

**МОСКОВСКИЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ**

**(технический университет)**

*Кафедра Радиоприемных устройств*

Шувалов Б.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ



## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Целью работы является ознакомление с типовыми схемами полупроводниковых преобразователей частоты и методикой лабораторных измерений их параметров.

#### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для экспериментального исследования основных характеристик трёх типов преобразователей частоты:

- 1) преобразователя частоты на биполярном транзисторе с отдельным гетеродином;
- 2) балансного диодного преобразователя частоты;
- 3) кольцевого диодного преобразователя частоты.

Лицевая панель лабораторной установки показана на рис. 1. На ней в упрощённом виде изображены принципиальные электрические схемы рассматриваемых преобразователей частоты.

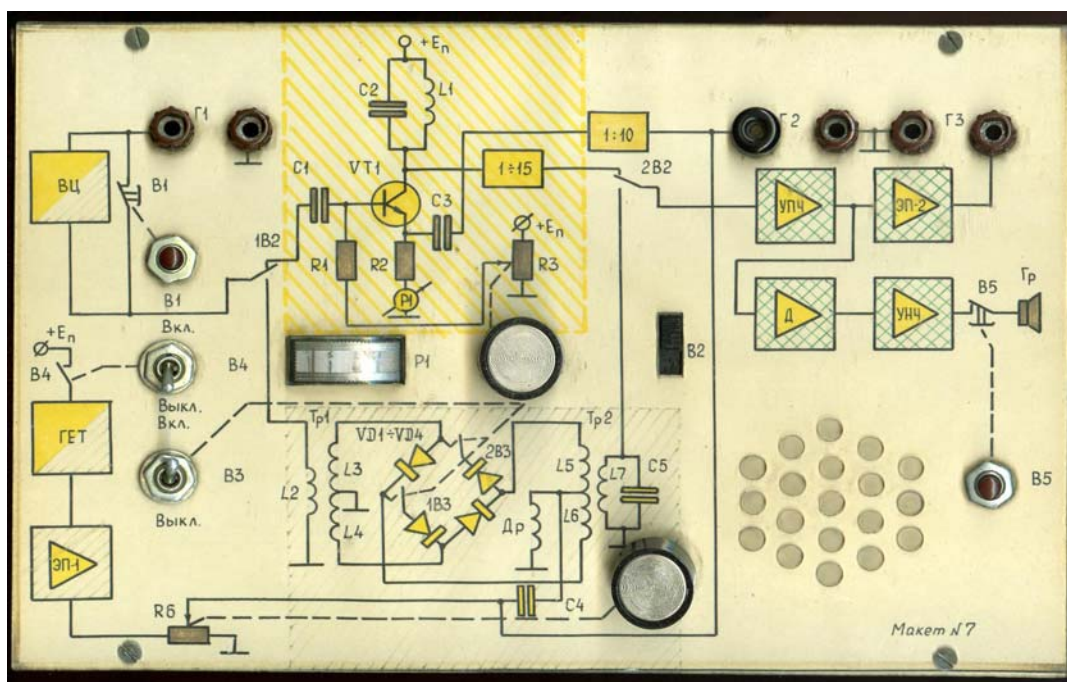
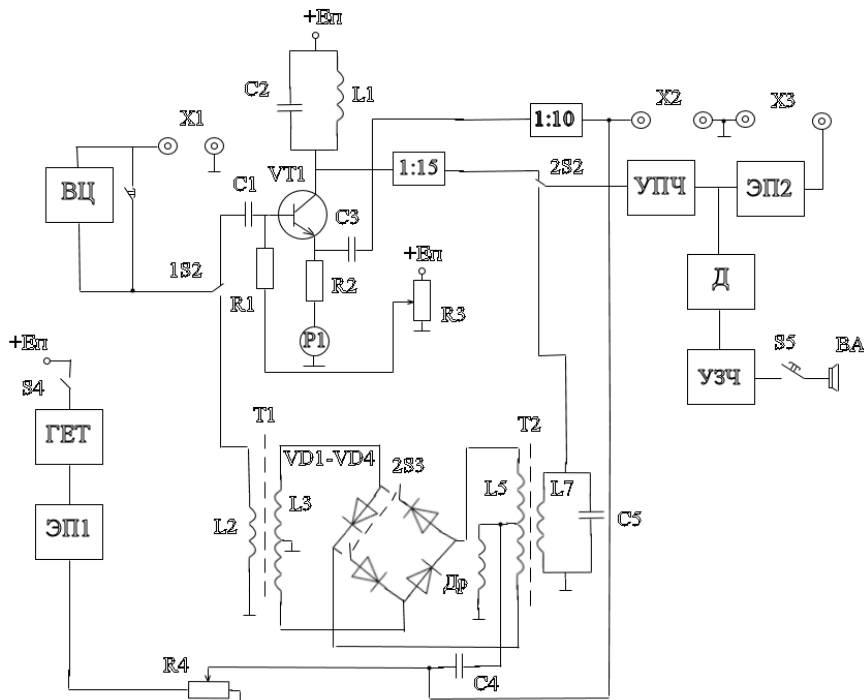


Рис.1. Лицевая панель лабораторной установки

На рис. 2 показана упрощённая принципиальная схема установки. Преобразователь частоты на биполярном транзисторе собран на микросхеме типа К2ЖА242, представляющей собой смеситель и гетеродин

тракта АМ сигнала. В работе используется лишь смесительная часть микросхемы. Гетеродинная часть микросхемы не используется, так как гетеродин собран по отдельной схеме. Напряжение сигнала от генератора стандартных сигналов или измерителя частотных характеристик подаётся на гнезда  $X1$  и через входную цепь и переключатель  $1S2$  подводится к базе транзистора  $VT1$ . Напряжение гетеродина подводится к эмиттеру транзистора  $VT1$  через конденсатор  $C3$  и делитель 1:10. Делитель исключает перегрузку транзистора смесителя большими уровнями напряжения гетеродина. В цепь нагрузки смесителя включён контур  $L1, C2$ , настроенный на промежуточную частоту  $f_{п} = 465$  кГц. В схеме имеется возможность контроля положения рабочей точки транзистора смесителя с помощью миллиамперметра  $P1$ , включённого в цепь эмиттера транзистора  $VT1$ . Потенциометр  $R3$  позволяет регулировать ток коллектора транзистора  $VT1$ .



**Рис. 2. Упрощённая принципиальная схема лабораторной установки**

Выход преобразователя подключается к усилителю промежуточной частоты (УПЧ) через делитель напряжения с коэффициентом передачи 1:15 и переключатель  $2S2$ . Выход УПЧ через развязывающий эмиттерный повторитель ЭП2 соединяется с гнездом  $X3$ . Делитель напряжения служит для того чтобы в первом приближении уравнивать напряжения промежуточной частоты, поступающие с транзисторного и диодных преобразователей, и обеспечить работу УПЧ в линейном режиме. Кольцевой диодный смеситель собран на четырёх диодах типа Д9Ж ( $VD1 - VD4$ , рис. 2). Противофазные напряжения сигнала, необходимые

для работы такого смесителя, образуются при помощи дифференциального трансформатора  $T1$ , имеющего коэффициент передачи, равный единице. Напряжение гетеродина подводится синфазно к плечам смесителя через конденсатор  $C4$ . Нагрузкой диодного моста служит высокочастотный дифференциальный трансформатор  $T2$ , состоящий из катушек индуктивности  $L5, L6, L7$ . Контур  $L7, C5$  настроен на промежуточную частоту  $f_{\Pi} = 465$  кГц. В схеме предусмотрена возможность перехода от кольцевой схемы смесителя к балансной. Для этого служит переключатель  $S3$ , разрывающий цепи двух диодов. Выход преобразователя подключается через переключатель  $2S2$  ко входу УПЧ. К числу остальных блоков, входящих в лабораторную установку, относятся следующие.

1. Входная цепь (блок ВЦ на рис. 2), настроенная на частоту  $f_{\Gamma} - f_{\Pi}$  и выполняющая функцию преселектора. Преселектор включается на время нажатия возвратной кнопки  $SB1$  и позволяет проиллюстрировать влияние избирательности входных цепей радиоприёмника на уровень и количество побочных каналов приема.

2. Гетеродин, выполненный на микросхеме типа К2УС242, настроен на частоту  $f_{\Gamma} \approx 2,5$  МГц. Гетеродинное напряжение подаётся на смесители через развязывающий каскад, представляющий собой эмиттерный повторитель (ЭП1, рис. 2). Применение развязывающего каскада увеличивает стабильность частоты и уменьшает уровень искажений синусоидального напряжения гетеродина. Напряжение гетеродина регулируется потенциометром  $R4$ . Контроль амплитуды и частоты гетеродинного напряжения можно провести на гнезде  $X2$ . Гетеродин включается переключателем  $S4$ .

3. Усилитель промежуточной частоты (УПЧ, рис. 2) усиливает полезный результат преобразования до уровня, достаточного для работы измерительной аппаратуры. УПЧ выполнен на микросхеме типа К2УС242. Эмиттерный повторитель (ЭП2, рис. 2) является развязывающим каскадом.

4. Амплитудный детектор, усилитель звуковой частоты и малогабаритный динамический громкоговоритель (Д, УЗЧ, ВА, рис. 2), позволяющие исследовать свисты в преобразователях частоты. Слуховой контроль свистов можно осуществить только при нажатии возвратной кнопки  $SB5$ , подключающей к УЗЧ громкоговоритель.

5. Два стабилизатора (на рис. 2 не показаны), обеспечивающие необходимые напряжения питания всех схем установки. Номинальное напряжение питания, подводимое ко входу стабилизаторов, составляет 14 – 16 В.

В работе используются следующие измерительные приборы:

- 1) генератор стандартных сигналов Г4-102;

- 2) милливольтметр переменного тока ВЗ-39;
- 3) измеритель частотных характеристик Х1-7Б или Х1-50;
- 4) частотомер ЧЗ-44.

### Домашнее задание

Для выполнения домашнего задания прочитайте описание по данной работе и рекомендованную литературу, обратив особое внимание на следующие вопросы.

1. Принцип работы преобразователя частоты на биполярном транзисторе с отдельным гетеродином.
2. Принцип работы балансного диодного и кольцевого диодного преобразователей частоты.
3. Сравнительная характеристика рассматриваемых преобразователей по следующим параметрам:
  - а) крутизна преобразования, коэффициент передачи;
  - б) частотные характеристики;
  - в) спектр выходного тока преобразователя.
4. Соображения по выбору промежуточной частоты.
5. Способы повышения избирательности по дополнительным каналам приёма.
6. Образование комбинационных свистов в преобразователях и меры борьбы с ними.

Далее следует провести следующие расчёты.

1. Используя проходную характеристику  $I_K(U_{БЭ})$  и зависимость крутизны от напряжения смещения  $S(U_{БЭ})$  транзистора преобразователя частоты (рис. 3), рассчитать зависимость крутизны преобразования  $S_{\Pi}$  и коэффициента передачи  $K_{\Pi}$  транзисторного преобразователя частоты от амплитуды напряжения гетеродина  $U_{Г}$ . Расчёт провести для тока коллектора транзистора  $I_K = 1$  мА. Амплитуду напряжения гетеродина взять равной 10 мВ, 20 мВ, 50 мВ и 70 мВ. Результаты расчёта свести в таблицы и графики.

**Указания:**

1. В схеме транзисторного преобразователя считать ток эмиттера приблизительно равным току коллектора.
2. При расчёте  $K_{\Pi}$  считать резонансное сопротивление контура в нагрузке транзисторного преобразователя с учётом шунтирующего действия последующих цепей равным  $R_K = 3$  кОм.

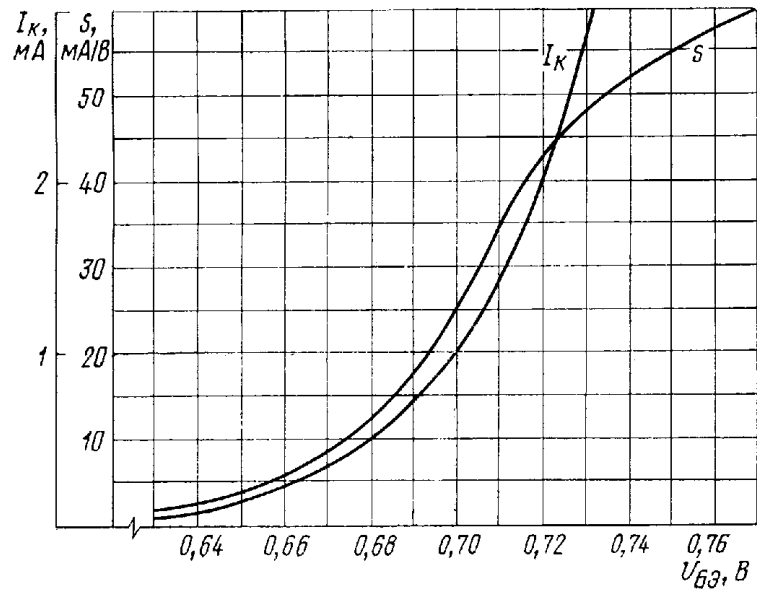


Рис. 3. Характеристики транзистора VT1

1. Рассчитать частоты, на которых частотная характеристика транзисторного преобразователя частоты будет иметь максимумы, и нарисовать примерный вид этой характеристики в диапазоне частот от 0 до 7 МГц. В расчёте учитывать гармоники сигнала и гетеродина не выше второй.

2. Провести аналогичные расчёты и нарисовать частотные характеристики балансного и кольцевого преобразователей частоты в диапазоне частот от 0 до 7 МГц. В расчёте учитывать гармоники сигнала и гетеродина не выше второй.

3. Для транзисторного преобразователя частоты рассчитать опасные в отношении свистов частоты сигнала. В расчёте учитывать гармоники сигнала и гетеродина, включая третью. Результаты расчёта свести в таблицу.

4. Продумать методику проведения экспериментальных исследований и нарисовать соответствующие им структурные схемы по каждому пункту работы.

## Задание на экспериментальное исследование

### I. Определение частоты гетеродина и промежуточной частоты

В соответствии с составленной при домашней подготовке структурной схемой измерения частоты гетеродина  $f_H$  и промежуточной частоты  $f_{ПЧ}$  определить значения этих частот.

- Указания:** 1. В качестве источника сигнала используется генератор Г4-102.  
2. Частота гетеродина измеряется на гнезде X2 с помощью цифрового частотомера.

## II. Коэффициент передачи преобразователя частоты, крутизна преобразования

1. Провести экспериментальное определение коэффициента передачи  $K_{\Pi}$  и крутизны преобразования  $S_{\Pi}$  транзисторного преобразователя частоты для тока коллектора  $I_{\text{к}}=1$  мА и амплитуд напряжения гетеродина  $U_{\text{Г}}$ , равных 10 мВ, 20 мВ, 30 мВ, 50 мВ и 70 мВ. Построить графики  $K_{\Pi}(U_{\text{Г}})$  и  $S_{\Pi}(U_{\text{Г}})$  и сравнить их с расчётными. Сделать выводы.

2. Провести экспериментальное определение зависимостей коэффициентов передачи по напряжению  $K_{\Pi}$  балансного и кольцевого преобразователей от амплитуды напряжения гетеродина. Амплитуду напряжения гетеродина изменять от 0 до 1 В. Построить графики зависимости  $K_{\Pi}(U_{\text{Г}})$  для балансной и кольцевой схем. Сделать выводы.

- Указания:** 1. При измерении амплитуды напряжения гетеродина учесть, что милливольтметр ВЗ-39 градуирован в действующих значениях измеряемого синусоидального напряжения.  
2. Учесть наличие делителя 1:10 в цепи от гетеродина до транзисторного преобразователя.  
3. Общий коэффициент передачи УПЧ и ЭП1 считать равным КУПЧ = 15.  
4. Коэффициент ослабления делителя, включённого после транзисторного преобразователя, считать равным 1:15.  
5. При экспериментальном исследовании установить следующие уровни сигналов: преобразователь на транзисторе –  $U_{\text{с}} = 10$  мВ; балансный и кольцевой преобразователи –  $U_{\text{с}} = 30$  мВ.

## III. Частотные характеристики преобразователя частоты

1. С использованием генератора стандартных сигналов Г4-102 провести измерение параметров частотных характеристик преобразователя частоты на биполярном транзисторе в случае как «слабого», так и «сильного» сигналов в диапазоне частот от 100 кГц до 7 МГц, устанавливая последовательно следующие режимы:

- а)  $I_{\text{к}} = 2$  мА,  $U_{\text{с}} = 5$  мВ,  $U_{\text{Г}} = 25$  мВ;
- б)  $I_{\text{к}} = 2$  мА,  $U_{\text{с}} = 5$  мВ,  $U_{\text{Г}} = 100$  мВ;
- в)  $I_{\text{к}} = 2$  мА,  $U_{\text{с}} = 25$  мВ,  $U_{\text{Г}} = 100$  мВ.

Установив рекомендуемые режимы работы и изменяя частоту генератора Г4-102 в указанных пределах, отметить частоты, на которых АЧХ имеет максимумы, и соответствующие уровни напряжения на выходе преобразователя.

Изменяя при необходимости режимы, добиться характерного вида частотных характеристик преобразователя. Сделать выводы.

**Указание:** Ток коллектора транзистора  $VT1$  устанавливать при выключенном гетеродине.

*При наличии измерителя частотных характеристик Х1-7Б либо Х1-50 получить на экране прибора АЧХ преобразователя для указанных выше режимов.*

**Указания:** 1. Ручками «Частота» и «Полоса» измерителя частотных характеристик установить на экране диапазон частот от 0 до 7 МГц.  
2. Установить напряжение сигнала ручкой «Ослабление», считая, что при нулевом ослаблении напряжение сигнала с учётом согласующих резисторов на входе лабораторной установки равно 50 мВ.  
3. Для определения положения максимумов частотной характеристики на оси частот использовать внутренние метки «1 МГц».

2. Повторить эксперимент для балансного и кольцевого преобразователей, установив следующие уровни напряжений:  $U_c = 30$  мВ,  $U_r = 1$  В. Объяснить различие частотных характеристик балансного и кольцевого преобразователей.

3. Исследовать частотную характеристику транзисторного преобразователя в случае «сильного» сигнала при включённом преселекторе. Сделать выводы.

#### IV. Свисты в преобразователях

Изменяя частоту генератора Г4-102 от 100 кГц до 10 МГц, отметить частоты, на которых возникают свисты в преобразователе на биполярном транзисторе. Проверить соответствие одной-двух найденных опасных частот результатам домашнего расчёта. Сделать выводы.

**Указание.** Установить режимы, рекомендованные в п. III, 1 в.

#### Контрольные вопросы

1. Как зависит крутизна преобразования от амплитуды напряжения гетеродина?
2. В чём причина возникновения дополнительных каналов приёма в преобразователе частоты?



3. Как выбрать тип транзистора и режим работы транзисторного преобразователя частоты, чтобы свести к минимуму возникновение дополнительных каналов приёма?
4. Какие требования предъявляются к гетеродину преобразователя частоты?
5. Как возникают свисты в преобразователе частоты?
6. Из каких соображений выбирается промежуточная частота в преобразователе частоты и на что влияет её величина?
7. Какими достоинствами обладает диодная балансная схема преобразователя частоты?
8. Какими достоинствами обладает диодная кольцевая схема преобразователя частоты?
9. Какие требования предъявляются к трансформаторам  $T1$  и  $T2$  диодных схем преобразователей частоты?
10. Какими способами можно повысить избирательность радиоприёмника по дополнительным каналам приёма?
11. Какие значения может принимать коэффициент передачи по напряжению диодной схемы преобразователя частоты?
12. Из каких соображений выбирается полоса пропускания дополнительного УПЧ лабораторной установки?
13. Какие требования предъявляются к диодам  $VD1 - VD4$  в схемах диодных преобразователей?

## **Методические указания по выполнению лабораторной работы**

### ***Общие сведения. Частотные характеристики преобразователей частоты***

Преобразователи частоты, исследуемые в данной работе, предназначены для переноса спектра входного радиосигнала с одной несущей частоты на другую, более низкую частоту, называемую *промежуточной*. Эпюры напряжений на входе и выходе преобразователя частоты и соответствующие им спектры при моногармонической амплитудной модуляции сигнала приведены на рис. 4.

Преобразователи частоты представляют собой нелинейные системы или линейные системы с переменными во времени параметрами. В основе преобразования частоты лежит перемножение двух сигналов – входного радиосигнала  $U_c(t)$  и напряжения  $U_T(t)$  вспомогательного генератора, называемого *гетеродином*, причём частота радиосигнала и

частота гетеродинного колебания (или её гармоники) отличаются на величину промежуточной частоты. Структурная схема преобразователя частоты приведена на рис. 5. Здесь смеситель – нелинейный элемент или элемент с переменными параметрами; гетеродин – автогенератор с частотой гетеродина  $f_{\Gamma}$ ; резонансная нагрузка – избирательная цепь, настроенная на промежуточную частоту  $f_{\Pi}$ . В случаях, когда смеситель линеен для сигнала, его выходной ток может содержать комбинационные составляющие с частотами  $f_{\kappa} = nf_{\Gamma} + f_c$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . При этом приёмник с таким преобразователем частоты может принимать сигналы на частотах, определяемых в соответствии с формулой

$$f_{\Pi} = f_{\kappa} = nf_{\Gamma} \pm f_c$$

ИЛИ

$$f_c = nf_{\Gamma} \pm f_{\Pi}. \quad (1)$$

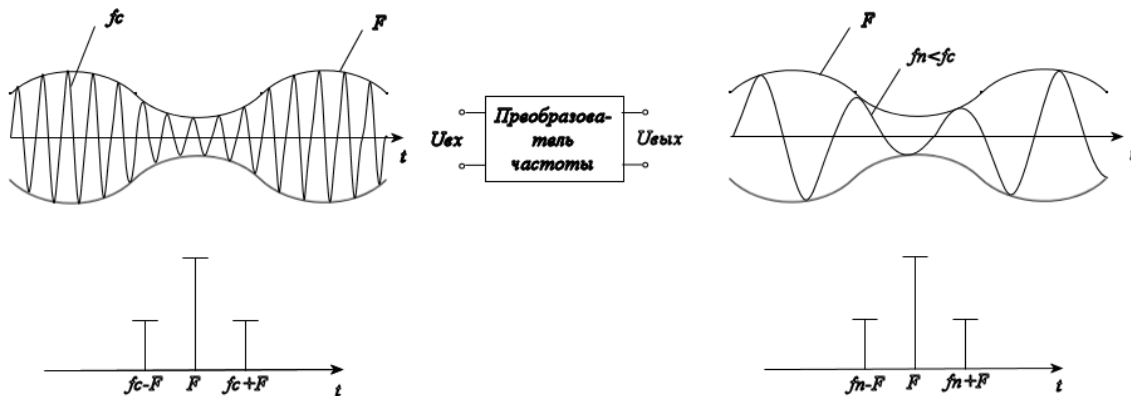


Рис. 4. Эюры напряжений и спектры сигналов на входе и выходе преобразователя частоты

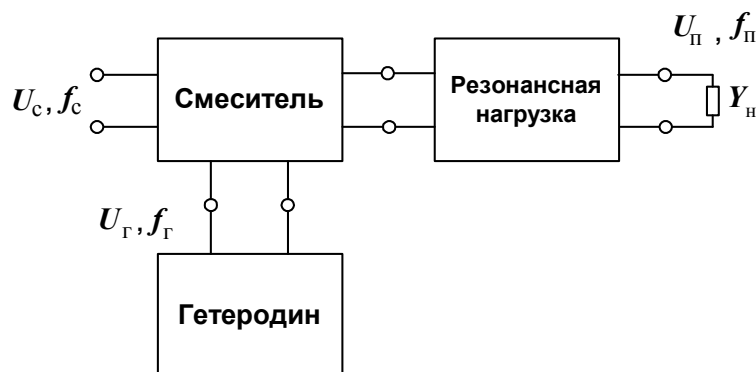


Рис. 5. Структурная схема преобразователя частоты

На одну из частот сигнала (формула (1)) настраивается преселектор приёмника. Преобразование с использованием первой гармоники частоты гетеродина ( $n=1$ ) называется простым, а с использова-

нием высших гармоник – комбинационным. В данной лабораторной установке преселектор (входная цепь) настроен на частоту сигнала

$$f_c = f_r - f_n.$$

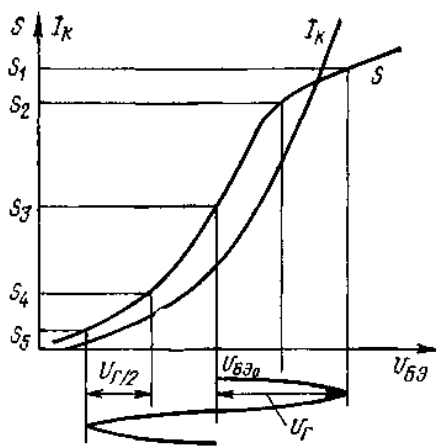
В общем случае следует учитывать нелинейность смесителя для напряжения сигнала. Тогда выходной ток смесителя содержит комбинационные составляющие с частотами  $f_k = nf_r \pm mf_c$ , где  $n, m = 1, 2, 3, \dots$ . Это приводит к появлению дополнительных (паразитных) каналов приёма на частотах

$$f_c = (n/m)f_r \pm f_n/m, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots, m = 1, 2, 3, \dots$$

Основным способом защиты супергетеродинного приёмника от помех по дополнительным каналам приёма является использование фильтров-пробок и высокоизбирательных преселекторов.

### ***Крутизна преобразования, коэффициент передачи преобразователя частоты на биполярном транзисторе***

Транзисторные преобразователи частоты находят наибольшее применение на умеренно высоких частотах. Крутизну преобразования транзисторного преобразователя можно определить, используя график зависимости крутизны транзистора от напряжения смещения



**Рис. 6.** К расчёту крутизны преобразования

$U_{БЭ}$ . Зависимость  $S(U_{БЭ})$  легко получить, взяв производную от проходной характеристики транзистора  $I_K(U_{БЭ})$  (рис. 6).

При работе без отсечки и простом преобразовании частоты ( $f_n = f_r - f_c$ ) для расчёта крутизны преобразования можно использовать **метод пяти ординат**. При этом для заданной амплитуды напряжения гетеродина определяют четыре значения крутизны:  $S_1, S_2, S_4$  и  $S_5$  (рис. 6). В этом случае крутизна преобразования и коэффициент передачи

преобразователя рассчитывается по формулам

$$S_{\Pi} = \frac{(S_1 + S_2) - (S_4 + S_5)}{6}, \quad K_{\Pi} = S_{\Pi} R_K,$$

где  $R_k$  – эквивалентное резонансное сопротивление контура в нагрузке транзисторного смесителя.

### Диодные преобразователи частоты

В диапазоне умеренно высоких частот широкое применение нашли сложные диодные преобразователи частоты, позволяющие существенно сократить число дополнительных каналов приёма по сравнению с преобразователем на биполярном транзисторе.

На рис. 7 и 8 изображены соответственно балансная и кольцевая (двойная балансная) схемы диодных преобразователей частоты, исследуемые в данной лабораторной работе.

Смеситель балансного преобразователя (рис. 7) состоит из двух диодов, включённых синфазно относительно колебаний гетеродина и противофазно относительно колебаний сигнала. Напряжение гетеродина подводится к схеме таким образом, что ток гетеродина, разветвляясь в средних точках катушек  $L2$ ,

$L3$ ,  $L4$ ,  $L5$  на одинаковые, но противофазно направленные составляющие, не индуцирует напряжения как на входной катушке  $L1$ , так и в выходном контуре  $L6C1$ , обеспечивая хорошую развязку гетеродина со входной и выходной цепями смесителя. Спектр тока, протекающего через выходной контур смесителя  $L6C1$ , состоит из комбинационных составляющих  $nf_g \pm mf_c$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,

$m = 1, 3, 5, \dots$ , поэтому в частотной характеристике такого преобразователя в случае хорошей симметрии схемы отсутствуют дополнительные каналы приёма, связанные с чётными гармониками сигнала. Достоинством схемы является отсутствие в спектре выходного тока частоты гетеродина и её гармоник.

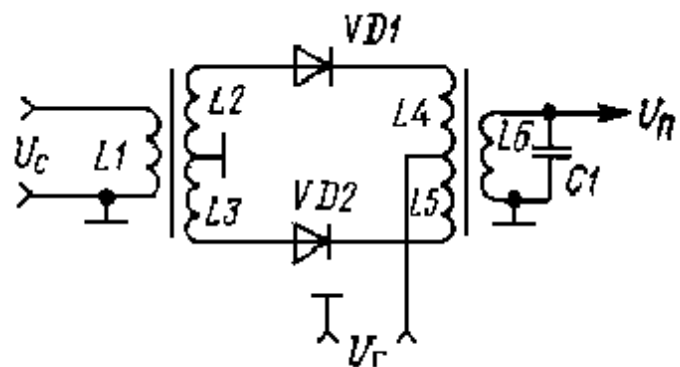


Рис. 7. Схема диодного балансного преобразователя частоты

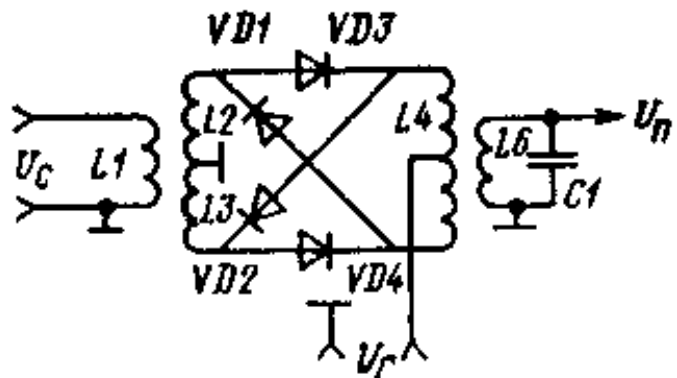


Рис. 8. Схема диодного кольцевого преобразователя частоты

Кольцевой диодный преобразователь частоты представляет собой совокупность двух балансных смесителей, подключённых к общей нагрузке (рис. 8). Балансный смеситель на диодах  $VD1, VD2$  работает при положительном полупериоде напряжения гетеродина, балансный смеситель на диодах  $VD3, VD4$  – при отрицательном полупериоде. Спектр выходного тока такого смесителя состоит из комбинационных составляющих с частотами  $|nf_r \pm mf_c|$ , где  $n = 1, 3, 5, \dots, m = 1, 3, 5, \dots$ . В спектре выходного тока отсутствуют как частота гетеродина и её гармоники, так и частота сигнала и её гармоники. В спектре также отсутствуют комбинационные частоты, связанные с чётными гармониками сигнала. Таким образом, использование кольцевой схемы позволяет получить частотную характеристику преобразователя с меньшим количеством дополнительных каналов приема.

### *Свисты в преобразователях частоты*

В общем случае выходной ток смесителя имеет в своем составе комбинационные частоты, которые можно вычислить по следующей формуле:

$$f_k = nf_r \pm mf_c,$$

где  $n$  и  $m$  – номера гармоник колебания гетеродина и сигнала.

Если частота  $f_k$  близка по величине к промежуточной частоте  $f_{\Pi}$ , то с выхода УПЧ на вход детектора поступает сумма сигналов с частотами  $f_{\Pi}$  и  $f_k$ , что приводит к появлению на выходе детектора напряжения с разностной частотой «биений»  $F_k = |f_{\Pi} - f_k|$ , которое воспроизводится громкоговорителем как свист. Основной мерой борьбы с такого рода помехами является уменьшение уровня и числа комбинационных составляющих.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоприёмные устройства / Под ред. Н.И.Чистякова. М.: Радио и связь, 1986. С. 91 - 93, 95 - 97, 104 - 110, 112 - 113, 119 - 127.
2. Сборник задач и упражнений по курсу «Радиоприёмные устройства» / Под ред. В.И.Сифорова. М.: Радио и связь, 1984. С. 46 - 52.
3. Методические указания по использованию измерительных приборов / Под ред. Б.В.Шувалова. М.: Моск. энерг. ин-т, 1986. С. 13 - 19.
4. Радиоприёмные устройства / Под ред. Н.Н.Фомина. М.: Радио и связь, 2003. Пп. 4.1, 4.2, 4.3, 4.5, 4.7, 4.8.