

# 1. Структура, принцип действия и основные характеристики устройств приёма и обработки сигналов

## 1.1. Типовые структурные схемы устройств приёма и обработки сигналов

Устройства приёма и обработки радиосигналов входят в состав любой радиотехнической системы:

- системы передачи информации (например, спутниковой системы связи);
- системы радионавигации (например, ГЛОНАСС);
- радиолокационных систем (например, систем противовоздушной обороны);
- систем радио- и телевизионного вещания.

При этом тип радиотехнической системы и её назначение существенно влияют как на структуру приёмника, так и на его характеристики.

Назначение устройства приёма и обработки радиосигналов (или, короче, радиоприёмного устройства) состоит в том, чтобы извлечь полезную информацию, заключённую в принимаемом радиосигнале. Для решения этой задачи радиоприёмное устройство (РПУ) строят по схеме, показанной на рис. 1.1. Здесь БВЧ – блок высокой частоты; ДМ – демодулятор сигнала. С выхода демодулятора низкочастотный сигнал поступает на блок последетекторной обработки, который называют также блоком низкой частоты, а затем – на окончательное устройство. На рисунке также показаны эпюры колебаний в различных точках РПУ в случае приёма сигнала с гармонической амплитудной модуляцией. Рассмотрим назначение и основные свойства отдельных блоков РПУ.

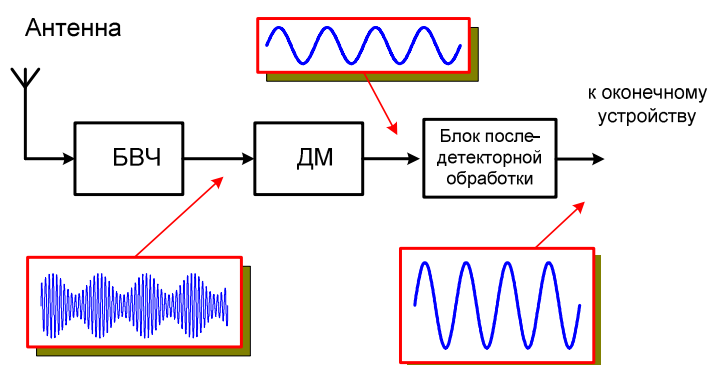


Рис 1.1. Укрупнённая структурная схема РПУ

**Антенна** преобразует сигнал, существующий в месте приёма в виде электромагнитного поля, в сигнал в форме высокочастотной ЭДС.

**Блок высокой частоты**

- а) усиливает полезный сигнал до рабочего напряжения демодулятора;
- б) выделяет сигнал из смеси с помехами и другими мешающими колебаниями.

БВЧ выполняет так называемую *додетекторную обработку* сигнала. Основные свойства БВЧ:

- 1) это квазилинейное устройство: поскольку уровень входных воздействий (сигнала и помех) обычно мал, то они проходят через БВЧ, не взаимодействуя друг с другом; однако при большой интенсивности помехи линейность может нарушаться, что приводит к искажениям сигнала;
- 2) структура БВЧ слабо зависит от вида принимаемого сигнала, в частности, от вида модуляции; важна только ширина спектра сигнала, т.к. она определяет требуемую полосу пропускания БВЧ;
- 3) БВЧ обладает очень большим усилением – порядка 80-120 дБ, т.е. коэффициент усиления по напряжению БВЧ составляет  $10^4 - 10^6$  раз (это соответствует типичным значениям входного напряжения  $U_{\text{вх}} = 1-10$  мкВ, а выходного –  $U_{\text{вых}} = 0,1-1$  В).

**Демодулятор** выделяет полезную информацию, заключённую в высокочастотном сигнале. В случае аналогового демодулятора эта информация представлена в виде низкочастотного колебания. В отличие от БВЧ структура демодулятора определяется видом модуляции принимаемого сигнала. Знакомым вам демодулятором является амплитудный детектор, применяемый для демодуляции амплитудно-модулированных сигналов. Существуют также другие виды демодуляторов – частотные, фазовые и различные импульсные демодуляторы. Демодулятор – это принципиально нелинейное устройство.

**Блок последетекторной обработки** выполняет обработку низкочастотного демодулированного колебания. Основное его назначение состоит в следующем:

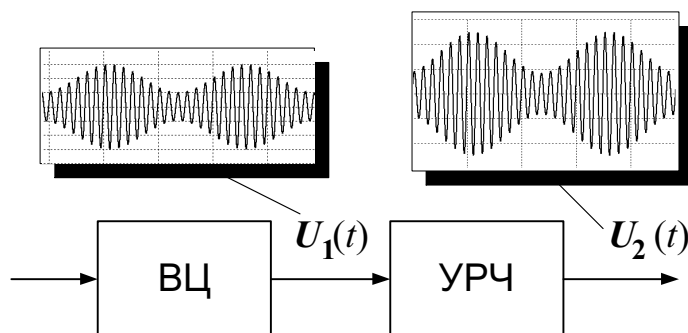
- а) окончательное выделение полезного сообщения из шумов и помех;
- б) усиление напряжения полезного сообщения до уровня, необходимого для нормальной работы конечного устройства.

В простейшем случае эти функции выполняет усилитель звуковой частоты либо видеоусилитель. В нашем курсе мы специально рассматривать блок последетекторной обработки не будем.

Вернемся к блоку высокой частоты. Современные приёмники получают своё название в зависимости от типа БВЧ. Существует **два основных типа схем БВЧ**:

- прямого усиления сигналов;
- усиления с гетеродинным преобразованием частоты и усилением на промежуточной частоте.

Рассмотрим структурную схему **БВЧ прямого усиления**. Радиоприёмник, содержащий такой БВЧ, называется **приёмником прямого усиления**. Характерный признак БВЧ прямого усиления заключается в том, что усиление и выделение сигнала (а это основная функция БВЧ) осуществляется непосредственно на частоте принимаемого сигнала. На рис. 1.2 изображена структурная схема БВЧ прямого усиления.



**Рис 1.2. Структурная схема БВЧ прямого усиления**

В состав БВЧ входят:

- входная цепь (ВЦ);
- усилитель радиочастоты (УРЧ).

Эти блоки выполняют следующие функции.

**Входная цепь** обеспечивает:

- а) согласование антенно-фидерного тракта с УРЧ;
- б) предварительную частотную фильтрацию полезного сигнала из смеси с помехами.

**Усилитель радиочастоты** обеспечивает:

- а) усиление колебаний до рабочего напряжения демодулятора;
- б) окончательную частотную фильтрацию и выделение полезного сигнала.

УРЧ состоит из одного или нескольких резонансных усилительных каскадов, настроенных на частоту принимаемого сигнала, либо из широкополосного усилителя и фильтра. Приёмники могут иметь либо

фиксированную настройку, либо работать в определенном диапазоне частот. В диапазонных приёмниках избирательные фильтры входной цепи и УРЧ необходимо перестраивать согласованно.

### **Недостатки приёмников прямого усиления**

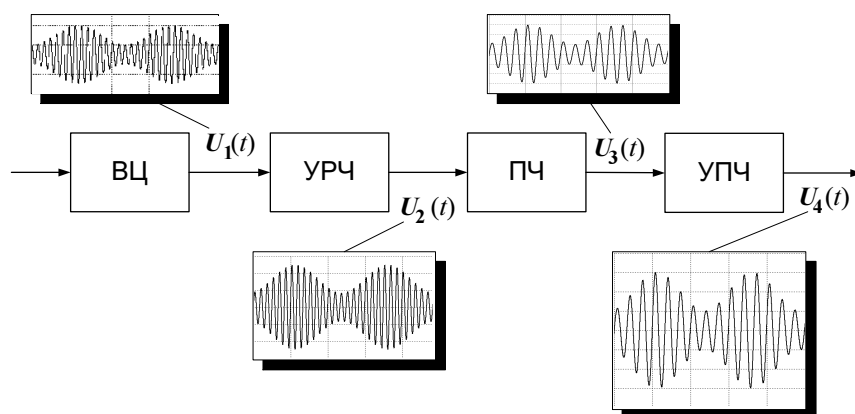
1) Если приёмник должен работать в диапазоне частот, то сильно усложняется настройка приёмника, особенно если он содержит большое число каскадов. В этом случае необходимо согласованно (одинаковым образом) перестраивать большое число фильтров, что технически трудно. Кроме того, при перестройке приёмника по диапазону его характеристики (коэффициент усиления, полоса пропускания) могут значительно изменяться.

2) Если приёмник предназначен для работы на фиксированной частоте, и частота эта довольно высокая (диапазон метровых и более коротких длин волн), то задача получения большого коэффициента усиления и высокой частотной избирательности становится весьма трудной, поскольку с увеличением частоты крутизна транзистора падает, а входная проводимость возрастает.

3) Склонность к самовозбуждению при большом коэффициенте усиления, что предъявляет повышенные требования к экранированию конструкции приёмника и развязкам в цепи питания.

Приёмники прямого усиления применяются сравнительно редко, широкое применение они нашли только в качестве широкополосных измерительных приёмников, предназначенных для контроля электромагнитного излучения.

Наибольшее распространение в радиоприёмной технике получила **схема БВЧ с преобразованием частоты** (рис. 1.3). В этой



**Рис 1.3. Структурная схема БВЧ радиоприёмника с преобразованием частоты**

схеме первоначальное сравнительно небольшое усиление сигнала осуществляется на частоте его несущей в усилителе радиочастоты. Затем преобразователь частоты (ПЧ) переносит спектр сигнала на так называемую **промежуточную частоту**, которая в большинстве случаев ниже частоты принимаемого сигнала. Основное усиление сигнала обеспечивается усилителем промежуточной частоты (УПЧ).

В приёмниках, которые должны работать в некотором диапазоне частот, входную цепь, УРЧ и ПЧ перестраивают таким образом, чтобы промежуточная частота при этом оставалась неизменной.

Блоки, входящие в состав изображённой на рис. 1.3 схемы, выполняют следующие функции.

**Входная цепь** обеспечивает:

- а) согласование антенно-фидерного тракта с УРЧ;
- б) предварительную частотную фильтрацию полезного сигнала от помех по так называемым паразитным (побочным) каналам приёма.

**Усилитель радиочастоты** обеспечивает:

- а) предварительное усиление сигнала на частоте несущей (радиочастоте), необходимое для повышения шумовой чувствительности радиоприёмника;
- б) (совместно с входной цепью) окончательную частотную фильтрацию полезного сигнала от помех по паразитным каналам приёма.

Входную цепь и УРЧ часто рассматривают как одно устройство, которое называется *преселектором*.

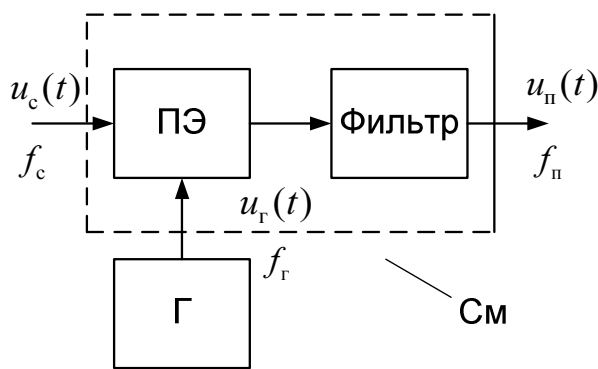
**Преобразователь частоты** выполняет перенос спектра принятого сигнала на фиксированную промежуточную частоту.

**Усилитель промежуточной частоты** обеспечивает:

- а) основное усиление сигнала на промежуточной частоте;
- б) частотную фильтрацию полезного сигнала от помех по так называемым соседним каналам приёма.

### **Основные сведения о преобразователе частоты**

Рассмотрим принцип действия и основные характеристики преобразователя частоты. Его структурная схема показана на рис. 1.4. Преобразователь частоты состоит из преобразовательного элемента



**Рис. 1.4. Преобразователь частоты**

преобразовательный элемент вместе с фильтром образует смеситель (См).

На смеситель действуют два колебания: сигнал с частотой  $f_c$  и напряжение гетеродина с частотой  $f_r$ . В результате их нелинейного взаимодействия в преобразовательном элементе в его выходной цепи образуется множество колебаний с комбинационными частотами

$$f_{\text{комб}} = |mf_c \pm nf_r|.$$

Фильтр пропускает на выход ПЧ одно единственное колебание с выбранной промежуточной частотой.

Идеальный преобразовательный элемент должен выполнять операцию перемножения напряжения сигнала и напряжения гетеродина. Получим выражение для выходного колебания такого ПЧ. Напряжение сигнала  $u_c(t)$  в общем случае имеет некоторую амплитудную модуляцию по закону  $U_c(t)$  и угловую модуляцию по закону  $\varphi_c(t)$ :

$$u_c(t) = U_c(t) \cos(\omega_c t + \varphi_c(t)).$$

Начальную фазу колебания гетеродина считаем нулевой, а амплитуду постоянной:

$$u_r(t) = U_r \cos \omega_r t.$$

Тогда напряжение на выходе преобразовательного элемента, который мы считаем идеальным перемножителем с коэффициентом передачи  $K_{\text{ПЭ}}$ , будет равно

$$\begin{aligned} u_{\text{ПЭ}}(t) &= K_{\text{ПЭ}} \cdot U_c(t) \cos(\omega_c t + \varphi_c(t)) \cdot U_r \cos \omega_r t = \\ &= \frac{1}{2} K_{\text{ПЭ}} U_c(t) U_r \cos((\omega_c - \omega_r)t + \varphi_c(t)) + \frac{1}{2} K_{\text{ПЭ}} U_c(t) U_r \cos((\omega_c + \omega_r)t + \varphi_c(t)). \end{aligned}$$

(ПЭ), гетеродина (Г) и фильтра. Преобразовательный элемент – это нелинейное устройство (диод, транзистор, микросхема). Гетеродин – маломощный источник гармонических колебаний: автогенератор или синтезатор частоты. Фильтр – частотно избирательная цепь, настроенная на промежуточную частоту. Преоб-

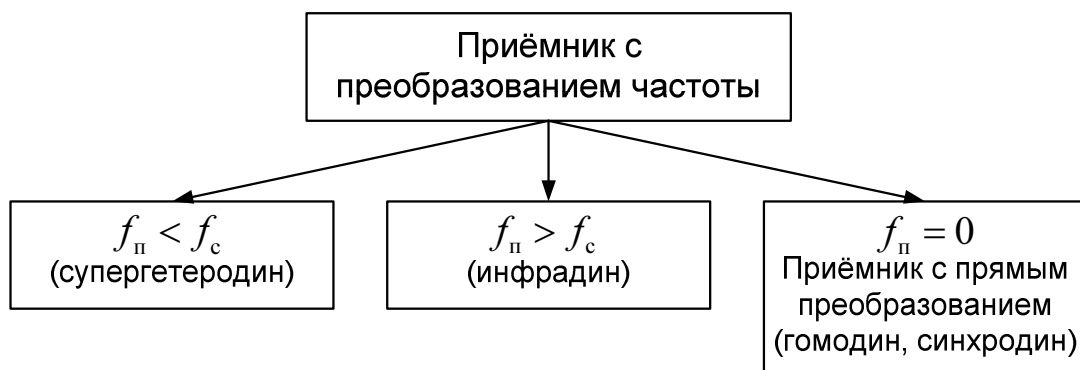


Таким образом, на выходе ПЭ получаются два колебания, параметры которых (амплитуда и фаза), изменяются так же, как у сигнала. Выделяя одно из этих колебаний с помощью фильтра, получим сигнал промежуточной частоты:

$$u_{\text{п}}(t) = \frac{1}{2} K_{\text{ПЭ}} U_{\text{г}} U_{\text{с}}(t) \cos(\omega_{\text{п}} t + \varphi_{\text{с}}(t)) = K_{\text{п}} U_{\text{с}}(t) \cos(\omega_{\text{п}} t + \varphi_{\text{с}}(t)),$$

где  $K_{\text{п}} = \frac{1}{2} K_{\text{ПЭ}} U_{\text{г}}$  – коэффициент передачи ПЧ. У сигнала промежуточной частоты сохраняются законы амплитудной и угловой модуляции.

В зависимости от значения промежуточной частоты могут быть следующие три разновидности радиоприёмников с преобразованием частоты:



Основной тип радиоприёмника с преобразованием частоты – *супергетеродин*, для которого промежуточная частота меньше частоты сигнала:  $f_{\text{п}} < f_{\text{с}}$ .

При выборе значения промежуточной частоты из множества комбинационных частот  $|mf_{\text{с}} \pm nf_{\text{г}}|$ , следует руководствоваться следующими соображениями.

1) Промежуточная частота должна быть достаточно низкой. Поэтому в качестве промежуточной частоты целесообразно брать *разностную комбинацию*:

$$f_{\text{п}} = |mf_{\text{с}} - nf_{\text{г}}|.$$

2) Значение  $m$  всегда выбирается равным единице:  $m=1$ . Это естественно, т.к. уровень сигнала обычно мал, а уровень его гармоник ещё меньше. Таким образом, выбирая  $m>1$ , мы неоправданно

снижаем уровень полезного сигнала.

3) Значение  $n$  иногда выбирается больше единицы. Использование гармоник гетеродина бывает выгодно, например, при работе на достаточно высоких частотах. В этом случае рабочая частота гетеродина снижается, что облегчает получение устойчивой генерации, стабильности частоты и т.п. В дальнейшем будем рассматривать наиболее распространённый случай, когда

$$f_{\Pi} = |f_c - f_r|.$$

При этом частота гетеродина может быть как больше, так и меньше частоты сигнала на величину  $f_{\Pi}$ . В обоих случаях процесс преобразования частоты происходит одинаково. Однако в перестраиваемых по диапазону приёмниках частота гетеродина обычно выбирается больше частоты сигнала (такой вариант называется *верхней настройкой гетеродина*), т.к. в этом случае относительное изменение частоты гетеродина при перестройке приёмника меньше, чем при использовании *нижней настройки гетеродина*, когда  $f_r < f_c$ .

4) В некоторых случаях (например, для вещательных радиоприёмников) значение промежуточной частоты регламентировано стандартом (в диапазонах ДВ, СВ и КВ промежуточная частота равна 465 кГц, в диапазоне УКВ 10,7 МГц).

По сравнению со схемой приёмника прямого усиления супергетеродинная схема обладает как существенными достоинствами, так и определёнными (специфическими для этого типа приёмников) недостатками.

### **Достоинства супергетеродинного приёмника**

1) Благодаря понижению частоты сигнала облегчается создание тракта с большим коэффициентом усиления.

2) Благодаря постоянству промежуточной частоты становится возможным применение в УПЧ сложных избирательных систем, обладающих «хорошей» формой частотной характеристики.

3) То обстоятельство, что усиление в БВЧ происходит на разных частотах (на  $f_c$  в УРЧ и на  $f_{\Pi}$  в УПЧ), делает БВЧ более устойчивым, поскольку на каждой из частот требуется обеспечить меньшее усиление.

### **Недостатки супергетеродинного приёмника**

1) Наличие **паразитных (побочных) каналов приёма**, т.е. таких значений частоты принимаемого колебания, на которых возможно



прохождение мешающего колебания на выход БВЧ приёмника. К паразитным каналам приёма относятся следующие.

а) **Зеркальный канал** или канал симметричной станции. Этот канал является основным паразитным каналом приёма. Его происхождение иллюстрируется рис. 1.5. В случае верхней настройки гетеродина ( $f_{\Gamma} > f_c$ ) частота зеркального канала равна  $f_{\text{зк}} = f_{\Gamma} + f_{\Pi} = f_c + 2f_{\Pi}$ . Ослабление действия помех, проникающих в тракт приёмника по

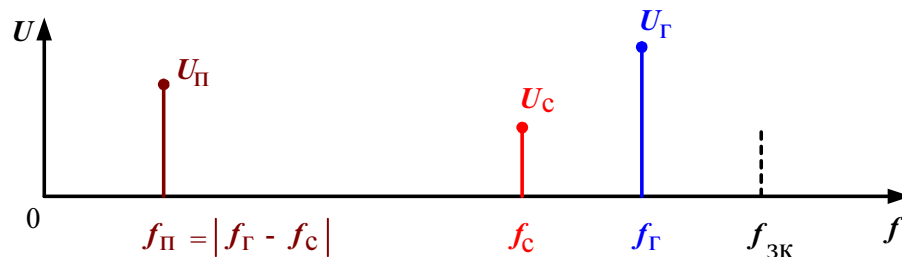


Рис. 1.5. К образованию зеркального канала приёма

зеркальному каналу, осуществляется избирательными цепями, входящими в состав ВЦ и УРЧ, т.е. преселектором (рис. 1.6).

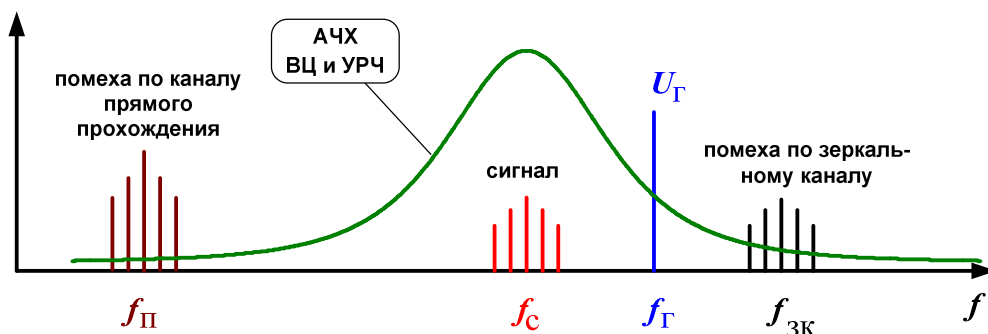


Рис. 1.6. Ослабление помех по паразитным каналам

Повысить избирательность по зеркальному каналу можно следующими путями:

- сужением полосы пропускания ВЦ и УРЧ;
- повышением избирательности ВЦ и УРЧ за счёт более крутых скатов АЧХ контуров;
- если промежуточная частота не определена стандартом, то для ослабления помехи по зеркальному каналу можно увеличивать  $f_{\Pi}$ .

Важно подчеркнуть, что **избирательность по зеркальному каналу обеспечивается резонансными цепями только до входа смесителя**.

б) **Канал прямого прохождения.** Этот канал образуется на промежуточной частоте  $f_{\text{п}}$  из-за неидеальности преобразователя частоты. Если в эфире действует мощная станция на частоте  $f_{\text{п}}$ , то из-за неидеальности преселектора её сигнал может пройти с заметным уровнем на вход преобразователя частоты, который в данном случае работает как усилитель. Далее этот сигнал, ничем не отличаясь от полезного сигнала (его частота равна промежуточной частоте), усиливается в УПЧ и проходит на выход приёмника, создавая помеху.

Существуют следующие способы ослабления действия помехи по каналу прямого прохождения:

- улучшение избирательности преселектора;
- постановка специальных режекторных фильтров на входе РПУ (это возможно благодаря тому, что промежуточная частота постоянна);
- тщательная экранировка ПЧ и УПЧ.

Важно отметить, что **основным средством борьбы с помехой по каналу прямого прохождения, так же как и с помехой по зеркальному каналу, является повышение избирательности каскадов до преобразователя частоты.**

в) **Комбинационные каналы приёма.** Их возникновение также обусловлено неидеальностью преобразователя частоты. Они образуются из-за взаимодействия в смесителе гармоник действующего на входе мешающего колебания и гармоник напряжения гетеродина. Если на входе приёмника действует мешающее колебание на частоте  $f_{\text{к}}$ , то на выходе преобразовательного элемента ПЧ образуется множество комбинационных составляющих с частотами

$$f_{\text{к.пр}} = |mf_{\text{к}} \pm nf_{\text{г}}|.$$

Если при каком-либо сочетании номера гармоники мешающего колебания  $m$  и номера гармоники напряжения гетеродина  $n$  частота  $f_{\text{к.пр}}$  преобразованного колебания совпадёт с промежуточной частотой  $f_{\text{п}}$ , то это колебание будет выделено фильтром ПЧ и затем усилено в УПЧ, т.е. возникнет паразитный канал приёма.

Найдём значения частоты входного колебания, для которых выполняется условие

$$f_{\text{к.пр}} = f_{\text{п}}.$$

Поскольку в ПЧ супергетеродинного приёмника выделяется колебание разностной частоты, то это условие можно записать как

$$|mf_k - nf_r| = f_n$$

или, что то же самое, в виде двух соотношений:

$$\begin{aligned} mf_k - nf_r &= f_n, \\ mf_k - nf_r &= -f_n. \end{aligned}$$

Из первого соотношения следует, что

$$f_k = \frac{n}{m} f_r + \frac{1}{m} f_n,$$

а из второго – что

$$f_k = \frac{n}{m} f_r - \frac{1}{m} f_n.$$

Объединяя эти два выражения, получим следующую формулу:

$$f_k = \frac{n}{m} f_r \pm \frac{1}{m} f_n. \quad (1.1)$$

Заметим, что данная формула является общей – она определяет частоты не только комбинационных каналов, но и вообще всех каналов приёма супергетеродинного приёмника, включая канал прямого прохождения (при  $m=1$  и  $n=0$ ), а также основной и зеркальный каналы (при  $m=1$  и  $n=1$ ). При  $m=1$  и  $n=2$  она определяет частоты двух комбинационных каналов, обусловленных 2-й гармоникой напряжения гетеродина и 1-й гармоникой мешающего колебания:

$$f_k = 2f_r \pm f_n.$$

Частоты этих каналов расположены симметрично относительно 2-й гармоники частоты гетеродина.

Повысить избирательность по комбинационным каналам приёма можно двумя способами:

- улучшить избирательность преселектора;
- соответствующим выбором режима работы смесителя уменьшить уровень гармоник входного напряжения смесителя и напряжения гетеродина.

2) *Излучение колебаний гетеродина в эфир*, что создаёт помехи другим радиоприёмным устройствам и нарушает скрытность работы приёмника.

Мы рассмотрели основные свойства супергетеродинного приёмника с промежуточной частотой  $f_{\Pi} = |f_c - f_r|$ . Теперь коротко рассмотрим особенности других типов приёмников с преобразованием частоты.

### *Инфрадин* ( $f_{\Pi} > f_c$ )

В преобразователе частоты такого приёмника фильтром выделяется колебание суммарной частоты:  $f_{\Pi} = f_c + f_r$ . Частота зеркального канала определяется условием  $f_{\text{зк}} - f_r = f_{\Pi}$  и равна  $f_{\text{зк}} = f_r + f_{\Pi} = f_c + 2f_r$ . Поскольку  $f_{\text{зк}} \gg f_c$ , то для ослабления помехи по зеркальному каналу можно использовать широкополосный неперестраиваемый преселектор. Это позволяет применить в преселекторе более сложные частотно-избирательные цепи с требуемой «хорошей» формой АЧХ. Поскольку в таком радиоприёмнике промежуточная частота высокая, то обычно дополнительно производят второе преобразование частоты на более низкую.

### *Гомодин* ( $f_{\Pi} = 0$ )

Такой приёмник не имеет зеркального канала (его частота совпадает с частотой основного канала) и канала прямого прохождения. Комбинационные каналы приёма на частотах  $2f_c, 3f_c, \dots$  легко подавляются простым преселектором. Недостатками такого типа приёмника является то, что после ПЧ сигнал должен усиливаться на нулевой частоте, где уровень шума усилительных приборов может быть больше, а также необходимость использования специальных схем демодуляторов.

## *1.2. Показатели качества радиоприёмных устройств*

К *важнейшим электрическим показателям качества РПУ* относятся:

- чувствительность,
- селективность (избирательность),
- динамический диапазон.

При рассмотрении этих показателей мы будем пользоваться двумя

определениями – качественным и количественным; качественные определения справедливы для любых РПУ, количественные определения учитывают специфику приёмного устройства и бывают различными.

### **Чувствительность**

Качественное определение:

***чувствительность – это способность РПУ принимать слабые сигналы, одновременно выделяя их из помех.***

Количественной мерой чувствительности служит величина сигнала в антенне (ЭДС или мощности), при которой содержащаяся в сигнале полезная информация воспроизводится с требуемым качеством.

Существует две причины, которые ограничивают чувствительность приёмников. В диапазоне ДВ, СВ и КВ (150 - 15000 кГц) – это внешние промышленные и атмосферные помехи. В дециметровом и сантиметровом диапазонах – внешние и внутренние шумы (интенсивность спектра промышленных и атмосферных помех на этих частотах мала). Если учитывается влияние только естественных (не преднамеренных) шумовых помех, то говорят о ***шумовой чувствительности***. В дальнейшем мы будем рассматривать именно такую чувствительность РПУ.

***Количественное определение чувствительности*** рассмотрим на примере радиолокационного приёмника:

Чувствительность РПУ РЛС сантиметрового диапазона волн – это номинальная мощность<sup>\*)</sup> сигнала в антенне, при которой на выходе БВЧ приёмника отношение сигнал-шум равно заданной величине.

Чувствительность приёмников РЛС составляет  $10^{-12}$  -  $10^{-16}$  Вт. Более подробно шумовая чувствительность рассматривается в разделе 2.

### **Селективность (избирательность)**

Качественное определение:

***селективность (или избирательность) – это способность РПУ выделить полезный сигнал из смеси с мешающими сигналами, отличающимися от полезного по какому-либо параметру.***

---

<sup>\*)</sup> Понятие номинальной мощности будет определено позднее, в разделе 2.

Далее будем рассматривать частотную селективность РПУ, когда полезный и мешающие сигналы различаются по частоте.

Количественное определение:

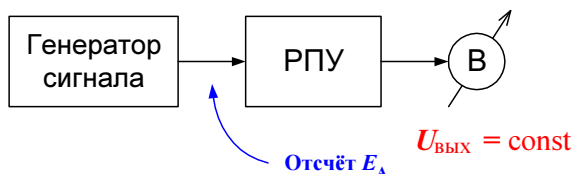
**селективность** - это отношение ЭДС в антенне при рассогласовании по частоте к ЭДС в отсутствие рассогласования при условии, что на выходе приёмника в обоих случаях развивается одинаковая мощность.

В соответствии с этим определением частотная селективность вычисляется как

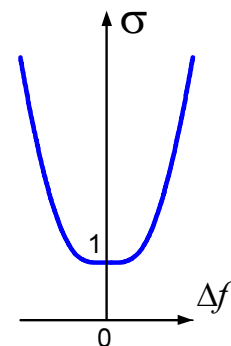
$$\sigma = \frac{E_A|_{\Delta f \neq 0}}{E_A|_{\Delta f = 0}} \bigg|_{P_{\text{вых}} = \text{const}} > 1, \quad (1.2)$$

где  $\Delta f$  – рассогласование по частоте. Часто вместо мощности на выходе РПУ фиксируется напряжение  $U_{\text{вых}}$ .

Схема измерения частотной селективности показана на рис. 1.7. График зависимости  $\sigma(\Delta f)$  (рис. 1.8) называется **кривой селективности** (кривой избирательности).



**Рис. 1.7. Измерение частотной селективности**



**Рис. 1.8. Кривая селективности**

Часто избирательность достаточно знать только при некоторых характерных значениях расстройки. Например,

- **избирательность по зеркальному каналу**

$$\sigma_{\text{зк}} = \frac{E_A|_{\Delta f = 2f_n}}{E_A|_{\Delta f = 0}} \bigg|_{P_{\text{вых}} = \text{const}}, \quad (1.3)$$

которая определяется формой АЧХ преселектора (совокупности ВЦ и УРЧ) (рис. 1.9);



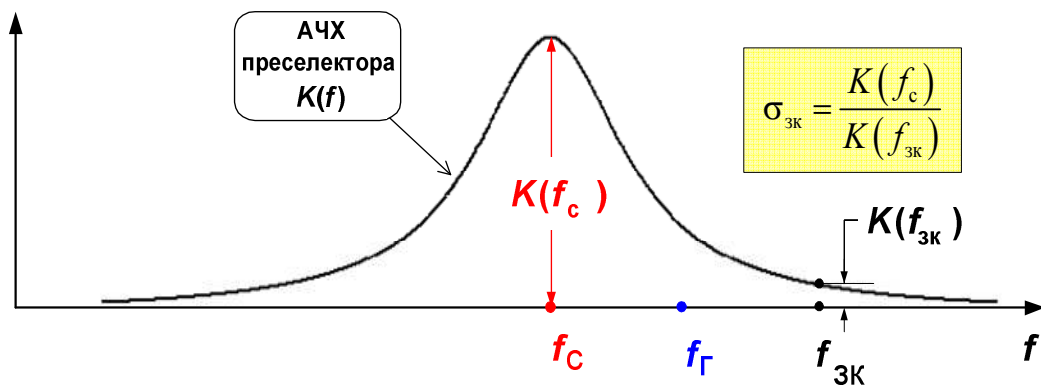


Рис. 1.9. Избирательность по зеркальному каналу

• *избирательность по соседнему (смежному) каналу*

$$\sigma_{\text{ск}} = \frac{E_A \big|_{\Delta f = f_{c2} - f_{c1}}}{E_A \big|_{\Delta f = 0}} \bigg|_{P_{\text{вых}} = \text{const}}, \quad (1.4)$$

где  $f_{c1}$  – частота настройки приёмника;  $f_{c2}$  – частота соседней (ближайшей по частоте) радиостанции. Для вещательных радиостанций диапазонов ДВ, СВ и КВ, работающих с АМ сигналами, принимают  $\Delta f = 10$  кГц; для радиостанций ЧМ вещания, работающих в диапазоне УКВ,  $\Delta f = 250$  кГц. Избирательность по соседнему каналу определяется формой АЧХ УПЧ. При этом АЧХ преселектора практически не влияет, поскольку его полоса пропускания значительно шире, чем полоса УПЧ (рис. 1.10).

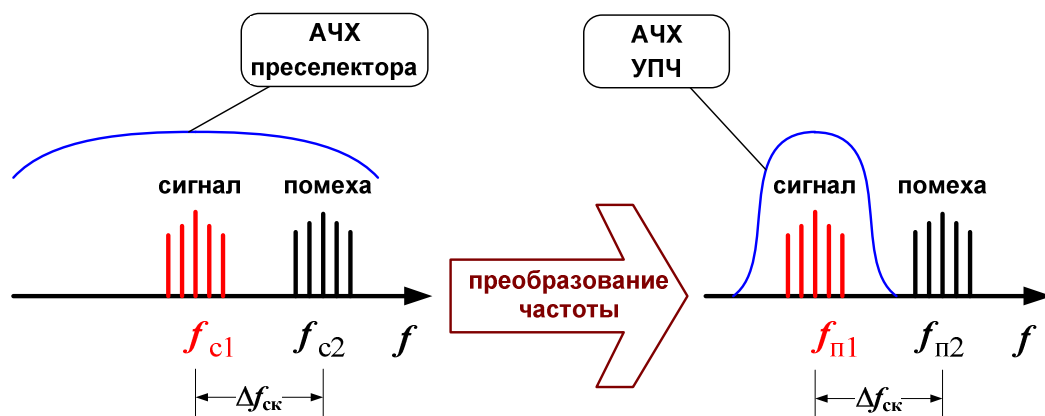


Рис. 1.10. Избирательность по соседнему каналу

Для блока приёмника, имеющего АЧХ в виде характеристики узкополосного одиночного колебательного контура, частотная избирательность определяется следующим образом:

$$\sigma = \frac{K(f_0)}{K(f)} = \sqrt{1 + \xi^2}, \quad (1.5, a)$$

где  $K(f) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \xi^2}}$  – АЧХ блока;

$$\xi = Q_k \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \text{ – обобщённая расстройка по частоте;}$$

$f_0$  – центральная частота АЧХ;

$K_0$  – максимальный коэффициент передачи;

$Q_k$  – добротность контура.

Обычно избирательность выражается в децибелах:

$$\sigma_{\text{дБ}} = 20 \lg \sigma = 10 \lg (1 + \xi^2). \quad (1.5, б)$$

При каскадном соединении блоков приёмника значения избирательности перемножаются:

$$\sigma = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_N, \quad (1.6, a)$$

а выраженные в децибелах – складываются:

$$\sigma_{\text{дБ}} = \sigma_{\text{дБ1}} + \sigma_{\text{дБ2}} + \dots + \sigma_{\text{дБN}}. \quad (1.6, б)$$

### **Динамический диапазон**

Качественное определение:

***Динамический диапазон – это диапазон значений напряжения (или мощности) сигнала на входе приёмника, в котором обеспечивается требуемое качество приёма сигнала.***

Нижняя граница динамического диапазона определяется шумами РПУ, а верхняя граница – нелинейными искажениями в приёмном тракте, возникающими при воздействии сильного сигнала. Различают мгновенный динамический диапазон и диапазон с учётом действия системы автоматической регулировки усиления. Величина динамического диапазона обычно выражается в децибелах.

Рассмотрим два количественных определения мгновенного динамического диапазона, которые широко применяются при проектировании радиоприёмных устройств.

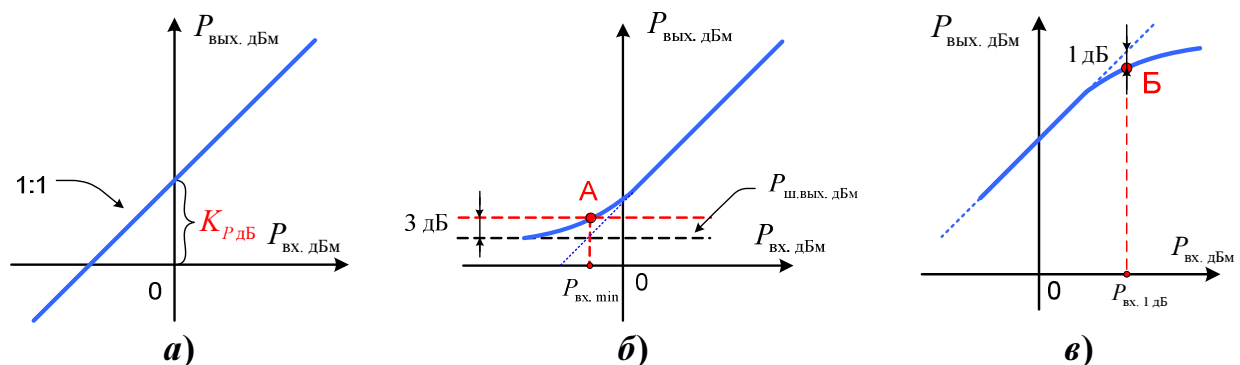
## Линейный динамический диапазон

Для определения линейного динамического диапазона построим в двойном логарифмическом масштабе амплитудную характеристику БВЧ приёмника. Амплитудная характеристика (АХ) радиочастотного блока – это зависимость мощности 1-й гармоники выходного колебания от мощности входного колебания. При построении амплитудной характеристики в двойном логарифмическом масштабе мощность выражают в децибелах относительно стандартного уровня 1 мВт:

$$P_{\text{дБм}} = 10 \lg \left( \frac{P}{1 \text{ мВт}} \right).$$

(Например, мощности 1 мкВт соответствует  $P_{\text{дБм}} = -30 \text{ дБм}$ ).

Амплитудная характеристика идеального линейного нешумящего устройства в двойном логарифмическом масштабе изображается прямой линией с угловым коэффициентом 1 (т.е. идущей под углом  $45^\circ$ ), смещённой по вертикальной оси на величину коэффициента усиления по мощности, выраженного в децибелах,  $K_{P \text{ дБ}} = 10 \lg(K_P)$  (рис. 1.11,а).



**Рис. 1.11. Амплитудная характеристика**

Амплитудная характеристика реального устройства имеет «загибы» в начале (при очень малой мощности сигнала на входе) и в конце (при большой мощности).

«Загиб» в начале АХ обусловлен шумом РПУ: очевидно, что мощность выходного колебания не может быть меньше некоторой минимальной величины, которая определяется уровнем шума<sup>\*)</sup> на выходе устройства. Обычно считают, что минимально различимый

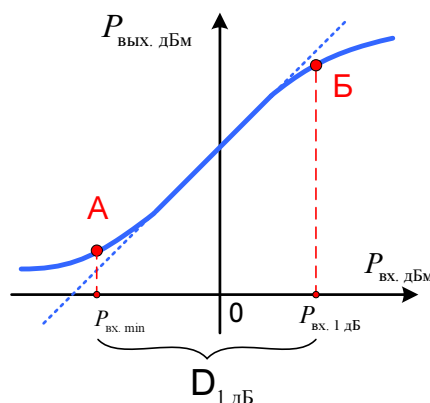
<sup>\*)</sup> Случайное шумовое колебание на выходе РПУ обусловлено как собственным (внутренним) шумом устройства, так и шумом, поступающим на его вход. При определении динамического диапазона считают, что на входе действует тепловой шум внутренней проводимости эквивалента источника сигнала (см. раздел 2).

сигнал – это такой сигнал, который на выходе устройства имеет такую же мощность, что и шум. Следовательно, суммарная мощность этого сигнала и шума на выходе устройства превышает мощность шума в 2 раза или, что то же самое, на 3 дБ:  $P_{\text{вых. min дБм}} = P_{\text{ш. вых. дБм}} + 3 \text{ дБ}$ . Поэтому началом линейного участка АХ считается такая точка А, для которой  $P_{\text{вых. дБм}}$  на 3 дБ превышает уровень шума. Соответствующее значение мощности входного сигнала  $P_{\text{вх. min дБм}}$  определяет нижнюю границу динамического диапазона (рис. 1.11,б). Эту нижнюю границу можно также определить как мощность, соответствующую точке пересечения линеаризованной амплитудной характеристики (пунктирная линия на рис. 1.11,б), с уровнем шума на выходе  $P_{\text{ш. вых. дБм}}$ . Это связано с тем, что линеаризованная АХ определяет мощность сигнала на выходе в отсутствие шума и, следовательно, точка её пересечения с уровнем шума как раз и определяет такой уровень сигнала на входе, при котором сигнал и шум на выходе имеют одинаковую мощность.

«Загиб» в конце АХ обусловлен нелинейными искажениями, которые возникают из-за нелинейности усилительных приборов при большом уровне сигнала. Верхней границей линейного участка АХ считается такая точка Б, в которой реальная АХ отклоняется от идеально линейной на 1 дБ (рис. 1.11,в). Этой точке соответствуют входная  $P_{\text{вх. 1 дБ}}$  и выходная  $P_{\text{вых. 1 дБ}}$  *мощности насыщения*. Точку Б называют также **точкой компрессии** (по-английски она называется **Compression Point** и обозначается CP). Она определяет верхнюю границу динамического диапазона.

Таким образом, линейный динамический диапазон по входу равен (см. рис. 1.12)

$$D_{1 \text{ дБ}} = P_{\text{вх. 1 дБ}} - P_{\text{вх. min дБм}} \quad (1.7)$$



**Рис. 1.12. К определению линейного динамического диапазона**

### Динамический диапазон по интермодуляционным искажениям 3-го порядка

Во многих практических задачах возникает необходимость характеризовать линейность приёмного тракта в условиях, когда на входе приёмника действует не одно колебание, а несколько. В этом случае верхнюю границу динамического диапазона принято определять исходя из относительного уровня комбинационных составляющих (называемых также *интермодуляционными искажениями*), которые образуются при действии двух колебаний одинаковой мощности с близкими частотами. Такими колебаниями могут быть, например, сигналы двух мешающих радиостанций, частоты которых лежат за пределами полосы пропускания УПЧ, но в пределах полосы преселектора. При этом в первую очередь учитываются комбинационные составляющие 3-го порядка<sup>\*)</sup>, частоты которых определяются как

$$f'_{\text{комб}} = 2f_1 - f_2, \quad f''_{\text{комб}} = 2f_2 - f_1,$$

поскольку они имеют наибольший уровень и близки по частоте к полезному сигналу.

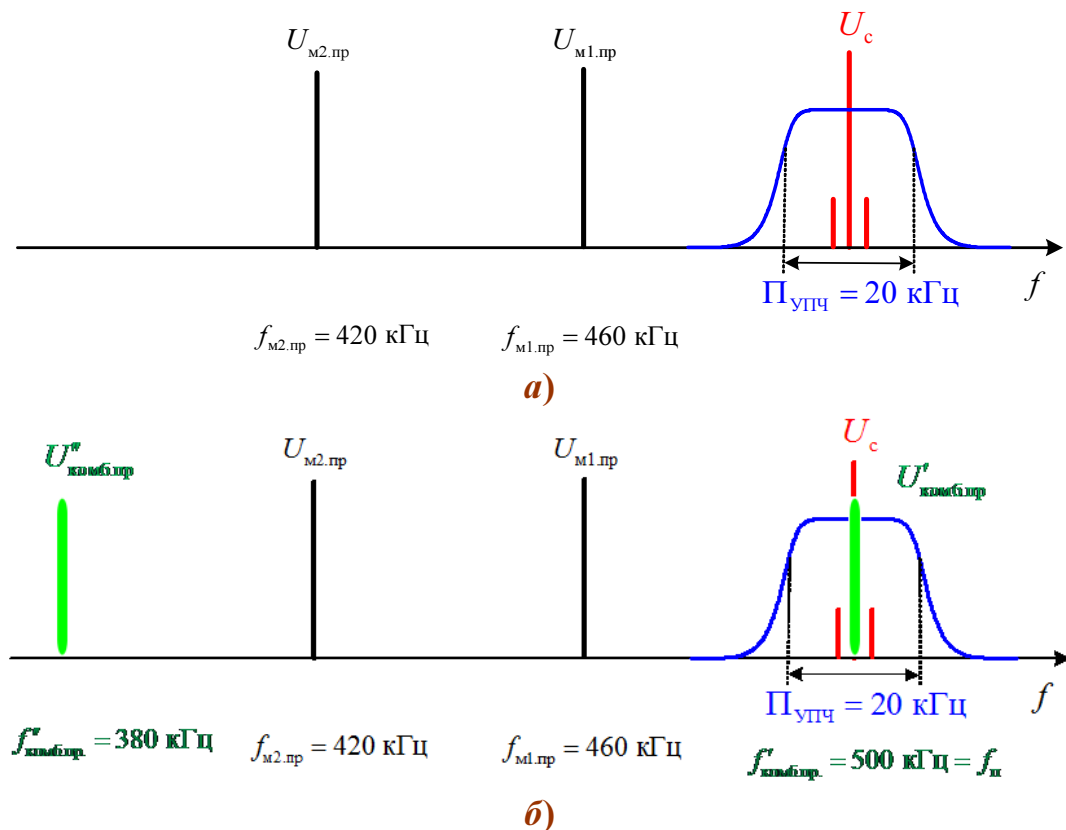
Рассмотрим следующий пример: частота полезного сигнала  $f_c = 1000$  кГц, частота 1-й помехи  $f_{m1} = 1040$  кГц, частота 2-й помехи  $f_{m2} = 1080$  кГц, частота гетеродина  $f_g = 1500$  кГц, промежуточная частота  $f_{\text{п}} = 500$  кГц, полоса пропускания УПЧ  $P_{\text{УПЧ}} = 20$  кГц.

В результате преобразования частоты мешающие колебания будут перенесены на частоту  $f_{m1.\text{пр}} = f_g - f_{m1} = 1500 - 1040 = 460$  кГц и  $f_{m2.\text{пр}} = f_g - f_{m2} = 1500 - 1080 = 420$  кГц соответственно. При этом они будут находиться далеко за пределами полосы пропускания УПЧ и не повлияют на качество приёма полезного сигнала (рис. 1.13,а).

Теперь рассмотрим комбинационную составляющую, частота которой  $f'_{\text{комб}} = 2f_{m1} - f_{m2} = 2 \cdot 1040 \text{ кГц} - 1080 \text{ кГц} = 1000 \text{ кГц}$  совпадает с частотой полезного сигнала. В преобразователе частоты это колебание, так же как и полезный сигнал, будет перенесено на промежуточную частоту и, следовательно, создаст помеху радиоприё-

<sup>\*)</sup> Порядок комбинационной составляющей равен сумме номеров гармоник колебаний, образующих в результате нелинейного взаимодействия данную составляющую.

му. Вторая комбинационная составляющая имеет частоту  $f''_{\text{комб.}} = 2f_{\text{м2}} - f_{\text{м1}} = 2 \cdot 1080 - 1040 = 1120$  кГц и в результате преобразования переносится на частоту  $f''_{\text{комб.пр.}} = 1500 \text{ кГц} - 1120 \text{ кГц} = 380$  кГц, которая лежит за пределами полосы пропускания УПЧ (рис. 1.13,б).



**Рис. 1.13. АЧХ УПЧ и спектры сигнала и помех в тракте промежуточной частоты: а) линейный УРЧ; б) нелинейный УРЧ**

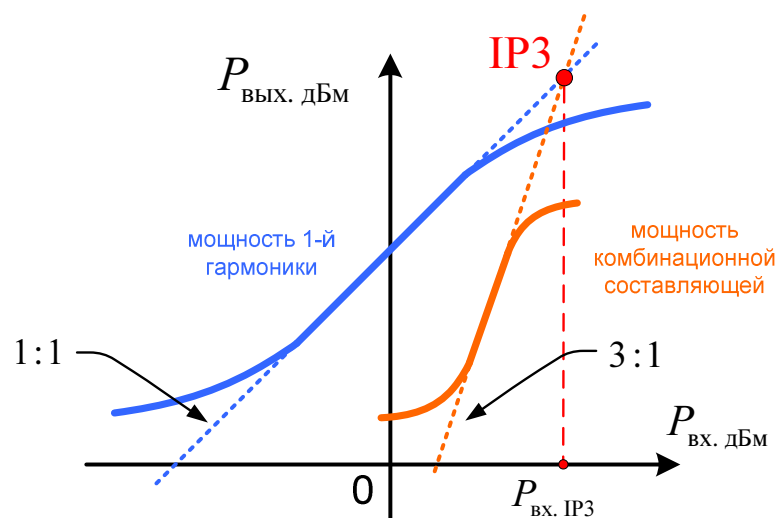
Нижняя граница  $P_{\text{вх. min}}$  дБм динамического диапазона по интермодуляционным искажениям 3-го порядка (точка А на рис. 1.15) определяется так же, как и для линейного динамического диапазона, т.е. по уровню шума на выходе устройства.

Верхняя граница (точка В) определяется на основе так называемой **характеристической мощности интермодуляционных искажений 3-го порядка**. Рассмотрим это понятие. Пусть на вход устройства подаются два колебания одинаковой амплитуды, имеющие небольшое различие по частоте. Для определения характеристической мощности интермодуляционных искажений 3-го порядка на графике амплитудной характеристики в двойном логарифмическом масштабе строят зависимость мощности комбинационной составляющей 3-го порядка от мощности каждого из входных колебаний (рис. 1.14). В случае слабой нелинейности эта зависимость в



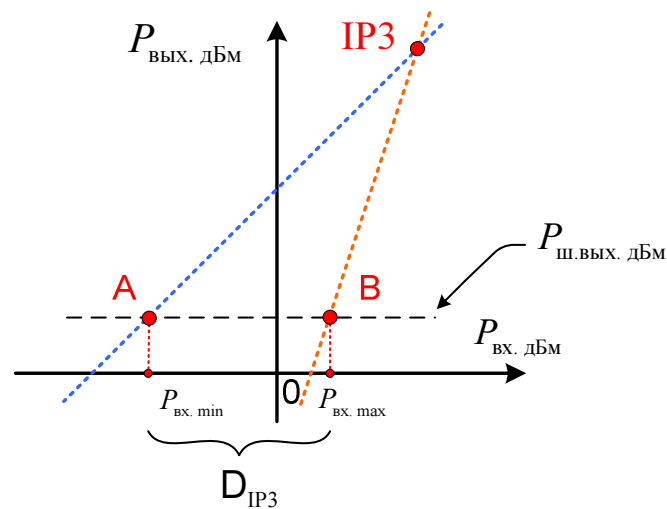
средней своей части линейна с угловым коэффициентом 3, т.е. имеет наклон 3:1.

Далее, определяя на этих двух графиках линейные участки, строят линеаризованную АХ и линеаризованную зависимость мощности комбинационной составляющей (пунктирные линии на рис. 1.14), после чего находят точку их пересечения. Эта точка называется **точкой характеристической мощности искажений 3-го порядка**. Общепринятое её обозначение – IP3 (от английского названия *3<sup>rd</sup> Order Intercept Point* – точка пересечения 3-го порядка). Точка IP3 – это условная характеристика, она не соответствует какому-либо реальному уровню мощности. Более того, во многих случаях эта мощность превышает предельно допустимую для данного устройства. Иногда также говорят, что точка IP3 определяет такую мощность каждого из двух колебаний на входе, при которой мощность комбинационной составляющей 3-го порядка была бы равна мощности 1-й гармоники, если бы эти зависимости были линейными.



**Рис. 1.14. К определению точки IP3**

Если принять, что допустимый уровень интермодуляционных искажений равен мощности шума на выходе, то по точке IP3 можно найти верхнюю границу  $P_{\text{вх. max дБм}}$  динамического диапазона: она определяется как точка пересечения линеаризованной зависимости мощности комбинационной составляющей 3-го порядка и уровня собственного шума  $P_{\text{ш.вых. дБм}}$  (точка В на рис. 1.15).



**Рис. 1.15. К определению динамического диапазона по интермодуляционным искажениям 3-го порядка**

Динамический диапазон по интермодуляционным искажениям 3-го порядка равен

$$D_{IP3} = P_{вх. max дБм} - P_{вх. min дБм}. \quad (1.8)$$

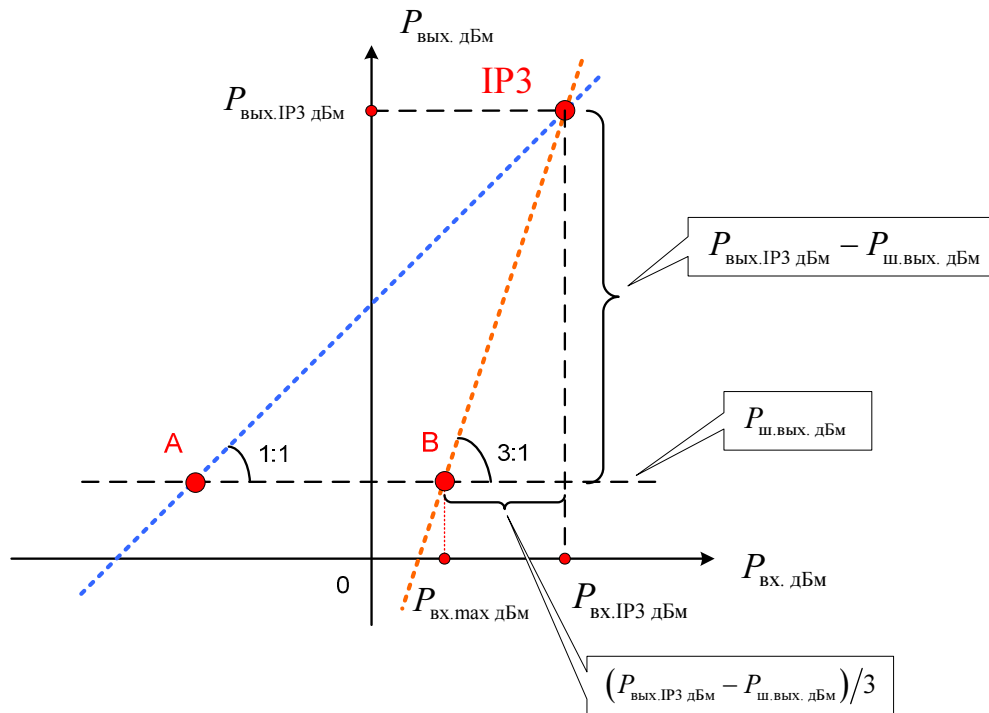
Его нижняя граница  $P_{вх. min дБм}$  определяется из условия равенства мощности сигнала на выходе и мощности шума — т.е. это мощность минимально различимого сигнала на входе устройства. Верхняя граница динамического диапазона определяет такую максимально допустимую мощность каждого из двух сигналов на входе, при которой уровень комбинационной составляющей 3-го порядка, образующейся при их взаимодействии на нелинейности, не превышает мощность шума на выходе.

Математически верхняя граница динамического диапазона рассчитывается следующим образом. Из графика на рис. 1.16, на котором показаны линеаризованные зависимости, видно, что верхняя граница динамического диапазона  $P_{вх. max дБм}$  (горизонтальная координата точки В) меньше характеристической мощности на входе  $P_{вх. IP3 дБм}$  (горизонтальной координаты точки IP3) на величину, которая геометрически определяется длиной горизонтальной стороны прямоугольного треугольника с угловым коэффициентом 3:1. Поскольку длина этой стороны в 3 раза меньше, чем вертикальной стороны треугольника, т.е. равна  $(P_{вых. IP3 дБм} - P_{ш.вых. дБм})/3$ , то мощность, соответствующая верхней границе динамического диапазона, равна

$$P_{\text{вх. max дБм}} = P_{\text{вх. IP3 дБм}} - (P_{\text{вых. IP3 дБм}} - P_{\text{ш.вых. дБм}})/3.$$

Входящие в это выражение значения характеристической мощности, соответствующей точке IP3, на входе приёмного тракта,  $P_{\text{вх. IP3 дБм}}$ , и на его выходе,  $P_{\text{вых. IP3 дБм}}$ , связаны соотношением

$$P_{\text{вых. IP3 дБм}} = P_{\text{вх. IP3 дБм}} + K_{P \text{ дБ}}.$$



**Рис. 1.16. К количественному определению верхней границы динамического диапазона по интермодуляционным искажениям 3-го порядка**

Поэтому в зависимости от того, какая характеристическая мощность задана — на входе или на выходе, — получаются следующие две формулы для верхней границы динамического диапазона:

$$P_{\text{вх. max дБм}} = P_{\text{вх. IP3 дБм}} - (P_{\text{вх. IP3 дБм}} + K_{P \text{ дБ}} - P_{\text{ш.вых. дБм}})/3, \quad (1.9,а)$$

$$P_{\text{вх. max дБм}} = P_{\text{вых. IP3 дБм}} - K_{P \text{ дБ}} - (P_{\text{вых. IP3 дБм}} - P_{\text{ш.вых. дБм}})/3. \quad (1.9,б)$$

Определённый таким образом динамический диапазон в общем случае не совпадает с линейным динамическим диапазоном. Поэтому на практике в качестве динамического диапазона устройства обычно принимают наименьшую из этих величин.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие блоки входят в состав радиоприёмного устройства?
2. Какие функции выполняет блок высокой частоты радиоприёмника?
3. Какие функции выполняет демодулятор? Чем определяется тип демодулятора?
4. Каковы основные преимущества супергетеродинного приёмника по сравнению с приёмником прямого усиления? Какие ему присущи специфические недостатки?
5. Из каких узлов состоит и какие функции выполняет преобразователь частоты супергетеродинного радиоприёмника?
6. Почему целесообразно основное усиление сигнала производить на промежуточной частоте?
7. Что такое паразитные каналы приёма супергетеродинного приёмника? Какие основные паразитные каналы приёма существуют? Чем определяется их частота?
8. Каковы основные электрические показатели качества радиоприёма?
9. Что такое «кривая избирательности» радиоприёмника?
10. Какие блоки супергетеродинного приёмника обеспечивают ослабление помех, действующих по паразитным каналам приёма?
11. Какими средствами может быть повышена избирательность по паразитным каналам приёма?
12. Какой блок супергетеродинного приёмника обеспечивает избирательность по соседнему каналу?
13. Что такое чувствительность радиоприёмного устройства? В каких единицах измеряется чувствительность радиолокационного приёмника сантиметрового диапазона волн?
14. Что такое динамический диапазон радиоприёмного устройства? Чем определяется нижняя граница динамического диапазона?
15. Чем определяется верхняя граница линейного динамического диапазона?
16. Чем определяется верхняя граница динамического диапазона по интермодуляционным искажениям 3-го порядка?