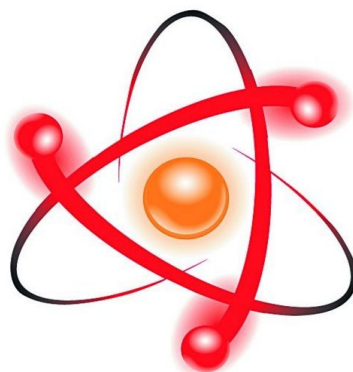


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



УПОиПС-3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ.

Тула, 2013 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЧАСТОТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ.

Цель работы: ознакомиться с принципом работы и характеристиками простых детекторов частотно-модулированных сигналов.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Общие сведения о модуляции.

Гармонические колебания тока, напряжения или электромагнитного поля характеризуются тремя параметрами: амплитудой, частотой и начальной фазой. Так, например, уравнение гармонического тока имеет следующий вид:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.1)$$

Непрерывные колебания с постоянной амплитудой, частотой и начальной фазой не могут содержать какой-либо информации. Такие колебания могут лишь свидетельствовать о факте своего существования. Для передачи информации (информационных сигналов) необходимо как-то изменять параметры электромагнитных колебаний, излучаемых антенной радиопередающего устройства.

Процесс изменения любого из параметров гармонического колебания в соответствии с передаваемой информацией называется модуляцией.

При непрерывных методах передачи информационных сигналов модуляция может быть амплитудной (АМ), частотной (ЧМ), фазовой (ФМ) либо импульсной.

В случае одновременного изменения двух параметров гармонического колебания имеет место смешанная модуляция, например амплитудно-фазовая (АФМ) или амплитудно-частотная (АЧМ).

При импульсном методе работы передатчика его антенной излучаются кратковременные радиоимпульсы, отделенные друг от друга сравнительно большой временной паузой. В этом случае в соответствии с передаваемой информацией изменяется какой-либо из параметров излучаемых радиоимпульсов.

При импульсном методе работы передатчика его антенной излучаются кратковременные радиоимпульсы, отделенные друг от друга сравнительно большой временной паузой. В этом случае в соответствии с передаваемой информацией изменяется какой-либо из параметров излучаемых радиоимпульсов.

Для целей радиолокации используется простейшая разновидность импульсной модуляции, при которой в пространство излучаются радиоволны постоянной частоты, амплитуды, длительности и скважности (рис.10).

Кроме импульсной модуляции, в некоторых радиолокационных устройствах применяют также частотную модуляцию.

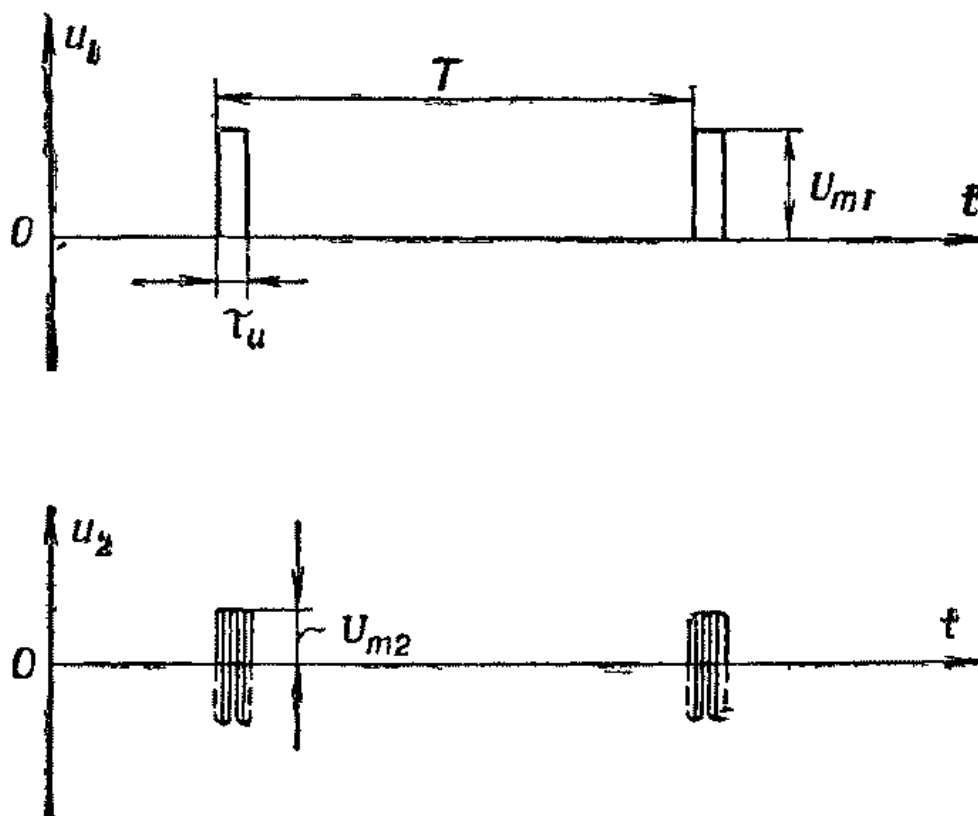


Рис. 10 Импульсная модуляция, используемая в РЛС:

u_1 — видеоимпульсы; u_2 — радиоимпульсы

В любом радиотехническом устройстве приходится встречаться с преобразованием электрических колебаний. Чтобы использовать высокочастотные колебания для передачи сигналов, необходимо каким-либо образом воздействовать на них, передавая их в виде отдельных посылок определенной длительности либо изменяя их амплитуду, фазу или частоту в соответствии с передаваемым сигналом. При приеме этих колебаний необходимо на основании изменения одного из параметров высокочастотных колебаний или длительности посылок восстановить передаваемый сигнал. Происходящие при этом процессы изменения формы, частоты или фазы будем в дальнейшем - называть преобразованием колебаний.

Виды преобразований и типовые схемы преобразователей электрических колебаний чрезвычайно многочисленны и разнообразны. Мы рассмотрим здесь лишь наиболее важные и распространенные из них.

Все виды преобразований можно разделить на два основных типа: линейные, и нелинейные. Первые, осуществляемые в линейных цепях, подчиняющихся закону Ома, могут приводить, только к изменениям амплитудных и фазовых соотношений в спектре сложного сигнала. В нелинейных цепях происходят более сложные преобразования, приводящие к изменению самого состава спектра сигнала, т. е. появлению на выходе таких составляющих, которых не было во входном сигнале. К линейным относятся цепи, параметры которых не зависят от действующих в них токов и напряжений. В нелинейных же цепях изменение токов и напряжений приводит к изменениям их активных и реактивных сопротивлений, вследствие чего напряжения и токи оказываются не пропорциональными один другому, а связанными более сложными зависимостями. Одно и то же устройство часто может играть роль как линейного, так и нелинейного элемента в зависимости от способа его использования. Например, если использовать лампу на участке AB ее характеристики, идеализированной в виде ломаной линии (рис. 11), то она будет вести себя как линейный элемент. Если же использовать ее на участке BB , то лампа ведет себя как нелинейный элемент и с ее помощью можно осуществлять преобразования колебаний. Ознакомимся сначала с одним из важнейших видов преобразований высокочастотных колебаний — модуляцией. Наиболее проста и распространена амплитудная модуляция.

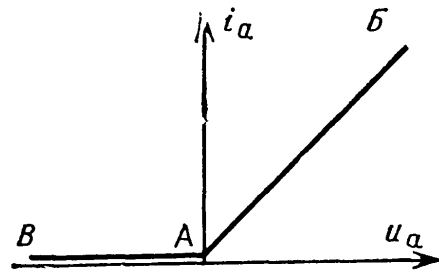


Рис. 11 Области использования лампы в качестве линейного и нелинейного элемента

Амплитудная модуляция.

Предположим, что нужно передать простой звуковой сигнал одного тона (частоты) и постоянной амплитуды. Для этого прежде всего необходимо превратить акустические (звуковые) колебания в электрические. Задача эта обычно решается с помощью микрофона. Полученное от микрофона переменное напряжение непосредственно или после усиления подают на модулятор. Это напряжение (рис. 12, а) подчиняется закону:

$$u_{зв} = U_{зв} \sin \Omega t, \quad (2.2)$$

где Ω — частота звукового сигнала.

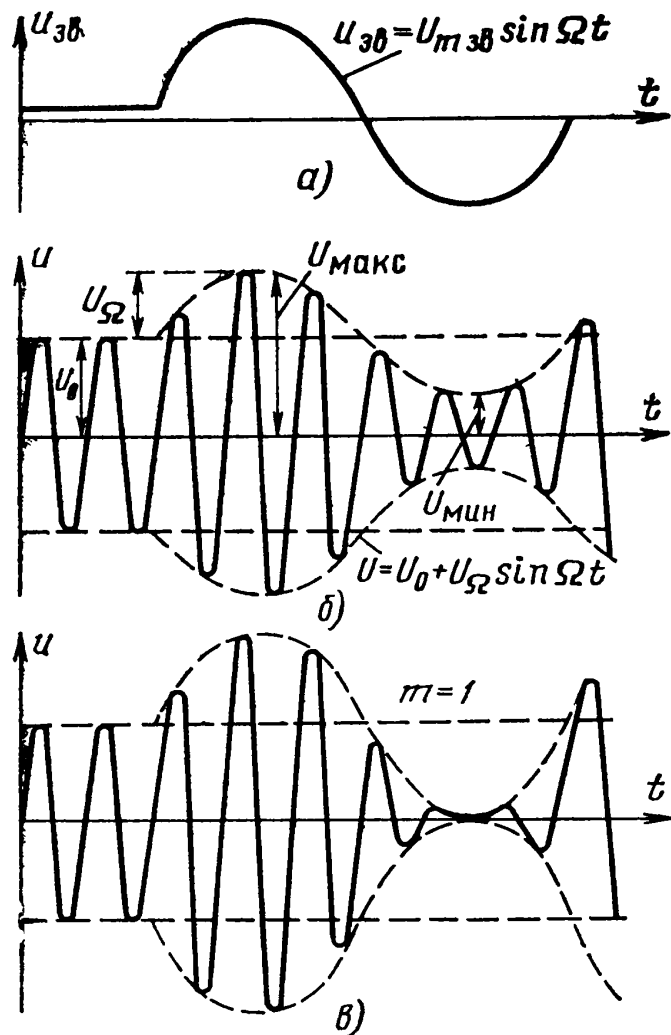


Рис. 12 Амплитудно-модулированные колебания:
 а — модулирующее напряжение;
 б — модулированные колебания при $m < 1$; в — модулированные колебания при $m = 1$

При амплитудной модуляции (АМ) амплитуда высокочастотных колебаний должна изменяться в соответствии с этим законом (рис. 12,б), т. е. убывать при отрицательном полупериоде напряжения сигнала и возрастать при положительном:

$$U = U_0 + U_{\Omega} \sin \Omega t, \quad (2.3)$$

где U — мгновенное значение амплитуды высокочастотных колебаний; U_0 — амплитуда высокочастотных колебаний при отсутствии модуляции, т. е. когда

звуковой сигнал, воздействующий на микрофон, не поступает, и U_{Ω} — максимальное отклонение амплитуды колебаний от значения U_0 при воздействии звукового сигнала на микрофон. Это выражение часто записывают в виде:

$$U = U_0 \left(1 + \frac{U_{\Omega}}{U_0} \sin \Omega t \right). \quad (2.3)$$

Относительное максимальное изменение амплитуды высокочастотных колебаний называют коэффициентом (глубиной) модуляции:

$$U_{\Omega}/U_0 = m. \quad (2.4)$$

Его часто выражают в процентах:

$$U_{\Omega}/U_0 \cdot 100\% = m \text{ или } [\%]. \quad (2.5)$$

Амплитуда колебаний U имеет максимальное значение при $\sin \Omega t = 1$

$$U_{\text{макс}} = (1 + m) U_0; \quad (2.6)$$

минимальное значение при $\sin \Omega t = -1$:

$$U_{\text{мин}} = U_0 (1 - m). \quad (2.7)$$

Из суммы равенств (2.6) и (2.7) получаем:

$$U_0 = \frac{1}{2} (U_{\text{макс}} + U_{\text{мин}}), \quad (2.8)$$

а из разности

$$m = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{2 U_0}. \quad (2.9)$$

Из равенств (2.8) и (2.9) следует, что:

$$m = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{U_{\text{макс}} + U_{\text{мин}}}. \quad (2.10)$$

Очевидно, что наибольший коэффициент модуляции будет в том случае, когда амплитуда колебаний изменяется от $U_{\text{мин}} = 0$ до $U_{\text{макс}} = 2U_0$; при этом, как следует из выражения (2.10), $m=1$ или $m=100\%$.

График колебаний для этого случая изображен на рис. 12 в.

Уравнение высокочастотных колебаний, модулированных по амплитуде, можно записать в виде:

$$u = U \sin \omega t = U_0 (1 + m \sin \Omega t) \sin \omega t, \quad (2.11)$$

где ω — частота высокочастотных колебаний. Раскрыв скобки, получим:

$$u = U_0 \sin \omega t + U_0 m \sin \Omega t \sin \omega t. \quad (2.12)$$

Так как:

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = 1/2 [\cos (\alpha - \beta) - \cos (\alpha + \beta)]$$

то уравнение АМ колебаний может быть представлено в виде:

$$u = U_0 \sin \omega t + \frac{U_0 m}{2} \cos (\omega - \Omega) t - \frac{U_0 m}{2} \cos (\omega + \Omega) t. \quad (2.13)$$

Следовательно, АМ колебания представляют собой результат сложения трех высокочастотных колебаний. Наибольшей амплитудой обладают колебания с частотой ω , которую принято называть несущей частотой. Две другие составляющие имеют одинаковые амплитуды, не превышающие половины амплитуды колебаний несущей частоты, и частоты, лежащие ниже и выше несущей частоты и отличающиеся от нее на значение, равное частоте модулирующего сигнала. Эти частоты принято называть соответственно нижней и верхней боковыми частотами.

То, что простые АМ колебания состоят из трех высокочастотных колебаний с постоянными амплитудами, можно также показать графически. Колебания боковых частот создают биения — колебания с несущей частотой и огибающей амплитуд, изменяющейся с разностной частотой 2Ω . Колебания складываются с колебаниями несущей частоты, имеющими постоянную амплитуду. При нарастании и спадании амплитуды колебаний биений они сначала увеличивают амплитуду общего суммарного колебания, а при изменении фазы на 180° (это происходит после перехода амплитуды колебаний биений через нуль) уменьшают амплитуду общего колебания (рис. 13, а). Этот процесс можно изобразить также в векторной форме (рис. 13, б). Если вектор колебаний несущей частоты в начальный момент времени $t=0$ занимает вертикальное положение, то согласно выражению (2.13), которое можно переписать в виде:

$$u = U_0 \sin \omega t + \frac{U_0 m}{2} \sin [(\omega - \Omega) t - 90^\circ] + \frac{U_0 m}{2} \sin [(\omega + \Omega) t + 90^\circ], \quad (2.14)$$

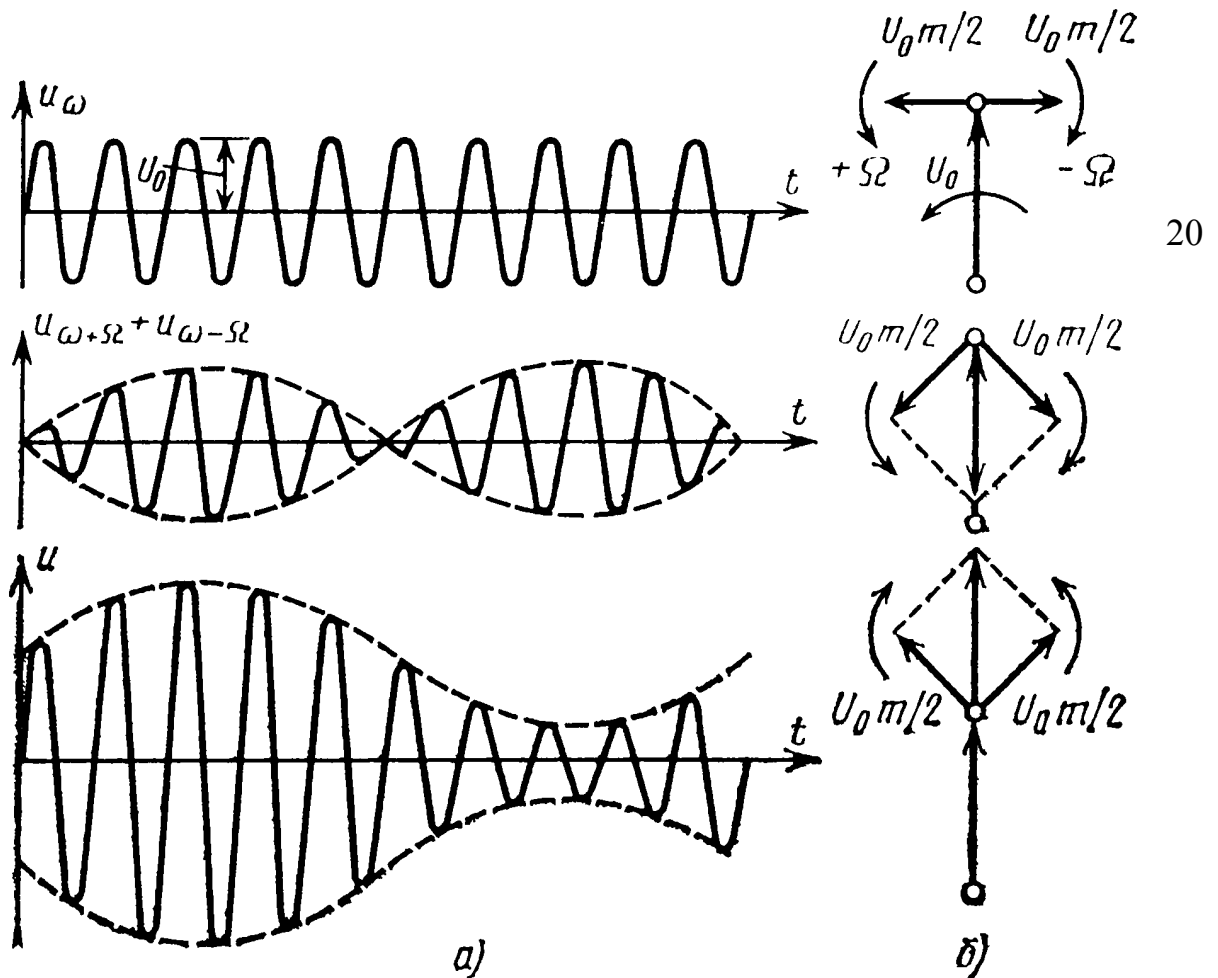


Рис. 13 Составляющие АМ колебаний и их векторное изображение

Вектор колебания нижней боковой частоты изобразится горизонтальным вектором, направленным вправо, а вектор колебаний верхней боковой частоты таким же вектором, направленным влево.

Поскольку вектор колебания верхней боковой частоты вращается против часовой стрелки с частотой $\omega + \Omega$, а вектор колебания несущей частоты совершает такое же движение с частотой ω , то вектор колебания верхней боковой частоты будет вращаться относительно последнего против часовой стрелки с угловой скоростью $+\Omega$. Вектор же колебания нижней боковой частоты по той же причине будет вращаться относительно вектора колебания несущей частоты с постоянной угловой скоростью $-\Omega$, т. е. по часовой стрелке. По диаграммам на рис. 13 нетрудно проследить, что вектор, равный сумме векторов колебаний боковых частот, в любой момент времени направлен вдоль вектора, колебания несущей частоты, то уменьшая, то увеличивая его длину.

Для качественного воспроизведения человеческой речи необходимо передавать полосу звуковых частот от 100 до 3400 Гц, а музыки — от 50 до 10 000 Гц. Поэтому при передаче модулированных колебаний происходит излучение колебаний целого спектра высоких частот, границы которого

определяются максимальной верхней и минимальной нижней боковыми частотами (рис. 14):

$$f_0 + F_{\text{макс}} \text{ и } f_0 - F_{\text{макс}}$$

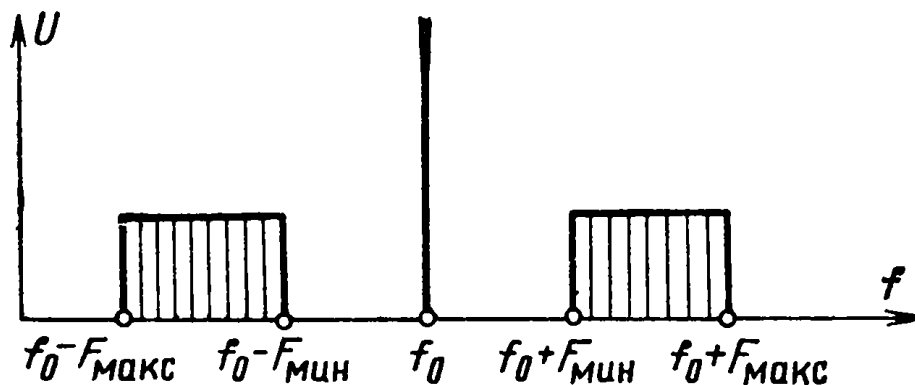


Рис. 14 Спектр АМ колебаний

Следовательно, при АМ передатчик занимает полосу частот, ширина которой равна двум максимальным частотам модуляции $2 F_{\text{макс}}$.

Когда говорят, что радиостанция работает на частоте f , то имеют в виду ее несущую частоту f_0 . Две радиостанции не могут работать без взаимных помех, если их несущие частоты различаются меньше, чем на сумму их максимальных частот модуляции. Поэтому несущие частоты радиовещательных станций некоторых диапазонов различаются не менее чем на 9 кГц.

Для неискаженной передачи и воспроизведения необходимо также, чтобы передатчик и приемник обладали достаточно широкой полосой пропускания, т. е. чтобы колебания боковых частот существенно не ослаблялись по сравнению с колебаниями несущей частоты. При этом очень важно, чтобы контуры были возможно точнее настроены на несущую частоту. В случае их неточной настройки колебания одной из боковых частот окажутся ослабленными больше, чем колебания другой боковой частоты, и сигнал будет сильно искажен. Такие искажения, например, имеют место при плохой настройке приемника.

Дальность передачи при АМ определяется интенсивностью колебаний боковых частот, несущих информацию, амплитуда которых всегда меньше амплитуды колебания несущей частоты. Из выражения (2.13) видно, что амплитуда колебаний боковых частот пропорциональна коэффициенту модуляции и, следовательно, дальность передачи будет тем больше, чем больше глубина модуляции передатчика.

Частотная модуляция.

При частотной модуляции амплитуда высокочастотных колебаний остается постоянной, а в соответствии с передаваемым сигналом изменяется частота высокочастотных колебаний ω (рис. 18).

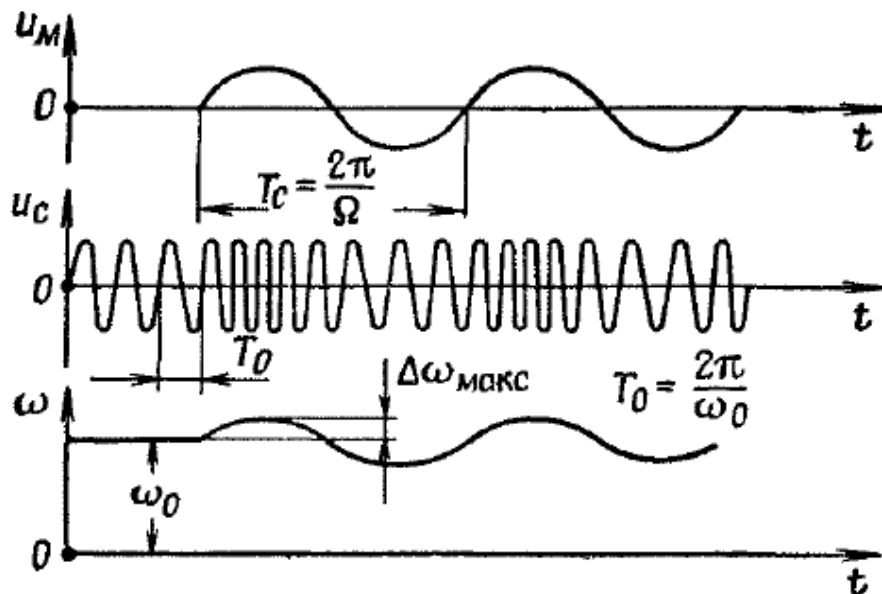


Рис. 18 Частотно-модулированные колебания

Изменение частоты $\Delta\omega$ при неискаженной модуляции должно быть пропорционально амплитуде модулирующего сигнала. Если модулирующий сигнал изменяется по косинусоидальному закону с частотой Ω , то угловая частота модулируемого колебания изменяется следующим образом:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{макс}} \cos \Omega t, \quad (3.1)$$

где ω_0 — несущая частота модулированного колебания, т. е. среднее значение частоты;

$\Delta\omega_{\text{макс}}$ — максимальное отклонение частоты в процессе модуляции от своего среднего значения, называемое девиацией частоты.

Угловая частота представляет собой скорость изменения фазы во времени :

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Отсюда фаза колебаний в момент t (так называемое текущее значение фазы) определится по формуле:

$$\varphi = \int_0^t \omega dt + \varphi_0, \quad \text{где } \varphi_0 \text{ — начальная фаза.}$$

Используя формулу (3.1), получим

$$\varphi = \int_0^t \omega_0 dt + \int_0^t \Delta\omega_{\text{макс}} \cos \Omega t dt + \varphi_0.$$

Отсюда после интегрирования:

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\Delta\omega_{\text{макс}}}{\Omega} \sin \Omega t + \varphi_0. \quad (3.2)$$

Из формулы (3.2) видно, что, когда модуляции нет ($\Delta\omega=0$), текущая фаза изменяется по линейному закону $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$.

При частотной модуляции, когда $\Delta\omega \neq 0$, текущая фаза высокочастотного колебания непрерывно изменяется относительно значения $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$.

Это изменение происходит по синусоидальному закону с амплитудой $\frac{\Delta\omega_{\text{макс}}}{\Omega}$ и частотой модулирующего сигнала.

Из рис. 18 видно, что в положительный полупериод модулирующего сигнала u_m частота, а следовательно, и фаза ЧМ колебаний увеличиваются. Поэтому в положительный пол у период модулирующего сигнала ЧМ колебания опережают по фазе колебания несущей частоты (колебания при отсутствии модуляции), а в отрицательной — отстают от них.

Амплитуда изменения фазы (девиация фазы) при частотной модуляции $\Delta\varphi_{\text{макс}}$ называется индексом частотной модуляции. Индекс частотной модуляции прямо пропорционален девиации частоты и обратно пропорционален величине модулирующей частоты. Индекс частотной модуляции обозначим m_f .

$$m_f = \Delta\varphi_{\text{макс}} = \frac{\Delta\omega_{\text{макс}}}{\Omega} = \frac{\Delta f_{\text{макс}}}{F}, \quad (3.3)$$

где

$$\Delta f_{\text{макс}} = \frac{\Delta\omega_{\text{макс}}}{2\pi}; \quad F = \frac{\Omega}{2\pi}.$$

Если модулирующий сигнал не является однотонным, а состоит из колебаний различных частот, то в формулу (3.3) для определения индекса модуляции должно входить максимальное значение модулирующей частоты $F_{\text{макс}}$:

$$m_f = \frac{\Delta f_{\text{макс}}}{F_{\text{макс}}}.$$

Как видно из формулы (3.2), при частотной модуляции одновременно с изменением частоты изменяется и фаза высокочастотных колебаний, т. е. частотная модуляция всегда сопровождается фазовой модуляцией.

Однако, несмотря на то, что девиация частоты и девиация фазы связаны прямо пропорциональной зависимостью $\Delta\omega_{\text{макс}} = \Omega\Delta\varphi_{\text{макс}}$, ФМ сигнал и ЧМ сигнал нельзя отождествлять. Действительно, при сложном модулирующем сигнале девиация частоты зависит не только от девиации фазы, но и от частоты модулирующего сигнала. При фазовой модуляции в соответствии с передаваемым сигналом изменяется фаза несущих колебаний (девиация фазы пропорциональна амплитуде модулирующего сигнала). Получающуюся же при фазовой модуляции девиацию частоты нельзя считать пропорциональной амплитуде модулирующего сигнала,

так как связывающий девиацию частоты и фазы коэффициент пропорциональности Ω изменяется в процессе модуляции.

Поэтому, например, прием ФМ колебаний на приемник, предназначенный для приема ЧМ колебаний, практически невозможен без предварительного преобразования фазовой модуляции в частотную. Для такого преобразования можно использовать интегрирующую цепь RC . Напряжение на выходе такой цепи связано с напряжением на входе соотношением

Поэтому если модулирующий сигнал в фазовом модуляторе пропустить через интегрирующую цепь RC , то девиация частоты при фазовой модуляции перестает зависеть от частоты модулирующего сигнала, т. е. ФМ сигнал превращается в частотно-модулированный.

$$U_{\text{вых}} = \frac{\frac{1}{\Omega C}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\Omega C)^2}}} U_{\text{вх}}$$

или при $R \gg \frac{1}{\Omega C}$, пренебрегая вторым слагаемым в знаменателе,

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{1}{\Omega RC} U_{\text{вх}} \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) следует, что амплитудно-частотная характеристика интегрирующей цепи $K(\Omega)$ обратно пропорциональна частоте сигнала

$$K(\Omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{\Omega RC}.$$

Фазовая модуляция для радиосвязи не применяется, однако использование фазового модулятора с интегрирующей цепью является довольно распространенным способом получения ЧМ колебаний.

Исходя из формул (3.2) и (3.3) и полагая для простоты начальную фазу $\varphi_0=0$, выразим ток в антенне при наличии частотной модуляции:

$$i_A = I_m \cos \varphi = I_m \cos (\omega_0 t + m_f \sin \Omega t). \quad (3.5)$$

Ширина спектра частот, занимаемого ЧМ сигналом, при широкополосной модуляции может быть приближенно оценена удвоенным значением девиации частоты $2\Delta f_{\text{макс}}$.

Для радиовещания используется частотная модуляция с девиацией частоты $\Delta f=80$ кГц. Максимальное значение частоты модулирующего сигнала можно считать равным 15 кГц.

К преимуществам частотной модуляции по сравнению с амплитудной следует отнести большую помехоустойчивость. Действительно, при частотной модуляции атмосферные и промышленные помехи, изменяя амплитуду сигнала, не изменяют закон модуляции и поэтому могут быть устранены в приемнике путем ограничения амплитуды сигнала. Большая помехоустойчивость позволяет улучшить качество воспроизведения сигнала и повысить реальную чувствительность приемника.

В режиме ЧМ колебаний передатчик работает при постоянных амплитудах, что позволяет повысить КПД и лучше использовать мощность генераторных ламп и транзисторов

Постоянство амплитуды ЧМ сигнала позволяет уменьшить нелинейные искажения сигнала при его усилении.

Частотные детекторы.

Частотные детекторы (ЧД) выполняют функции, противоположные функциям модулятора, т. е. обеспечивают выделение передаваемой информации из частотно-модулированного сигнала.

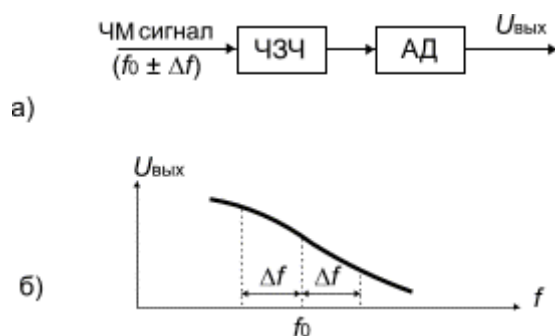


Рис. 19

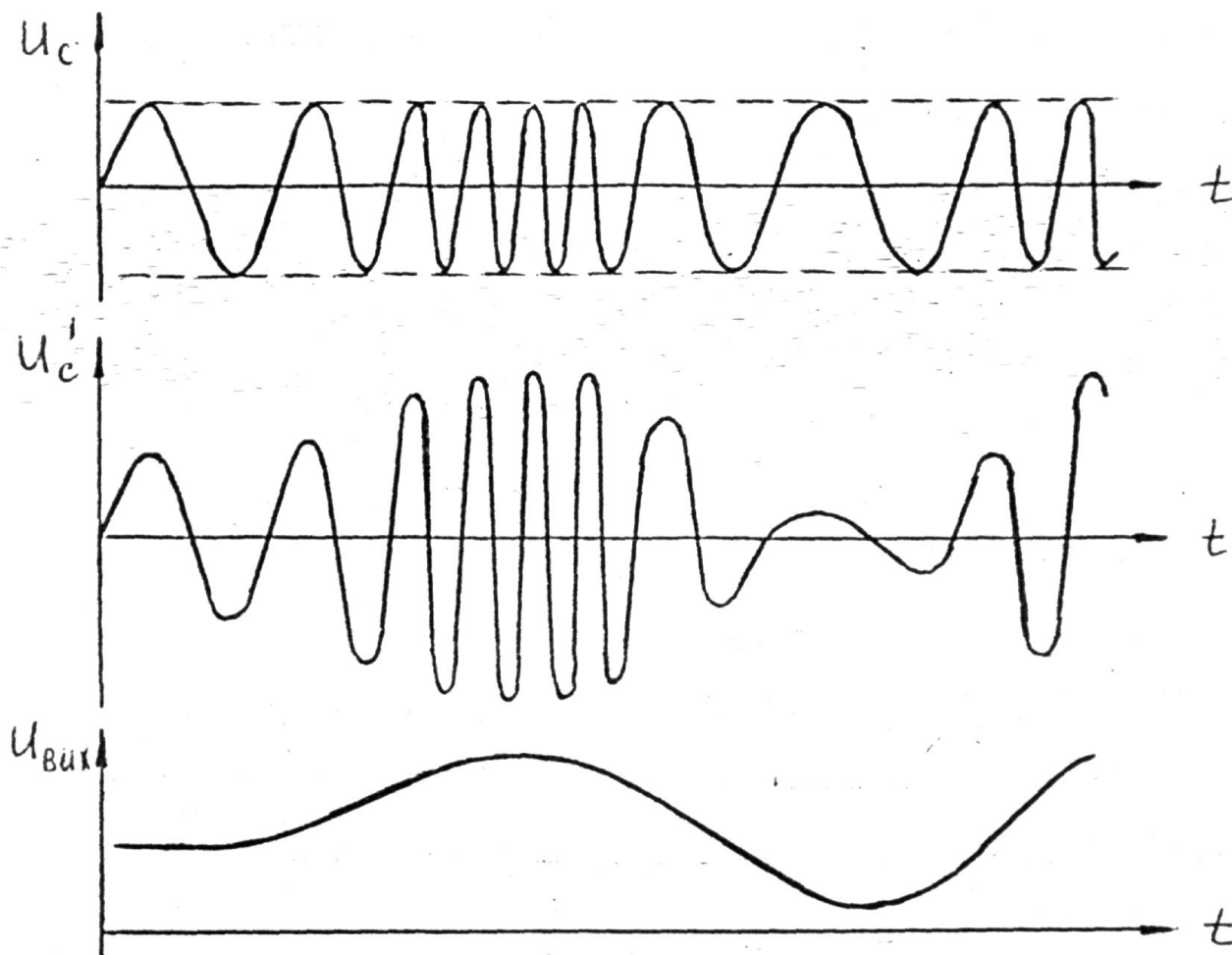


Рис. 19-1. Временные диаграммы работы ЧД. Вызывая изменение амплитуды, зависящее от частоты, линейная цепь ЧЗЧ в квазистационарном режиме не изменяет частоты колебания $u_c(t)$, поэтому на выходе ее получается колебание $u_c'(t)$, изменяющееся одновременно по частоте и по амплитуде. Это обстоятельство не препятствует осуществлению амплитудного детектирования, так как колебание $u_{\text{вых}}(t)$ на выходе амплитудного детектора для относительно узкополосных сигналов определяется только амплитудной модуляцией и не зависит от закона изменения частоты колебания.

Часто эта операция производится в два этапа (рис. 19,а). На первом этапе частотно-модулированный сигнал преобразуется в амплитудно-модулированный, а на втором этапе - осуществляется амплитудное детектирование.

Первый этап можно выполнить, подавая ЧМ сигнал на частотно-зависимый четырехполюсник (ЧЗЧ), с неравномерной частотной характеристикой. Часто в качестве такого четырехполюсника применяется параллельный резонансный контур.

К ЧД предъявляются следующие основные требования: 1) изменение выходного напряжения во времени должно, по возможности, более точно повторять закон изменения частоты подаваемого на вход сигнала; 2) коэффициент передачи напряжения должен быть возможно большим; 3) выходное напряжение не должно изменяться при изменении амплитуды входного сигнала.

Для выполнения последнего требования в применении перед ЧД используется амплитудный ограничитель (рис. 20), назначение которого - преобразование напряжения, модулированного по частоте и амплитуде в напряжение, модулированное только по частоте и имеющее постоянную амплитуду.

Ограничение паразитной амплитудной модуляции ЧМ сигналов (рис. 21) осуществляется посредством применения 2-сторонних диодных ограничителей с последующей фильтрацией, а также резонансных дифференциальных усилителей, входящих в состав интегральных микросхем усилителей промежуточной частоты.

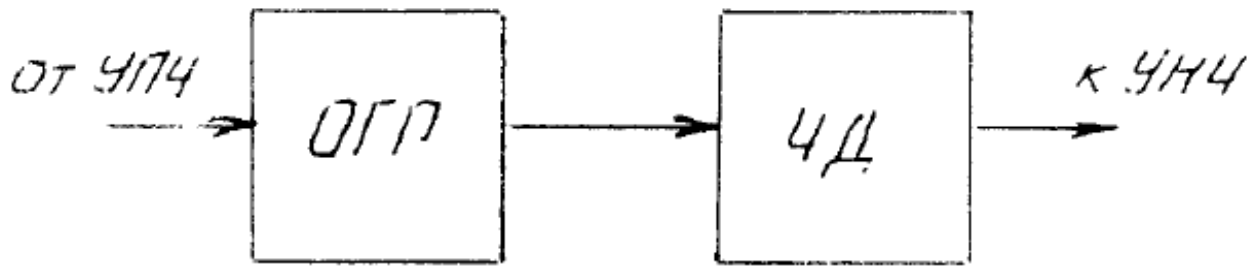


Рис. 20

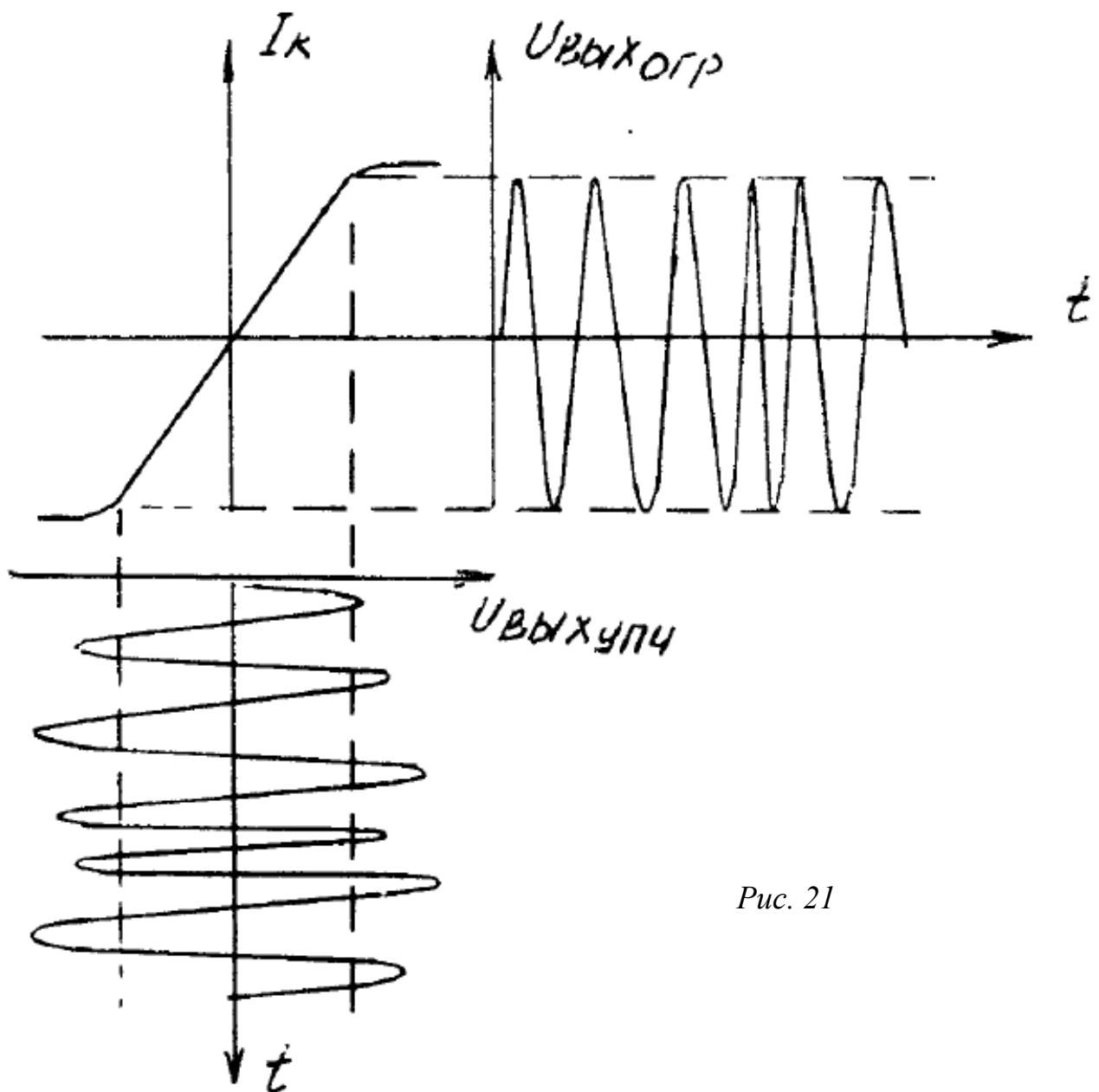


Рис. 21

Рассмотрим основные параметры ЧД.

1. Частотная (детекторная, переходная) характеристика

Частотная характеристика ЧД представляет собой зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от частоты f входного сигнала (рис. 22). Здесь f_0 принято называть частотой настройки детектора. ЧД, у которых $U_{\text{вых}}(f_0) = 0$, называется балансным. Иногда в качестве частотной характеристики рассматривают зависимость выходного напряжения от частоты расстройки $\Delta f = f - f_0$.

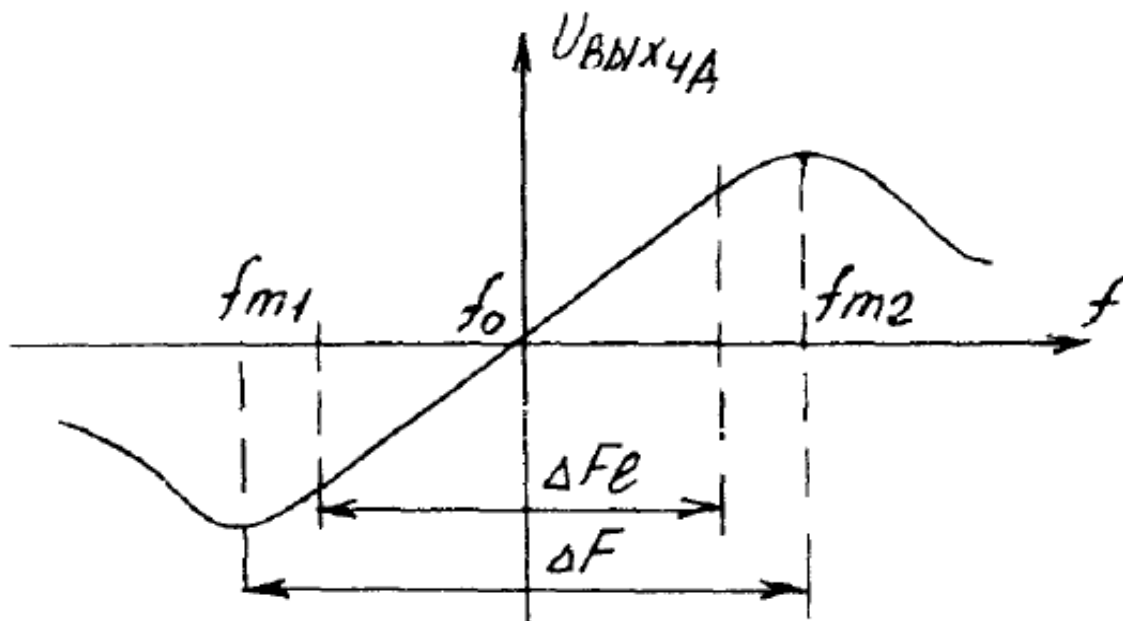


Рис. 22

2. Полоса пропускания ЧД (рис. 23).

$$\Delta F = |f_{m2} - f_{m1}| \quad (4.1)$$

где f_{m2} , f_{m1} - значения частот, при которых частотная характеристика имеет максимальное и минимальное значения.

Для того, чтобы при детектировании ЧМ-сигнала избежать нелинейных искажений, в качестве рабочего выбирают линейный участок частотной характеристики ΔF_l , то есть как правило используется лишь часть полосы пропускания $\Delta F_l = L\Delta F < 1$). При этом ЧД должен проектироваться так, чтобы величина ΔF_l была согласована с шириной спектра сигнала. Если ЧД используется не для детектирования ЧМ сигнала, а в системе ЧАПЧ, то требования к линейности частотной характеристики могут быть снижены. При этом необходимо обеспечить требуемую полосу частот ΔF и стабильность частоты настройки f_0 .

3. Крутизна частотной характеристики.

Крутизна частотной характеристики определяется как абсолютная величина тангенса угла наклона частотной характеристики при $f = f_0$:

$$S = \left| \frac{dU_{\text{ВЫХ}}(f)}{df} \right| \quad (4.2)$$

Наиболее распространенными методами детектирования ЧМ колебаний (то есть извлечение из $U_{\text{чм}}(t)$ модулирующего НЧ звукового сигнала), являются методы, основанные на преобразовании исходного ЧМ колебания в АМ или ФМ колебание с последующим амплитудным или фазовым детектированием соответственно рис. 19.

Частотные детекторы с амплитудным преобразованием сигнала с частотной модуляцией (ЧМ-АМ).

Принцип действия ЧД с преобразованием ЧМ-АМ (АМ - амплитудная модуляция) основан на том, что после прохождения ЧМ колебаний через преобразующую (дифференцирующую) цепь на выходе имеет место колебание с АМ. При этом закон изменения амплитуды полностью повторяет закон изменения частоты, а последующее амплитудное детектирование позволяет выделить модулирующую функцию (НЧ звуковой сигнал).

Простейшая схема такого детектора и пояснение принципа его работы приведены соответственно на рис. 23а и рис. 23б соответственно, а также на рис. 24. Недостатком такого детектора (с расстроенным контуром относительно средней частоты ЧМ колебаний) является большая величина нелинейных искажений, для уменьшения которых следует расширять полосу пропускания колебательного контура. Однако, это приводит к уменьшению крутизны частотной характеристики ЧД.

В схеме рис. 23, 24 контур расстроен относительно частоты f_0 так, чтобы ЧМ сигнал попадал на один из скатов характеристики. Видно, что при изменении частоты выходное напряжение будет меняться и, следовательно, ЧМ сигнал получит и амплитудную модуляцию, из которой полезный выходной сигнал выделится амплитудным детектором, образованным элементами VD1, R1, C2. Однако линейность подобного устройства будет невысокой и на практике применяется более совершенные схемы.

Для уменьшения нелинейных искажений применяются балансные ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами рис. 25.

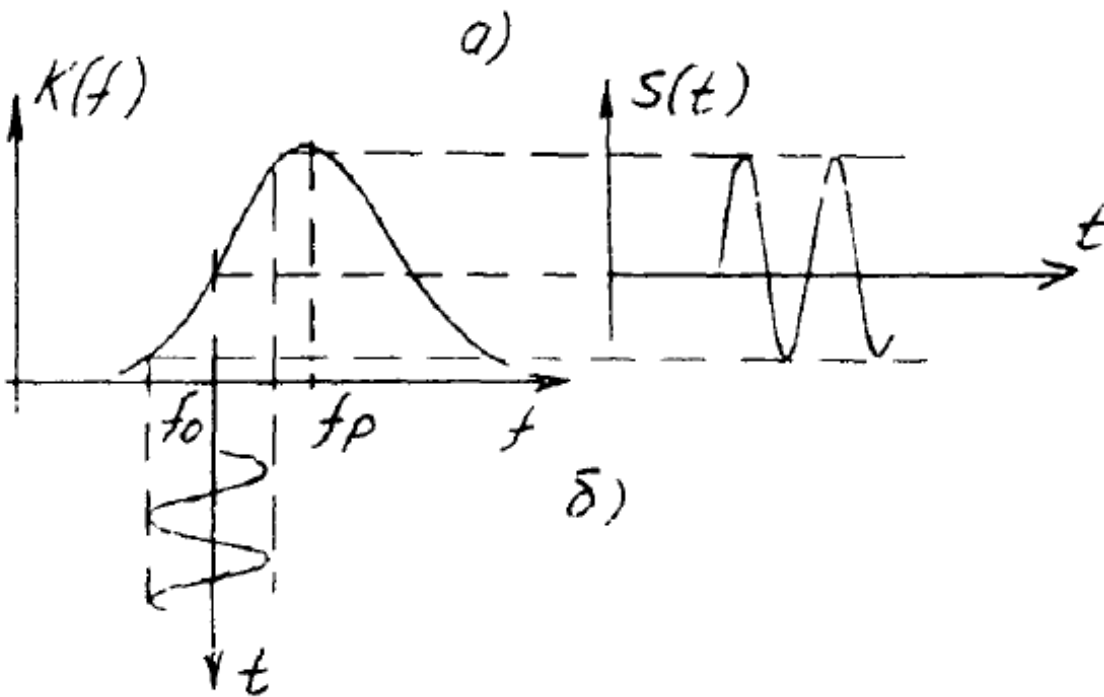
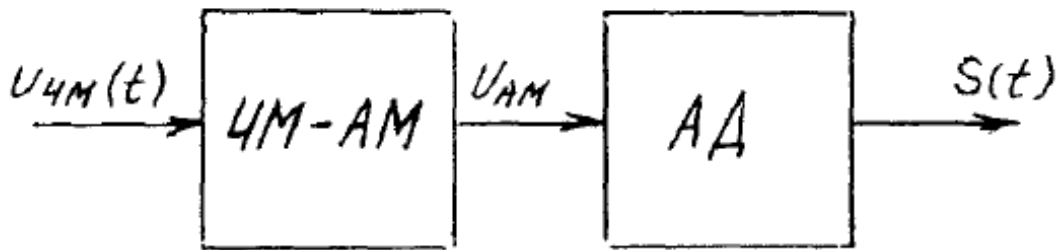
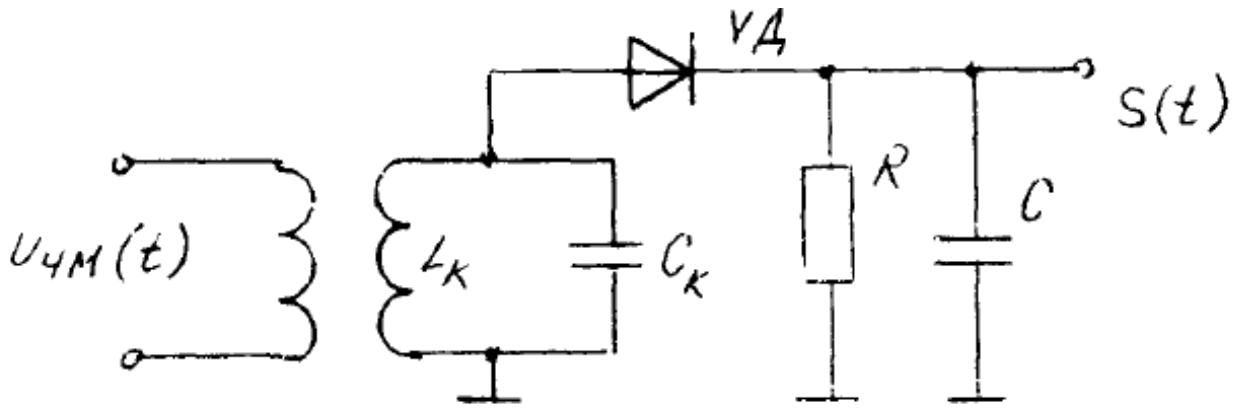


Рис. 23. Частотный детектор на одном диоде и на одном расстроенном резонансном контуре. $U_{ЧМ}(t)$ – ЧМ сигнал; $S(t)$ – НЧ звуковой сигнал; $K(f)$ – АЧХ детектора (переходная характеристика)

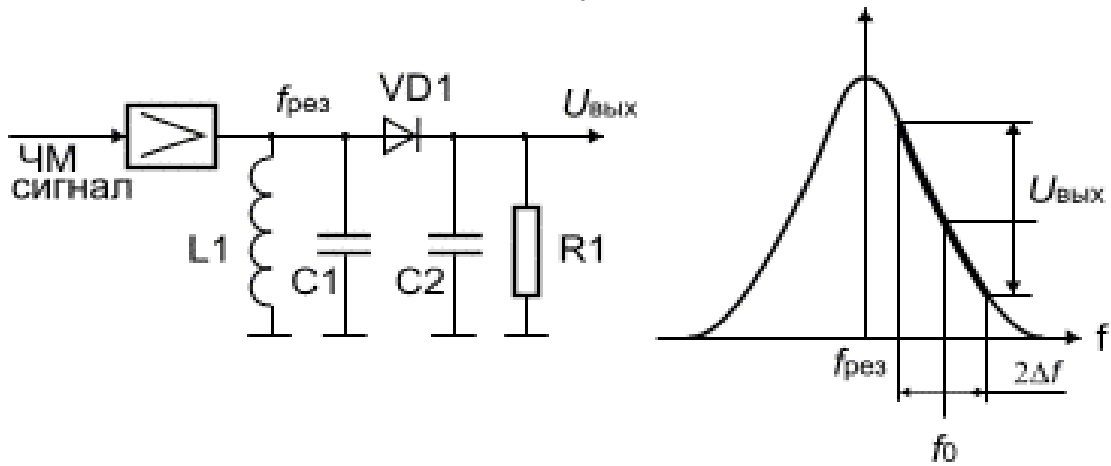
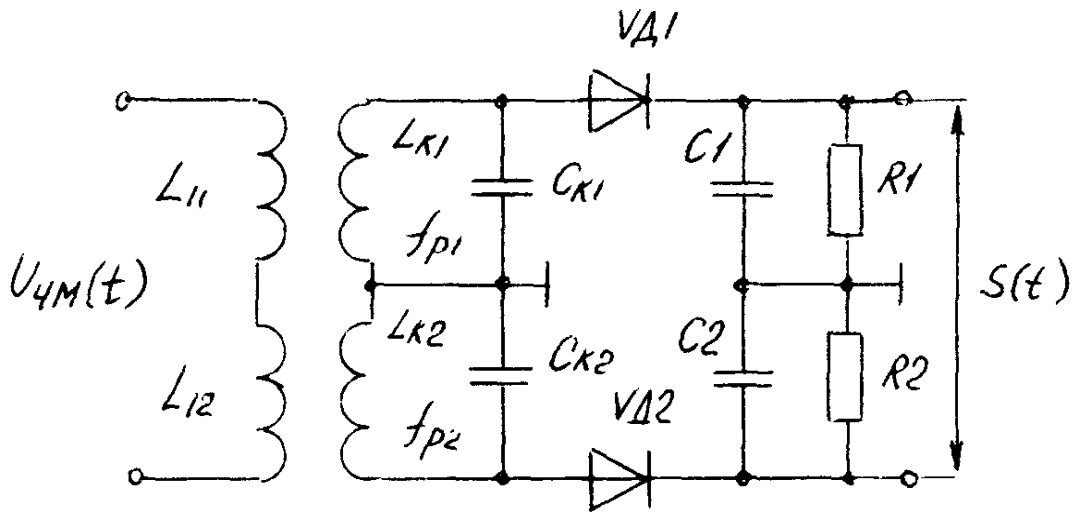
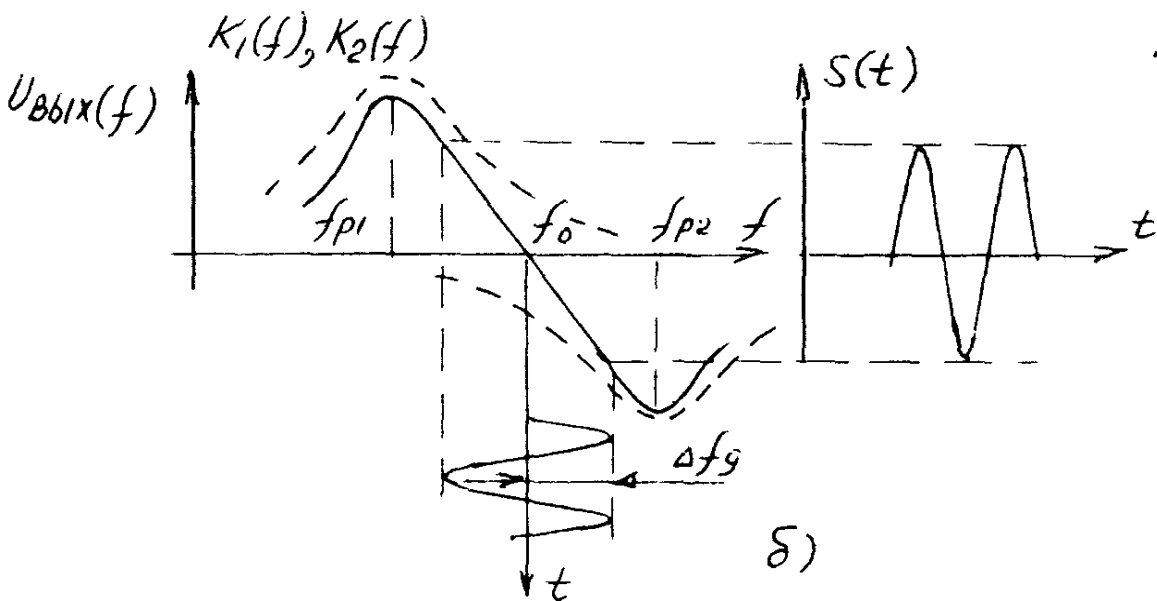


Рис. 24.



а)



б)

Рис. 25. Балансный ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами.

Частотный детектор рис. 25а содержит два колебательных контура $L1C1$ и $L2C2$, индуктивно связанных с контуром $L_{11}L_{12}$ предыдущего каскада и два амплитудных детектора, включенных по балансной схеме (диоды $VD1$, $VD2$). Пусть несущая частота частотно-модулированного колебания равна f_0 . Контуры $L1C1$ и $L2C2$ расстроены относительно этой частоты на некоторую величину Δf так, что их резонансные частоты соответственно равны $f_{p1}=f_0+\Delta f$ и $f_{p2}=f_0-\Delta f$. Резонансные кривые этих контуров имеют вид, приведенный на рисунке 26.

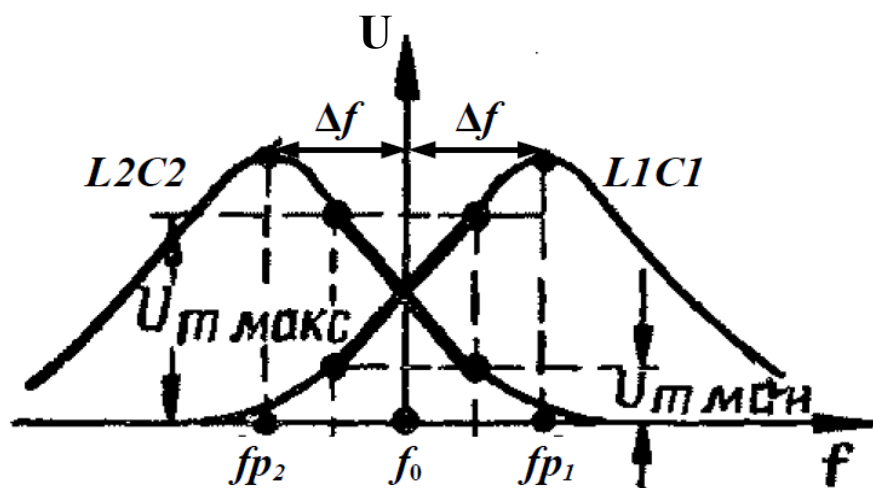


Рис. 26. Резонансные кривые контуров балансного детектора.

Когда частота подводимого к детектору напряжения равна f_0 , на контурах создаются равные по величине напряжения. Через оба диода $VD1$ и $VD2$ протекают одинаковые токи, постоянные составляющие которых создают на нагрузочных резисторах $R1$ и $R2$ равные напряжения. Напряжение на выходе ЧД $U_{вых}$ при этом равно нулю. Когда частота подводимого к детектору напряжения становится больше f_0 , напряжение на контуре $L1C1$ возрастает, а на контуре $L2C2$ — уменьшается.

Результирующее напряжение на выходе ЧД оказывается отрицательным. Аналогично, когда частота на входе меньше f_0 , результирующее напряжение оказывается положительным. Частотная характеристика детектора приведена на рисунке 27,б. При соответствующем выборе параметров контуров $L1C1$ и $L2C2$ кривизна резонансной характеристики контура $L1C1$ компенсируется кривизной резонансной характеристики $L2C2$ и характеристика детектора в целом получается практически линейной в полосе от f'' до f' .

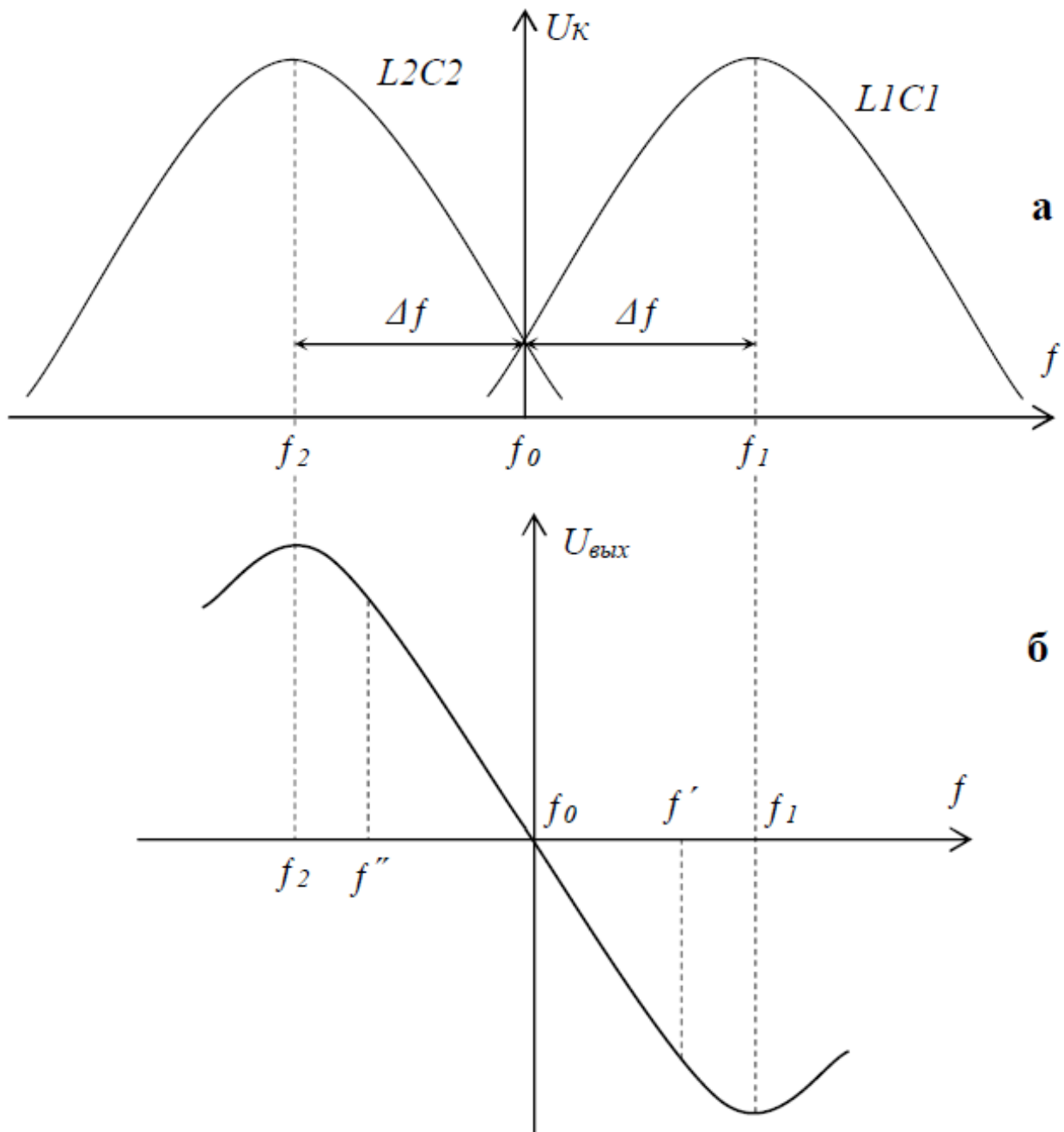


Рис. 27. Резонансные кривые контуров балансного детектора — а); и результирующая характеристика частотного детектора (S – образная кривая) — б).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Приборы и оборудование.

Эксперимент выполняется на комбинированном лабораторном комплексе УПОиПС-3, схема которого приведена на рис. 2.1.

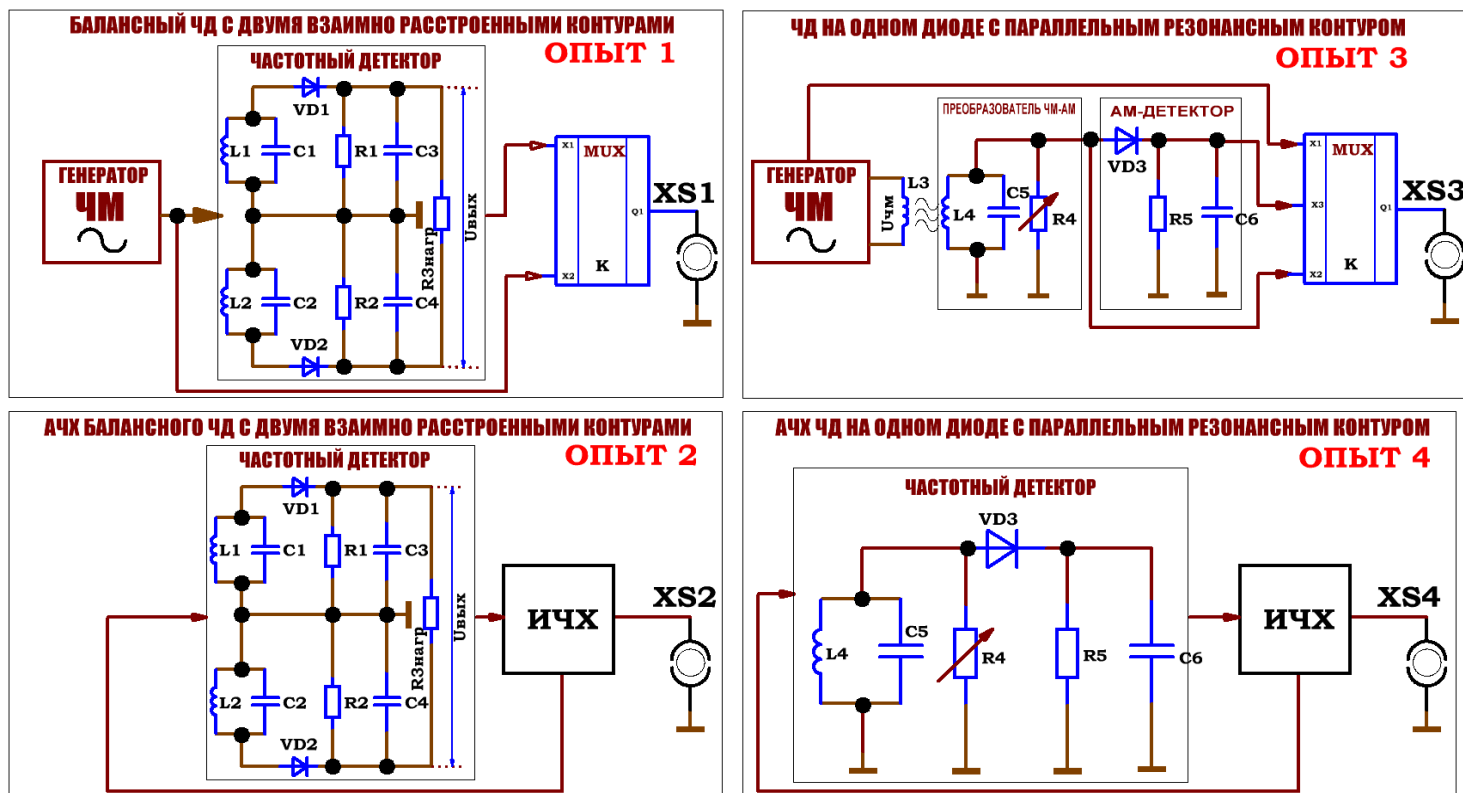


Рис. 2.1. Принципиальные электрические схемы экспериментов, выполняемые на лабораторном комплексе УПОиПС-3

Эксперимент состоит из четырех опытов. Выбор необходимого эксперимента осуществляется с помощью кнопки «ВЫБОР», вход в эксперимент осуществляется кнопкой «ВХОД», для остановки эксперимента и выхода в главное меню предназначена кнопка «ВЫХОД/ESC».

Учебные модели частотных детекторов выполнены по классическим схемам рис. 23а), рис. 25а). Для формирования ЧМ сигнала в учебной установке используется учебная модель генератора частотно-модулированного сигнала.

Для наблюдения и исследования АЧХ детекторов (переходных характеристик) в установку встроена модель Измерителя Частотных Характеристик (ИЧХ). При этом сигнал переменной частоты, но равной амплитуды $U_{вх}$ от ИЧХ подается на вход необходимой схемы. Сигнал с выхода схемы $U_{вых}$ подается на ИЧХ и затем, после необходимых преобразований в приборе, в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) поступает на вход Y электронного осциллографа.

Таким образом, на экране осциллографа визуализируется вид АЧХ данной схемы, т. е. зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты $U_{вых}=U_{вых}(f)$. При этом, из за особенности работы прибора ИЧХ, на экране

осциллографа может визуализироваться сразу несколько одинаковых характеристик с периодом, совпадающим с периодом работы внутреннего развертывающего генератора прибора ИЧХ. Вращением ручек разверток частоты и амплитуды на осциллографе следует добиться четкого изображения одной ветки АЧХ в середине экрана.

Вращая многофункциональную ручку «УПРАВЛЕНИЕ — 1» и изменяя частоту сигнала с выхода генератора, можно снять АЧХ схемы «ОПЫТ-2» по точкам с одновременной визуализацией на экране электронного осциллографа (S – кривая). При этом одновременно с АЧХ на экран осциллографа выводится «метка», указывающая на текущее положение точки, для которой на дисплее отображаются показания частоты f и амплитуды выходного сигнала схемы U .

Вращая многофункциональную ручку «УПРАВЛЕНИЕ — 2 / R4» можно наблюдать за изменением детекторной характеристики схемы рис. 23а при различном значении шунтирующего сопротивления $R4$ (вращение по часовой стрелке соответствует уменьшению сопротивления $R4$, вращение против часовой стрелки соответствует увеличению сопротивления).

Управление мультиплексорами MUX в экспериментах ОПЫТ — 1, 3 (выбор необходимого сигнала для наблюдения) осуществляется кнопками управления учебной установки.

Порядок выполнения.

1. Перед включением установки в сеть проверить целостность всех соединительных сигнальных и сетевых проводов. Разобраться с принципиальными блок-схемами опытов, в назначении кнопок, переключателей и ручек прибора. **Все соединительные провода и контрольные точки использовать следует только по назначению, запрещается замыкать выходы контрольных точек, которые не предназначены для этого в данной работе!**
2. Включить учебную установку и электронный осциллограф в сеть ~ 220 В с помощью прилагаемых силовых сетевых кабелей евро-стандарта. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля и осциллографа в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор «СЕТЬ».
3. **Перед началом эксперимента настоятельно рекомендуется ознакомиться с инструкцией по эксплуатации применяемого в работе учебного осциллографа.**
4. Приступить к выполнению первой части лабораторной работы «ОПЫТ-1». При этом на LCD дисплее должно отображаться название эксперимента «1 discriminator; 2 diod scheme»
5. Подключить выход мультиплексора XS1 соединительным проводом типа «тюльпан — BNC» ко входу Y электронного осциллографа. На некоторых экземплярах учебных осциллографов входы имеют номера «КАНАЛ 1», «КАНАЛ 2», в этом случае сигнал можно подать на любой из каналов, предварительно включив его соответствующим переключателем либо кнопкой (CH1, CH2, КАН1, КАН2) рис. 3.1, рис. 3.2.

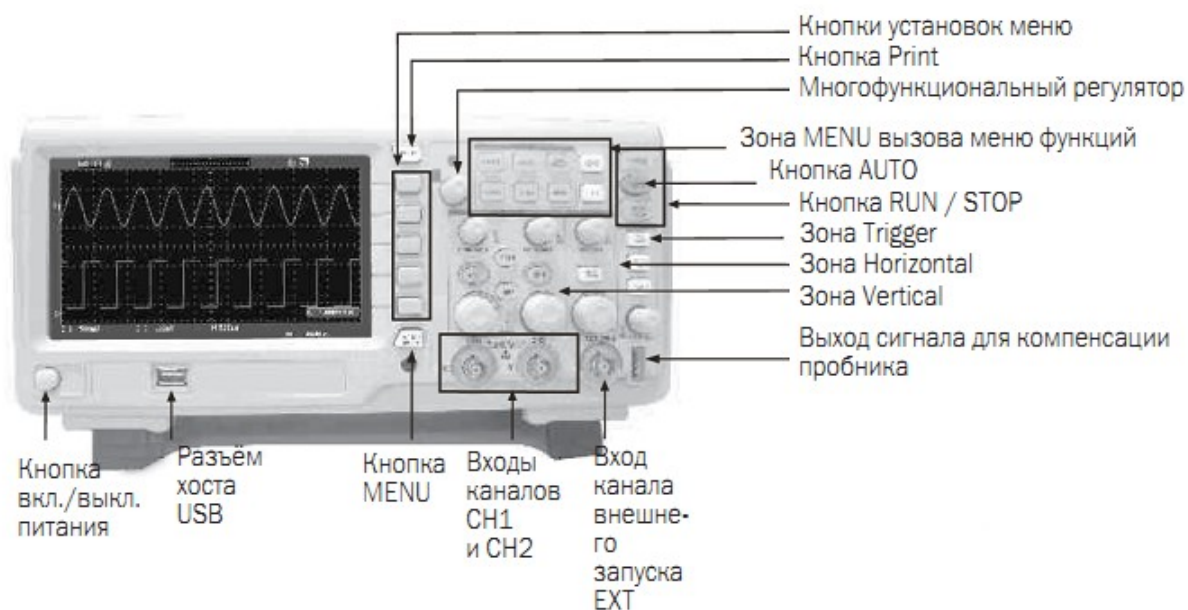


Рис. 3.1. Элементы управления передней панели ЖКД осциллографа

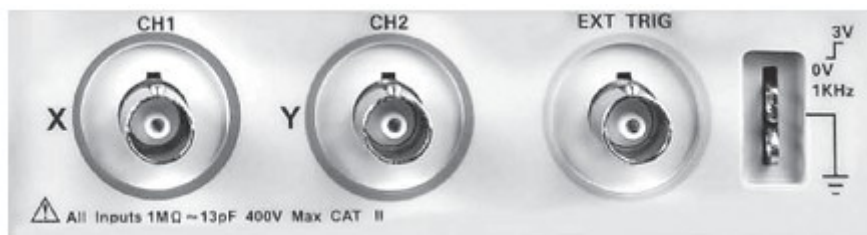


Рис. 3.2. Разъемы передней панели осциллографа. CH1, CH2: входные разъемы каналов 1 и 2 для подключения исследуемых сигналов; EXT TRIG: входной разъем для подключения источника пускового сигнала внешней синхронизации.

6. Нажать кнопку «ВХОД/START» и войти в подменю управления сигналами электронного коммутатора MUX.
7. С помощью кнопки управления «ВЫБОР» в подменю управления сигналами электронного коммутатора MUX выбрать необходимый вход коммутатора MUX, сигнал с которого будет коммутироваться на выход XS1 и подаваться на осциллограф. Вход x1 «discriminator» - наблюдение сигнала с выхода балансного ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами (сигнал на вход x1 поступает с резистора R3нагр). Вход x3 «generator FM» - наблюдение ЧМ — сигнала с выхода встроенного ЧМ — генератора.
8. С помощью кнопки «ВХОД/START» скоммутировать выбранный вход на выход XS1 (Q1) коммутатора и наблюдать на экране осциллографа соответствующий сигнал.
9. Для коммутации другого входа в рамках ОПЫТА-1 необходимо остановить текущий эксперимент кнопкой «ВЫХОД/ESC», выбрать с помощью кнопки «ВЫБОР» другой вход коммутатора и запустить его кнопкой «ВХОД/START».
10. Вращением ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV (ВОЛЬТ/ДЕЛ, ВЕРТ и ВРЕМЯ/ДЕЛ, ГОР.) и ручек POSITION осей X и Y («СМЕЩЕНИЕ») на осциллографе добиться визуально наиболее удобного изображения сигнала. Для дополнительной синхронизации можно использовать ручку LEVEL («УРОВЕНЬ»). Нажатием кнопки «МЕНЮ СИНХР» установить режим внутренней синхронизации, т. е. синхронизации тем же каналом, к которому вы подаете исследуемый сигнал (за подробностями следует обратиться к инструкции по работе с осциллографом данного типа). Зайти в меню настроек каналов, вызываемое нажатием кнопок КАН1 либо

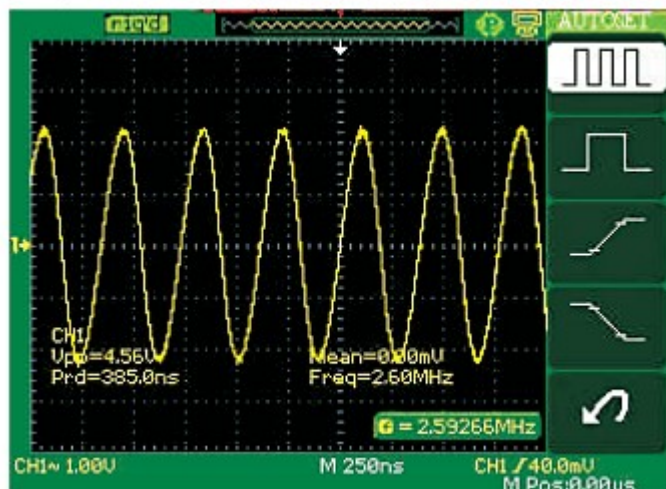


Рис. 3.3. Вид осциллограммы сигналов (пример синусоидального сигнала), получаемых на ЖКД осциллографе.

- КАН2. Для каждого канала установить режим АС — **закрытый вход**: блокировка входа по постоянному току и ослабление сигналов фильтром с частотой среза 10 Гц.
11. Текущие установленные масштабы и другая информация для каждого из входных сигналов отображается внизу осциллограммы рис. 3.3 (CH1=1.00 V — означает, что для канала 1 установлен масштаб по оси Y с коэффициентом 1V/клетка; M 2.50 mS означает, что для двух каналов установлен масштаб по оси X-время с коэффициентом развертки 2,5 мсек/клетка).
 12. Зарисовать формы сигналов, по показаниям частотомера, встроенного в осциллограф (кнопка ИЗМЕР.) зарегистрировать частоту протектированного сигнала. Наблюдать спектральную характеристику сигнала с помощью встроенного в осциллограф спектроанализатора (кнопка МАТЕМ — БПФ быстрое преобразование Фурье).
 13. Сигнал с ЧМ — генератора должен иметь форму, аналогичную Рис. 19-1 Ус; сигнал с выхода детектора должен иметь форму близкую к синусоидальному колебанию.
 14. Перейти к эксперименту по снятию частотной характеристики схемы балансного ЧД «ОПЫТ-2»
 15. Для этого выйти из подменю предыдущего опыта нажатием кнопки «ВЫХОД/ESC» и повторным нажатием кнопки «ВЫХОД/ESC» вернуться в режим выбора эксперимента.
 16. С помощью кнопки «ВЫБОР» выбрать «ОПЫТ-2», при этом на LCD дисплее должно отображаться название эксперимента «2 discriminator; 2 diod AFC» (АЧХ балансного детектора).
 17. Подключить выход ИЧХ XS2 соединительным проводом типа «тюльпан — BNC» ко входу Y электронного осциллографа.
 18. Нажать кнопку «ВХОД/START» и войти в режим снятия АЧХ схемы балансного ЧД.
 19. При этом сигнал переменной частоты, но равной амплитуды $U_{вх}$ от ИЧХ подается на вход схемы балансного частотного детектора (фактически сигнал ЧМ наводится в приемных контурах L1C1 и L2C2). Сигнал с выхода схемы $U_{вых}$ подается на ИЧХ и затем, после необходимых преобразований в приборе, в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) поступает на вход Y электронного осциллографа.
 20. Таким образом, на экране осциллографа визуализируется вид АЧХ данной схемы, т. е. зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты $U_{вых}=U_{вых}(f)$. При этом, из за особенности работы прибора ИЧХ, на экране осциллографа может визуализироваться сразу несколько одинаковых характеристик с периодом, совпадающим с периодом работы внутреннего развертывающего генератора прибора ИЧХ. Вращением ручек разверток частоты и амплитуды на осциллографе следует добиться четкого изображения одной ветки АЧХ в середине экрана.

21. Плавню вращая ручку «УПРАВЛЕНИЕ-1», снять зависимость выходного сигнала U_{out} от частоты f_0 входного сигнала $U_{out}=U_{out}(f_0)$. При этом одновременно с АЧХ на экран осциллографа выводится «метка», указывающая на текущее положение точки, для которой на дисплее отображаются показания частоты и амплитуды выходного сигнала схемы.
22. Вид АЧХ данного типа детектора должен представлять собой S – образную кривую, аналогичную рис. 25б, рис. 27б.
23. Срисовать полученную характеристику по точкам на миллиметровую бумагу.
24. По полученной АЧХ определить несущую частоту частотно-модулированного колебания f_0 , резонансные частоты первого и второго контура f_{p1} , f_{p2} и линейный рабочий участок кривой в полосе от f'' до f' (см. рис. 25, 26, 27).
25. Перейти к эксперименту по изучению схемы частотного детектора на одном диоде и на одном расстроенном резонансном контуре «ОПЫТ-3»
26. Для этого нажатием кнопки «ВЫХОД/ESC» вернуться в режим выбора эксперимента и с помощью кнопки «ВЫБОР» выбрать «ОПЫТ-3», при этом на LCD дисплее должно отображаться название эксперимента «3 discriminator; 1 diod scheme».
27. Подключить выход мультиплексора XS3 соединительным проводом типа «тюльпан — BNC» ко входу Y электронного осциллографа.
28. Нажать кнопку «ВХОД/START» и войти в подменю управления сигналами электронного коммутатора MUX.
29. С помощью кнопки управления «ВЫБОР» в подменю управления сигналами электронного коммутатора MUX выбрать необходимый вход коммутатора MUX, сигнал с которого будет коммутироваться на выход XS3 и подаваться на осциллограф. Вход x1 «generator FM» - наблюдение сигнала с выхода встроенного ЧМ — генератора. Вход x2 «converter» - наблюдение смешанного АМ-ЧМ — сигнала с выхода преобразователя АМ-ЧМ (резистор R4). Вход x3 «amplitude detector» - наблюдение протектированного сигнала с АМ-детектора (сигнал снимается с конденсатора C6).
30. С помощью кнопки «ВХОД/START» скоммутировать выбранный вход на выход XS3 (Q1) коммутатора и наблюдать на экране осциллографа соответствующий сигнал.
31. Для коммутации другого входа в рамках ОПЫТА-3 необходимо остановить текущий эксперимент кнопкой «ВЫХОД/ESC», выбрать с помощью кнопки «ВЫБОР» другой вход коммутатора и запустить его кнопкой «ВХОД/START».
32. Вид соответствующих сигналов должен совпадать с рис. 19-1.
33. Зарисовать формы сигналов, по показаниям частотомера, встроенного в осциллограф (кнопка ИЗМЕР.) зарегистрировать частоту протектированного сигнала. Наблюдать спектральную характеристику

- сигнала с помощью встроенного в осциллограф спектроанализатора (кнопка МАТЕМ — БПФ быстрое преобразование Фурье).
34. Перейти к эксперименту по снятию частотной характеристики частотного детектора на одном диоде и на одном расстроенном резонансном контуре «ОПЫТ-4».
 35. Для этого выйти из подменю предыдущего опыта нажатием кнопки «ВЫХОД/ESC» и повторным нажатием кнопки «ВЫХОД/ESC» вернуться в режим выбора эксперимента.
 36. С помощью кнопки «ВЫБОР» выбрать «ОПЫТ-4», при этом на LCD дисплее должно отображаться название эксперимента «4 discriminator; 1 diod AFC» (АЧХ детектора).
 37. Подключить выход ИЧХ XS4 соединительным проводом типа «тюльпан — BNC» ко входу Y электронного осциллографа.
 38. Поставить ручку «УПРАВЛЕНИЕ — 2 / R4» в среднее положение ($R \approx 1,5$ кОм)
 39. Нажать кнопку «ВХОД/START» и войти в режим снятия АЧХ схемы ЧД.
 40. На экране осциллографа при этом визуализируется вид АЧХ данной схемы, т. е. зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}(f)$. При этом, из за особенности работы прибора ИЧХ, на экране осциллографа может визуализироваться сразу несколько одинаковых характеристик с периодом, совпадающим с периодом работы внутреннего развертывающего генератора прибора ИЧХ. Вращением ручек разверток частоты и амплитуды на осциллографе следует добиться четкого изображения одной ветки АЧХ в середине экрана.
 41. Вид АЧХ данного типа детектора должен представлять собой колоколообразную кривую, аналогичную рис. 23б, рис. 24.

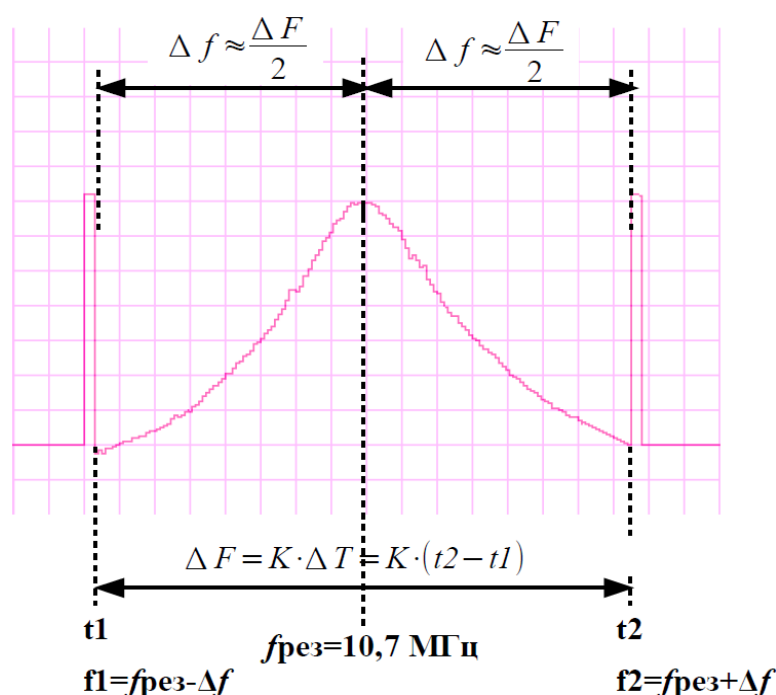


Рис. 3.4. Вид АЧХ, получаемый с помощью учебной модели ИЧХ на приборе УПОиПС-3 для ОПЫТА-4.

42. Из-за особенностей работы ИЧХ в данном эксперименте вид АЧХ, получаемый для резонансного контура и отображаемый на осциллографе будет соответствовать рис. 3.4. При этом в начале и в окончании АЧХ выводится прямоугольная метка, которая не перемещается по картинке и указывает на начало отсчета и окончание отсчета АЧХ по шкале частот. Т. о., АЧХ снимается в некотором диапазоне частот ΔF (от метки до метки) при этом, вся шкала осциллографа по оси времени X (от начала кривой АЧХ с нулевого уровня до спада до нулевого уровня) может быть переведена в частоты согласно формуле: $\Delta F = K \cdot \Delta T$, где $\Delta T = t_2 - t_1$ — расстояние в мС (миллисекундах) между метками, $K = 13,3$ кГц/сек — коэффициент перевода, $f_{рез} = 10,7$ МГц — резонансная частота контура рис. 3.4. При этом принять $\Delta f \approx \frac{\Delta F}{2}$, $f_1 = f_{рез} - \Delta f$, $f_2 = f_{рез} + \Delta f$ (рис. 3.4). Уровень выходного сигнала для каждой точки АЧХ измерять по показаниям оси ОУ (напряжение) электронного осциллографа.

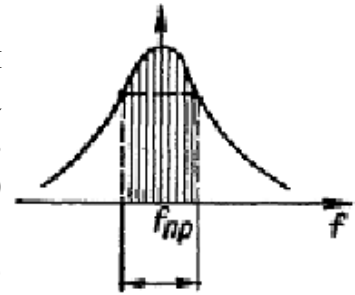


Рис. 3.5. Определение ширины полосы пропускания.

43. Срисовать полученную характеристику по точкам на миллиметровую бумагу.
44. Определить полную ширину полосы пропускания резонансного контура $f_{пр}$ на уровне 0,707 от максимального значения рис. 3.5.
45. Согласно рис. 24, приняв за резонансную частоту контура $f_{рез} = 10,7$ МГц, и зная общую ширину ΔF детекторной характеристики, определить рабочую несущую частоту f_0 и рабочий линейный участок детекторной характеристики (рис. 3.4, рис. 24).
46. Вращая многофункциональную ручку «УПРАВЛЕНИЕ — 2 / R4» можно наблюдать за изменением детекторной характеристики схемы рис. 23а при различном значении шунтирующего сопротивления R4 (**вращение по часовой стрелке соответствует уменьшению сопротивления R4, вращение против часовой стрелки соответствует увеличению сопротивления**). Диапазон изменения значения R4: 500 Ом (крайнее правое значение) — 3 кОм (крайнее левое значение). R4 в данном эксперименте не измеряется и определяется визуально по шкале.
47. Сделать вывод о качестве работы различных схем ЧМ — детекторов и о влиянии шунтирующего резистора в цепи резонансного контура.
48. По окончании работы отключить учебную установку и осциллограф от сети, поставив переключатели «СЕТЬ» на панели установки и осциллографа в положение «выкл» и вынуть сетевые вилки из розеток.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. Ефимов И. Е., Козырь И. Я. Основы микроэлектроники — М-Связь, 1975. — 272 с.
2. Справочник по интегральным микросхемам/ Под ред. Б В Та-рабрина. 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергия, 1980. — 816 с
3. Банк М. У. Аналоговые интегральные схемы в радиоаппаратуре. — М.: Радио и связь, 1981. — 136 с.
4. Полевые транзисторы и интегральные микросхемы. Технический каталог. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1975. — 112 с.
5. А.И. Фалько. Основы радиоприема. Учебное пособие. - Новосибирск: СибГУТИ, 2002
6. Радиоприемные устройства/ Под ред. Н.Н. Фомина.- М.: Радио и связь, 1996
7. Н.Н. Буга, А.И. Фалько, Н.И. Чистяков. Радиоприемные устройства.- М.: Радио и связь, 1986

ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»