$  - начальная фаза входного сигнала,  $\pi = 3,141\dots$

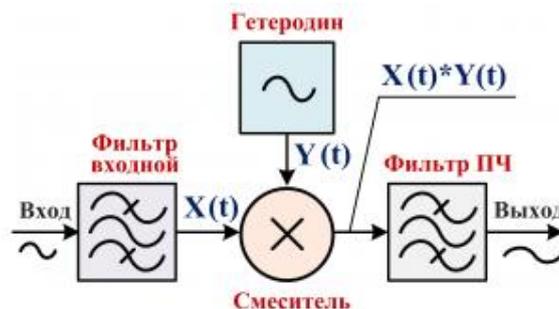


Рис. 12.5. Классическая система преобразования частоты

**Гетеродин** - это синусоидальный генератор с постоянной частотой  $f_2$  и начальной фазой  $\varphi_2$ . Опишем сигнал гетеродина функцией:

$$Y(t) = \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)$$

**Смеситель** представляет собой умножитель сигналов. На выходе смесителя порождается сложный сигнал с функцией:

$$X(t) \cdot Y(t)$$

Учитывая тригонометрическое соотношение:

$$\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2}(\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)),$$

становится понятно, что сигнал на выходе смесителя будет состоять из суммы синусоидальных сигналов с частотами  $f_1 + f_2$  и  $f_1 - f_2$  и соответствующими начальными фазами.

Фильтр промежуточной частоты (это традиционное название из радиотехники) предназначен для выделения одной из частотных компонент:  $f_1 + f_2$  или  $f_1 - f_2$ . Если применяется фильтр, пропускающий частоту  $f_1 + f_2$ , то

соответствующая операция преобразования частоты происходит с **повышением частоты** выходного сигнала, относительно входного. Если применяется фильтр, пропускающий частоту  $f_1-f_2$  (рис.12.6), то преобразование происходит с **понижением частоты**.

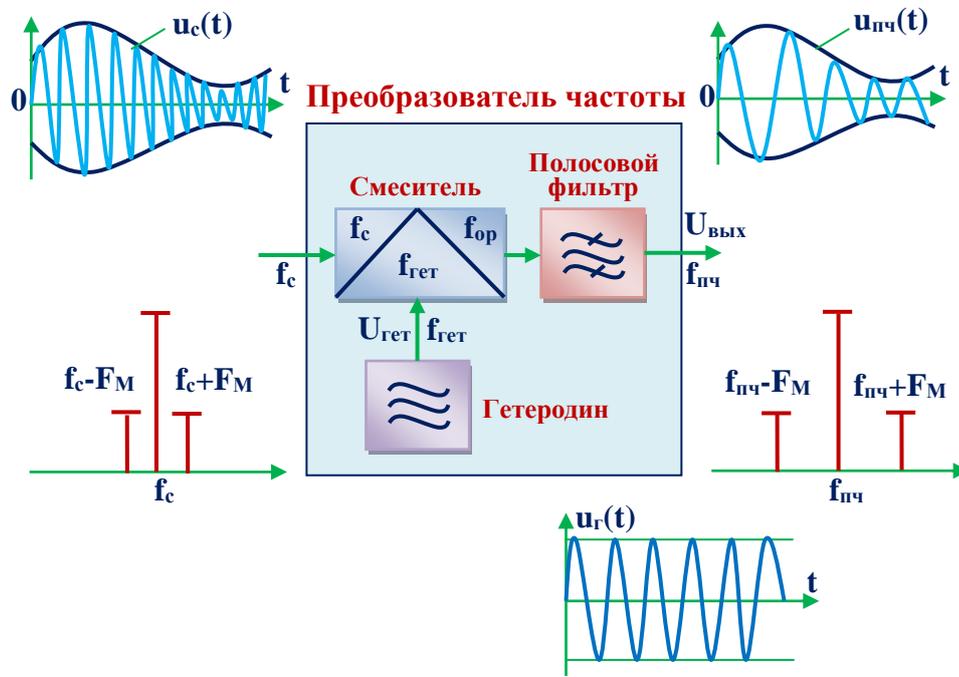


Рис. 12.6. Функциональная схема ПЧ и графики переноса спектра АМ-сигнала

С учётом того, что входной физический сигнал - это не одиночная частота  $f_1$ , а сумма частот в разложении реального сигнала с ограниченной полосой пропускания, понятно, что *операция преобразования частоты* может сдвигать полосу частот сигнала либо влево, либо вправо на частотной оси. И, перестраивая частоту гетеродина, можно управлять либо сдвигом выходной частоты, либо сдвигом входной, в зависимости от цели преобразования.

## 12.2. Диодные схемы смесителей сигналов

Смесители являются интегральной частью ВЧ-тракта любого современного приемника. Частотные смесители могут быть основаны на различных нелинейных устройствах, таких как диоды и полевые транзисторы. Из-за простоты и возможности работы без постоянного смещения диодные смесители преобладают во многих беспроводных системах. Существует несколько топологий смесителей, включая несимметричный смеситель, балансный смеситель и кольцевой балансный смеситель. Возможны и другие варианты этих конфигураций, например, смесители с подавлением зеркального сигнала и смесители на гармонике гетеродина, которые обычно используются на более высоких частотах, часто в миллиметровом диапазоне длин волн.

Простейшим диодным смесителем является несимметричный смеситель, который может состоять из входного трансформатора с согласованием импеданса, единственного диода, ВЧ-дросселя и фильтра низких частот (рис. 12.7).

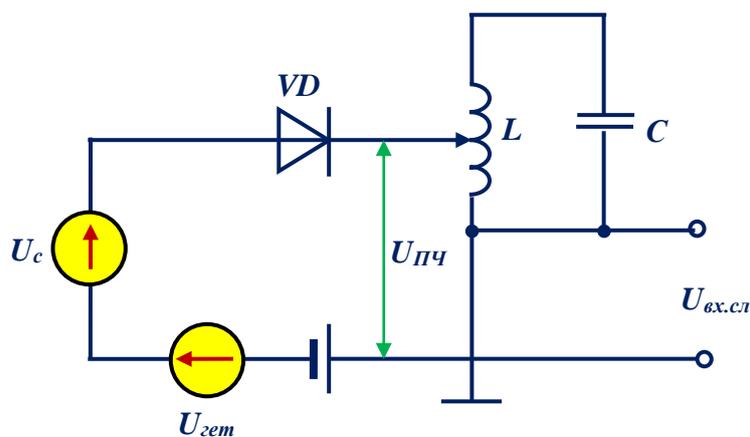


Рис. 12.7. Простейший диодный смеситель

Несимметричный смеситель является простым решением, которое часто используется в недорогих детекторах, таких как детекторы движения. Входной трансформатор для согласования импеданса должен обладать хорошей избирательностью, чтобы исключить излучение сигнала гетеродина обратно в ВЧ-терминал и в антенну.

Для уменьшения влияния шумов гетеродина можно использовать балансные схемы диодных ПЧ. Простейшая подобная схема приведена на рис. 12.9, где напряжение гетеродина  $U_g(t)$  поступает к диодам  $VD1$  и  $VD2$  в фазе, а сигнала  $U_c(t)$  - в противофазе. Из распределения токов видно, что в идеальной симметричной схеме балансного ПЧ отсутствуют:

а) “просачивание” колебания гетеродина в контур сигнала, так, как токи диодов в плечах смесителя  $I_1'$  и  $I_1''$  в катушке  $L2$  противофазны и поэтому не создают ЭДС во входном контуре  $L1, C1$ ;

б) преобразование шумов гетеродина в тракт промежуточной частоты, так как преобразованные токи  $I_{шг}'$  и  $I_{шг}''$  обусловлены синфазными колебаниями шумов и гетеродина и поэтому относительно диодов  $VD1$  и  $VD2$  имеют одни и те же условные направления, вследствие чего не создают ЭДС в выходном контуре  $L4, C2$ .

в) преобразование колебания промежуточной частоты из цепи гетеродина снова в тракт УПЧ, что исключает его неустойчивую работу. Попадание колебания из тракта промежуточной частоты в гетеродин на СВЧ вероятно из-за влияния паразитных схемных и конструктивных связей между этими функциональными узлами РПУ.

Балансный смеситель (рис. 12.8) использует два встречно-включенных диода. В такой конфигурации шумовые компоненты от гетеродина или ВЧ-порта, которые поступают в диод, генерируются в противоположном

направлении в другом диоде и почти полностью компенсируются на выходе ПЧ.

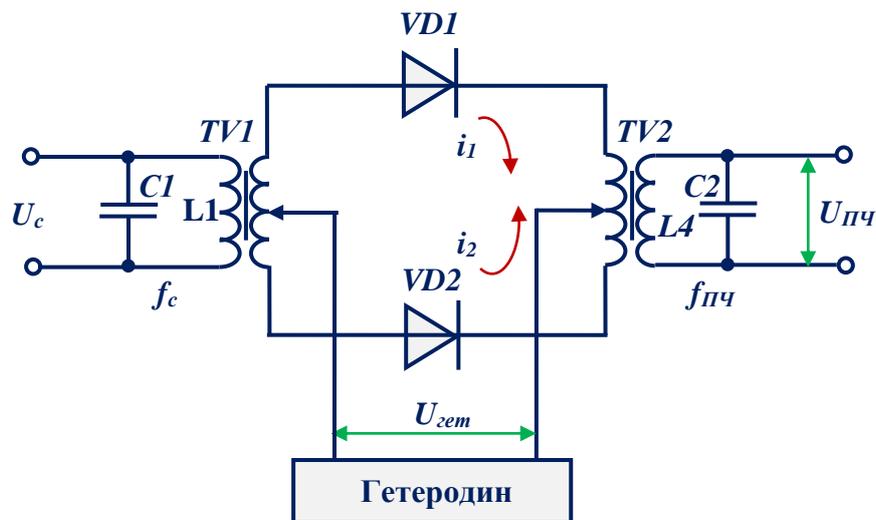


Рис. 12.8. Балансная схема диодного смесителя

Кольцевой балансный смеситель обычно строится на основе четырех диодов, включенных, как показано на рис.12.9. Такая конфигурация обеспечивает прекрасное подавление случайных помех и хорошую изоляцию между всеми портами. Из-за симметричного включения напряжение гетеродина изолировано от ВЧ-входа, что предотвращает появление напряжения ВЧ на выходе гетеродина.

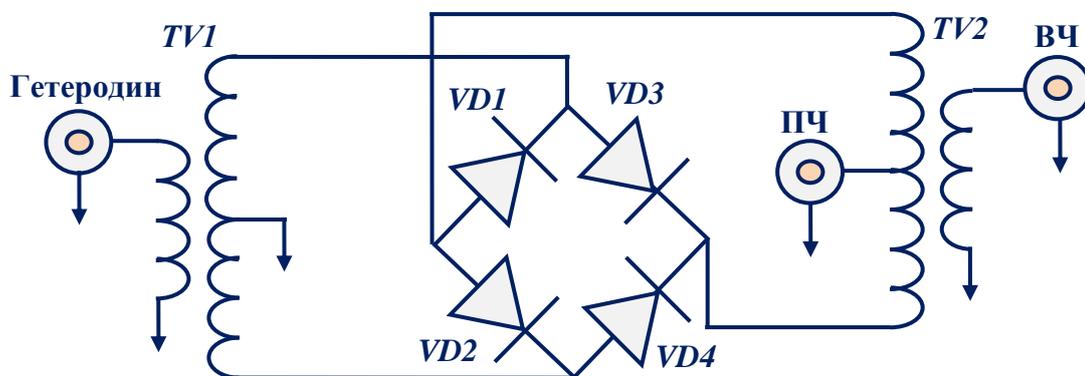


Рис. 12.9. Схема кольцевого балансного смесителя

### 12.3. Транзисторные схемы смесителей сигналов

Рассмотрим проектирование транзисторных преобразователей частоты с внешним гетеродином при простом преобразовании (рис. 12.10). В таком преобразователе сигнал  $U_c$  от входной цепи или последнего каскада УРЧ поступает к базе биполярного транзистора смесителя, включенного по схеме с ОЭ. При таком включении входная проводимость смесителя для напряжения сигнала получается меньшей, чем в схеме с ОБ. Напряжение гетеродина  $U_H$  поступает в цепь эмиттера смесителя и по отношению к гетеродину смеситель оказывается включенным по схеме с ОБ, так как цепь сигнала представляет собой короткое замыкание для колебаний гетеродина. Подача сигнала и гетеродина на различные электроды ослабляет связь между их цепями и повышает стабильность частоты гетеродина, хотя при этом увеличиваются входная проводимость смесителя и потребление мощности гетеродина.

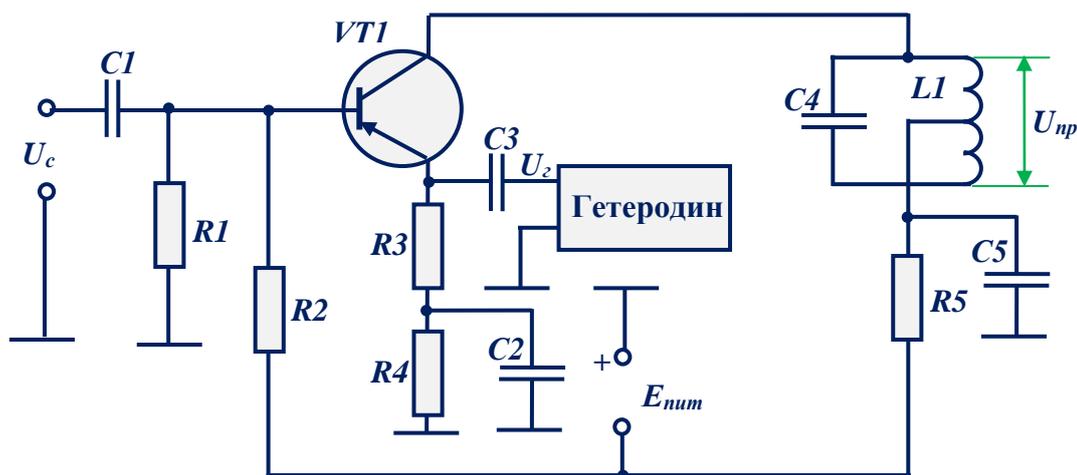


Рис. 12.10. Схема преобразователя частоты с внешним гетеродином на биполярном транзисторе

В цепь коллектора смесителя включают фильтры, подобные фильтрам УПЧ (в данной схеме резонансный контур, настроен на промежуточную частоту). С помощью резисторов  $R1$  и  $R2$  подается напряжение отрицательного смещения на базу транзистора  $T$ . Цепь  $R4C2$  служит для стабилизации режима работы транзистора при изменении температуры окружающей среды. Резистор  $R3$  используется для подачи напряжения гетеродина в цепь эмиттера. Конденсатор  $C3$  не пропускает постоянную составляющую тока эмиттера в цепь гетеродина.

Транзисторные преобразователи частоты с внутренним гетеродином (рис. 12.11) применяют для уменьшения числа транзисторов и потребления электропитания.

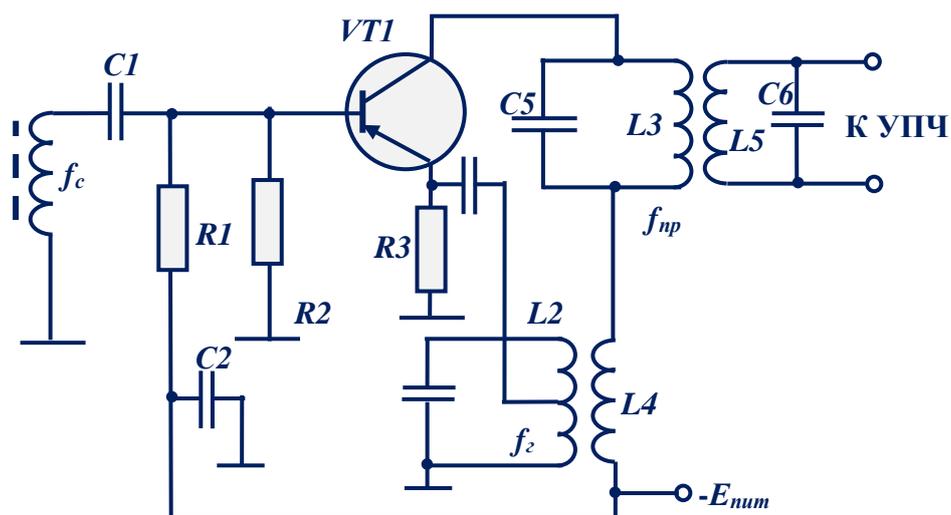


Рис.12.11. Схема преобразователя частоты с внутренним гетеродином на биполярном транзисторе

Они имеют худшие характеристики, чем преобразователи с внешним гетеродином, поскольку нельзя одновременно обеспечить оптимальные режимы смесителя и гетеродина на одном транзисторе.

## Контрольные вопросы

1. Что образуются на выходе при подаче в цепь разных ВЧ сигналов?
2. Что изменится при включении диода в цепь, в которой поданы разные ВЧ сигналы?
3. В чём состоит преобразование частоты?
4. Объясните структурную схему преобразователя приемника?
5. Объясните принцип работы преобразователя частоты?
6. Как осуществляется перенос радиочастоты сигнала на промежуточную частоту?
7. Приведите схему простейшего диодного смесителя и объясните принцип его работы?
8. Приведите схему балансного диодного смесителя и объясните принцип его работы?
9. Приведите схему преобразователя частоты с внешним гетеродином на биполярном транзисторе и объясните принцип его работы?
10. Приведите схему преобразователя частоты с внутренним гетеродином на биполярном транзисторе и объясните принцип его работы?

## 13. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ В РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

### 13.1. Методы детектирования и характеристики детекторов

Процесс выделения звука (полезной информации) из высокочастотного сигнала называется демодуляцией (обратный процесс модуляции) или другими словами детектирование.

В долгой истории радио в качестве детектора использовались разные элементы. Сначала были кристаллические, жидкостные или магнитные детекторы, потом вакуумные диоды (электронные лампы) и наконец, стали применяться полупроводниковые элементы.

Простейшая схема детекторного приемника и формы сигналов в различных точках приведена на рис.13.1, вид элементов на схеме детекторного приемника на рис.13.2.

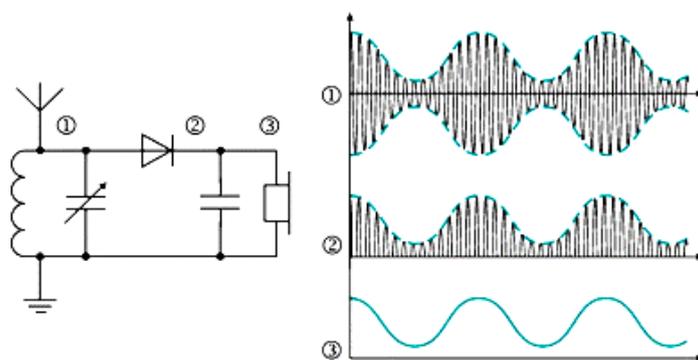


Рис.13.1. Простейшая схема детекторного приемника и формы сигналов в различных точках

Детектирование может осуществляться при когерентном и некогерентном приеме сигналов.

При **когерентном приеме**, при детектировании, используются данные о начальной фазе сигнала.

При **некогерентном приеме**, при детектировании, не используются данные о начальной фазе сигнала.

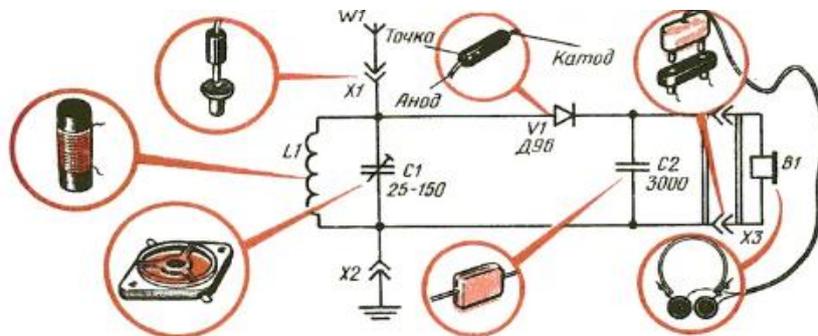


Рис. 13.2. Вид элементов на схеме детекторного приемника

Таким образом, детектирование осуществляется в устройствах - детекторах. Условное графическое обозначение детектора имеет вид (рис.13.3):

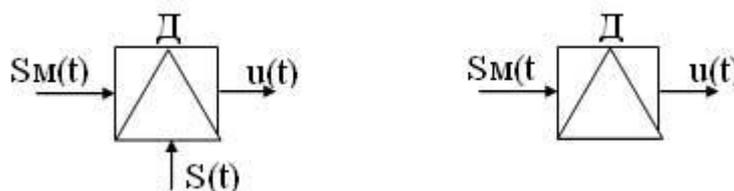


Рис. 13.3. Условное графическое обозначение детектора: а) при когерентном приеме, б) при некогерентном приеме

Характеристиками детектора являются: детекторная, частотная характеристики и коэффициент передачи.

**Детекторная характеристика** представляет собой зависимость постоянной составляющей напряжения на выходе детектора от изменения информационного параметра несущей, подводимой к нему. При АМ

информационным параметром является амплитуда, при ЧМ частота, при ФМ фаза.

**Идеальная характеристика** является линейной, проходя через начало координат под углом  $\alpha$  к оси абсцисс (рис. 13.4). **Реальная характеристика** имеет отклонение, которое приводит к нелинейным искажениям модулирующего сигнала.

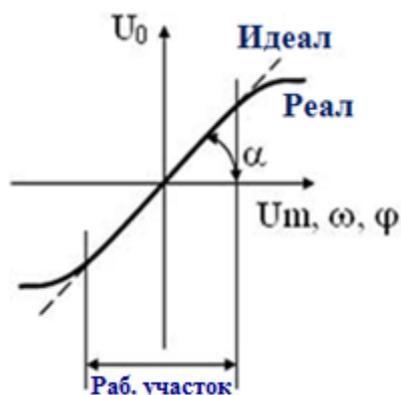


Рис. 13.4. Детекторная характеристика

**Частотная характеристика** представляет собой зависимость амплитуды выходного напряжения  $U_{mi}$  детектора от частоты модулирующего гармонического сигнала. Реальная характеристика имеет линейный характер и постоянна для  $U_{mi}$  на всех частотах (рис. 13.5). Отклонение реальной характеристики от идеальной приводит к частотным искажениям модулирующего сигнала. Также как и для модуляторов, по частотной характеристике определяют полосу пропускания детектора

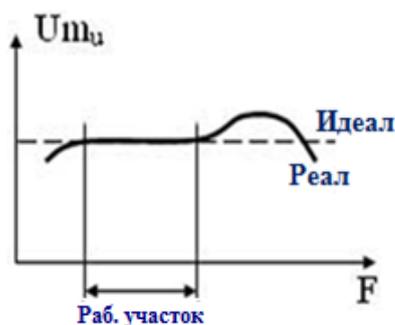


Рис. 13.5. Частотная характеристика

**Коэффициент передачи детектора** определяется для гармонического модулирующего сигнала и равен отношению амплитуды гармонического сигнала  $U_{mi}$  к амплитуде приращения информационного параметра несущей:

$$K_{\partial} = U_{mi} / \Delta U_m$$

Коэффициент передачи детектора можно определить из детекторной характеристики:

$$K_{\partial} = k \operatorname{tg} \Delta$$

где  $k$  - масштабный коэффициент пропорциональности.

### 13.2. Детектирование амплитудно-модулированных сигналов

**Амплитудный детектор** – устройство, предназначенное для выделения выходного напряжения, повторяющего закон амплитудно-модулированного входного сигнала, содержащего полезную информацию. Операция детектирования может быть реализована либо при использовании цепей с периодически изменяющимися параметрами (синхронный детектор), либо путем применения нелинейных элементов (рис. 13.6).

При использовании в качестве детектора нелинейный элемент, на вход которого действует сигнал (рис. 13.7):

$$u_{ex} = U_{exm} \cos(\omega t) = U_{m0} (1 + m \cos(\Omega t)) \cos(\omega t)$$

Вследствие нелинейности НЭ входной и выходной токи представляют сумму постоянной и гармонических составляющих:

$$i_{вх} = I_{вх} + I_{вхm1}\cos(\omega t + \varphi_1) = I_{вхm2}\sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots$$

$$i_{вых} = I_{вых} + I_{выхm1}\cos(\omega t + \varphi_1) = I_{выхm2}\sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots$$



Рис. 13.6. Обобщенная схема амплитудного детектора

Постоянная составляющая выходного тока повторяет закон модуляции сигнала.

$$I_{вых} = I_0 + I_{\Omega m}\cos(\Omega t + \varphi)$$

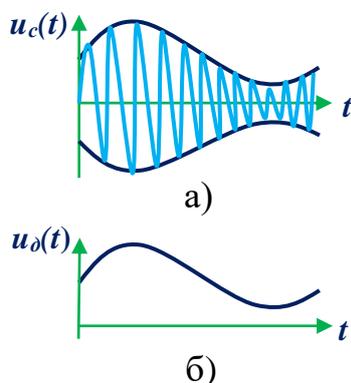


Рис. 13.7. Форма входного и выходного сигнала АМ-детектора

Напряжение сигнала постоянной составляющей и закона модуляции выделяется на нагрузке детектора и имеет вид:

$$U_{вых} = U_{вых} Z = U_0 + U_{\Omega m} \cos(\Omega t + \varphi) = U_0 + U_{вых}(\Omega)$$

Аналогично можно получить и для более сложных сигналов.

Основные технические характеристики детектора АМ-сигнала включают:

- точность воспроизведения закона модуляции, оцениваемая коэффициентом гармоник:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_{2\Omega t}^2 + U_{3\Omega t}^2 + \dots}}{U_{\Omega t}}$$

- эффективность детектирования (коэффициент передачи):

$$K_{Д} = S_{\partial x} = dU_{вых} / dU_{вхт} = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вхт}$$

для немодулированного сигнала  $K_{Д} = \Delta U / \Delta U_{m0}$ , для АМ-сигнала

$$K_{Д} = U_{\Omega m} / \omega U_{m0}.$$

- неравномерность АЧХ;
- влияние сопротивления детектора на технические характеристики последнего каскада УПЧ.

Принципиальная электрическая схема некогерентного амплитудного детектора представлена на рис. 13.8. В состав детектора включен нелинейный элемент — диод  $VD$ . Необходимость нелинейного элемента

вызвана тем, что процесс детектирования связан с трансформацией спектра сигнала. Диаграммы поясняющие принцип работы модулятора представлены на рис. 13.9.

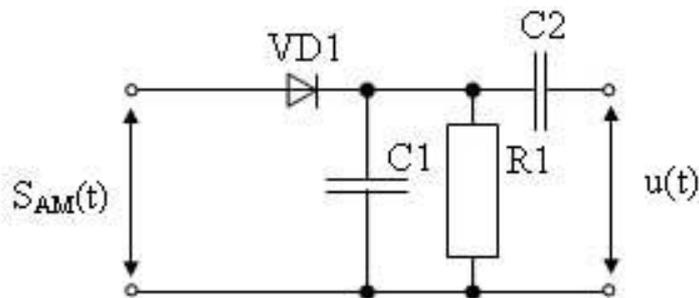


Рис. 13.8. Принципиальная электрическая схема некогерентного амплитудного детектора на диоде

На диод поступает АМ сигнал  $S_{AM}(t)$ , в спектре которого имеются составляющая несущего сигнала и боковые составляющие (рис. 13.9, а).

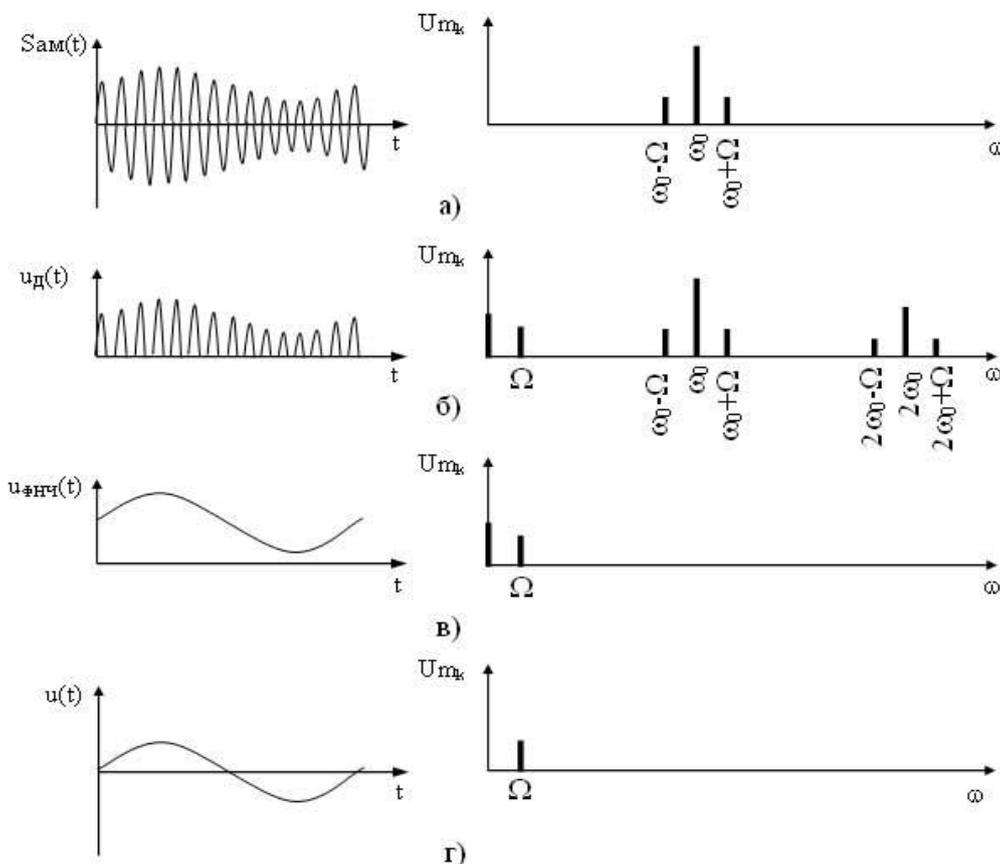


Рис. 13.9. Процесс детектирования АМ сигналов

В спектре отклика диода  $u_o(t)$  появляются новые составляющие: постоянная, составляющая модулирующего сигнала и высшие гармоники модулированного сигнала (рис. 13.9, б). Элементы  $R1C1$  образуют фильтр низких частот, который шунтирует высокочастотные составляющие спектра отклика и тем самым выделяют составляющую модулирующего сигнала и постоянную составляющую  $u_{ФНЧ}(t)$  (рис. 13.9, в). Разделительный конденсатор  $C2$  задерживает постоянную составляющую спектра и в спектре выходного сигнала присутствует только составляющая модулирующего сигнала  $u(t)$  (рис. 13.9, г).

При детектировании разделяют два режима: квадратичный и линейный. При *квадратичном режиме* для детектирования сигналов используется нелинейный участок ВАХ диода, который аппроксимируется полиномом второй степени (рис. 13.10). При данном режиме могут использоваться входные сигналы небольшой амплитуды, но при этом возникают большие нелинейные искажения сигнала.



Рис. 13.10. Режимы детектирования

Высокоточный амплитудный детектор на ОУ показан на рис. 13.11.

Если напряжение на входе больше нуля, то на выходе ОУ отрицательное напряжение. Тогда диод  $V1$  открыт, а диод  $V2$  закрыт, поэтому напряжение на выход не поступает. Если напряжение входа

отрицательное, то на выходе ОУ положительный потенциал, поэтому диод  $V_1$  закрыт, а диод  $V_2$  открыт.

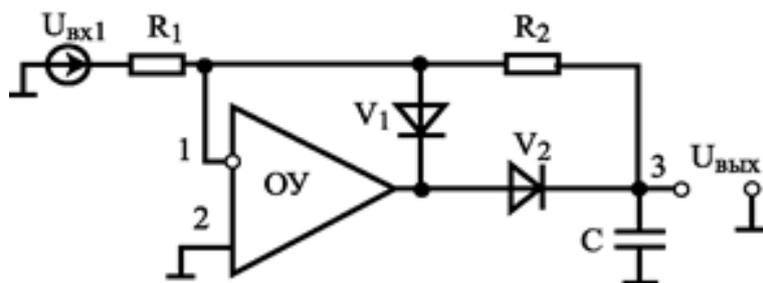


Рис. 13.11. Амплитудный детектор на ОУ

В результате напряжение поступает на выходной конденсатор и он подзаряжается. При этом диод  $VD_2$  оказывается охвачен отрицательной обратной связью с очень большим коэффициентом усиления за счет операционного усилителя. Отрицательная обратная связь компенсирует изменения рабочей точки диода, поэтому при всех напряжениях статическая характеристика детектора остается линейной.

Для повышения точности детектирования часто используют двухполупериодный детектор, который состоит из двух частей, аналогичных рис. 13.11. Однако на второй ОУ входное напряжение подается на неинвертирующий вход поэтому детектор реагирует как на положительную, так и на отрицательную полуволны. Это повышает точность устройства

### 13.3. Синхронное детектирование

*Синхронное детектирование* — это детектирование, при котором используется опорное колебание с частотой и фазой соответствующими частоте и фазе несущего колебания.

Структурная электрическая схема синхронного детектора представлена на рис. 13.12.

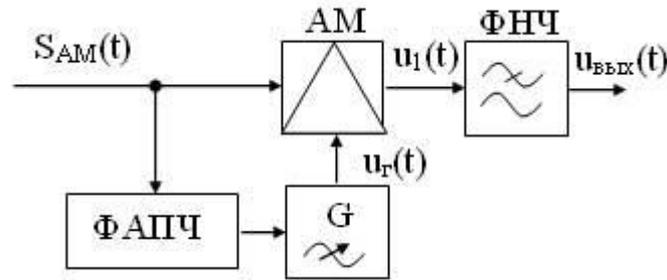


Рис. 13.12. Структурная электрическая схема синхронного детектора

На входы балансного или кольцевого модулятора поступают сигнал  $S_{AM}(t)$  и опорное колебание от генератора  $u_2(t)$ :

$$S_{AM}(t) = Um(1 + m_{AM}u(t)) \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$u_2(t) = Um_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

На выходе модулятора формируется сигнал  $u_1(t)$

$$u_1(t) = S_{AM}(t) \cdot u_2(t) = U_m (1 + m_{AM} u(t)) \cos(\omega_0 t + j_0) \cdot$$

$$\cdot U_{m_2} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = 0,5 U_m U_{m_2} (1 + m_{AM} u(t)) \cdot$$

$$\cdot (1 + \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_0))$$

ФНЧ на выходе модулятора подавляет высокочастотные и постоянную составляющие и выделяет составляющие модулирующего сигнала:

$$u_{вых}(t) = 0,5 U_m U_{m_2} m_{AM} u(t)$$

Для получения опорного колебания с частотой и фазой несущего колебания используется блок **фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ)**. Блок ФАПЧ выделяет несущее колебание из поступившего сигнала и подстраивает под его параметры генератор.

Свойством и основным достоинством синхронного детектора является сохранение отношения сигнал-помеха на выходе детектора. Это объясняется тем, что данный детектор представляет собой преобразователь частоты, который переносит спектр сигнала в область низких частот без изменения формы сигнала и соотношений между составляющими спектра. Это свойство детектора позволяет применять последетекторную обработку сигнала.

Синхронный детектор позволяет также детектировать балансно-модулированные и однополосно-модулированные сигналы. Однако в данном случае возникают трудности с получением информации о частоте и фазе несущего колебания, т. к. составляющая несущего колебания в спектре этих сигналов отсутствует. Поэтому для детектирования этих сигналов применяют два технических решения:

- при детектировании используют **пилот-сигнал**, который представляет собой остаток несущего колебания и передается вместе с сигналом, а на приеме выделяется системой ФАПЧ;

- при детектировании на приемной стороне используется высокостабильный опорный генератор который вообще не синхронизируется. Для детектирования используется местная несущая отличающаяся от передаваемой на  $\phi$ . При этом возникает *сдвиг частот* в канале связи (рис. 13.13). Если этот сдвиг не превышает 10 Гц для телефонного сигнала, то получатель его не ощущает. Отсюда следуют

жесткие требования к стабильности генераторного оборудования систем связи с ОМ.

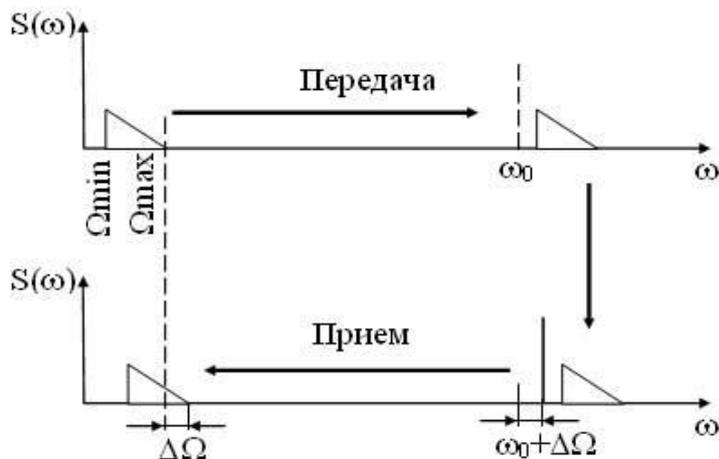


Рис. 13.13. Процесс сдвига частот в канале связи

### 13.4. Детектирование частотно-модулированных сигналов

Детектирование ЧМ сигналов может осуществляться при когерентном и некогерентном приеме. Рассмотрим детектирование ЧМ сигналов при некогерентном приеме. В этом случае детектирование осуществляется в два этапа:

- преобразование частотно-модулированного сигнала в амплитудно-частотно-модулированный сигнал (АЧМ);
- детектирование АЧМ сигнала амплитудным детектором.

Принципиальная схема одноконтурного частотного детектора представлена на рис. 13.14.

При увеличении частоты ЧМ сигнала, она приближается к резонансной частоте контура  $\omega_{рез}$  и амплитуда колебания  $u_K(t)$  возрастает. При уменьшении частоты ЧМ сигнала, она удаляется от резонансной частоты контура и амплитуда  $u_K(t)$  уменьшается. Таким образом, на выходе контура

колебание представляет собой модулированный сигнал, у которого изменяется и частота амплитуда и частота (АЧМ сигнал). Затем данный сигнал детектируется амплитудным детектором.

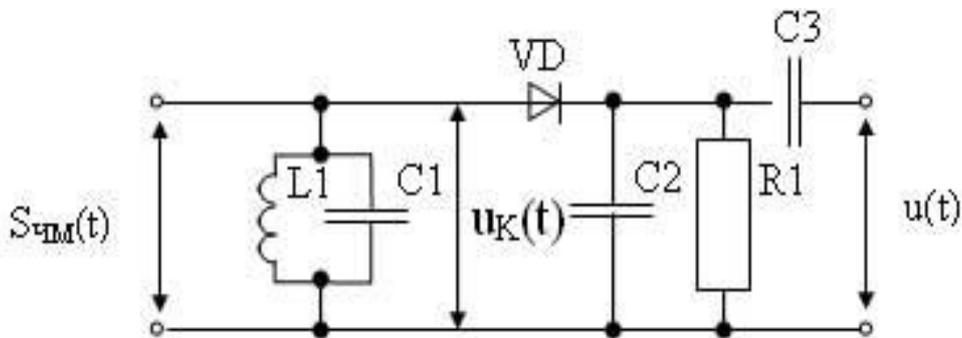


Рис. 13.14. Принципиальная схема однотактного частотного детектора

В данном детекторе преобразование ЧМ сигнала в АЧМ осуществляется с помощью колебательного контура  $L1C1$ . Контур расстроен относительно несущей частоты, т. е. его резонансная частота не равна частоте несущего сигнала (рис. 13.15).

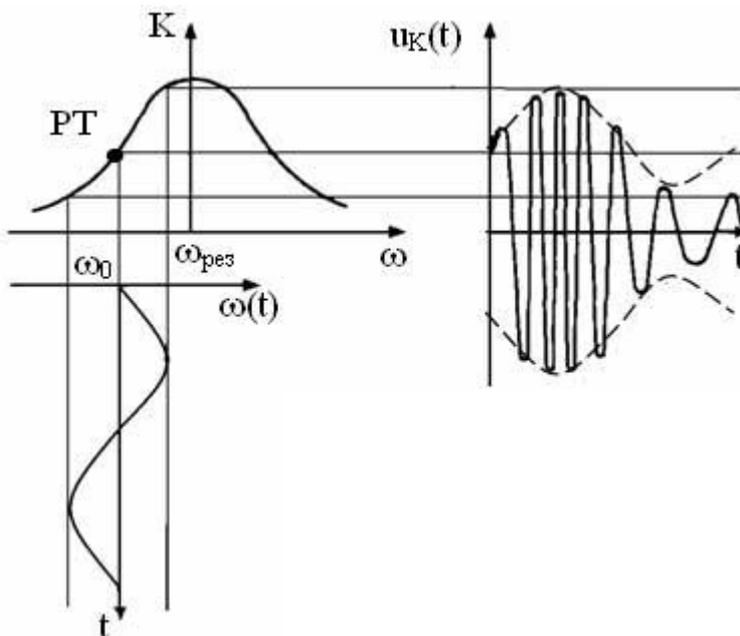


Рис. 13.15. Временные диаграммы частотного детектора

Детекторная характеристика данного детектора представлена на рис.13.16. Данная характеристика является нелинейной, а следовательно, при детектировании данным детектором модулирующий сигнал имеет нелинейные искажения.

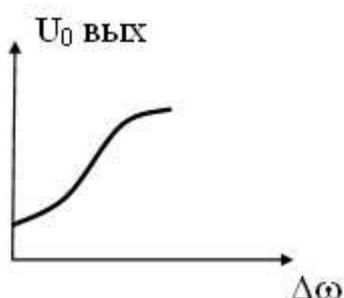


Рис. 13.16. Детекторная характеристика одноконтурного частотного детектора

Для устранения нелинейных искажений используют балансную (двухконтурную) схему частотного детектора (рис. 13.17). В этом детекторе оба колебательных контура взаимно расстроены относительно несущей частоты и имеют различные резонансные частоты  $\omega_{рез1}$  и  $\omega_{рез2}$ , характеристики контуров представлены на рис.13.18.

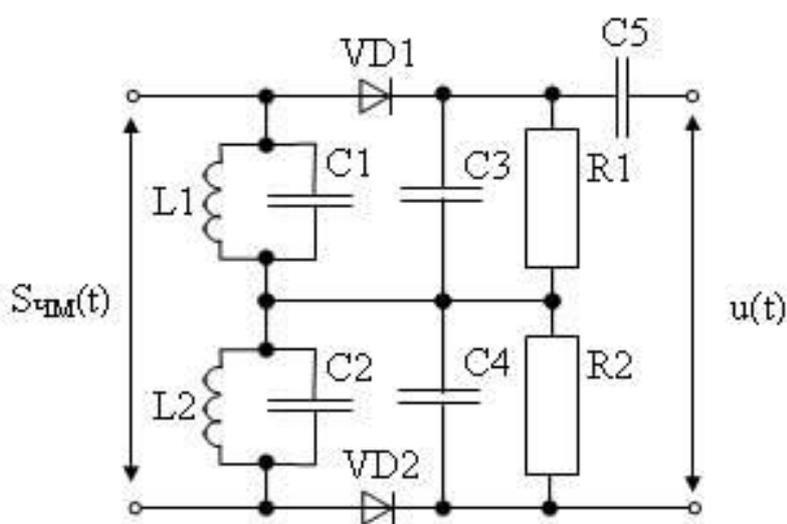


Рис.13.17. Принципиальная схема балансного частотного детектора

В результате получаем характеристику  $\nu$ , в которой имеется линейный участок между резонансными частотами  $\omega_{рез1}$  и  $\omega_{рез2}$ , который и используется для детектирования. Детекторная характеристика детектора балансного детектора представлена на рис.13.19.



Рис.13.18. Частотная зависимость колебательных контуров балансного детектора

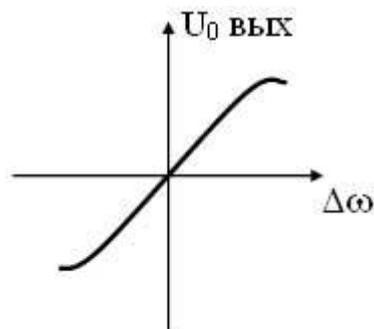


Рис. 13.19. Детекторная характеристика балансного частотного детектора

### 13.5. Детектирование фазо-модулированных сигналов

Детектирование ФМ сигналов осуществляется при когерентном приеме. Детектирование этих сигналов осуществляется в два этапа:

- преобразование ФМ сигнала в амплитудно-фазо-модулированный сигнал (АФМ);
- детектирование АФМ сигнала амплитудным детектором.

Принципиальная схема однотактного фазового детектора представлена на рис. 13.20.

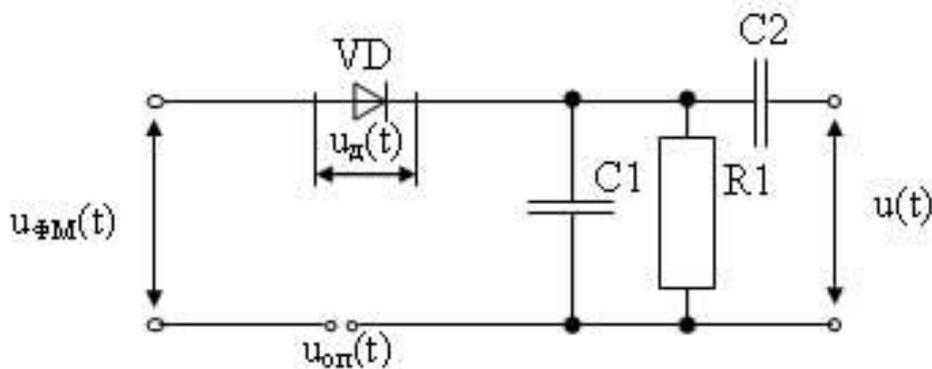


Рис. 13.20. Принципиальная схема однотактного фазового детектора

Он представляет собой амплитудный детектор, в котором используется опорное колебание. Преобразование ФМ сигнала в АФМ сигнал осуществляется диодом  $VD$ . На диод подается два напряжения: опорное колебание  $u_{on}(t)$  с фазой  $\varphi = 0$  и ФМ сигнал  $u_{\text{ФМ}}(t)$ . Напряжение диода определяется суммой этих напряжений:

$$u_{\text{д}}(t) = u_{on}(t) + u_{\text{ФМ}}(t)$$

Формирование напряжения на диоде поясняется векторной диаграммой (рис.13.21). Допустим, в некоторый момент времени ФМ сигнал имеет значение фазы  $\varphi_{\text{ФМ}1}$  соответствующее наклону вектора  $u_{\text{ФМ}1}$ , тогда напряжение на диоде будет соответствовать вектору  $u_{\text{д}1}$ . В следующий момент времени фаза ФМ сигнала изменится, и будет соответствовать углу наклона  $\varphi_{\text{ФМ}2}$  вектора  $u_{\text{ФМ}2}$  (при этом длина вектора соответствует длине вектора  $u_{\text{д}1}$ , т.

к. амплитуда ФМ сигнала не изменяется). Напряжение на диоде в этот момент времени соответствует вектору  $u_{\partial 2}$ . Как видно из диаграммы, вектора  $u_{\partial 1}$  и  $u_{\partial 2}$  имеют различную длину, а соответственно и амплитуду.

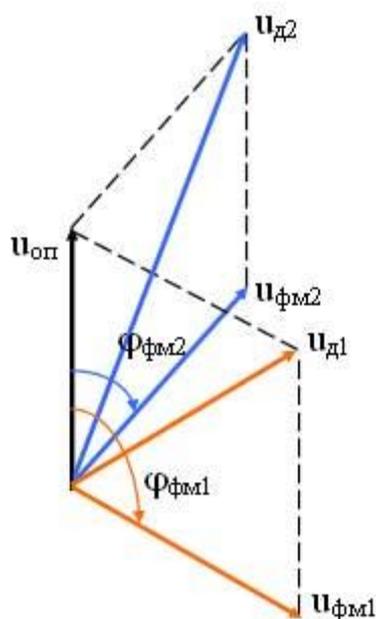


Рис. 13.21. Формирование напряжений на диоде

Таким образом, на диоде происходит преобразование ФМ сигнала в АФМ сигнал. Одновременно с этим преобразованием диод осуществляет трансформацию спектра АФМ сигнала, и дальнейшее детектирование осуществляется аналогично детектированию однотоктным амплитудным детектором. Детекторная характеристика однотоктного фазового детектора представлена на рис. 13.22. Как видно эта характеристика имеет нелинейный характер, что приводит к нелинейным искажениям модулирующего сигнала.

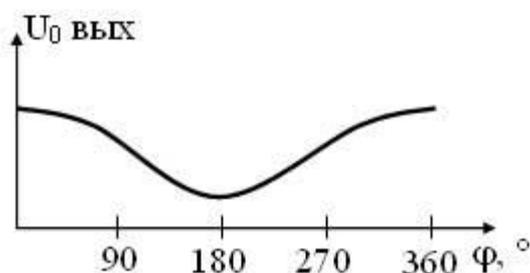


Рис. 13.22. Детекторная характеристика одноконтного фазового детектора

Для уменьшения нелинейных искажений применяют балансный (двухтактный) фазовый модулятор (рис. 13.23).

Данный детектор состоит из двух одноконтных фазовых детекторов. Опорное напряжение  $u_{on}(t)$  подводится между средней точкой вторичной обмотки трансформатора (Т) и точками соединения резисторов  $R1R2$  и конденсаторов  $C1C2$ . Напряжение ФМ сигнала  $u_{фм}(t)$  подается через первичную обмотку трансформатора.

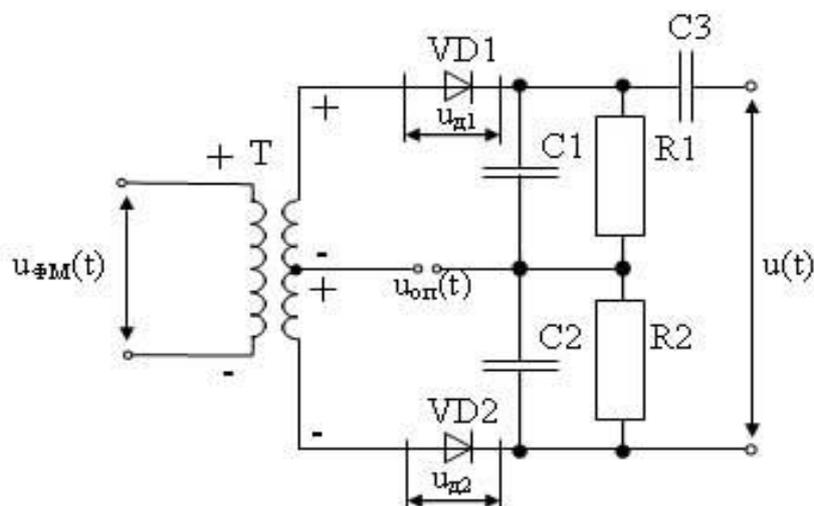


Рис. 13.23. Принципиальная схема балансного фазового детектора

Пусть в некоторый момент времени на вход детектора поступает сигнал  $u_{фм}(t)$  с фазой  $\varphi(t)$  и полярностью напряжений соответствующей указанной на рисунке. В этом случае напряжение на диодах будет определяться:

$$u_{д1} = u_{on} + 0,5u_{фм};$$

$$u_{д2} = u_{on} - 0,5u_{фм}.$$

### 13.6. Детектирование манипулированных сигналов

#### Детектирование амплитудно-манипулированных сигналов.

Детектирование данных сигналов может осуществляться рассмотренным выше амплитудным детектором на диоде (рис. 13.8).

#### Детектирование частотно-манипулированных сигналов.

Структурная электрическая схема детектора ЧМн сигналов и диаграммы, поясняющие его работу приведены на рис. 13.24 и 13.25.

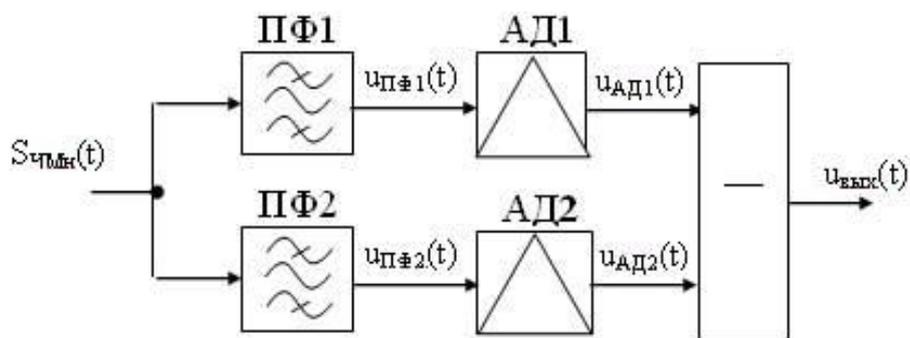


Рис. 13.24. Структурная электрическая схема детектора ЧМн сигналов

На вход детектора поступает ЧМн сигнал (рис. 13.25,а). Это сигнал поступает на полосовые фильтры ПФ1 и ПФ2, каждый из ПФ выделяет свою полосу частот (рис. 13.25, б, в). Полученные сигналы детектируются амплитудными детекторами АД1 и АД2 (рис. 13.25, г, д). Полученные сигналы поступают в вычитающее устройство, причем сигнал  $u_{АД2}(t)$  поступает в негативной полярности. В вычитающем устройстве происходит формирование выходного сигнала (рис. 13.25, е):

$$u_{вых}(t) = u_{АД1}(t) - u_{АД2}(t)$$

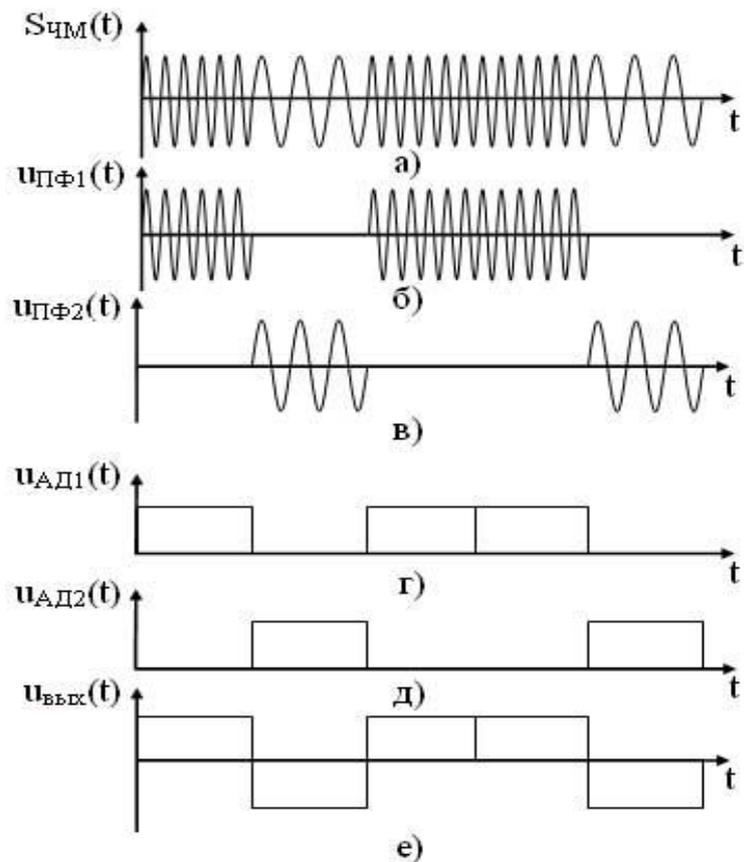


Рис. 13.25. Процесс детектирования ЧМ сигналов

### Детектирование фазо-манипулированных сигналов

Детектирование данных сигналов осуществляется при когерентном приеме. Структурная электрическая схема приемника ФМ сигналов представлена на рис. 13.26.

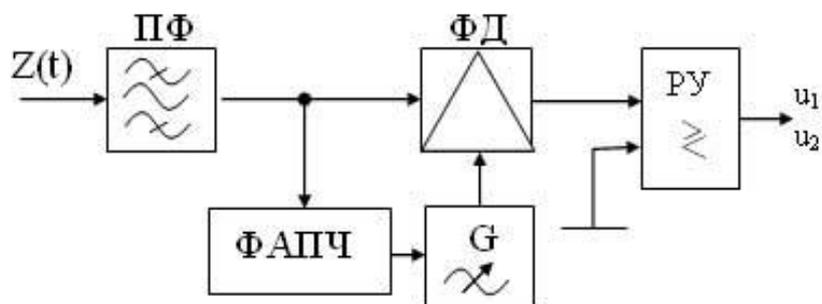


Рис. 13.26. Структурная схема приемника ФМ сигналов

На вход полосового фильтра подается входное колебание  $Z(t)$ . ПФ производит додетекторную обработку сигнала, т. е. ограничивает уровень помех на входе приемника. ФМн сигнал с выхода ПФ поступает в фазовый детектор ФД, на второй вход которого поступает опорное колебание от генератора. Подстройка частоты и фазы опорных колебаний осуществляется системой фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ. Частота и фаза опорных колебаний должна совпадать с частотой и фазой одного из сигналов  $S_1(t)$  или  $S_2(t)$ . Сигнал, полученный на выходе ФД поступает в решающее устройство, которое определяет какой сигнал принят  $u_1$  или  $u_2$ . Определение сигнала осуществляется путем сравнения амплитуды дискретного элемента поступающего с ФД с нулевым уровнем, который снимается с корпуса: если амплитуда дискретного элемента поступающего с ФД больше нуля, то принят элемент положительной полярности  $u_2$  («1»), если меньше нуля, то принят элемент отрицательной полярности  $u_1$  («0»).

Основным недостатком данной схемы и соответственно системы с ФМн является необходимость передачи вместе с информационным сигналом *сигнала фазовой синхронизации*, что приводит к дополнительным затратам мощности и, соответственно, снижению эффективности ФМн. Необходимость передачи сигналов синхронизации связана с тем, что фаза колебаний опорного генератора должна с высокой точностью совпадать с фазой одного из сигналов  $S_1$  или  $S_2$ . Использование для целей фазовой синхронизации входного сигнала  $Z(t)$  приводит к эффекту *обратной работы*. Обратная работа заключается в замене, при детектировании, сигнала  $u_1$  сигналом  $u_2$  и наоборот. Обратная работа возникает тогда, когда фаза опорных колебаний генератора меняется на противоположную. Это возникает из-за того, что при равновероятных сигналах  $S_1$  и  $S_2$ , отличающихся

друг от друга по фазе на  $180^\circ$ , на приеме нет ни каких признаков по которым можно определить, фаза какого сигнала была принята в качестве опорного. Генератор, подстраиваемый системой ФАПЧ, может генерировать колебания с двумя устойчивыми состояниями фазы 0 или  $180^\circ$ . В канале связи под воздействием помех фаза сигнала используемого для синхронизации изменяется. Если она не соответствует 0 или  $180^\circ$ , то генератор подстраивается под ближайшую фазу, т. е. если фаза изменяется менее чем на  $90^\circ$ , то генератор будет подстраиваться под верную фазу сигнала (обратная работа отсутствует), если более чем на  $90^\circ$ , то генератор подстраивается под противоположную фазу и возникает обратная работа. Из вышесказанного можно сделать вывод, что источником обратной работы в приемнике является генератор с ФАПЧ.

#### **Детектирование относительно-фазо-модулированных сигналов.**

Детектирование ОФМн сигналов может осуществляться двумя методами: методом сравнения фаз (обеспечивает некогерентный прием) и метод сравнения полярностей (обеспечивает когерентный прием).

При **методе сравнения фаз** источники обратной работы генератор и ФАПЧ заменяются линией задержки, которая осуществляет задержку сигнала на длительность одного дискретного элемента (рис. 13.27). В фазовом детекторе осуществляется сравнение фаз принятого сигнала и предыдущего. Формирование выходного сигнала РУ осуществляется также как и в приемнике ФМн сигналов. Поскольку в данной схеме в качестве опорного колебания используется принятый сигнал, то появление обратной работы исключено.

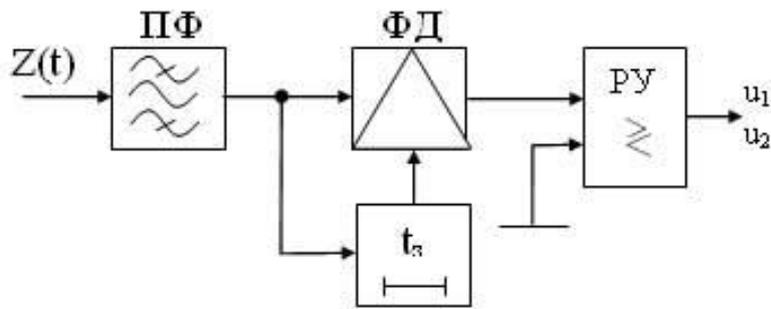


Рис. 13.27. Структурная электрическая схема приемника ОФМн сигналов:  
метод сравнения фаз

При *методе сравнения полярностей* приемник состоит из двух частей: приемника ФМн сигналов и относительного декодера (рис. 13.28). При детектировании сигналов в приемнике ФМн сигналов возникает обратная работа. Сигнал с выхода приемника поступает в сравнивающее устройство СУ относительного декодера. На второй вход СУ поступает предыдущий выходной сигнал приемника. Задержку сигнала на один дискретный элемент осуществляет линия задержки. В СУ происходит сравнение полярностей двух элементов и формируется выходной сигнал. Формирование дискретного элемента выходного сигнала осуществляется по правилу: если полярности обоих сигналов совпадают, то формируется сигнал положительной полярности  $u_2$  («1»), если полярности не совпадают, то сигнал отрицательной полярности  $u_1$  («0»). Так как обратная работа изменяет полярность как текущей, так и предыдущей посылок, то она на работе СУ не сказывается.

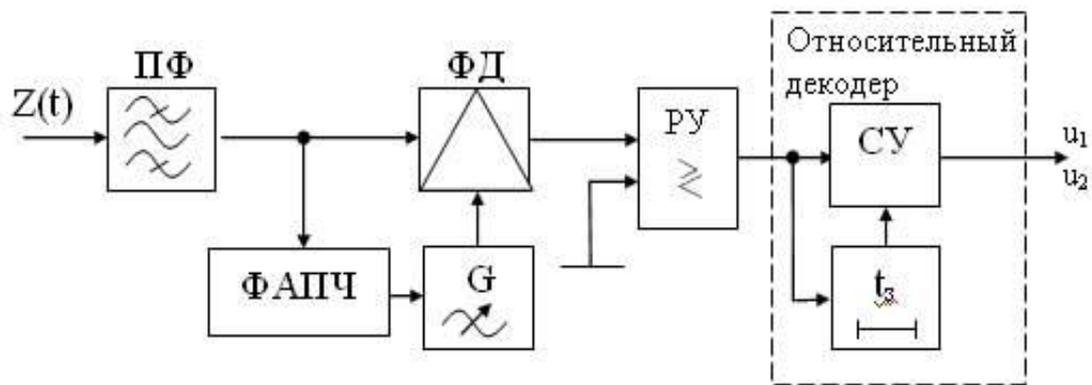


Рис. 13.28. Функциональная электрическая схема приемника ОФМн сигналов: метод сравнения полярностей

### 13.7. Детектирование импульсно-модулированных сигналов

Особенностью ИМ сигналов является наличие в их спектре низкочастотных составляющих модулирующего сигнала. Поэтому для детектирования данных сигналов нелинейный элемент не используется. Детектирование осуществляется фильтром, с помощью которого выделяются составляющие модулирующего сигнала. Для этого граничные частоты фильтра должны быть равны наименьшей  $F_{min}$  и наибольшей  $F_{max}$  частоте спектра модулирующего сигнала. Детектирование первичных (низкочастотных) сигналов осуществляется ФНЧ.

А) **Детектирование АИМ сигналов.** Если скважность импульсов АИМ сигнала велика  $q \gg 1$ , то детектирование осуществляется пиковым детектором.

**Пиковым детектором** — называется амплитудный детектор, выходное напряжение которого пропорционально амплитуде импульсов и сохраняется приблизительно постоянным на интервале периода следования импульсов  $T$ .

В спектре ФИМ сигналов уровень составляющих частоты модуляции незначителен, а также он зависит от частоты модуляции. Поэтому

непосредственно ФИМ сигналы детектировать ФНЧ нельзя. Предварительно эти сигналы преобразуются в ШИМ или ЧИМ сигналы, а затем детектируются ФНЧ. Однако, для преобразования ФИМ сигнала необходимо вместе с ним передавать синхронизирующие тактовые импульсы, а это усложняет схему детектора.

Для увеличения помехоустойчивости в приемнике принятые импульсно модулированные сигналы подвергаются регенерации.

**Регенерация** — процесс восстановления формы импульсов.

На рис. 13.29 представлены временные диаграммы, поясняющие регенерацию импульсно модулированного сигнала. На рис. 13.29,а представлен передаваемый импульсно-модулированный сигнал  $S_{M_{пер}}(t)$ . На рис. 13.29, б представлен принятый сигнал  $Z_{пр}(t)$ . Форма этого сигнала искажена вследствие воздействия флуктуационных и импульсных помех в канале связи. Регенерация осуществляется путем ограничения амплитуды импульсов по максимуму и минимуму на уровне близком к половине пикового значения импульсов (рис. 13.29, в). При регенерации возможно искажение принятого сигнала вызванное большой амплитудой импульсной помехи, однако, большая часть помех подавляется.

Поскольку при регенерации осуществляется ограничение амплитуды импульсов, то регенерации не могут подвергаться АИМ сигналы, т. к. амплитуда этих сигналов является информационным параметром.

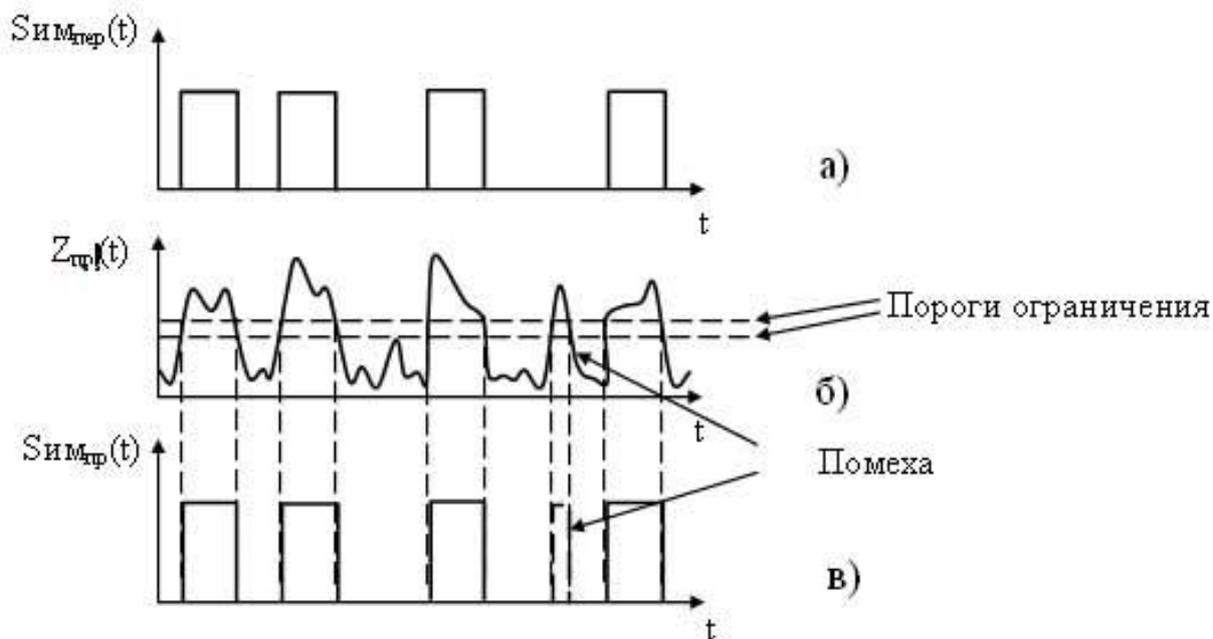


Рис. 13.29. Регенерация импульсно-модулированных сигналов

### Контрольные вопросы

1. Перечислите методы детектирования и характеристики детектирования.
2. В чём состоит цель детектирования? В каких устройствах осуществляется детектирование сигналов?
3. Приведите схему амплитудного детектора и объясните принцип его работы?
4. Приведите схему высокоточного амплитудного детектора на ОУ и объясните принцип его работы?
5. Приведите схему синхронного детектора и объясните принцип его работы?
6. Приведите схему однотактного частотного детектора и объясните принцип его работы?

7. Приведите схему балансного частотного детектора и объясните принцип его работы?

8. Приведите схему однотоктного фазового детектора и объясните принцип его работы?

9. Приведите схему балансного фазового детектора и объясните принцип его работы?

10. Приведите схему детектора ЧМн сигналов и объясните принцип его работы?

11. Приведите схему детектора ФМн сигналов и объясните принцип его работы?

12. Как происходит регенерация импульсно-модулированных сигналов?

## 14. ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ПРИЕМНИКАХ

### 14.1. Определение технологии SDR

С развитием цифровых технологий все большее внимание уделяется построению радиоприемных трактов с применением цифровой обработки сигналов (ЦОС), называемых в литературе SDR - software defined radio. Эта технология основывается на возможности оцифровки радиосигнала в реальном времени и последующей обработке программными или аппаратными цифровыми средствами - цифровыми сигнальными процессорами, ПЛИС и т.д. Технология SDR позволяет осуществлять прием и демодуляцию сигналов, в которых используются цифровые виды модуляции, такие как DPSK, QAM, GMSK и т.д.

### 14.2. Структура приемника с ЦОС по радиочастоте

В зависимости от частоты и ширины спектра принимаемого сигнала цифровая обработка в приемнике может использоваться как по радиочастоте, так и после переноса сигнала на фиксированную промежуточную частоту - обработка по ПЧ.

Структура приемника с ЦОС по радиочастоте приведена на рис. 14.1.

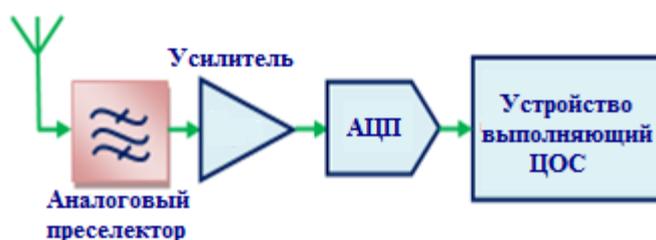


Рис. 14.1. Структура приемника с ЦОС по радиочастоте

### 14.3. Структура приемника с ЦОС по промежуточной частоте

На рис. 14.2 приведена структура приемника с ЦОС по промежуточной частоте

Радиоприемники с цифровой обработкой сигнала по ПЧ относятся к супергетеродинному типу и имеют ряд преимуществ перед приемниками прямого преобразования:

- возможность работы в большом диапазоне частот;
- хорошая селективность;
- чувствительность во всём диапазоне.

Приемники такого типа используются в профессиональной связной аппаратуре, к которой предъявляются жесткие технические требования. В числе недостатков супергетеродинных приемников — относительно высокое энергопотребление и большие размеры из-за использования аналоговых элементов.



Рис. 14.2. Структура приемника с ЦОС по промежуточной частоте

К преимуществам приемников прямого преобразования относятся малое энергопотребление и возможность размещения всех элементов в небольшом портативном устройстве (в идеале в корпусе одной микросхемы), однако по избирательности, чувствительности и динамическому диапазону эти устройства уступают супергетеродинным приемникам.

При обработке сигналов с частотами, не превышающими несколько десятков МГц, скорость современных АЦП позволяет использовать классический принцип дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова, согласно которой частота выборок должна быть как минимум в два раза больше верхней частоты в спектре дискретизируемого сигнала. При этом оцифровке подвергается диапазон частот от постоянной составляющей до половины частоты дискретизации, и на входе АЦП достаточно использовать аналоговый ФНЧ для защиты от наложения спектров. Для высокочастотных сигналов используется полосовая дискретизация (*under sampling*), которая позволяет обойти ограничение, накладываемое теоремой Котельникова для обработки узкополосных сигналов, у которых ширина спектра много меньше абсолютного значения центральной частоты. Этому условию соответствуют практически все радиосигналы. В этом случае теорема Котельникова звучит следующим образом: для сохранения информации о сигнале частота его дискретизации должна быть равной или большей, чем удвоенная ширина его полосы. Математически условие, которое должна выполнять частота дискретизации, описывается следующим выражением:

$$(2f_c - B) / m \geq f_s \geq (2f_c + B) / m + 1$$

где  $f_c$  - центральная частота в спектре сигнала;

$f_s$  - частота дискретизации;

$B$  - ширина спектра сигнала;

$m$  - произвольное целое число, выбираемое таким образом, чтобы выполнялось соотношение  $f_s \geq 2B$ .

При полосовой дискретизации оцифровке подвергается не вся полоса частот, а лишь небольшая ее часть. При этом для защиты от наложения спектра необходимо использовать полосовые аналоговые фильтры. Стоит также отметить, что полосовая дискретизация позволяет одновременно с оцифровкой сигнала произвести перенос его спектра на низкую частоту.

В обоих случаях на входе преобразователя необходимо использовать аналоговые фильтры для защиты от наложения спектра. При этом, чем выше частота дискретизации, тем менее жесткие требования предъявляются к аналоговому фильтру. На практике разработчики стараются обеспечить такую частоту дискретизации, чтобы на входе АЦП было достаточно использовать трех- или четырехкаскадный пассивный фильтр. Для диапазона частот до 25 МГц можно применить как схему с непосредственной дискретизацией сигнала по Котельникову, так и полосовую дискретизацию.

Цифровые устройства в радиоприемнике решают следующие задачи:

- выделение требуемого канала;
- перенос спектра сигнала на низкую частоту
- декодирование содержащихся в сигнале данных или детектирование.

Для решения этих задач могут применяться различные устройства и их сочетания. Первичную, неинтеллектуальную обработку, включающую канальную фильтрацию, гетеродинирование, понижение частоты дискретизации (децимацию), чаще всего выполняют либо при помощи быстродействующей программируемой логики (*FPGA*), либо в специализированных микросхемах - цифровых приемниках (*digital down converter - DDC*).

## 14.4. Структура цифрового приемника 1288ХК1Т

В качестве примера подобных микросхем можно привести *AD6620* компании *ADI* и *1288ХК1Т* производства ФГУП НПЦ «Элвис», структура которой изображена на рис. 14.3. Устройство *1288ХК1Т* обладает следующими возможностями:

- наличие 4-х независимых каналов для обработки 16-разрядных сигналов;
- скорость входного потока данных до 100 МГц в каждом канале;
- совместимость со многими типами АЦП;
- возможность гибкой настройки внутренней структуры микросхемы для обработки как действительных, так и комплексных сигналов.

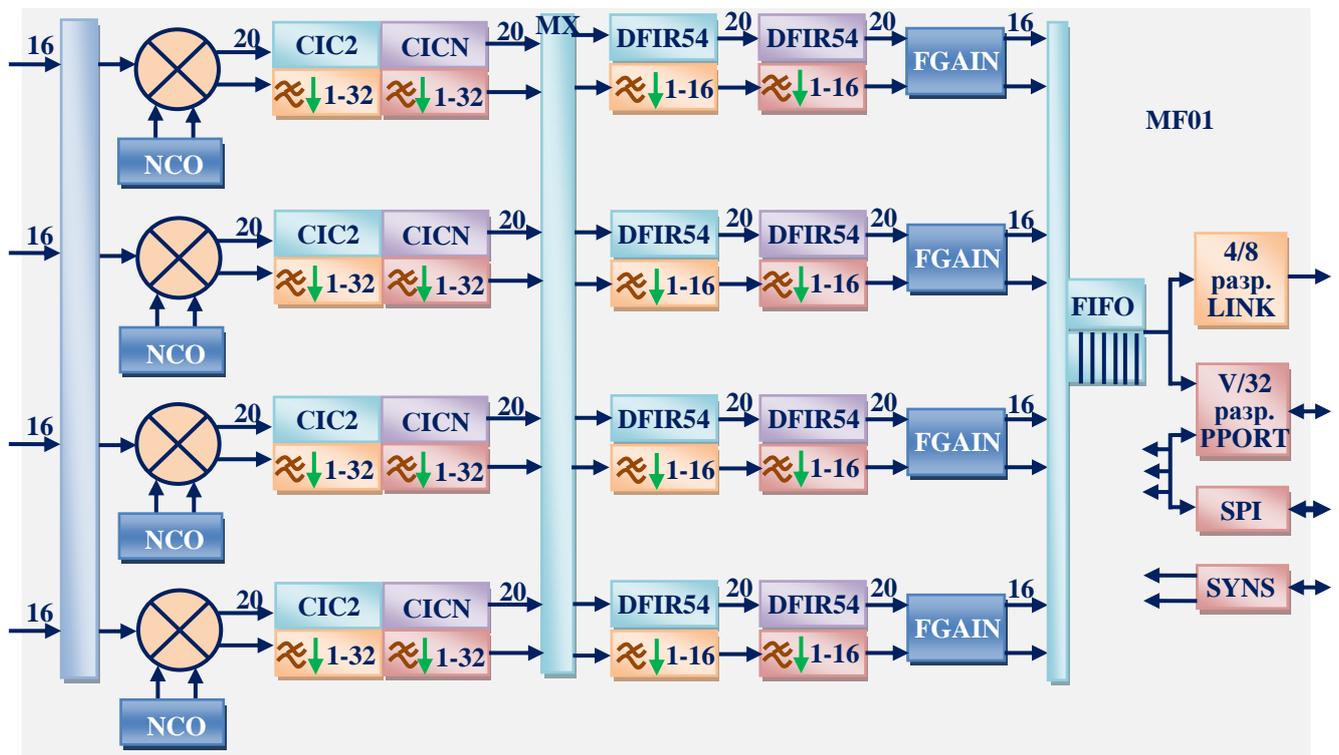


Рис. 14.3. Структура цифрового приемника *1288ХК1Т*

Микросхема содержит *СИС*-фильтры для понижения частоты дискретизации, по два *КИХ*-фильтра 64 порядка в каждом канале, цифровые гетеродины для получения квадратурных сигналов и удобный выходной интерфейс для чтения данных. Коэффициенты фильтров, коэффициенты децимации каждого каскада, маршрутизация данных внутри чипа и многие другие параметры задаются программно. Все это делает микросхему *1288ХК1Т* и ее аналоги удобными для применения в самых разных системах цифрового приема. Для окончательной обработки сигнала, декодирования данных, обработки декодированного битового потока и реализации протоколов более высокого уровня применяются цифровые сигнальные процессоры.

После дискретизации задача выделения требуемого канала решается при помощи цифровых фильтров, которые представляют собой набор постоянных чисел — коэффициентов фильтра, количество и значения которых определяют его вид и крутизну характеристики. Различают два основных класса цифровых фильтров — нерекурсивные (*КИХ*-фильтры) и рекурсивные (*БИХ*-фильтры). *КИХ*-фильтры имеют известные преимущества перед рекурсивными, которые заключаются в их устойчивости, меньшей подверженности эффектам квантования и возможности получения линейной фазовой характеристики, что особенно важно в системах связи. В этой связи в цифровых радиоприемных устройствах более широкое распространение получили именно нерекурсивные фильтры.

Для проектирования цифровых фильтров, также как и для разработки аналоговых активных и пассивных фильтров, применяются разнообразные программные средства. Для расчета коэффициентов фильтра от разработчика

требуется только определение требований к фильтру, но не знание алгоритмов и методов расчета коэффициентов. Широкое распространение для проектирования дискретных фильтров получил пакет Matlab, т.к. он позволяет провести расчет фильтра различными методами, с применением разных окон и т.д. Кроме того, для расчета коэффициентов фильтра можно использовать, как режим командной строки, так и графический интерфейс приложения *Filter design and analysis tool (FDA Tool)*.

После расчета, как правило, коэффициенты фильтра сохраняются в файле необходимого формата для дальнейшего использования в соответствующей программе, однако в возможности пакета Matlab входит также моделирование работы фильтра в цифровой системе при помощи приложения Simulink и загрузка в поддерживаемые отладочные комплекты.

По сравнению с аналоговыми цифровые фильтры имеют следующие преимущества.

- возможность получения недоступных для аналоговых фильтров характеристик (как крутизны АЧХ, так и линейности ФЧХ). Увеличение порядка цифрового фильтра приводит лишь к увеличению количества математических операций, так что порядок фильтра ограничен только быстродействием цифровой системы;

- цифровые фильтры не подвержены влиянию старения и температурного дрейфа параметров;

- т.к. цифровой фильтр представляет собой набор чисел — коэффициентов, то для изменения характеристики достаточно изменить набор коэффициентов, что делает возможным создание адаптивных фильтров;

– цифровые фильтры могут работать как с низкочастотными, так и с высокочастотными сигналами.

Подводя итоги, хочется отметить, что появление радиоприемных устройств с цифровой обработкой сигналов стало логичным продолжением развития цифровой техники. Использование цифровой обработки сигналов позволило разрабатывать системы высокоскоростного обмена данными по радиоканалам с применением цифровых методов модуляции радиосигнала. В зависимости от стадии приема, на которой используется цифровая обработка, возможно получение как недорогих, компактных и малопотребляющих устройств вплоть до систем на кристалле, так и изделий, отвечающих жестким требованиям по избирательности, динамическому диапазону, чувствительности и другим параметрам, что достигается правильным сочетанием аналоговой и цифровой частей приемного тракта. Наиболее вероятно, что в перспективе развитие «цифрового» приема будет идти по пути увеличения скоростей дискретизации и обработки, что позволит охватить все более широкий диапазон частот, и при этом будет уменьшаться доля аналоговой схемотехники в структуре приемника.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение на технологию *SDR*?
2. Приведите структуру приемника с ЦОС по радиочастоте и поясните его принцип работы?
3. Приведите структуру приемника с ЦОС по промежуточной частоте и поясните его принцип работы?
4. В чём состоят недостатки супергетеродинных приемников?

5. Какие достоинства имеются у приемника с ЦОС по промежуточной частоте?
6. Как математически описывается условие частоты дискретизации?
7. Какие элементы входят в цифровое устройство радиоприемника?
8. Какие функции выполняют цифровые устройства в радиоприемнике?
9. Объясните структуру цифрового приемника 1288ХК1Т?
10. Перечислите возможности цифрового приемника 1288ХК1Т?

## 15. ПРИЕМНИКИ АНАЛОГОВОГО И ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

### 15.1. Структура телевизионного приёмника

В телевизионном приёмнике (рис. 15.1) осуществляется обратный процесс преобразования принятого антенной телевизионного радиосигнала в яркостную картину изображения на экране телевизионной трубки.

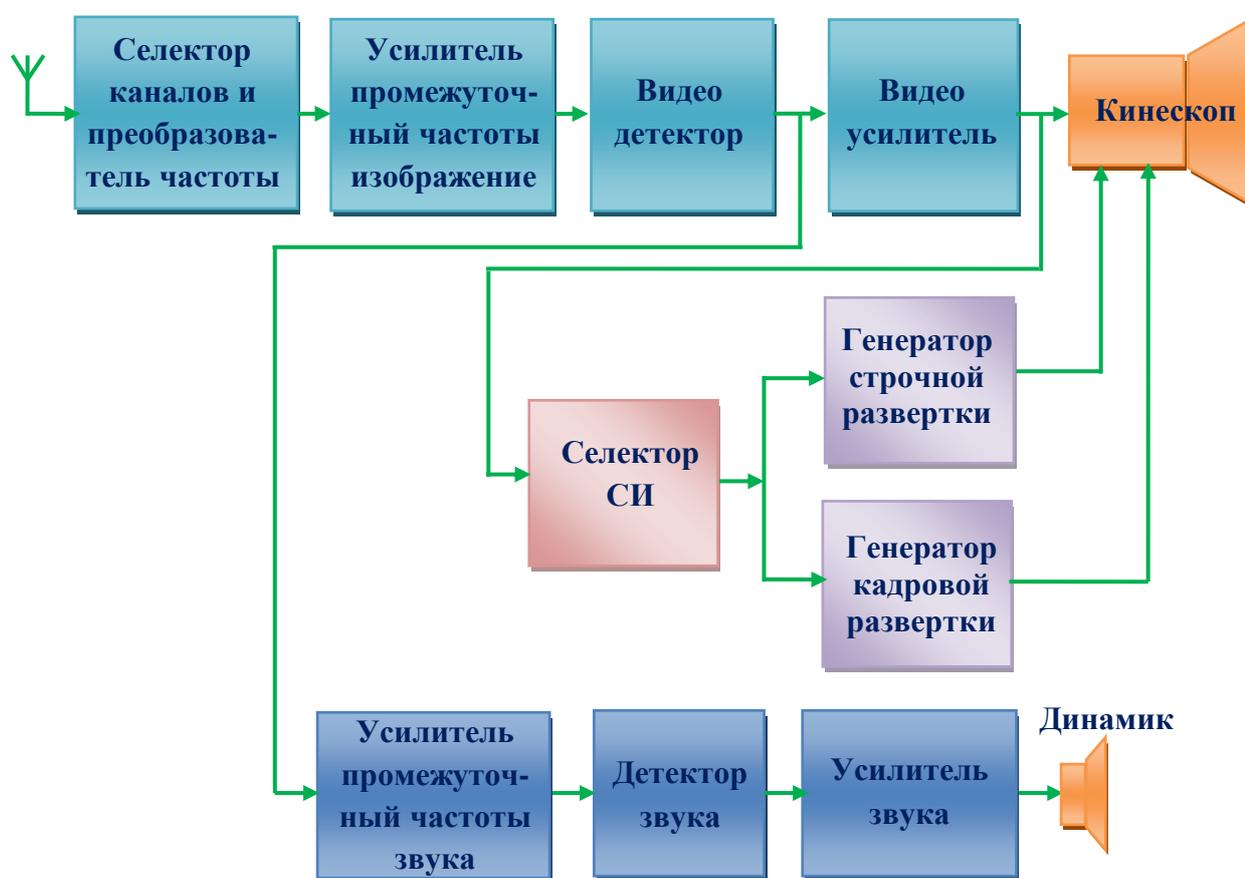


Рис. 15.1. Структура телевизионного приёмника

В селекторе каналов и преобразователе частоты происходит осуществление разделения частотных каналов и преобразование принятого радиосигнала в сигнал промежуточной частоты. Основное усиление сигналов изображения и звука производится на промежуточной частоте.

Сигнал изображения детектируется в видеодетекторе. Здесь же происходит разделение сигналов изображения и звука. Далее сигнал изображения усиливается в видеоусилителе и подаётся на кинескоп.

Сигнал промежуточной частоты звукового канала усиливается в УПЧ звука и, после детектирования в частотном детекторе и усиления в усилителе звука, подается на громкоговоритель.

Синхронность развёрток электронных лучей приёмника и передатчика обеспечивается выделением синхроимпульсов из принятого видеосигнала.

Параметры систем чёрно-белого телевидения:

- частота смены кадров = 25 Гц;
- частота смены полей при чересстрочной развёртке = 50 Гц;
- число строк в кадре  $Z=625$ ;
- частота следования строк 15 625 Гц;
- число элементов разложения в строке = 33;
- число элементов разложения в кадре = 521 000 п;
- длительность развёртки строки с обратным ходом 64 мкс;
- длительность развёртки кадра с обратным ходом 0,04 с;
- ширина полосы частот сигнала изображения 6,5 МГц;
- ширина полосы частот видеосигнала изображения и звукового сопровождения 8 МГц.

### **13.2. Структурная схема цветного телевизионного приёмника**

Структурная схема цветного телевизионного приёмника приведена на рис. 15.2.

Основное отличие цветного телевизионного приёмника – блок цветности, формирующий три сигнала цветности  $E_G$ ,  $E_R$  и  $E_B$ . Фильтр  $E_Y$  с полосой частот 6,5 МГц, включённый на выходе видеоусилителя, выделяет сигнал яркости.

Сигнал  $E_Y$  с выхода видеоусилителя поступает также на фильтры цветоразностных сигналов (ЦРС), которые выделяют ЧМ цветоразностные сигналы с несущими частотами  $f_{ЦР.В}$  и  $f_{ЦР.Р}$ . С помощью электронного коммутатора, управляемого синхро-импульсами строк, цветоразностные сигналы поступают на ЧД. С выхода усилителей протектированные цветоразностные видеосигналы  $E_G - E_Y$  и  $E_R - E_Y$  вместе с сигналами яркости  $E_Y$  подаются на матрицу, на выходе которой получают три сигнала цветности  $E_G$ ,  $E_R$  и  $E_B$ . Эти сигналы вместе с сигналами яркости  $E_Y$  поступают на цветной кинескоп и формируют цветное изображение на экране.

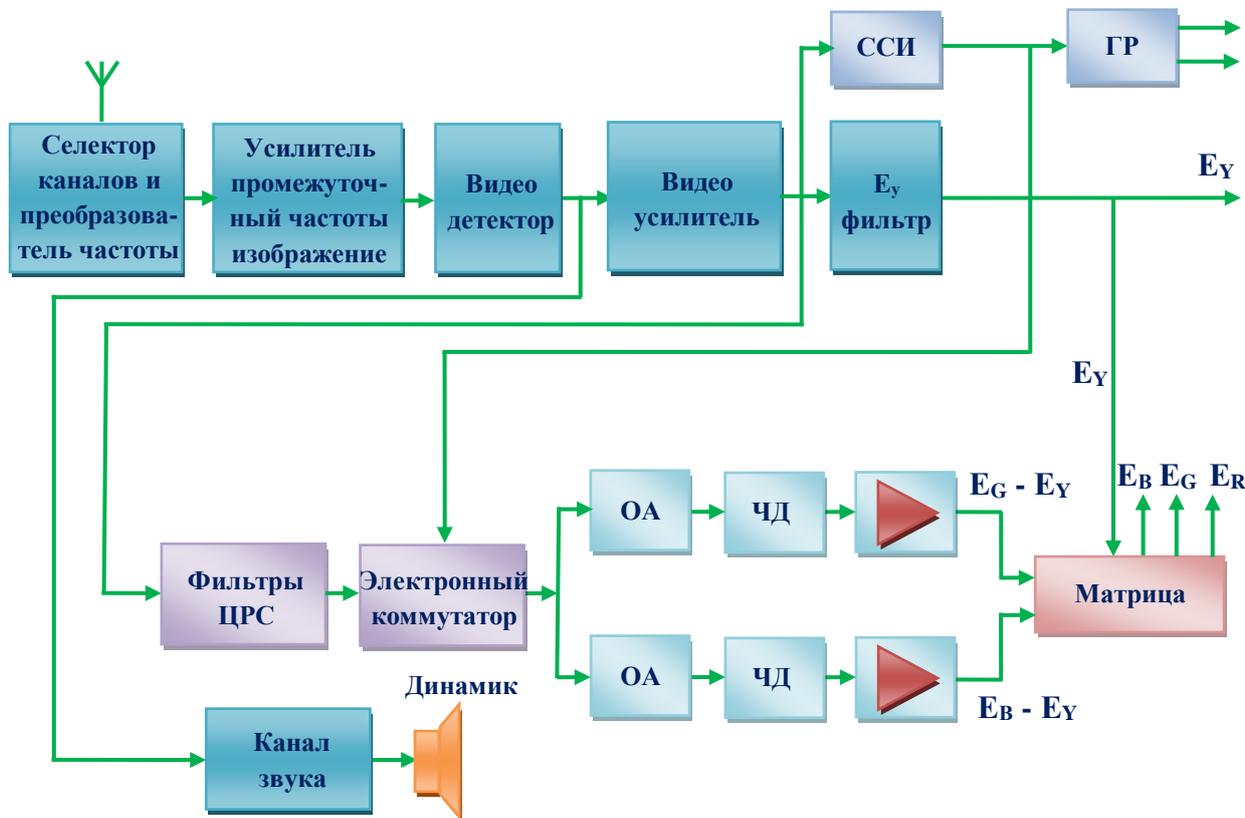


Рис. 15.2. Структурная схема цветного телевизионного приёмника

### 15.3. Структурная схема ЖК телевизора

На рис. 15.3 приведена структурная схема ЖК телевизора.

Здесь в основном используется цифровая обработка сигнала. Например *COFDM* - обработка данных с ортогональным частотным разделением каналов с кодированием, широко использующееся в телевидении. Аббревиатура *LVDS* - способ передачи сигналов на матрицу. Инвертор - вырабатывает напряжение для ламп подсветки (или светодиодов в телевизорах *LCD* и *OLED*) и регулирует его. Флеш память (ПЗУ) - это собственная память телевизора хранящая информацию о ваших настройках, встроенных функциях, управлении приемником. ОЗУ - оперативная память, участвует в обработке данных при работе ТВ.

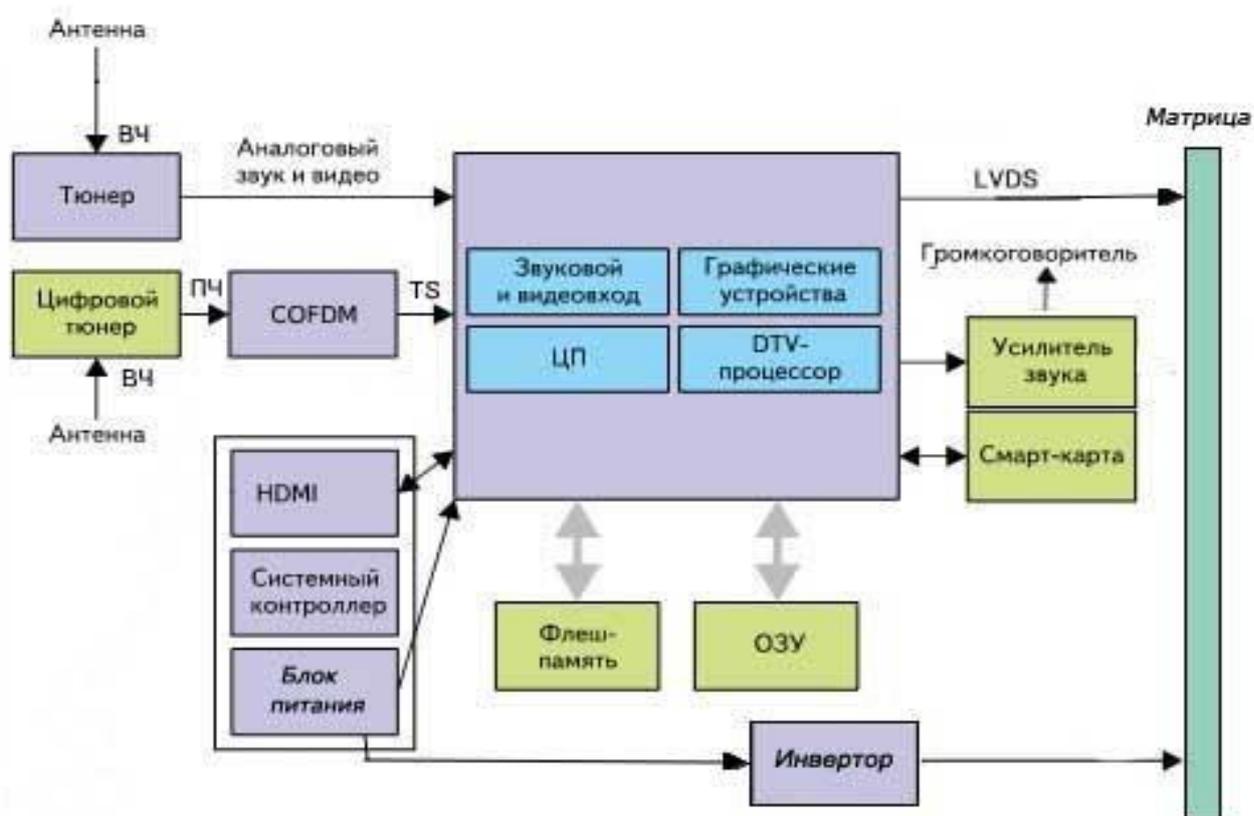


Рис. 15.3. Структурная схема ЖК телевизора

## 15.2. Принципы построения абонентских цифровых приставок-декодеров

Функциональная схема абонентской приставки для приема программ цифрового телевидения приведена на рис. 15.4.

Цифровая приставка состоит из следующих основных элементов:

- моноплаты приема и обработки цифровых сигналов, а также кодирования полученного аналогового сигнала в системе PAL;
- сетевой платы импульсного блока питания; корпуса;
- инфракрасного (ИК) пульта дистанционного управления (ДУ).

В качестве опций предполагается наличие жесткого диска для записи и хранения отдельных телевизионных программ и устройства для чтения *smart-card*.



Рис. 15.4. Функциональная схема абонентской приставки цифрового телевидения

Управление режимами работы цифровой приставки осуществляется как с ИК-пульта ДУ при помощи системы экранных меню на русском языке, так и с кнопочной панели. Подключение к аналоговому телевизору можно производить через разъем *SCART* или тюльпаны *RCA*.

Цифровые приставки системы *DVB-T* работают с обычной телевизионной антенной, причем осуществляется качественный прием даже

на комнатную антенну в условиях, где аналоговый прием уже невозможен из-за помех и переотражений сигналов.

Обобщенная структурная схема абонентской цифровой приставки-декодера (STB), которая может быть подключена к антенному входу обычного аналогового телевизора представлена на рис. 15.5.

Канальный декодер приставки включает в себя цифровой демодулятор и узел коррекции ошибок. Декодер преобразует принятые высокочастотные модулированные сигналы в цифровой транспортный поток, содержащий пакеты данных мультиплексированных программ. Цифровой транспортный поток поступает на демультимплексор, который опознает каждый пакет по находящемуся в нем программному идентификатору и перекомпоновывает данные с целью создания пакета выбранной программы.

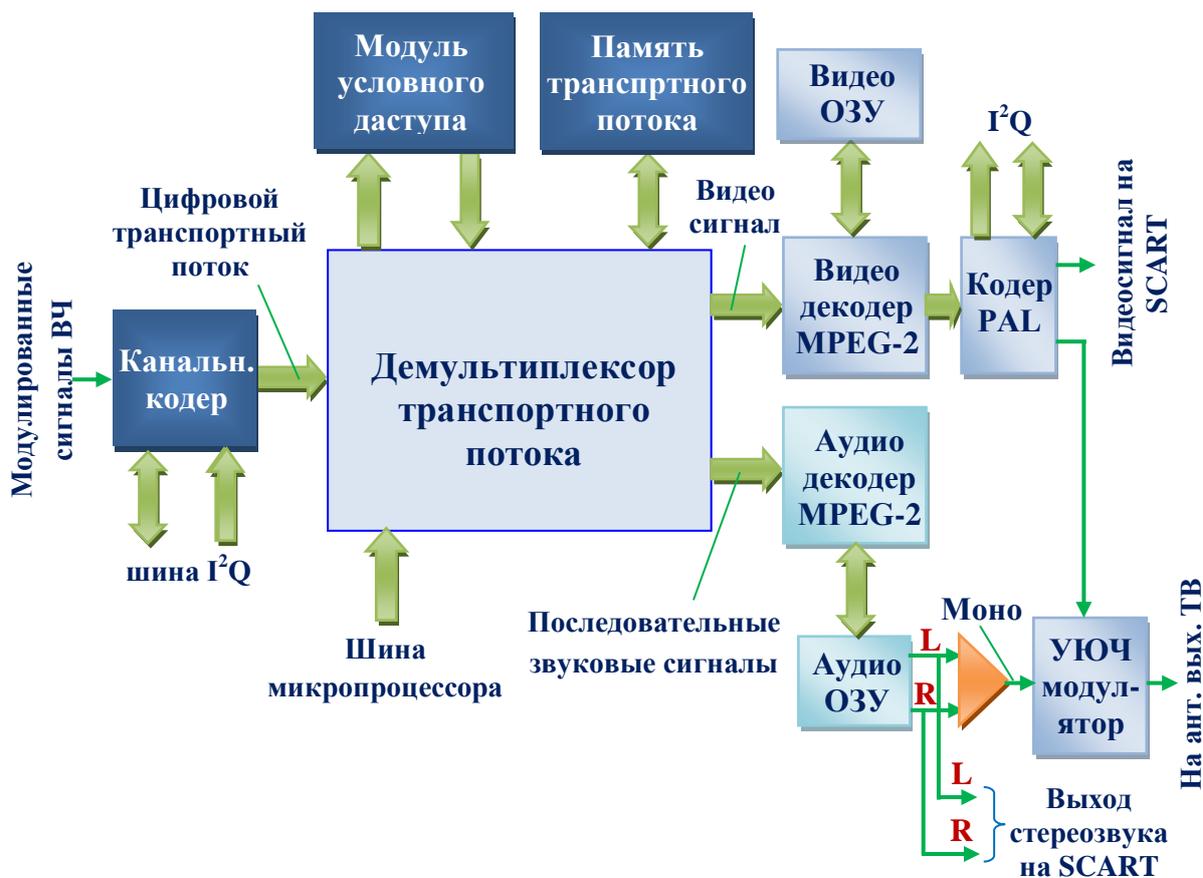


Рис. 15.5. Обобщенная структурная схема абонентской цифровой приставки-декодера

Если пакет скремблируется, то есть цифровой сигнал преобразуется, в результате чего разрушаются корреляционные связи между символами исходного сигнала, изменяются его статические свойства и он приобретает свойства случайного сигнала, то он поступает в модуль условного доступа, предназначенный для определения возможности зрителем пользоваться выбранной программой. Если это недоступно, то обработка сигналов прекращается. Если это делать можно, то сигнал возвращается в демультимплексор, откуда два набора цифровых сигналов подаются на соответствующие декодеры: один набор – однобайтовые (8 бит) видеосигналы, другой – последовательные сигналы звука.

Для хранения и последующей выдачи видео- и звуковых сигналов используется быстрая память транспортного потока СОЗУ 8К

Видеодекодер стандарта *MPEG-2* преобразует видеосигналы в сигналы яркости  $E_Y$  и цветности  $E_G$ ,  $E_R$  и  $E_B$ . Большая память видеоданных в микросхеме ДОЗУ необходима для одновременного хранения информации о нескольких кадрах.

Цифровые сигналы яркости и цветности передаются в кодер *PAL*, который преобразовывает их в полный аналоговый телевизионный сигнал, поступающий затем в УВЧ-модулятор.

Звуковой канал содержит декодер *MPEG*, который декодирует звуковой сигнал по тем же правилам, что и при его кодировании в передатчике. Звуковой декодер формирует левый ( $L$ ) и правый ( $R$ ) аналоговые звуковые сигналы. Микросхема ДОЗУ звуковых сигналов необходима для их хранения в памяти и создает задержку для обеспечения синхронизации звука и изображения. Задержка необходима, поскольку обработка видеосигналов производится дольше, чем обработка звуковых сигналов.

Звуковые сигналы обоих каналов поступают на суммирующий усилитель, где создается сигнал монофонического звука, подаваемый на УВЧ-модулятор. Сигнал с УВЧ-модулятора может быть подан на антенный вход обычного телевизора.

Для более глубокого понимания принципов работы цифровой абонентской приставки рассмотрим более детально устройство канального декодера, называемого также внешним интерфейсом. Структурная схема канального декодера, являющегося одной из основных частей цифровой приставки к аналоговому телевизору, приведена на рис. 15.6.



Рис. 15.6. Структурная схема канального декодера

В селекторе каналов (тюнере), входящем в состав канального декодера, входной модулированный высокочастотный сигнал смешивается с сигналом гетеродина, который является *маломощным генератором, управляемым напряжением (ГУН)*. В результате чего на выходе селектора каналов формируется модулированная ПЧ, состоящая из сигналов двух квадратурных составляющих *I* и *Q*. Для передачи на цифровой демодулятор ПЧ

квадратурные составляющие  $I$  и  $Q$  следует преобразовать в цифровую форму с помощью АЦП. Цифровой демодулятор представляет собой микросхему демодулятора *COFDM*.

Демодулятор управляется и программируется системным микроконтроллером по цифровой шине  $I^2C$ . Он оценивает мощность входного сигнала и управляет работой селектора каналов с помощью схемы АРУ. Одновременно демодулятор через схему управления изменяет частоту гетеродина селектора.

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс осуществляется в телевизионном приемнике?
2. Приведите структурную схему телевизионного приемника и объясните принцип его работы?
3. Перечислите параметры систем черно-белого телевидения?
4. Из каких основных элементов состоит структурная схема цветного телевизионного приемника?
5. Приведите структурную схему цветного телевизионного приемника и объясните принцип его работы?
6. Приведите структурную схему современного ЖК телевизора на технологии *LVDS* и объясните принцип его работы?
7. Из каких основных элементов должен состоять телевизионный приемник для приема программ цифрового телевидения?
8. Приведите функциональную схему абонентского телевизионного приемника цифрового телевидения и объясните принцип его работы?

9. Приведите обобщенную структурную схему абонентского цифрового устройства и объясните принцип его работы?

10. Приведите структурную схему канального декодера и объясните принцип его работы?

## 16. ПРИЕМНИКИ АНАЛОГОВОГО И ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ

### 16.1. Переход от аналогового вещания к цифровому

Настоятельная необходимость перехода от аналогового вещания к цифровому обусловлена нарастающим процессом объединения средств вещания, связи, информационных служб и компьютерных систем в единую интерактивную сеть, что стало возможным благодаря стремительному мировому прогрессу в области цифровых технологий. Эти интеграционные процессы обуславливают все возрастающий интерес к проблемам повышения эффективности использования радиочастотного спектра (РЧС) и повышения качества и количества услуг в электросвязи.

В настоящее время проблема повышения эффективности использования РЧС в радиосвязи выходит во всем мире на передний план, диктуя необходимость развития цифровых методов вещания и связи. Помимо этого, необходимость внедрения систем цифрового радиовещания объясняется следующими двумя факторами. Первый из них определяет требование к качеству передачи и связан с широким распространением у населения компакт-дисков (*CD*) и, как следствие - появлением в связи с этим потребности в высококачественном звучании, которое становится общепринятым стандартом. Второй фактор - требование сохранения этого качества в условиях подвижного (мобильного) приема. Исследования показали, что в рамках существующих (аналоговых) систем эфирного радиовещания одновременное удовлетворение этих требований практически невозможно.

В соответствии с мировым опытом, задача перспективного развития звукового вещания (ЗВ) решается путем создания абсолютно новых систем вещания, спроектированных таким образом, чтобы удовлетворить высоким требованиям слушателей к качеству звучания программ при различных условиях приема. Этим требованиям отвечает **цифровое радиовещание** - новая информационная технология, в основе которой представление и передача звукового сигнала в цифровой форме во всех звеньях вещательного тракта - от студии до мобильного приемника.

По сравнению с аналоговым цифровое радиовещание имеет ряд существенных технических преимуществ, среди которых: большая эффективность использования радиочастотного спектра, меньшие мощности передатчиков при той же зоне обслуживания, меньшая чувствительность к помехам.

Несмотря на бурное развитие телевидения - на сегодняшний день важнейшего электронного средства массовой информации, эфирное радиовещание во всем мире продолжает оставаться основным источником информации для населения. Для эфирного радиовещания в мире используется несколько служб, различающихся целями, техническими параметрами и зонами обслуживания. Основные характеристики существующих систем эфирного радиовещания приведены в табл. 16.1, где для сравнения указаны планируемые параметры цифрового радиовещания. Эти системы условно можно разделить на три класса:

1) системы с амплитудной модуляцией (АМ), использующие диапазоны КМВ, ГМВ и ДКМВ (т.е. частоты ниже 30 МГц), что по терминологии "Регламента радиосвязи" (в дальнейшем – РР [78]) соответствует диапазонам НЧ, СЧ и ВЧ;

2) МВ (УКВ) ЧМ системы, использующие метровые волны, т.е. работающие на частотах 30...300 МГц в диапазоне ОВЧ;

3) системы непосредственного спутникового радиовещания (*DSR, ADR, World Space, Digital System E* и ряд других), работающие в диапазонах УВЧ и СВЧ.

Таблица 16.1.

Основные характеристики существующих систем эфирного радиовещания

Диапазон волн/служба	Вещательные зоны	Число звуковых программ	Полоса звуковых частот, кГц	Отношение сигнал/несущая, дБ	Моно/стерео	Фиксированная/подвижная
КМВ	Национальное вещание, смежные государства	3...5	4,5...5,0	20	М	Ф+П
ГМВ	То же	8	4,5...5,0	20	М	Ф+П
ДКМВ	Весь мир		4,5...5,0	0	М	Ф(П)
МВ/УКВ	Региональное и местное вещание	5...10	15	50	М/С	Ф(П)
DSR, ADR	Национальное вещание, смежные государства	16	15	70	М/С	Ф
ЦРВ (наземное)	Региональное и местное вещание	$\geq 6$	$>15$	70	С	Ф+П
ЦРВ (спутниковое)	Национальное вещание, смежные государства	$\geq 16$	$>15$	70	С	Ф+П

## 16.2. Радиовещательные приемники

Высокочастотный тракт радиовещательных приемников выполняют по супергетеродинной схеме. Переносные приемники IV класса имеют лишь диапазоны длинных (ДВ) и средних (СВ) волн. В этих диапазонах применяется амплитудная модуляция радиопередатчиков, и поэтому приемники IV класса рассчитаны на прием АМ сигналов. В стационарных приемниках III класса предусматривается прием УКВ вещательных станций с частотной модуляцией (ЧМ). Поэтому приемники III класса кроме диапазонов ДВ и СВ имеют диапазон УКВ. Структурная схема стационарного приемника III класса изображена на рис.16.1.

Схема состоит из двух трактов радиочастоты (ТРЧ) и общего тракта промежуточной частоты (ТПЧ). Приемник имеет две антенны: антенна диапазона УКВ и антенна диапазонов ДВ, СВ и КВ. Для диапазонов КВ и УКВ используется внешняя телескопическая антенна, а для диапазонов ДВ и СВ внутренняя магнитная антенна.

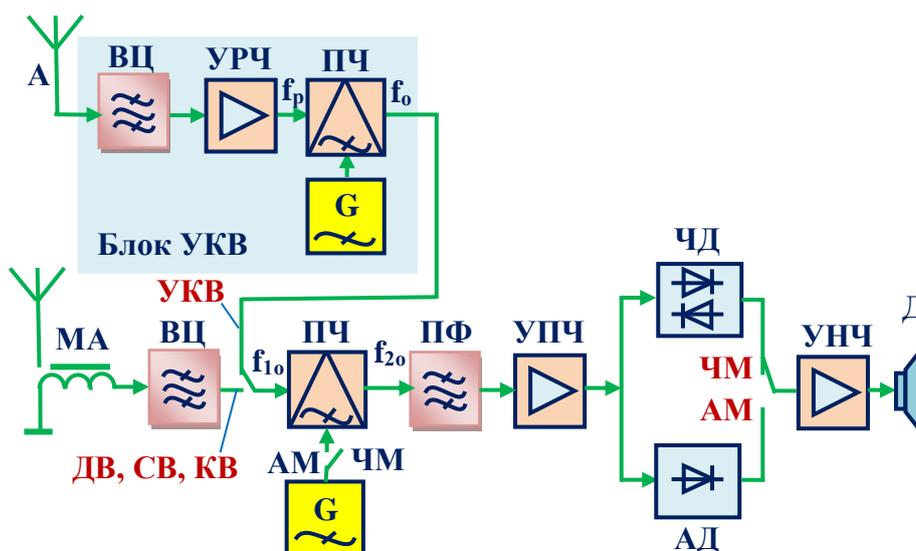


Рис.16.1. Структурная схема стационарного приемника III класса

Сигнал от антенны поступает на входную цепь (ВЦ), частота которой изменяется по диапазону. ВЦ выделяет нужную частоту и подавляет остальные. Выделенный сигнал получается слабый, он усиливается с помощью каскадов УРЧ. После этого сигнал преобразуется в сигнал промежуточной частоты с помощью преобразователя частоты (ПЧ) и усиливается на каскадах УПЧ, общих для всех диапазонов.

УПЧ имеет два контура и они настроены на частоты 465 кГц (для ДВ, СВ, КВ) и 10,7 МГц (для УКВ). Усиленный до требуемого значения сигнал детектируется с помощью отдельных АД и ЧД детекторов. После чего сигнал усиливается до необходимой мощности на УНЧ каскадах и с помощью акустической системы (Д) преобразуется в акустические (звуковые) волны.

### **16.3. Стерефоническое радиовещание**

Одним из способов повышения качества звука (музыки) являются передача и прием стерефонического сигнала.

Стерефонический сигнал даёт эффект источника звука в пространстве (концертном зале) и слушатель может чувствовать себя сидящим в концертном зале.

Для создания полного стереоэффекта требуется отдельный микрофон и отдельный усилитель для каждого источника звука.

Два микрофона, два усилителя и две акустические системы могут создать удовлетворительный стереоэффект. Такая система называется двухканальной стереофонией.

Стерефонический сигнал можно сформировать тремя способами. При передаче стереосигнала по радио монофонический приемник тоже должен

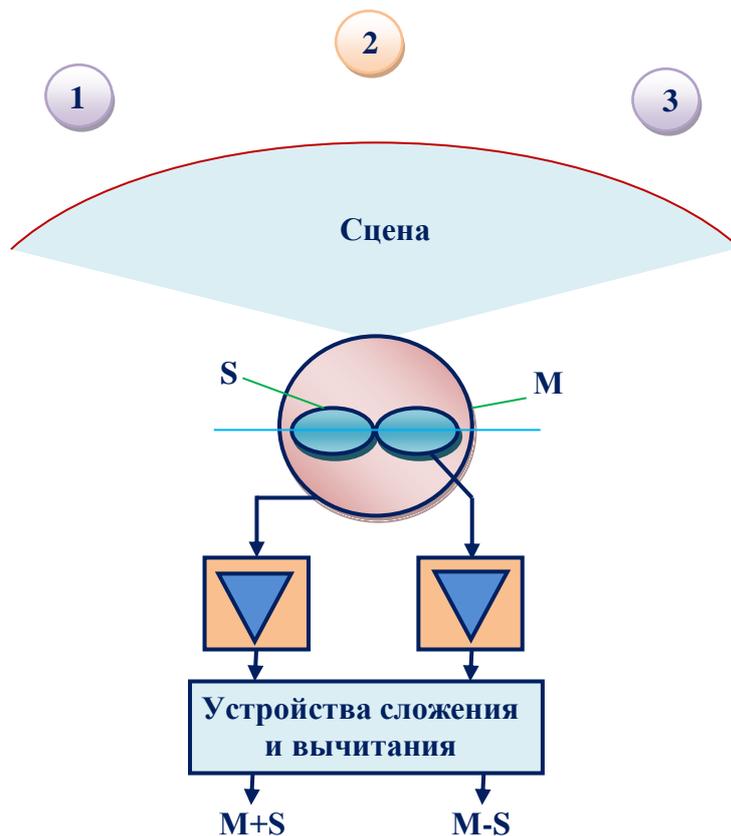
принимать стереофонический сигнал. Для выполнения этой задачи один из микрофонов должен принимать все звуки на сцене (рис. 16.2). В этом случае используется микрофон  $M$  с диаграммой направленности в форме круга.

Второй микрофон  $S$  должен принимать звуки от двух краев сцены, его диаграмма направленности должна быть в форме “восмерки”. Сигнал, образующийся на микрофоне  $S$  подается на схему специального устройства сложения и вычитания. Такой способ формирования стереосигнала называется системой  $L/5$ .

На рис.16.2 приведена схема формирования стереосигнала на основе системы  $MC$  - Миттел-Сеите (середина-край).

На рис.16.3 приведена мостовая схема устройства сложения и вычитания напряжений образующихся на микрофонах. При совпадении направлений сигналов они суммируются, а при несовпадении (встречном направлении) они вычитаются. Микрофоны устанавливаются в одной точке, в результате чего фазы звуков будут одинаковые и в канале  $I$  будет формироваться их постоянная сумма, а на канале  $II$  будет - их постоянная разность.

В радиопередатчике с помощью сложения и вычитания сигналов  $M$  и  $S$  создаются сигналы  $M+S$  и  $M-S$ . В виду того что, диапазоны частот обоих сигналов одинаковы,  $M-S$  сигнал модулируется по амплитуде на дополнительной несущей частоте 31,25 кГц, в результате чего образуется полярно-модулированный стереосигнал, имеющий широкий спектр. После чего этот сигнал модулируется по частоте на ультракороткой волне, усиливается и излучается через антенну. На рис.16.4 показан частотный спектр этого стереосигнала.



1, 2, 3 – источники звука;  $M$  - диаграмма направленности микрофона, получающего полную звуковую информацию на сцене;  $S$  - диаграмма направленности микрофона, принимающего звук от краев сцены

Рис. 16.2. Схема формирования стереосигнала на основе системы МС - Миттел-Сейте

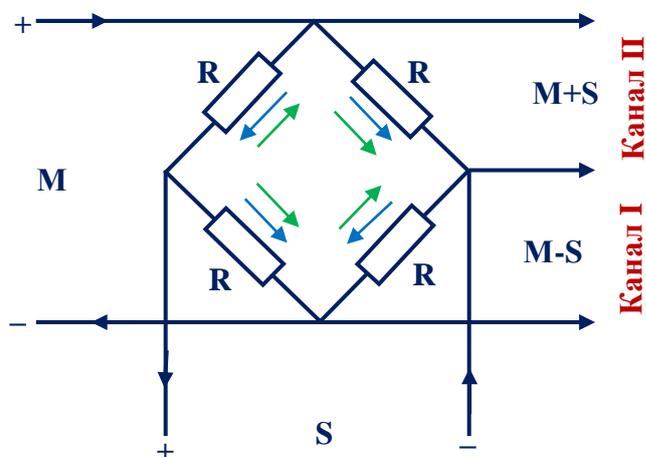


Рис. 16.3. Мостовая схема устройства сложения и вычитания напряжений, образующихся на микрофонах

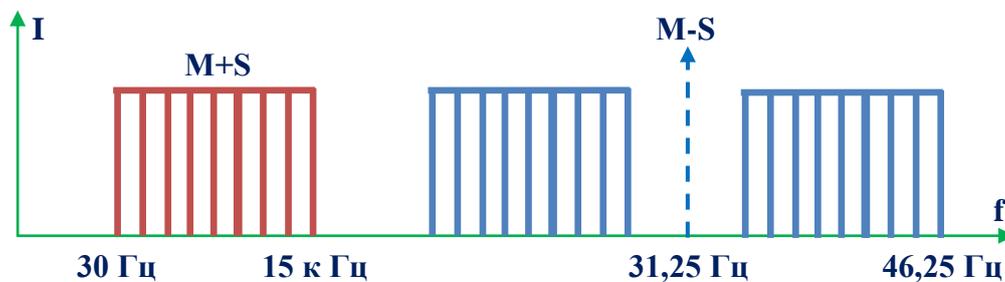


Рис. 16.4. Частотный спектр стереосигнала

Как видно, из рис.16.4, частотный диапазон передаваемого сигнала занимает полосу от 30 Гц до 46,25 кГц, поэтому стереофоническое радиовещание можно осуществлять только в УКВ диапазоне. Стереорадиоканал модулированный по частоте охватывает диапазон, равный 190 кГц.

Структурная схема высокочастотного тракта с детектором приемника стереовещания не отличается от структурной схемы приемника ЧМС.

Укрупненная структурная схема приемника стереофонического вещания изображена на рис. 16.5. Здесь КСС, полученный на выходе частотного детектора, подается на стереодекодер (СД), который выделяет сигналы левого и правого каналов стереопары. Далее происходит усиление сигналов левого и правого каналов в отдельных усилительных трактах, где осуществляется коррекция передыскажений. Усиленные колебания левого и правого каналов подаются на электроакустические преобразователи (громкоговорители). Громкоговорители располагаются так, чтобы создать необходимый стереоэффект.

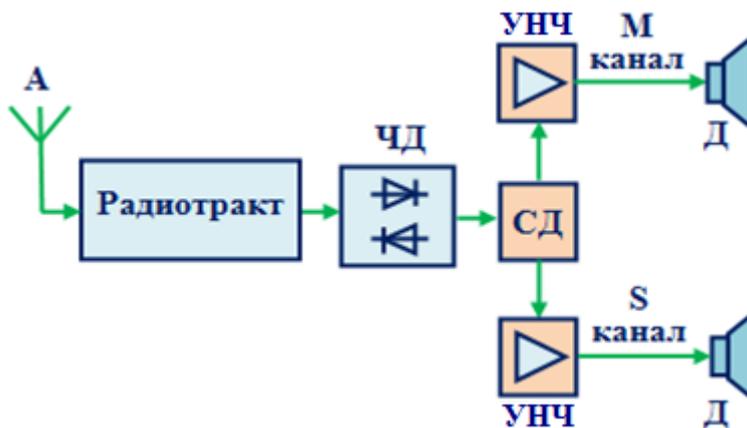


Рис. 16.5. Укрупненная структурная схема приемника стереофонического вещания

Структурная схема стереодекодера приведена на рис. 16.6.

В стереодекодере выполняются следующие операции:

- коррекция линейных искажений КСС, возникающих в высокочастотном тракте приемника;
- восстановление амплитуды поднесущего колебания;
- детектирование полярно-модулированного колебания;
- коррекция предискажений сигнала.

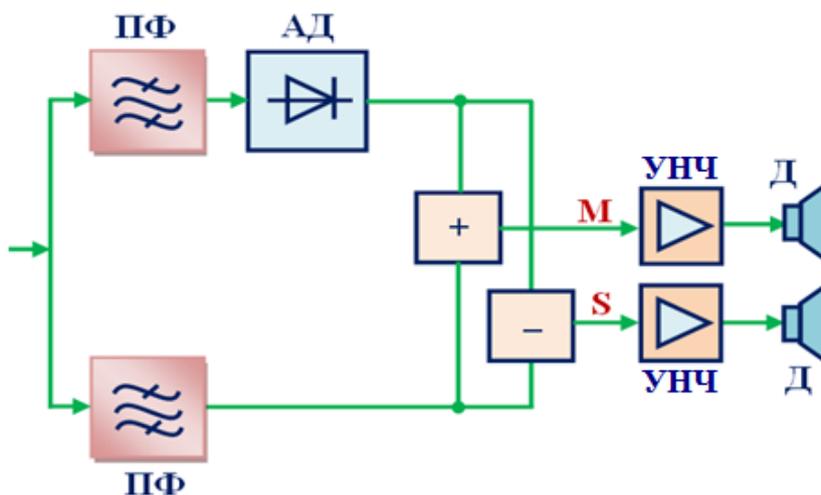


Рис. 16.6. Структурная схема стереодекодера приемника стереофонического вещания

Обычно используются следующие принципы разделения сигналов стереопары в стереодекодерах:

1) диодное детектирование полярно-модулированного колебания (ПМК);

2) разделение тональных и надтональных составляющих КСС с последующей их обработкой;

3) преобразование ПМК в АИМК с последующим выделением сигналов стереоканала.

### **Контрольные вопросы**

1. На какие виды подразделяются радиовещательные приемники?
2. В каких диапазонах используются стационарные приемники III класса?
3. В каких диапазонах используются стационарные приемники IV класса?
4. Приведите структурную схему и поясните принцип работы радиовещательного приемника III класса?
5. Как организуется стереофоническое радиовещание?
6. Приведите структурную схему и поясните принцип формирования стереосигнала на основе системы МС - Миттела-Сеите (Средина-Край)?
7. Приведите структурную схему и поясните принцип работы устройства сложения и вычитания напряжений, возникающих на микрофонах на основе мостовой схемы?
8. Приведите и объясните графика частотного спектра стереосигнала?

9. Приведите и объясните структурную схему стереофонического приемника?

10. Из каких элементов состоит структурная схема стереодекодера и поясните принцип работы стереодекодера?

## СПИСОК ТЕРМИНОВ

### **Приемопередатчик**

**uz** - қабул қилгич-узаткич

**en** - transceiver

Устройство, которое как передает, так и получает информацию; размещается в радиоплате интерфейса сети.

Ахборотни ҳам узатадиган, ҳам қабул қиладиган қурилма; тармоқ интерфейсининг радиоплатасида жойлаштирилади.

### **Радиосигнал**

**uz** - радиосигнал

**en** - RF signal

Сигнал, частота которого соответствует диапазону радиоволн, используется для передачи информации через воздушную среду.

Частотаси радиотўлқинлар диапазониға мос келадиган сигнал. Ҳаво муҳити орқали ахборот узатиш учун фойдаланилади.

### **Фазовая манипуляция**

**uz** - фазавий манипуляция

**en** - phase shift keying (PSK)

Процесс модуляции, при котором для представления информации используются небольшие изменения фазы несущей, в результате чего возможна передача данных через радиоэфир.

Модуляция жараёни бўлиб, ахборотни тақдим этиш учун элтувчи фазаси сал ўзгартирилади, натижада маълумотларни радиоэфир орқали узатиш мумкин

бўлади.

## **Частотная манипуляция**

**uz - частотавий**

**манипуляция**

**en - frequency shift keying  
(FSK)**

Метод модуляции, при котором слегка изменяется частота несущего сигнала, за счет чего осуществляется представление информации способом, подходящим для ее передачи через воздушную среду.

Модуляция методи, бунда элтувчи сигнал частотаси сал ўзгартирилиши ҳисобига, ахборотни ҳаво муҳити орқали узатиш учун қулай бўлган усулда тақдим этиш амалга оширилади.

## **Амплитудно-частотная характеристика, АЧХ**

**uz - амплитуда-частотавий  
характеристика, АЧХ**

**en - gain-frequency  
characteristic**

Характеристика, определяющая значение амплитуды сигнала на выходе устройства или канала связи по сравнению с входной амплитудой для всех возможных частот передаваемого сигнала. Степень искажений сигнала (неравномерность АЧХ) оценивают по ширине полосы пропускания, измеряемой по заданному уровню (обычно 0,5).

Қурилма ёки алоқа канали чиқишидаги сигнал амплитудаси қийматини узатиладиган сигналнинг мумкин бўлган барча частоталари учун тегишли кириш амплитудаси билан таққослаб аниқловчи характеристика. Сигналнинг бузилиш даражаси (АЧХ нотекислиги) берилган сатҳ бўйича ўлчанадиган (у одатда 0,5 га

тенг) ўтказиш полосасининг кенглиги бўйича баҳоланади.

**возбудитель**

**uz - қўзғаткич**

**en - launcher**

Высокочастотный генератор передатчика, например, коаксиально-щелевого или волноводного типа.

Узаткичдаги юқори частотали, масалан, коаксиал-тирқишли ёки тўлқин ўтказгич туридаги генератор.

**время когерентности**

**uz - когерентлик вақти**

**en - coherence time**

Интервал времени, в пределах которого принимаемые сигналы могут рассматриваться как когерентные. Время когерентности в канале с замираниями зависит от разброса доплеровской частоты ( $f_d$ ) и определяется как  $1/f_d$ . При невысокой скорости перемещения абонента оно существенно больше, чем необходимо для интерактивного обмена. По этой причине временное разнесение «в чистом виде» на практике встречается крайне редко.

Вақт интервали, шу вақт оралиғида қабул қилинувчи сигналлар когерент деб қаралиши мумкин. Тинишлар кузатиладиган каналдаги когерентлик вақти доплер частотасининг тарқоқлиғига ( $f_d$ ) боғлиқ бўлади ва  $1/f_d$  кўринишида аниқланади. Абонент ҳаркатланишининг юқори бўлмаган тезлиғида у интерактив

алмашинув учун керак бўладиганидан кўра анча каттадир. Шу сабабли вақт бўйича тарқоқлик «соф ҳолда» амалда жуда кам учрайди.

**Гетеродин**

**uz - гетеродин**

**en - local oscillator**

Вспомогательный маломощный генератор электрических колебаний, применяемый для преобразования частоты в супергетеродинном приемнике.

Супергетеродинли қабул қилгичда частотани ўзгартириш учун қўлланиладиган, ёрдамчи, кичик қувватли электр тебранишлар генератори.

**Дуплекс; дуплексная  
передача**

**uz - дуплекс; дуплекс узатиш**

**en - duplex**

Процесс передачи сообщений по каналам связи одновременно в двух направлениях. Данный термин часто употребляется как прилагательное, означающее «дуплексный, одновременно двусторонний». В этом случае он характеризует тип канала связи или режим работы устройства, способного одновременно передавать и принимать информацию.

Алоқа каналлари бўйлаб хабарларни бир вақтнинг ўзида икки йўналишда узатиш жараёни. Бу атама «дуплекс, бир вақтнинг ўзида икки томонлама» маъносида ишлатилади. Бунда у бир вақтнинг ўзида ҳам узатиш, ҳам қабул

қилиш қобилиятига эга бўлган канал тури ёки қурилманинг ишлаш режимини тавсифлайди.

**замирание**

**uz - тиниш**

**en - fading**

Внезапное ослабление или даже полное исчезновение радиосигнала, обусловленное случайными изменениями параметров передающей среды (температуры, влажности, давления), а также из-за интерференции радиоволн, приходящих в точку приема по разным путям. При одних и тех же условиях распространения радиоволн замирания могут быть гладкими, если передаваемые сигналы узкополосные, и селективными, если они широкополосные. В зависимости от скорости изменения мгновенных значений сигнала замирания условно разделяются на быстрые и медленные.

Узатувчи муҳит параметрлари (ҳарорат, намлик, босим)нинг тасодифий ўзгаришлари, шунингдек, қабул нуқтасига турли йўллардан келувчи радиотўлқинлар интерференцияси билан боғлиқ ҳолда радиосигналнинг тўсатдан сусайиши ёки ҳатто, тўла йўқолиб қолиши. Агар узатилувчи сигналлар тор полосали бўлса радиотўлқинларнинг бир хил шароитларида тинишлар бир текисда бўлади, кенг полосали бўлганида эса селектив тинишлар кузатилади. Сигнал

оний қийматларининг ўзгариш тезлигига боғлиқ ҳолда тинишларнинг икки тури фарқланади: тез ва оҳиста.

**Затенение**

**uz - сояланиш**

**en - shadowing**

Медленные замирания на трассе между передатчиком и приемником, обусловленные экранирующим влиянием рельефа местности и городскими строениями. Например, в сетях сотовой связи этот вид замираний характерен для каждых (12-60) метров пути (временной интервал 1,2 s-6 s) при движении абонента со скоростью 36 km/h в городских условиях.

Жой рельефи ва шаҳар иморатларининг тўсувчи таъсири туфайли, узаткич ва қабул қилгич ўртасидаги трассадаги секин аста тинишлар. Масалан, шаҳар шароитида

36 km/h тезликда ҳаракат қилувчи абонентларга сотали алоқа тармоқларида бу хилдаги тинишлар масофанинг ҳар (12-60) метри учун хосдир (вақт интервали 1,2 s-6 s).

**Звено; тракт**

**uz - звено; тракт**

**en - link**

Часть системы связи или сквозного соединения, состоящего из нескольких последовательных участков.

Алоқа тизимининг ёки кетма-кетликдаги бир нечта участкадан иборат бўлган,

бошдан охир дахлдорликдаги бирикманинг бир қисми.

**Избирательность по каналам  
побочного приема**

**uz - номақбул қабул қилиш  
каналлари бўйича  
танловчанлик**

**en - spurious-response  
selectivity**

Характеристика, определяющая способность радиоприемника выделять полезный сигнал при воздействии мешающих сигналов по каналам побочного приема.

Радиоқабулқилгичнинг номақбул қабул қилиш каналлари бўйлаб халақит берувчи сигналлар таъсир этганда фойдали сигнални ажратиб олиш қобилиятини белгиловчи характеристика.

**Интерференционное  
замирание**

**uz - интерференцион тиниш  
en - interference fading**

Замирание, возникающее по причине изменения относительных фаз сигналов, приходящих в точку приема по разным маршрутам.

Қабул қилиш нуқтасига турли йўналишлар бўйича келадиган сигналларнинг нисбий фазаси ўзгариши сабабли содир бўладиган тиниш.

**Квадратурная фазовая  
манипуляция со сдвигом**

**uz - силжишли квадратура-  
фазавий манипуляция**

**en - Offset Quadrature Phase-  
Shift Keying (OQPSK)**

Метод модуляции, при котором сигналы в синфазном и квадратурном каналах сдвинуты на  $T/2$  ( $T$  – длительность символа), а фаза манипулированного сигнала изменяется в пределах  $\pm \pi/2$ -  
Применение OQPSK позволяет снизить требования к показателю линейности

**(син. Staggered Quadrature Phase-Shift Keying – SQPSK)**

усилителя мощности, так как после манипуляции в выходном радиосигнале отсутствуют нежелательные провалы огибающей радиосигнала.

Синфаза ва квадратуравий каналларда сигналлар  $T/2$  га ( $T$  – символнинг давомийлиги) силжийдиган, манипуляцияланган сигнал фазаси  $\pm \pi/2$  доирасида ўзгарадиган модуляция методи. OQPSK нинг қўлланилиши кувват кучайтиргичнинг чизиқлилик кўрсаткичига бўлган талабни пасайтириш имконини беради, чунки манипуляциядан сўнг чиқиш радиосигналида уни оғиб ўтувчи номақбул пасайиш бўлмайди.

**Квадратурный канал**

Канал, у которого фаза входного сигнала сдвинута относительно опорного на  $90^\circ$ .

**uz - квадратуравий канал**

**en - Q channel**

Кириш сигналининг фазаси таянч сигнални кига нисбатан  $90^\circ$  га силжитилган канал.

**Кодирование**

Процесс преобразования исходной информации в кодированную форму.

**uz - кодлаш**

**en - encoding**

Дастлабки ахборотни кодланган шаклга ўзгартириш жараёни.

**Одна боковая полоса**

Амплитудно-модулированный сигнал,

**uz - битта ён полоса**

**en - Single Sideband (SSB)**

спектр которого состоит из одной боковой полосы, расположенной ниже (нижняя боковая полоса) или выше (верхняя полоса) несущей частоты.

**Передающая среда**

**uz - узатувчи мухит**

**en - transmission media**

Спектри элтувчи частотадан пастда (куйи ён полоса) ёки юқорида (юқори полоса) жойлашган битта ён полосадан иборат амплитудавий модуляцияланган сигнал.

Совокупность различных типов наземных средств радиосвязи, спутниковых, кабельных и волоконно-оптических линий, используемых для передачи информации.

Ахборотни узатиш учун фойдаланиладиган турли ер усти радиоалоқа воситалари, йўлдошли, кабелли ва оптик толали линиялар йиғиндиси.

**Поддиапазон**

**uz - қуйи диапазон  
(поддиапазон)**

**en - subband**

Часть диапазона рабочих частот, в пределах которого обеспечивается работа радиостанции.

Ишчи частоталар диапазонининг бир қисми бўлиб, унинг чегарасида радиостанциянинг иши таъминланади.

**помехозащищенность**

Показатель, характеризующий степень

**uz - халақитдан  
ҳимояланганлик**

**en - error performance**

устойчивости работы аппаратуры при появлении ошибок в принятых символах.

Қабул қилинган символларда хато пайдо бўлганида аппаратура ишининг барқарорлик даражасини тавсифловчи кўрсаткич.

**помехозащищенность,  
помехоустойчивость**

**uz - халақитдан  
ҳимояланган-лик, халақитга  
чидамлилиқ**

**en - jam-protection, jam-  
resistance**

Способность радиостанции устойчиво функционировать в условиях воздействия преднамеренных помех. Помехоустойчивость обеспечивается за счет использования одного или нескольких видов селекции сигнала, основанных на использовании различий между полезным сигналом и преднамеренными помехами. Наиболее эффективна пространственная селекция, при которой в диаграмме направленности антенны формируется провал, ориентированный на источник помех.

Атайлаб қилинадиган халақитлар шароитида радиостанциянинг барқарор ишлай олиш қобилияти. Халақитга чидамлилиқ фойдали сигнал ва атайлаб қилинувчи халақитлар ўртасидаги тафовутдан фойдаланишга асосланган, бир ёки бир неча турдаги сигналларнинг селекциясидан фойдаланиш эвазига

таъминланади. Фазовий селекция энг самарали бўлиб, унда антеннанинг йўналганлик диаграммасида халақитлар манбаига мўлжалланган ботиқлик ҳосил бўлади.

**Преобразование**

**uz - ўзгартириш**

**en - transformation**

Замена одного сигнала другим, получаемым из первого по определенным правилам.

Биринчи сигнални ундан маълум қоидалар бўйича олиндиган бошқа сигнал билан алмаштириш.

**Приемопередатчик;  
трансивер**

**uz - қабул қилгич-узаткич;  
трансивер**

**en - transceiver**

Комбинация передающего и приемного устройства, размещенных в одном корпусе. Обычно реализуется в портативном или мобильном вариантах исполнения.

Битта корпусда жойлашган қабул қилувчи ва узатувчи қурилмаларнинг комбинацияси. Одатда, портатив ёки мобил вариантларда ишлаб чиқарилади.

**прямая видимость**

**uz - тўғридан-тўғри кўриниш**

**en - Line-Of-Sight (LOS)**

Наличие геометрической (оптической) видимости между передающей и приемной антеннами. Термин также употребляется как прилагательное «в пределах прямой видимости» или «радиорелейный» (о трассе).

Узатувчи ва қабул қилувчи антенналар ўртасида геометрик (оптик) кўринишнинг мавжудлиги. Атама, шунингдек, «тўғридан-тўғри кўриниш чегарасида» ёки «радиорелели» (трасса ҳақида) мазмунларида ҳам қўлланилади.

## **Радиоканал**

**uz - радиоканал**

**en - radio channel**

Полоса частот, образующая канал, достаточная для организации информационного обмена между передающим и приемным пунктами. Максимальная ширина полосы канала зависит от вида передаваемой информации, нестабильности частоты, величины доплеровского сдвига, а также частотно-селективных свойств передающей среды.

Узатувчи ва қабул қилувчи пунктлар ўртасида ахборот алмашувини таъминлаш учун етарли канал ҳосил қиладиган частоталар полосаси. Канал полосасининг максимал кенглиги узатиладиган ахборот тури, частота ностабиллиги, Допплер силжиши катталиги, шунингдек, узатувчи муҳитнинг частотавий-селектив хоссаларига боғлиқ бўлади.

**Сверхвысокая частота, СВЧ** Область частот, лежащих в диапазоне от **uz - ўта юқори частота, ЎЮЧ** 3 до 30 GHz. Диапазон СВЧ используется в системах фиксированной спутниковой и

**en - superhigh frequency  
(SHF)**

радиорелейной связи.

3 дан 30 GHz гача бўлган диапазондаги частоталар соҳаси. Қайд этилган йўлдошли ва радиорелели алоқа тизимларида қўлланилади.

**Сигнал**

**uz - сигнал**

**en - signal**

Изменяющаяся во времени физическая величина, используемая для передачи различных видов информации, а также оповещения о каких-либо событиях или состояниях объектов.

Вақт бўйича ўзгарувчи, турли хилдаги ахборотларни узатиш, шунингдек, қандайдир воқеа ёки объектларнинг ҳолати ҳақида хабар бериш учун фойдаланиладиган физик катталиқ.

**Синтезатор**

**uz - синтезатор**

**en - synthesizer**

Генератор, формирующий большое число рабочих частот от одного источника опорных колебаний.

Таянч тебранишларнинг битта манбаидан кўп сонли ишчи частоталарни шакллантирувчи генератор.

**Спектр**

**uz - спектр**

**en - spectrum**

Функция, описывающая зависимость изменения амплитуды и фазы сигнала от частоты и однозначно определяющая его характеристики и свойства. Спектр

любого сигнала может быть представлен в виде суммы большого числа гармонических колебаний с различными частотами, амплитудами и фазами. Такое разложение на гармонические составляющие называется спектральным разложением, а его свойства могут быть описаны с помощью распределения спектра амплитуд (энергетический спектр) и спектра фаз.

Сигнал амплитудаси ва фазасининг частотага боғлиқ равишда ўзгаришини тавсифловчи ҳамда сигналнинг характеристика ва хоссаларини қатъий белгиловчи функция. Ҳар қандай сигналнинг спектри турли частота, амплитуда ва фазадаги гармоник тебранишларнинг йиғиндиси тарзида ифодаланиши мумкин. Гармоник ташкил этувчиларга бундай ажратиш спектрал парчаланиш дейилади, унинг хоссалари эса амплитудалар спектри (энергетик спектр) ва фазалар спектрини тақсимлаш ёрдамида тавсифланиши мумкин.

## **Супергетеродинный радиоприемник**

**uz - супергетеродинли радиоқабулқилгич**

**en - superheterodyne receiver**

Радиоприемное устройство, в котором входной сигнал с помощью смесителя переносится на промежуточную частоту, а затем осуществляется его усиление и демодуляция.

Основными преимуществами супергетеродинного приемника является высокая

чувствительность и избирательность.

Кириш сигналини аралаштиргич ёрдамида оралик частотага кўчириб ўтказиладиган, сўнгра унинг кучайтирилиши ва демодуляцияси содир бўладиган радио қабул қилиш қурилмаси. Супергетеродинли қабул қилгичнинг асосий устунлиги – юқори сезгирлик ва танловчанликдир.

**фильтр нижних частот**

**uz - қуйи частоталар  
фильтри**

**en - low-pass filter**

Фильтр, который пропускает все частоты, лежащие ниже заданной частоты и отсекает остальные.

Берилган частотадан пастдаги барча частоталарни ўтказадиган ва бошқаларини кесиб ташлайдиган фильтр.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года. «<http://lex.uz/docs/3107036>».
2. А.Абдуазизов, Д.Давронбеков. Радиоузатиш ва қабул қилиш қурилмалари. Ўқув қўлланма. Т.: «Fan va texnologiya», 2011, 272 бет.
3. Радиопередающие устройства: Учебник для вузов/ В.В.Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А.Ляховкин и др.; Под ред. В.В.Шахгильдяна. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1996. – 560 с.: ил.
4. Радиопередающие устройства: Учебник/ В.И.Каганов. – М.: ИРПО: Издательский центр «Академия», 2002. – 282 с.
5. Системы цифровой радиосвязи. Базовые методы и характеристики. Учеб. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. - М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2005. - 392 с. : ил.
6. Радиоприёмные устройства. Учебник для вузов/ Н.Н.Фомин, Н.Н.Буга, О.В.Головин и др.; Под ред.Н.Н. Фомина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 520 с.: ил.
7. Головин О.В. Радиоприемные устройства. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 384 с.: ил.
8. Онищук А.Г., Забеньков И.И., Амелин А.М. Радиоприёмные устройства. Уч. пособие. Минск, ООО «Новые знания», 2005. – 240 с.
9. A.Abduazizov. Elektraloqa nazariyasi. (Darslik). – Т.: «Fan va texnologiya», 2011, 416 б.
10. A.Abduazizov, D.Davronbekov. Radiouzatish va qabul qilish qurilmalari. O‘quv qo‘llanma. –Т.: «Fan va texnologiya», 2011, 272 б.

11. М.Мухитдиновнинг умумий таҳрири остида. Мобил алоқа тизимларига оид атамаларнинг русча- ўзбекча изоҳли луғати. Ўзбекистон алоқа ва ахборотлаштириш агентлиги. Фан-техника ва маркетинг тадқиқотлари маркази. Т.: 2008, 292 б.

12. М.Маҳмудовнинг умумий таҳрири остида. Симсиз фойдаланиш тизимларига оид атамаларнинг русча-ўзбекча изоҳли луғати. Ўзбекистон алоқа ва ахборотлаштириш агентлиги. «UNICON.UZ» – Фан-техника ва маркетинг тадқиқотлари маркази Давлат унитар корхонаси («UNICON.UZ» ДУК).Т.: 2010, 192 б.

Д.А.Давронбеков, У.Т.Алиев  
ПЕРЕДАЮЩИЕ И ПРИЕМНЫЕ  
УСТРОЙСТВА В  
ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИИ

Учебник для бакалавров,  
по направлению образования  
5350100 – Телекоммуникационные  
технологии (Телерадиовещание)

Рецензенты:

Заведующий кафедрой “Радиотехнические  
устройства и системы” ТГТУ, к.т.н ., доц.  
А.А.Ярмухамедов

Заведующий кафедрой “Системы  
телерадиовещание” ТУИТ, к.т.н ., доц.  
Б.Н. Рахимов.

Корректор:

Заведующий кафедрой “Узбекско и  
русских языков” ТУИТ, к.ф.н ., доц.  
С.Х. Абдуллаева

Ответственный редактор:

Заведующий кафедрой “Технологии  
мобильной связи” ТУИТ, к.т.н ., доц.  
Ш.У.Пулатов