

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

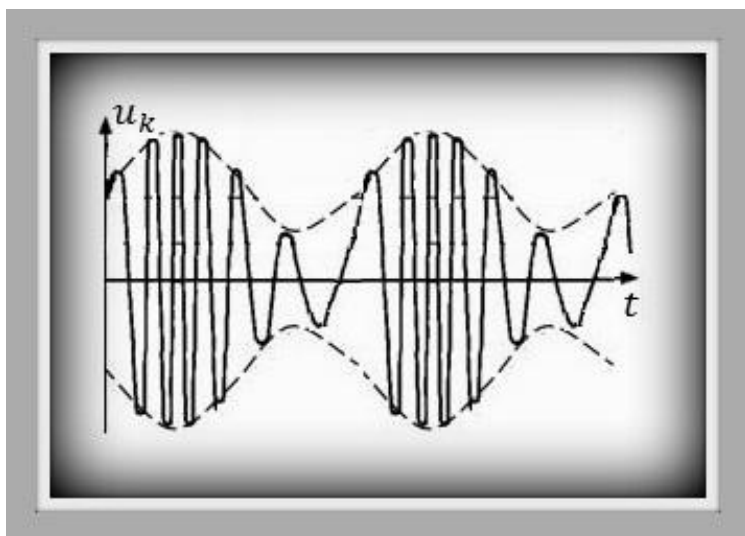
---

Кафедра радиофизики

***Ю. Н. НОВИКОВ***

---

# **ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ, ЧАСТОТНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ**



**Учебное пособие по лабораторной работе**

---

Модернизация, изготовление, настройка  
стенда лабораторной работы: ***Ф. А. КОПЫЛОВ***

Санкт-Петербург  
2014

## Оглавление

---

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение .....</b>                                                                 | <b>3</b>  |
| <b>Краткие сведения о частотной модуляции и частотном<br/>детектировании .....</b>    | <b>3</b>  |
| Модулированные колебания.....                                                         | 3         |
| Об устройстве частотного модулятора .....                                             | 6         |
| Детектирование ЧМ-колебаний .....                                                     | 11        |
| Состав лабораторной установки, программа исследований .....                           | 13        |
| <b>Контрольные вопросы .....</b>                                                      | <b>15</b> |
| <b>Порядок выполнения работы .....</b>                                                | <b>15</b> |
| Исследование частотного модулятора .....                                              | 15        |
| Исследование частотного детектора .....                                               | 16        |
| Исследование «сквозного» преобразования колебаний трактом<br>модулятор-детектор ..... | 17        |
| <b>Литература.....</b>                                                                | <b>18</b> |

## Введение

Лабораторная работа **Частотная модуляция, частотное детектирование** входит в состав лабораторного практикума дисциплин «Радиотехнические цепи и сигналы», «Электроника». Исследования, предусмотренные программой работы, и анализ результатов измерений расширяют и углубляют знания о свойствах частотно-модулированных (ЧМ) колебаний, об их формировании и детектировании, о том, как можно построить частотный модулятор и частотный детектор. Выполнение пунктов лабораторной работы способствует приобретению навыков экспериментального исследования процессов в радиоэлектронных устройствах, модулирующих и детектирующих колебания.

В пособии изложены краткие сведения о частотной модуляции и частотном детектировании, описано устройство лабораторной установки, представлена программа исследований, даны методические рекомендации по выполнению пунктов работы и анализу явлений в модуляторе и детекторе ЧМ-колебаний. Детальное изучение пособия – неременное условие подготовки к работе в лаборатории. Тщательно освоив представленный здесь материал, можно успешно выполнить программу работы. В пособии имеются ссылки на дополнительные источники. Обращение к ним поможет при необходимости преодолеть возникающие на подготовительном этапе и при анализе результатов исследований затруднения. Контрольные вопросы позволят самостоятельно оценить требуемый уровень освоения материала и готовности к занятиям в лаборатории.

Лабораторная работа (идейная основа, лабораторный стенд) разработана, изготовлена, снабжена методической и технической документацией преподавателями и сотрудниками кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Описание первой версии работы [1] имеется в библиотеке кафедры. Лабораторные установки находятся в лаборатории «Основы радиоэлектроники и радиофизики» кафедры радиофизики СПбГПУ.

## Краткие сведения о частотной модуляции и частотном детектировании

### Модулированные колебания

*Модуляция* – преобразование информации в формат, облегчающий ее транспортировку. По закону информационного сигнала можно изменять (*модулировать*) какой-либо из параметров гармонического колебания высокой частоты (*несущего колебания*) — амплитуду, частоту или начальную фазу. В теории сигналов используют понятие *радиосигнал*:  $a(t) = A(t)\cos(\omega_0 t + \varphi(t) + \varphi_0)$ . Его основа - гармоническое (*несущее*) колебание, частоту которого ( $\omega_0 = 2\pi f_0$ ) называют *несущей*. Функции  $A(t)$  (*огибающая радиосигнала*), и  $\varphi(t)$  (*фазовая функция*) можно изменять заданным образом. Обычно задают медленные по сравнению с не-

сущей частотой изменения, то есть функции  $A(t)$  и  $\varphi(t)$  за период несущей частоты  $T_0 = 2\pi/\omega_0$  меняются слабо.

### Амплитудно-модулированный сигнал

Если по закону информационного сигнала  $s(t)$  изменяют амплитуду радиосигнала  $A(t)$ , имеем случай *амплитудной модуляции*. Такой сигнал называют *амплитудно-модулированным* или *АМ-сигналом*.

Представим АМ-сигнал в виде  $a_{am}(t) = A_0[1 + s(t)]\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ , здесь  $A_0$  — амплитуда несущего колебания,  $s(t)$  — информационный сигнал. Если огибающая АМ-сигнала является гармоническим колебанием с частотой  $\Omega$ , имеем *гармоническую*, или *однотоновую*, *амплитудную модуляцию* и, соответственно, *однотоновый АМ-сигнал* (рис. 1, а):

$$a_{am}(t) = A_0[1 + m\cos(\Omega t + \phi)]\cos(\omega_0 t), \Omega \ll \omega_0$$

(начальную фазу несущего колебания считаем нулевой). Параметр  $m$  называют *коэффициентом амплитудной модуляции*. Его значения лежат в диапазоне  $0 \leq m \leq 1$ . Найти  $m$  можно по осциллограмме АМ-колебания (см. рис. 1, а):  $m = (U_M - U_m)/(U_M + U_m)$ .

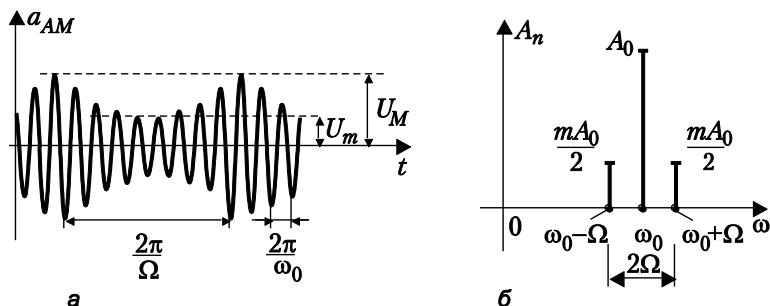


Рис. 1. Гармоническое АМ-колебание (а) и его спектральная (б) диаграмма

Однотоновый АМ-сигнал можно преобразовать к виду

$$a_{am}(t) = A_0\cos(\omega_0 t) + 0,5A_0m\cos[(\omega_0 - \Omega)t - \phi] + 0,5A_0m\cos[(\omega_0 + \Omega)t + \phi]$$

и обнаружить, что спектр АМ-колебания в случае гармонической модуляции состоит из трех гармоник (рис. 1, б): центральной — на несущей частоте  $\omega_0$ , и двух других, симметричных относительно  $\omega_0$ , — на *нижней боковой частоте*  $\omega_0 - \Omega$ , и *верхней боковой частоте*  $\omega_0 + \Omega$ . Таким образом, *эффективная ширина спектра амплитудно-модулированного колебания* определяется частотой модулирующего колебания, то есть однотонное АМ-колебание занимает полосу  $2\Omega$ .

В случае модуляции периодическим колебанием (имеющим дискретный спектр) с периодом  $T = 2\pi/\Omega$  каждая гармоника исходного спектра порождает две гармоники: с нижней и верхней боковыми частотами. Представим, что ширина спектра модулирующего сигнала ограничена  $n$ -ой гармоникой, тогда спектр АМ-колебания занимает полосу  $2n\Omega$ .

## Частотно-модулированный сигнал

В случае *частотной модуляции* информационный сигнал  $s(t)$  связывают с приращением мгновенной частоты:  $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t)$ ,  $\Delta\omega(t) \sim s(t)$ . Соответствующий сигнал называют *частотно-модулированным*, или *ЧМ-сигналом*. В случае *гармонической*, или *однотоновой*, *частотной модуляции* мгновенная частота радиосигнала изменяется по закону гармонического колебания:  $\omega(t) = \omega_0 + W\sin(\Omega t)$ . Амплитуду приращения мгновенной частоты  $W$  называют *девиацией частоты*. Однотоновое ЧМ-колебание (рис. 2, а) можно привести к виду:

$$a_{fm}(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + m \cos(\Omega t)], \quad m = W/\Omega.$$

Величину  $m$  называют *индексом модуляции*.

Существенное свойство частотной модуляции: даже при модуляции гармоническим колебанием спектр ЧМ-колебания состоит из бесконечного числа гармоник [2]. И в этой связи важно уметь выявлять полосу, в пределах которой лежат частоты гармоник, определяющих в совокупности энергию ЧМ-сигнала.

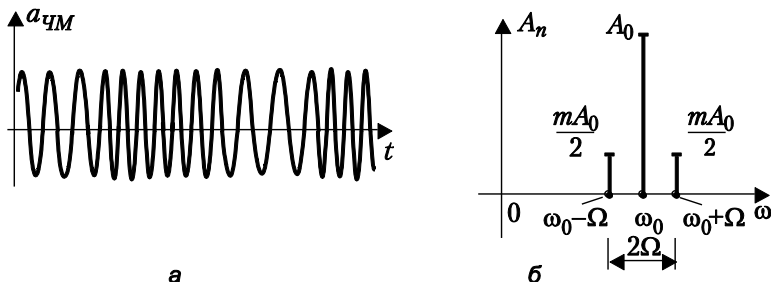


Рис. 2. Гармоническое ЧМ-колебание (а) и его спектральная (б) диаграмма

Пусть индекс модуляции  $m \ll 1$ . Преобразуем  $a_{fm}(t)$ , используя формулу косинуса суммы углов:

$$a_{fm}(t) = A_0 \{ \cos(\omega_0 t) \cos[m \cos(\Omega t)] - \sin(\omega_0 t) \sin[m \cos(\Omega t)] \}.$$

Так как  $m \ll 1$ , считаем:  $\cos[m \cos(\Omega t)] \approx 1$ ,  $\sin[m \cos(\Omega t)] \approx m \cos(\Omega t)$ . С учетом этих приближений

$$a_{fm}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t) + 0,5 A_0 m \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \pi/2] + 0,5 A_0 m \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \pi/2].$$

Таким образом, при малом индексе частотной модуляции спектр ЧМ-колебания состоит практически из трех гармоник: центральной — на несущей частоте  $\omega_0$ , и двух, расположенных симметрично относительно несущей частоты: на *нижней боковой частоте*  $\omega_0 - \Omega$ , и *верхней боковой частоте*  $\omega_0 + \Omega$  (рис. 2, б). Резонно заключить, что при  $m \ll 1$  эффективная ширина спектра ЧМ-колебания практически не зависит от индекса модуляции и примерно равна  $2\Omega$ . Такой случай принято называть *узкополосной частотной модуляцией*. Важно отметить, что амплитудные спектрограммы ЧМ- и АМ-колебания при одинаковых  $m \ll 1$  практически

неразличимы (сравните рис. 1 и рис. 2). В спектральном представлении отличие этих сигналов проявляется в фазовых диаграммах.

Альтернативная ситуация — *широкополосная частотная модуляция* — реализуется при индексах  $m$ , превышающих единицу. В этом случае имеем богатый спектр: чем больше индекс модуляции, тем больше гармоник приходится учитывать, определяя полосу ЧМ-сигналов [2]. При широкополосной частотной модуляции полосу частот спектра ЧМ-колебания оценивают формулой  $2\Omega(m + 1)$ . Поскольку  $m = W/\Omega$ , можем считать, что *полоса частот для случая широкополосной частотной модуляции примерно равна удвоенной девиации частоты:  $2W$ .*

#### **ПРИМЕЧАНИЕ**

В [2] показано: при значениях индекса модуляции равных 2,405, 5,55 в спектре ЧМ колебания отсутствует гармоника на несущей частоте, то есть энергия колебания аккумулируется в составляющих, порожденных информационным сигналом. Этим иногда пользуются: формируют ЧМ-сигнал так, чтобы доля энергии, приходящаяся на несущее колебание, была небольшой.

### **Об устройстве частотного модулятора**

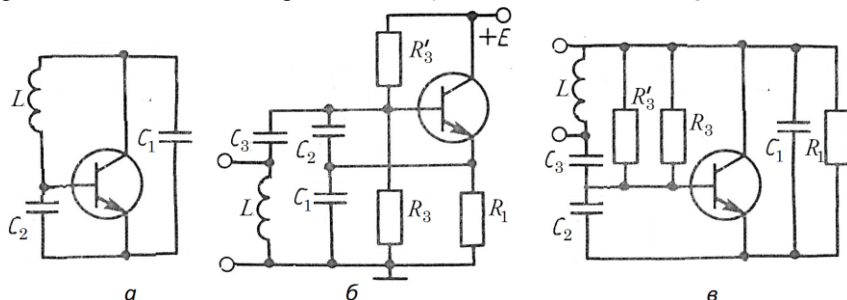
*Частотным модулятором* называют устройство, формирующее ЧМ-колебание посредством воздействия информационным сигналом на частоту несущего колебания. Один из способов построения частотного модулятора основан на управлении частотой автогенератора гармонических (несущих) колебаний.

#### **Об автогенераторе гармонических (несущих) колебаний**

Представим, что функцию полосового фильтра в автогенераторе выполняет колебательный контур с частотой резонанса  $\omega_0$ . Если контур сложный - составлен, например, из нескольких реактивных элементов, - сведем его схему к соединению эквивалентных элементов: индуктивности  $L_k$  и емкости  $C_k$ . (В случае добротных контуров такой прием облегчает анализ явлений в окрестности резонанса.) Значения элементов  $L_k$ ,  $C_k$  и резонансная частота связаны формулой  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_k C_k}$ . Известно, что частоту автоколебаний генератора находят, решая *уравнение установившегося режима* [3]. Для рассматриваемых здесь цепей и диапазона частот оказывается, что частота генерации практически совпадает с резонансной частотой контура  $\omega_0$ . В этом случае очевиден способ управления частотой автоколебаний: воздействием на реактивный элемент, задающий резонансную частоту контура. Если это делать в согласии с формой информационного сигнала, получим ЧМ-колебание.

Рассмотрим автогенератор, построенный по схеме Колпитца (в отечественной литературе ее именуют *емкостная трехточка* [3]). На рис. 3 показаны: (а) идейная основа схемы Колпитца, (б) пример трехточечного автогенератора на биполярном транзисторе [4] и (в) его эквивалентная схема для переменного тока. Структура цепи - подключение индуктивности к электродам база-коллектор, а емкостей к электродам база-эмиттер и

эмиттер-коллектор – обеспечивает необходимые фазовые сдвиги для выполнения условия самовозбуждения (положительную обратную связь на резонансной частоте). Из эквивалентной схемы генератора (см. рис. 3, в) следует, что соответствие схеме Колпитца на резонансной частоте будет здесь обеспечено только при индуктивном характере импеданса двухполюсника, подключенного к электродам база-коллектор. То есть необходимо выполнение условия  $\omega_0 L > 1/(\omega_0 C_3)$ . Резонансную частоту находим по формуле  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_k}$ , здесь  $C_k = C_1 C_2 / (C_1 C_2)$  для схемы на рис. 3, а, а для схемы на рис. 3, в  $1/C_k = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$ .



**Рис. 3.** Идея схемы Колпитца (а), трехточечный автогенератор на биполярном транзисторе (б) и его эквивалентная схема для переменного тока (в)

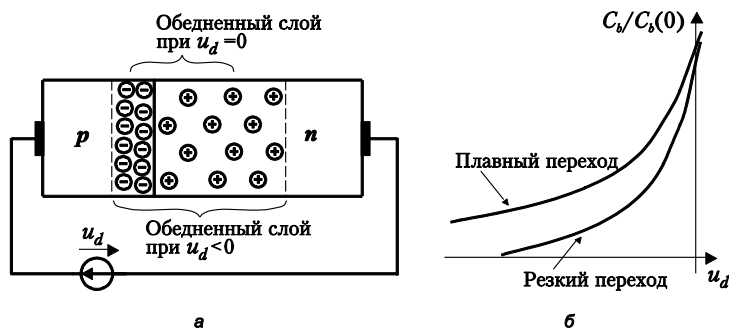
Понятно, что частотой генерируемых колебаний можно управлять, воздействуя на реактивный элемент контура. Известный прием построения ЧМ-модулятора на основе автогенератора: включение в колебательную цепь обратно смещенного полупроводникового диода. При таком включении диод подобен конденсатору, емкость которого зависит от приложенного напряжения. Воздействуя на диод модулирующим напряжением, управляют частотой генерации.

При построении практической схемы необходимо учитывать влияние резистивных цепей на процесс генерации. На рис. 3, в показано, что резисторы, задающие режим работы биполярного транзистора, входят в состав контура, а значит, влияют на его добротность. Нужно также учитывать проводимость перехода база-эмиттер. Диссипативные потери могут существенно снизить добротность контура, затруднить выполнение условия самовозбуждения.

#### *Полупроводниковый диод как управляемый конденсатор*

Подобие полупроводникового диода конденсатору можно объяснить следующим образом. При подаче на диод запирающего напряжения в области контакта полупроводников *n*- и *p*- типа образуются слои зарядов *Q* и  $-Q$  неподвижных ионизированных атомов примесей (рис. 4, а). Здесь низка концентрация подвижных носителей электрических зарядов – электронов и дырок, поэтому данную область контакта называют *обедненным слоем*. С ростом запирающего напряжения ( $|u_d|$ ) область пространст-

венного заряда увеличивается, и заряд  $Q$  растет. Функция  $Q(u_d)$  оказывается нелинейной. Известно, что через обратно смещенный  $p$ - $n$  переход текут неосновные носители, но этот ток неощутимо мал, и можно констатировать: запертый  $p$ - $n$  переход подобен конденсатору, обкладки которого раздвигаются при увеличении приложенного напряжения.



**Рис. 4.** Изменение ширины обедненного слоя (а) и примерное поведение барьерной емкости (б) при подаче на  $p$ - $n$  переход запирающего напряжения

Для описания свойств запертого перехода используют понятие *барьерной емкости*:  $C_b = dQ/du_d$ . Барьерная емкость убывает с ростом (по модулю) приложенного к переходу напряжения. Характер функции  $C_b(u_d)$  определяется законом распределения концентрации примесей в области контакта полупроводников  $n$ - и  $p$ -типа (рис. 4, б). Условно разделяют переходы на *резкий*, или *ступенчатый*, и *плавный* — с распределением примеси в зоне контакта по линейному закону. Для оценки барьерной емкости используют формулу  $C_b(u_d) = C_b(0)^n \sqrt[n]{\varphi/(\varphi + |u_d|)}$ . Здесь  $\varphi$  — *контактная разность потенциалов* (для кремния  $\varphi \approx 0,75$  В), показатель  $n$  считают равным 2 (для резкого перехода) или 3 (для плавного).

Для использования в электронных цепях в качестве конденсаторов переменной емкости выпускают специальные диоды — варикапы, варакторы. Изменяя запирающее напряжение на таких диодах в пределах 5 - 10 В, реально получить пятикратное и более изменение емкости, например: от 10 – 20 пФ до 50 – 150 пФ.

#### *Применение варикапа в цепи частотного модулятора*

Частотный модулятор можно построить на основе автогенератора Колпитца, включив параллельно катушке  $L$  варикап  $C_b$  (рис. 5). При таком соединении важно, чтобы составной реактивный двухполюсник  $C_b, L$  в диапазоне частот, отводимых ЧМ-сигналу, обеспечивал индуктивную реакцию на полюсах база-коллектор (см. рис. 3, а).

На рис. 6 штриховыми линиями показаны графики суммарной проводимости двухполюсника варикап-катушка равной  $\omega C_b - 1/(\omega L)$ . Кривые демонстрируют зависимость проводимости совокупного двухполюс-

ника от емкости  $C_b$ , задаваемой напряжением на варикапе. В показанном на рисунке примере левее частоты  $\omega_{b3}$  наблюдаем индуктивную реакцию реактивного двухполносника. Следовательно, в этой области частот двухполносник варикап-катушка можно условно уподобить эквивалентной индуктивности  $L_k$ . Изменение емкости диода  $C_b(u_d)$  влечет изменение проводимости (индуктивной) двухполносника, а это можно интерпретировать (весьма примерно, зато наглядно) зависимостью от напряжения значения условной индуктивности:  $L_k(u_d)$  (см. рис. 6, графики проводимости двухполносника варикап-катушка в окрестности некоей частоты  $\omega'$ ).

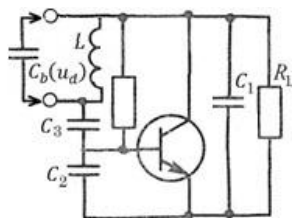


Рис. 5. Модулятор на основе генератора Колпитца (схема по переменному току)

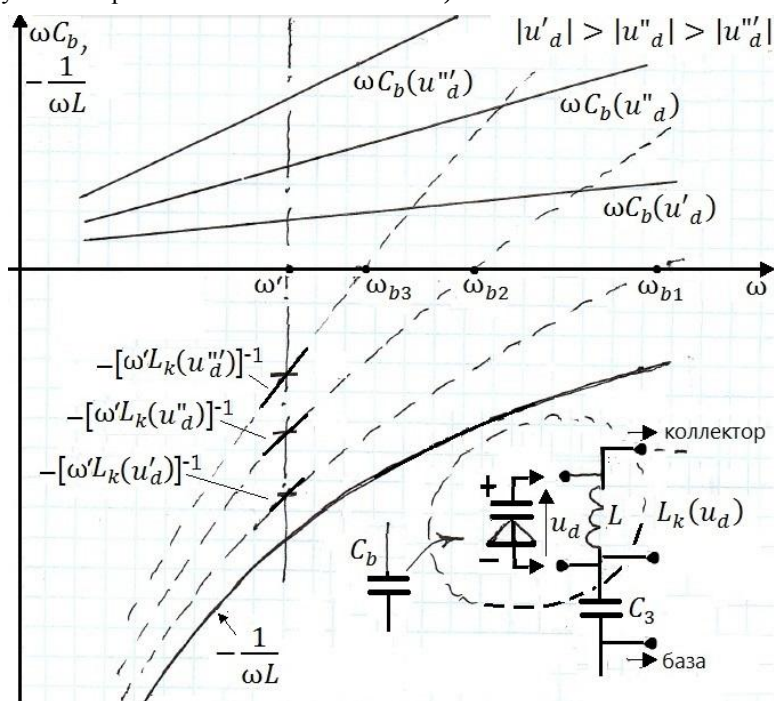


Рис. 6. Частотная зависимость проводимости двухполносника варикап-индуктивность (штриховые кривые)

На частотах, при которых суммарное сопротивление  $\omega L_k - 1/(\omega C_3)$  положительно, на контактах двухполносника база-коллектор получим индуктивную реакцию (см. рис. 5). Следовательно, будет выполнено условие образования емкостной трехточечной схемы, и возможна генерация колебаний. Их частота будет примерно равна резонансной частоте

колебательной системы схемы Колпитца. Для оценки частоты воспользуемся значением условной индуктивности  $L_k(u_d)$ :

$$\omega_0(u_d) = 1/\sqrt{L_k(u_d)C_k}, 1/C_k = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3.$$

Формулу для резонансной частоты можем записать иначе. Если в схеме модулятора (см. рис. 5) учесть включение емкости варикапа  $C_b$  параллельно катушке  $L$  и пренебречь влиянием резисторов на частотные свойства колебательной системы, частоту резонанса можем найти по формуле, в которой в явном виде фигурирует функция  $C_b(u_d)$ :

$$\omega_0(u_d) = 1/\sqrt{L(C_b(u_d) + C_k)}, 1/C_k = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3.$$

Зависимость частоты генерации от напряжения на варикапе  $\omega_0(u_d)$  будем называть *модуляционной характеристикой* (рис. 7). Следует заметить, что она не является линейной. Вид функции задается поведением барьерной емкости  $C_b(u_d)$  и предопределен технологией формирования  $p$ - $n$  перехода варикапа. Это обстоятельство ограничивает область применения подобных ЧМ-модуляторов. Однако для случаев малой, по сравнению с несущей частотой, девиации (имеется в виду приближение малого сигнала), нелинейные искажения могут оказаться приемлемыми.

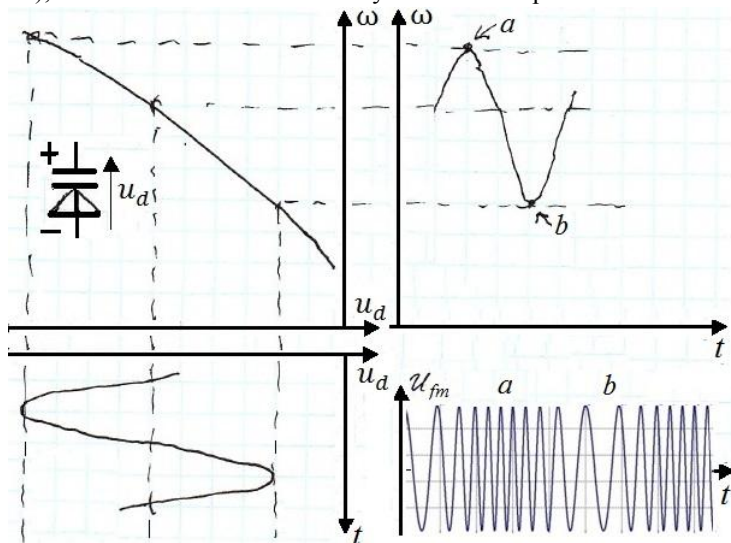


Рис. 7. Модуляционная характеристика  $\omega_0(u_d)$  и иллюстрация модулирования частоты напряжением на варикапе

#### ЧМ-модулятор лабораторной установки

На рис. 8 показан фрагмент лабораторной установки – транзисторный ЧМ-модулятор на основе автогенератора Колпитца (см. рис. 3, б). Конденсаторы  $C_1, C_2, C_3$ , катушка  $L$  и варикап обеспечивают необходимые для емкостной трехточечной схемы фазовые сдвиги, задают частоту генерации. Источник ЭДС +12 В и резисторы задают рабочую точку, выбор

которой влияет на условия возникновения генерации и амплитуду колебаний. Помимо этих, обязательных для генератора Колпитца элементов, видим конденсаторы, которые обеспечивают разрыв цепей постоянного тока. Их емкости имеют достаточно большие значения, чтобы замыкать, можно считать накоротко, цепи для переменных токов в окрестности частоты генерации. Постоянное напряжение (напряжение смещения) подведено к варикапу через дроссель (катушку большой индуктивности), что практически обеспечивает разрыв этой ветви для переменных токов на частотах близких частоте генерации. Модулирующее напряжение подводит к варикапу через разделительный конденсатор и дроссель.

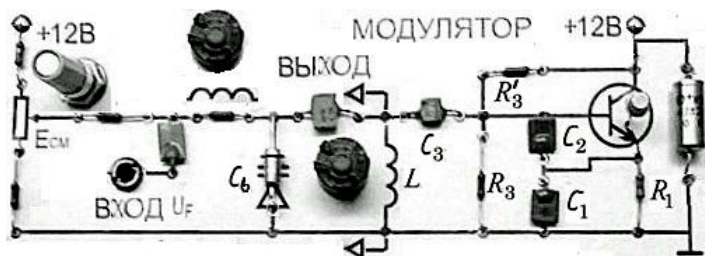


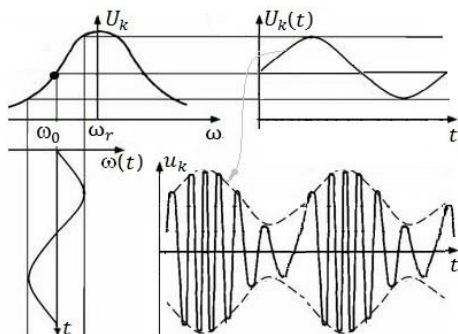
Рис. 8. ЧМ-модулятор лабораторной установки на основе схемы Колпитца

Основную характеристику модулятора  $\omega_0(u_d)$  - модуляционную (см. рис. 7) - снимают в отсутствие модулирующего напряжения, подавая на варикап смещение разных уровней с потенциометра. Интересно выяснить диапазон частот, в пределах которого возможна частотная модуляция, есть ли участок, близкий к линейному, какова его протяженность.

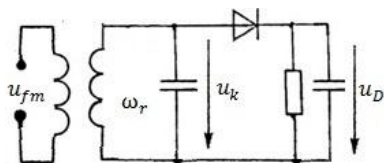
### Детектирование ЧМ-колебаний

Детектированием называют операцию выделения (извлечения) исходного модулирующего сигнала из модулированного. Детектирование - операция «обратная» модуляции.

Частотное детектирование можно выполнять, подавая ЧМ-сигнал на колебательный контур так, чтобы весь спектр частот ЧМ-сигнала с несущей частотой  $\omega_0$  пришелся на склон резонансной кривой контура (рис. 9). Иными словами, резонансная частота контура  $\omega_r$  на оси частот должна лежать или выше (как на рисунке), или ниже полосы частот ЧМ-сигнала. Тогда изменение частоты колебаний по закону информационного сигнала  $\Delta \omega(t)$  вызовет аналогичное изменение  $U_k$  - амплитуды колебаний напряжения на контуре. Далее ЧМ-сигнал с изменяющейся амплитудой подвергают амплитудному детектированию. В результате на выходе детектора получают сигнал  $u_D(t)$ , повторяющий изменения амплитуды, а значит, отражающий функцию  $\Delta \omega(t) \sim s(t)$  - в итоге имеем информационный сигнал. Таким образом, схемотехнически частотный детектор представляет собой симбиоз колебательной системы (контура) и амплитудного детектора (рис. 10).



**Рис. 9.** Изменение частоты влечет амплитудную модуляцию ЧМ-сигнала.



**Рис. 10.** Частотный детектор на основе амплитудного детектора

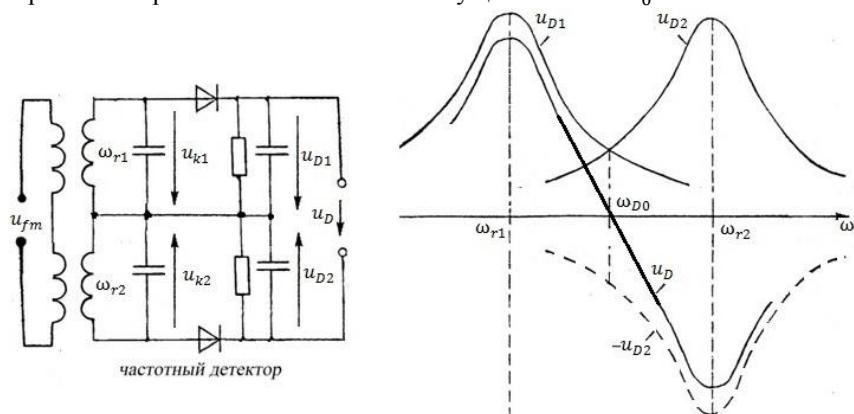
Рассмотрим случай гармонической модуляции. Пропустим через контур с резонансной частотой  $\omega_r$  ЧМ-колебание  $u_{fm}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + m \cos(\Omega t)]$ . Считаем  $\omega_r > \omega_0$  (см. рис. 9). Напряжение на контуре окажется модулированным и по частоте, и по амплитуде. После прохождения такого колебания через амплитудный детектор на его выходе получим колебание на частоте модуляции  $u_D(t) = U_D \sin(\Omega t)$  с амплитудой пропорциональной индексу модуляции:  $U_D \propto U_0 m$ .

Свойства ЧМ-детектора описывают *детекторной характеристикой*  $u_D(\omega)$  – зависимостью напряжения  $u_D$  на выходе устройства (на выходе АМ-детектора) от частоты  $\omega$  напряжения (немодулированного), действующего на входе частотного детектора (на входе контура). Очевидно, что детекторная характеристика практически повторяет форму резонансной кривой контура ( $U_k(\omega)$  на рис. 9). Для уменьшения искажений стараются «разместить» частотный спектр ЧМ-сигнала в пределах линейного участка детекторной характеристики.

Протяженность линейного участка детекторной характеристики и ее крутизну увеличивают, строя частотные детекторы по дифференциальной (разностной) схеме (рис. 11). В дифференциальном детекторе используют два амплитудных детектора и два контура, настроенные на разные частоты – выше и ниже несущей частоты. При такой настройке спектр частот ЧМ-сигнала попадает на правый склон резонансной кривой одного контура и на левый склон другого. Желательно иметь контуры с одинаковой добротностью и обеспечить одинаковые по модулю отклонения несущей частоты ЧМ-колебания от резонансных частот контура. В этом случае сигналы на выходе контуров будут подобны и инверсны. Модулирующий сигнал получают, вычитая напряжения на выходе амплитудных детекторов.

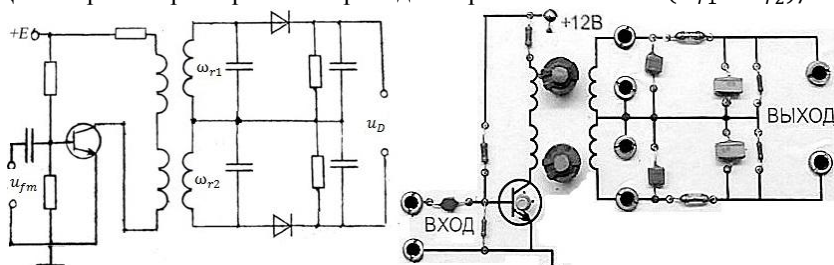
На рис. 11 показана детекторная характеристика  $u_D(\omega)$  дифференциального частотного детектора для симметричного случая – когда контуры имеют одинаковые добротности и одинаковую расстройку (по модулю)

от несущей частоты ЧМ-сигнала  $\omega_0$ . Настройка дифференциального детектора сводится к сближению  $\omega_{D0}$  - точки перехода детекторной характеристики через ноль оси частот - и несущей частоты  $\omega_0$ .



**Рис. 11.** Дифференциальный частотный детектор, формирование детекторной характеристики  $u_D(\omega)$

Схема дифференциального частотного детектора лабораторной установки показана на рис. 12. ЧМ-сигнал подают на вход резонансного усилителя, нагрузкой которого являются контуры детектора, связанные с коллекторной цепью трансформаторной связью. Контуры имеют примерно одинаковую добротность и настроены на разные частоты  $\omega_{r1}$  и  $\omega_{r2}$ . Детекторная характеристика проходит через ноль в точке  $(\omega_{r1} + \omega_{r2})/2$ .



**Рис. 12.** Дифференциальный частотный детектор лабораторной установки

### Состав лабораторной установки, программа исследований

Лабораторную работу выполняют на установке, в составе которой (рис. 13): частотный модулятор, частотный детектор и развязывающий (буферный) каскад - эмиттерный повторитель. Эмиттерный повторитель существенно уменьшает влияние входной цепи частотного детектора на модулятор. В качестве источников колебаний используют лабораторный генератор синусоидального напряжения. Измерительная аппаратура: осциллограф, частотомер, вольтметры. Предусмотрена регулировка напряжения смещения на варикапе. Тумблер, расположенный на стенде слева,

используют для разрыва тракта сквозного преобразования при необходимости раздельного исследования модулятора и детектора.

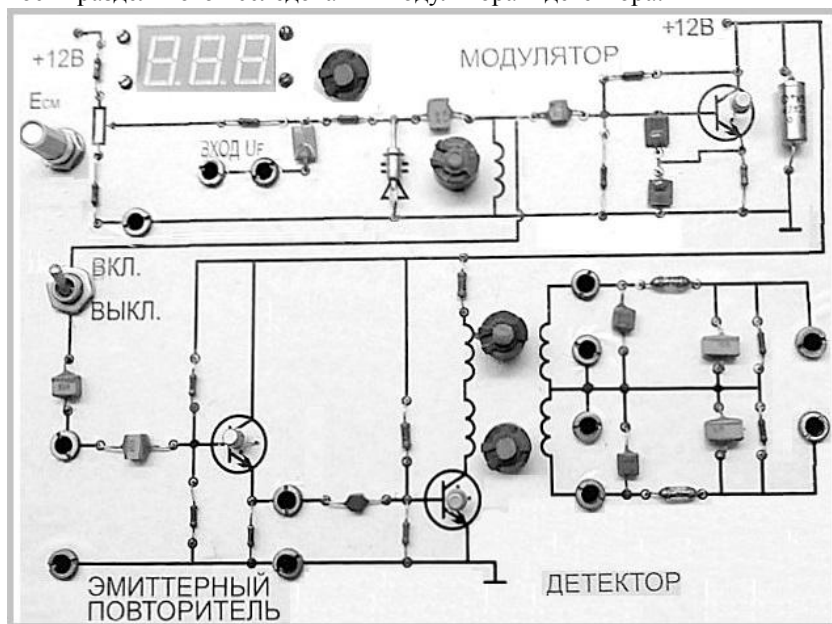


Рис. 13. Лицевая панель лабораторной установки

### Программа исследований

- ✓ Снятие модуляционной характеристики частотного модулятора, анализ возможности использования данного частотного модулятора для осуществления линейной частотной модуляции.
- ✓ Снятие резонансных кривых контуров частотного детектора, измерение и сопоставление резонансных частот и добротностей контуров.
- ✓ Снятие детекторной характеристики дифференциального частотного детектора, выявление напряжения смещения на варикапе, соответствующего нулевой точке характеристики.
- ✓ Выявление по детекторной характеристике диапазона девиации частоты ЧМ-колебаний, в пределах которого детектирование можно считать линейным.
- ✓ Снятие «сквозной» характеристики тракта модулятор-детектор: уровня напряжения на выходе детектора от напряжения смещения на варикапе; выявление области линейного преобразования колебаний.
- ✓ Исследование с использованием осциллографа эволюции формы синусоидального модулирующего напряжения в результате сквозного преобразования: частотная модуляция – детектирование при разных напряжениях смещения на варикапе и амплитуды воздействия.

## Контрольные вопросы

1. На каком физическом принципе основано управление частотой генератора гармонических колебаний лабораторной установки? Можно ли при используемом способе управления реализовать линейное изменение частоты частотно-модулированного колебания?
2. Как устроен частотный модулятор лабораторной установки? Объясните назначение элементов модулятора (см. рис. 8).
3. Что называют модуляционной характеристикой частотного модулятора, и как ее снимают?
4. Каким образом используют колебательный контур для преобразования ЧМ-колебания в колебания с модулированной амплитудой?
5. В чем достоинства дифференциального способа частотного детектирования? Какими соображениями руководствуются, выбирая резонансные частоты контуров дифференциального детектора?
6. Как устроен частотный детектор лабораторной установки? Объясните назначение элементов детектора (см. рис. 12).
7. Предложите способ снятия детекторной характеристики без использования лабораторного генератора.
8. Если заведомо известна несущая частота ЧМ-колебания, как следует настраивать частотный детектор?
9. Какую форму примет синусоидальное модулирующее напряжение в результате «сквозного» преобразования сигнала блоками лабораторной установки (см. рис. 13): операция частотная модуляция – частотное детектирование. Рассмотрите случаи разных напряжений смещения на варикапе, соответствующих: (а) нулевой точке детекторной характеристики, (б) ее «вершинам».
10. Объясните функцию эмиттерного повторителя в составе установки.

## Порядок выполнения работы

### Исследование частотного модулятора

1. Включите установку. Убедитесь в наличии автоколебаний.

Наблюдайте колебания осциллографом, подключенным к выходным контактам эмиттерного повторителя. (Подключение приборов через буферный каскад практически исключает влияние их входных цепей на процессы в модуляторе.)

2. Снимите и постройте модуляционную характеристику  $f_0(E)$ .

#### ОБ ИЗМЕРЕНИИ ЧАСТОТЫ

В теоретическом разделе при описании преобразования колебаний фигурирует понятие *круговая частота* (обозначения:  $\omega, \Omega$ , размерность: рад/с). Эта величина связана с частотой  $f$  ( $f = 1/T$ ,  $T$  - период колебаний) формулой  $\omega = 2\pi f$ . Во избежание ошибок анализа результатов измерений учитывайте, что в опытах фигурирует частота  $f$ ,  $[f] = \text{Гц}$ . То же относится к девиации  $W$  (размерность: рад/с). Для девиации частоты, измеряемой в герцах, договоримся использовать в материалах данной лабораторной работы обозначение  $G$ :  $G = W/(2\pi)$ .

В качестве модуляционной характеристики здесь фигурирует зависимость частоты автоколебаний генератора  $f_0$  (в герцах) от напряжения смещения  $E$ , измеряемого на потенциометре делителя источника питания. Уровень напряжения  $E$  выведен на дисплей цифрового вольтметра, вмонтированного в стенд. Частоту измеряйте частотомером, подключив его к выходу эмиттерного повторителя (ЭП).

3. Снимите (сфотографируйте) осциллограмму напряжения, генерируемого модулятором. Измерьте амплитуду (действующее значение) напряжения.

Вычислите среднюю частоту  $f_c$  модуляционной характеристики по значениям крайних частот:  $f_u$  (верхней) и  $f_d$  (нижней). Формула:  $f_c = (f_u + f_d)/2$ . Установите напряжение на варикапе, отвечающее генерации колебаний на частоте  $f_c$ . Снимите (сфотографируйте) осциллограмму напряжения, измерьте его амплитуду (действующее значение).

### Исследование частотного детектора

4. Соберите схему исследования частотного детектора.

Отключите тумблером модулятор от входа эмиттерного повторителя и подайте на вход повторителя синусоидальное напряжение с лабораторного генератора (рис. 14). Для измерений амплитуды колебаний подключите вольтметры к выводам контуров. Имейте в виду: уровни напряжений на контурах в 10 раз больше измеренных вольтметрами. Дело в том, что напряжения контуров к гнездам на стенде подведены через емкостные делители, десятикратно уменьшающие напряжения на гнездах по отношению к напряжениям на контурах. Это сделано для ослабления влияния емкостей и проводимостей входов измерительных приборов на процессы в контурах.

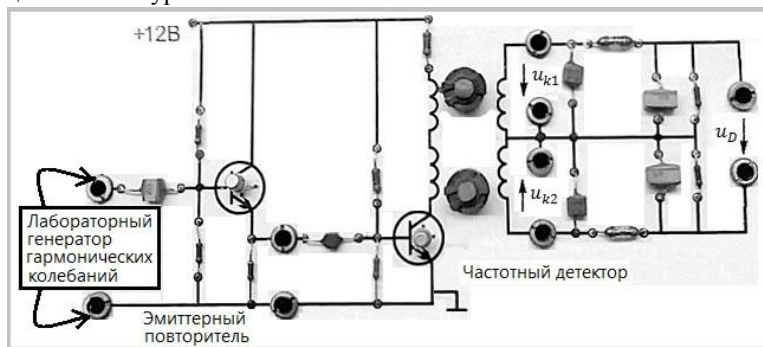


Рис. 14. Схема исследования дифференциального частотного детектора

5. Снимите резонансные кривые контуров частотного детектора. Определите резонансные частоты и добротности контуров.

Амплитуду синусоидального напряжения на выходе эмиттерного повторителя поддерживайте постоянной на уровне, который наблюдался

ранее при подключенном модуляторе. Изменяя частоту генератора в пределах значений, отвечающих крайним точкам модуляционной характеристики, снимите резонансные кривые контуров.

Определите резонансные частоты.

По результатам измерения ширины резонансной кривой вычислите добротности контуров.

#### **ПОЯСНЕНИЕ**

Чтобы вычислить добротность контура  $Q$ , находят по максимуму резонансной кривой резонансную частоту  $f_0$  и измеряют ширину кривой  $(f_v - f_n)$  по уровню 0,7 максимального значения. Добротность  $Q = f_0 / (f_v - f_n)$ .

6. Снимите и постройте детекторную характеристику  $u_D(f)$  дифференциального частотного детектора (см. рис. 11).

Действуйте по той же схеме измерений (см. рис. 14), используя в качестве источника синусоидального напряжения лабораторный генератор. Частоту генератора изменяйте в пределах всего диапазона частот снятой ранее модуляционной характеристики.

7. Определите нулевую точку детекторной характеристики (частоту  $f_{D0}$ ) и частоты экстремумов: верхнего  $f_{D1}$  и нижнего  $f_{D2}$ .

Сопоставьте выявленные в этом опыте значения экстремумов с резонансными частотами контуров, а частоту  $f_{D0}$  сравните с частотой, на которой пересекаются резонансные кривые контуров.

8. Оцените максимальную девиацию частоты ЧМ-колебания, при которой искажения вследствие детектирования будут малы.

#### **Исследование «сквозного» преобразования колебаний трактом модулятор-детектор**

9. Подключите тумблером выход частотного модулятора к входу эмиттерного повторителя (см. рис. 13). (Лабораторный генератор отключите.) Снимите и постройте  $u_D(E)$  - зависимость постоянного напряжения на выходе детектора от смещения на варикапе.

10. (Можно делать при подготовке отчета.) Постройте в тех же осях график  $u_D(E)$ , используя данные ранее снятых характеристик: модуляционной и детекторной. Объясните сходства и отличия измеренного и построенного графиков.

11. Получите изображение характеристики  $u_D(E)$  на экране осциллографа. Сравните с кривой, полученной «вручную».

Установите смещение на варикапе, соответствующее нулевой точке детекторной характеристики. На вход модулятора подайте пилообразное напряжение с гнезд, расположенных в нише боковой стенки осциллографа. Осциллограф подключите к выходным гнездам детектора.

12. Выберите (а) смещение на варикапе и (б) максимальную девиацию частоты наилучшие для линейного преобразования синусоидального напряжения трактом модулятор-детектор.

13. Выполните проверку качества преобразования синусоидального напряжения, последовательно подвергнутого операциям частотного модулирования и детектирования.

Установите выбранный уровень смещения на варикапе. Подайте на вход модулятора с лабораторного генератора синусоидальное напряжение частоты 1 кГц. Амплитуду установите на уровне, обеспечивающем максимальную девиацию частоты согласно сделанного выбора. Снимите (сфотографируйте) осциллограмму на выходе частотного детектора. Составьте форму с синусоидой.

14. Установите уровень смещения на варикапе, отвечающий нулевой точке детекторной характеристики. Подберите на входе модулятора такую амплитуду синусоидального напряжения (на верхней границе), чтобы форма напряжения на выходе детектора еще была подобна синусоиде. Измерьте по модуляционной характеристике девиацию, отвечающую выбранной амплитуде.

15. Для всех опытов исследования преобразования синусоидального напряжения вычислите индексы модуляции, выясните количество гармоник, существенных в спектрах ЧМ-колебаний, и ширину полосы частот ЧМ-колебаний.

---

На этом экспериментальная часть лабораторной работы закончена. В отчете по работе приведите схемы измерений, результаты расчетов и измерений в виде графиков, осциллограмм, числовых значений. В отчет вложите протокол, как компонент итогового документа. Отчет следует заключить выводами, в которых проанализируйте результаты исследований, объясните отличия полученных данных от ожидаемых.

## Литература

1. Частотная модуляция и частотное детектирование: методические указания по лабораторной работе / составитель Золотухина Н. М. – ЛПИ им. М.И.Калинина, 1983. 14 с., библиотека каф. радиофизики СПбГПУ.

2. Новиков Ю. Н. Основные понятия и законы теории цепей, методы анализа процессов в цепях: Учеб. пособие. - СПб.: Лань, 2010. 363 с.

3. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для вузов / — М. : Высш. шк., 2003.

4. Гусев В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: учеб. для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. — М. : Высш. шк., 2008.