

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Мордовский Государственный университет им. Н. П. Огарева

Устройства приема и обработки сигналов

**Преобразователи частоты**

Методические указания

Саранск  
Издательство мордовского университета  
2012

УДК 621.372.632(076)

Составители: В. М. Бардин, А. В. Брагин

Рецензент – кандидат технических наук доцент Н. Н. Беспалов

Устройства приема и обработки сигналов. Преобразователи частоты :  
Метод. указания / сост.: В. М. Бардин, А. В. Брагин. – Саранск : Изд-во Мор-  
дов. Ун-та, 2012. – 14 с.

Рассмотрены вопросы, связанные с изучением одного из разделов курса  
«Устройства приема и обработки сигналов».

Предназначено для студентов специальности «Радиотехнические ком-  
плексы и системы», но может быть полезно и студентам других специаль-  
ностей при изучении курса радиотехники.

© Бардин В.М., Брагин А.В., 2012  
© Оформление. Издательство Мордовского университета, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое издание является продолжением серии подобных изданий, предназначенных для студентов специальности «Радиотехнические комплексы и системы», изучающих курс «Устройства приема и обработки сигналов». Рассматриваются принципы работы и схемные решения преобразователей частоты, которые являются основными узлами радиоприемных устройств.

Содержание этого издания отражает основные разделы лекционного курса, дополняет, но не заменяет его. Предполагается, что студенты будут использовать их при подготовке к выполнению соответствующих лабораторных работ и подготовке к экзамену.

### 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Улучшение показателей приемных устройств достигается за счет переноса принимаемого сигнала в частотную область, где он может быть обработан с наибольшей эффективностью. Широкое распространение получила построенная на этом принципе схема супергетеродинного приемника (рис.1), который обеспечивает высокую и практически одинаковую избирательность на разных диапазонах волн с равномерной АЧХ. Это достигается введением в главный тракт приемника преобразователя частоты.

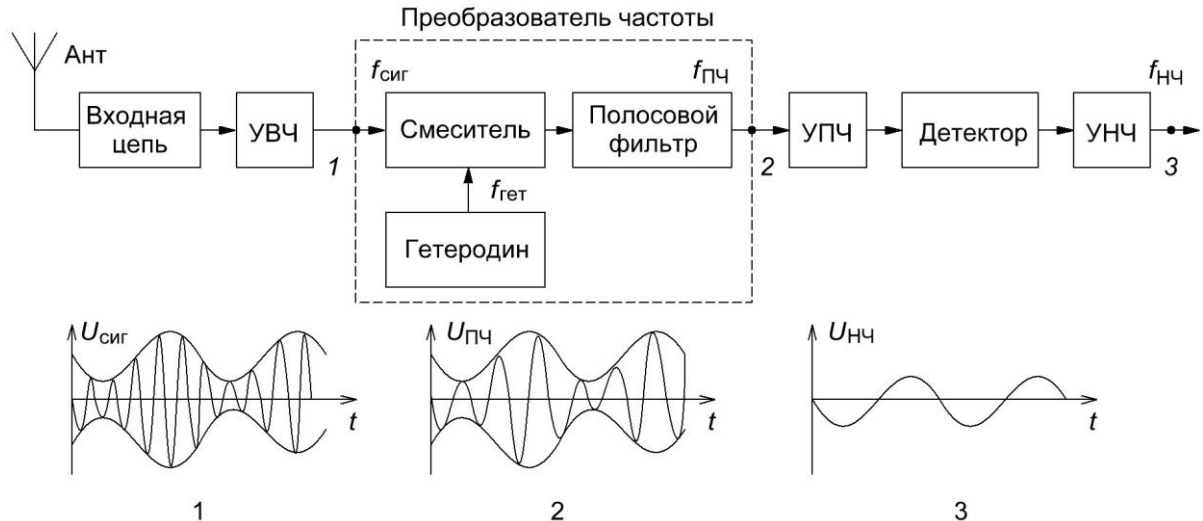


Рис. 1. Структурная схема приемника с преобразованием частоты и диаграммы напряжений в контрольных точках:

- 1 – радиосигнал после предварительной селекции и усиления  $f_{сиг}$ ;
- 2 - преобразованный сигнал на промежуточной частоте  $f_{пч}$ ;
- 3 – низкочастотный сигнал  $f_{нч}$ .

Радиосигнал из антенны подается во входную цепь, где обеспечивается предварительная селекция, затем происходит усиление высокочастотного сигнала в УВЧ, далее несущая частота понижается до промежуточной, после чего осуществляется детектирование и усиление низкочастотного сигнала.

Преобразователем частоты называется устройство, предназначенное для переноса спектра сигнала из одной частотной области в другую с сохранением закона модуляции. В состав преобразователя частоты входят: смеситель, гетеродин и частотно-избирательная система (полосовой фильтр).

Смеситель служит для перемножения входного сигнала и сигнала маломощного автогенератора (гетеродина) с целью получения на выходе ряда комбинационных частот. Одна из этих частот называется промежуточной и выделяется полосовым фильтром.

Преобразователь частоты должен выполнять следующие функции:

- преобразовать несущую частоту принимаемого сигнала в фиксированную более низкую частоту;
- сохранять закон модуляции;
- выделять промежуточную частоту на выходе преобразователя.

Наибольшее применение в радиоприемных устройствах нашли методы преобразования частоты, основанные на использовании нелинейных характеристик полупроводниковых приборов.

Операция переноса спектра реализуется перемножением преобразуемого и гетеродинного колебаний различными способами:

1. При подаче на вход электронного прибора (транзистора, диода) с нелинейной характеристикой суммы входного сигнала и сигнала гетеродина, на его выходе возникает ток, содержащий множество гармонических колебаний с частотами  $f_{\text{гарм}} = |\pm mf_{\Gamma} \pm nf_{\text{C}}|$ , где  $m$  и  $n = 0, 1, 2, \dots$ , одно из которых (обычно с частотой  $f_{\Gamma} - f_{\text{C}}$ ) выделяется фильтром в качестве промежуточной частоты.

2. Путем управления коэффициентом передачи линейного усилителя, на вход которого подается колебание  $u_{\text{C}}(t)$ , с помощью сигнала гетеродина. При этом преобразование будет иметь вид  $y = Fu_{\text{C}}(t)$ , где  $F = \varphi|u_{\Gamma}(t)|$ . Если  $F = Vu_{\Gamma}(t)$ , то результат преобразования аналогичен результату по п. 2.

#### **Параметры, характеризующие преобразователь частоты:**

**Коэффициент усиления** преобразователя равен отношению амплитуды выходного напряжения  $U_{\text{ПЧ}}$  преобразованной частоты к амплитуде напряжения сигнала  $U_{\text{C}}$ , действующего на входе преобразователя:  $K_{\text{П}} = U_{\text{ПЧ}}/U_{\text{C}}$ .

**Линейные искажения** сигнала возникают из-за различия коэффициента усиления в заданной полосе спектра сигнала и нелинейности фазовой характеристики (рис. 2). В преобразователе частоты эти искажения дает фильтр, настроенный на промежуточную частоту.

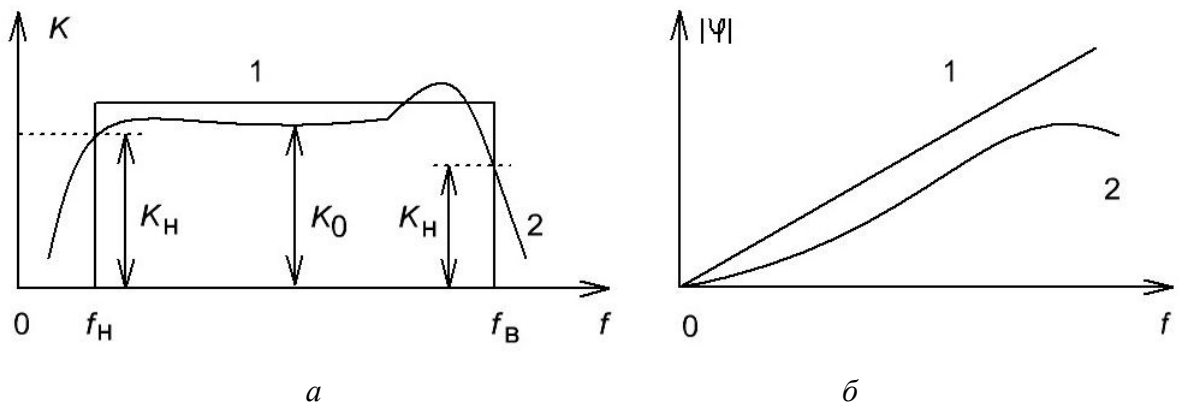


Рис. 2. Идеальные (1) и реальные (2) АЧХ (а) и ФЧХ (б) фильтра

Коэффициент линейных искажений  $M_B = K_0 / K_B$  и  $M_H = K_0 / K_H$ , где  $K_H$ ,  $K_B$  и  $K_0$  коэффициенты передачи на нижней, верхней и средней частотах.

**Коэффициент нелинейных искажений.** Причиной нелинейных искажений является прохождение сигнала через элементы, имеющие нелинейную характеристику, в результате чего искажается форма колебаний и изменяется спектральный состав тока. Колебания с частотой гетеродина являются источниками побочных каналов, которые могут проявляться в виде свиста, сопровождающие прием полезного сигнала.

$$K_{\Gamma} = (I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots)^{1/2} / I_1,$$

где  $I_1$  амплитуда основной гармоники,  $I_2, I_3, \dots$  высшие гармоники.

**Избирательность** - это способность принимать полезный сигнал на заданной частоте с заданной вероятностью ошибки в присутствии мешающего сигнала по соседнему каналу. Обычно для задания избирательности по соседнему каналу предъявляются требования к коэффициенту подавления частоты первого и второго соседних каналов.

Подавление соседнего канала определяется как отношение коэффициента передачи на рабочем канале  $K_K$  к его коэффициенту передачи на соседнем канале  $K_{СК}$ :

$$A_{СК}(\text{дБ}) = 20 \lg K_K / K_{СК}.$$

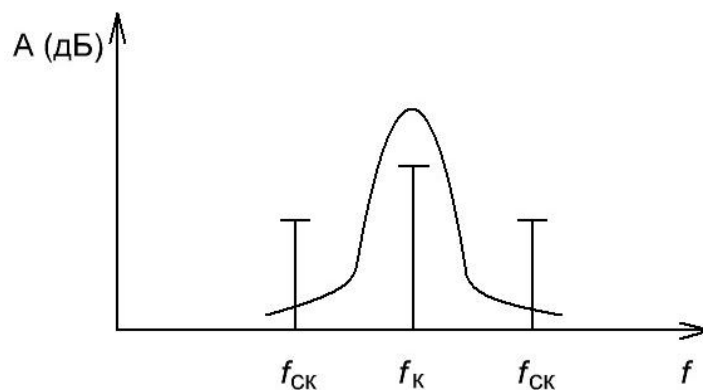


Рис. 3. Избирательность по соседнему каналу

**Коэффициент перекрытия** определяется относительной шириной диапазона перестройки частоты гетеродина, в пределах заданного диапазона.

$$K = f_{\text{макс}} / f_{\text{мин}},$$

где  $f_{\text{макс}}$ ,  $f_{\text{мин}}$  граничные частоты перестройки гетеродина.

## 2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

На рис. 4 показан спектр сигнала на выходе смесителя с понижающей частоту преобразованием. В большинстве случаев частота гетеродина  $f_{\Gamma}$  выше  $f_c$ . В идеальном случае на выходе смесителя присутствуют только частоты со значениями  $f_{\Gamma} + f_c$  и  $f_{\Gamma} - f_c$ . За промежуточную частоту принимают  $f_{\text{ПЧ}} = f_{\Gamma} - f_c$ .

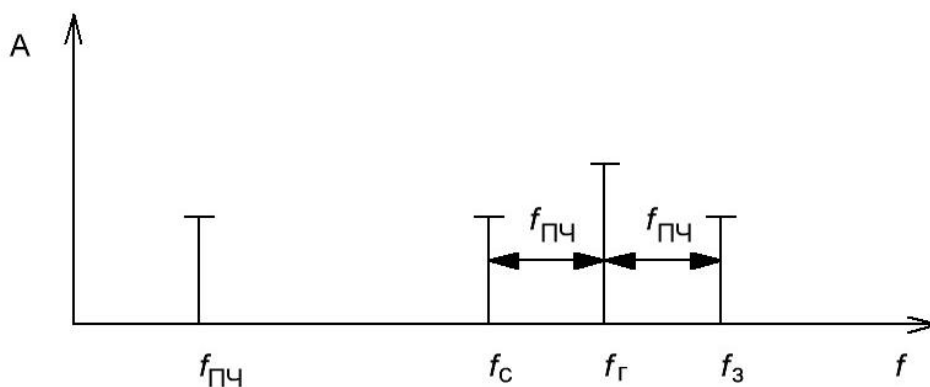


Рис. 4. Характер расположения основного и побочных каналов приема

Полупроводниковые приборы в смесителе имеют нелинейную вольт-амперную характеристику, поэтому при прохождении сигналов  $f_c$  и  $f_{\Gamma}$  на выходе формируется множество комбинационных частот  $mf_c \pm nf_{\Gamma}$ , где  $m$  и  $n=1,2,3\dots$ . Нежелательные (паразитные) частоты на выходе смесителя отфильтровываются с помощью полосовых фильтров.

Одна из комбинационных частот с  $m=1$  и  $n=1$   $f_{\Pi} = f_{\Gamma} + f_{\text{ПЧ}} = f_3$  образует побочный канал приема, который называется «зеркальным» (рис. 4).

Помеха, проходящая по зеркальному каналу, преобразуется в смесителе на равных основаниях с входным сигналом, поэтому ее подавление должно осуществляться до преобразования частоты с помощью частотно-избирательных систем входного устройства и усилителя радиочастоты.

При  $m=0$  и  $n=1$  имеем  $f_{\Pi} = f_{\text{ПЧ}}$ . Эта помеха прямого прохождения. Она может быть ослаблена установкой на входе приемника режекторного фильтра, настроенного на эту частоту.

Для радиовещательных радиоприемников длинных, средних и коротких волн промежуточная частота задается равной  $f_{\text{ПЧ}}=465$  кГц, у приемников с частотной модуляцией, работающих в метровом диапазоне, она равна 10,7 МГц, в радиолокационных и радионавигационных приемниках дециметрового и сантиметрового диапазона  $f_{\text{ПЧ}}$  равна 30; 60; 100 МГц и более.

## 2.1. Смесители на биполярных транзисторах

Преобразование частоты реализуется на электронных приборах при соответствующем выборе режима. Для достаточно больших амплитуд приложенного к входу напряжения такие приборы являются нелинейными элементами. При малых амплитудах отдельные участки характеристики можно считать линейными. Чтобы огибающая модулированного сигнала не была искажена, напряжение сигнала должно быть малым. Но для того чтобы электронный прибор работал как нелинейный элемент, на его вход необходимо подавать напряжение с амплитудой, 10-15 раз превышающей амплитуду сигнала. Такое напряжение создается специальным маломощным генератором, который называется гетеродином.

Допустим, что на входы смесителя подается амплитудно-модулированный сигнал  $u_c = U_c(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t$  и напряжение гетеродина  $u_{\Gamma} = U_{\Gamma} \cos \omega_{\Gamma} t$ , причем  $u_{\Gamma} \gg u_c$ . Под действием напряжения гетеродина крутизна характеристики  $S$  нелинейного элемента периодически изменяется по закону

$$S(t) = S_0 + S_1 \cos \omega_{\Gamma} t.$$

Выходной ток смесителя, возникающий под действием входного сигнала, описывается выражением

$$I_{\text{вых}} = S(t)u_c = (S_0 + S_1 \cos \omega_{\Gamma} t)U_c(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t.$$

После преобразования получим

$$I_{\text{вых}} = S_0 U_c (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t + 0,5 S U_c (1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_{\Gamma} - \omega_c) t + 0,5 S U_c (1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_{\Gamma} + \omega_c) t.$$

Видно, что в спектре тока сигнала на выходе появилась комбинационная составляющая на частоте  $\omega_{\Gamma} - \omega_c$ , которая выделяется полосовым фильтром в качестве промежуточной частоты.

### **Небалансные смесители на биполярных транзисторах**

Небалансные смесители на биполярных транзисторах позволяют создавать компактные, дешевые устройства, осуществляющие усиление преобразованного сигнала, однако при этом имеют плохую линейность. На рис. 5 показаны упрощенные схемы типовых смесителей на БТ.

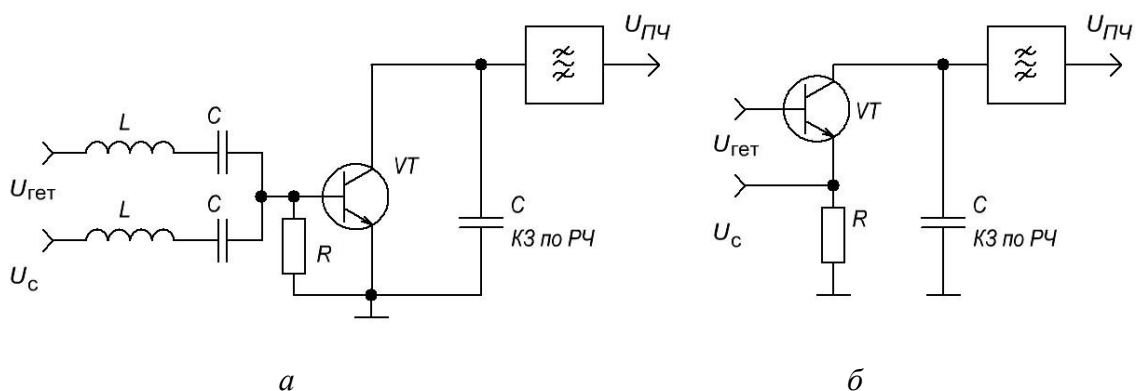


Рис. 5. Упрощенные схемы типовых реализаций смесителей на биполярном транзисторе

Один из вариантов реальной схемы смесителя на биполярном транзисторе приведен на рис. 6. Смеситель и гетеродин, выполнены на одном транзисторе.

К недостаткам простых схем относится необходимость обеспечения развязки трактов гетеродина и входного сигнала. Обычно это делается при помощи трансформаторов.

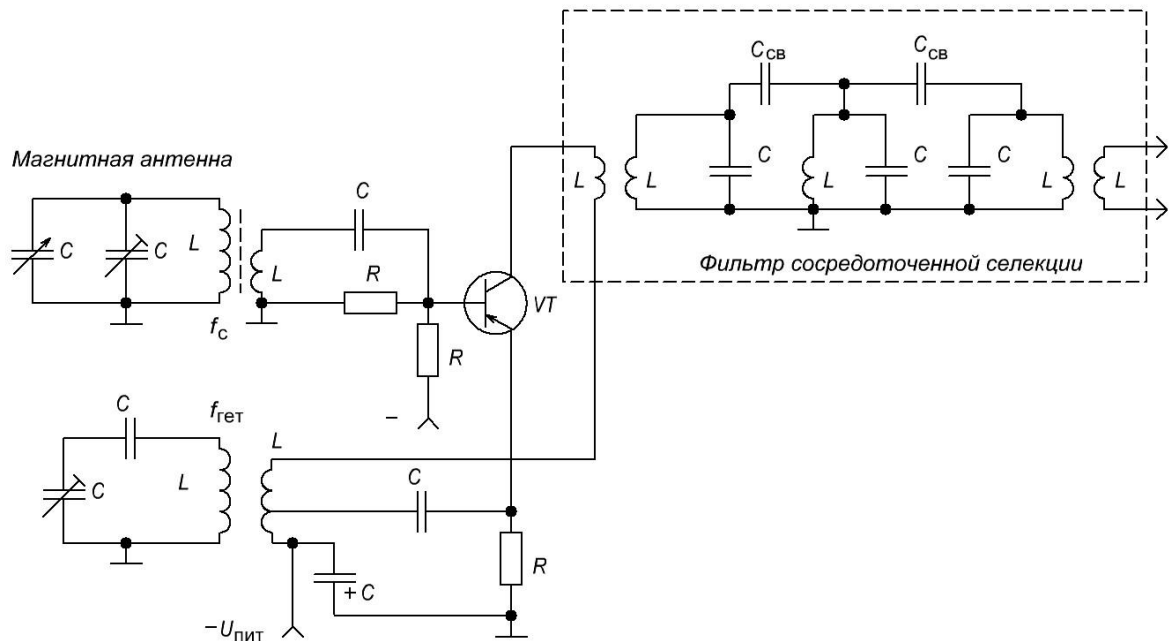


Рис. 6. Схема реализации смесителя на биполярном транзисторе

Лучшие характеристики обеспечивают так называемые балансные смесители. Типовая схема такого смесителя приведена на рис. 7.



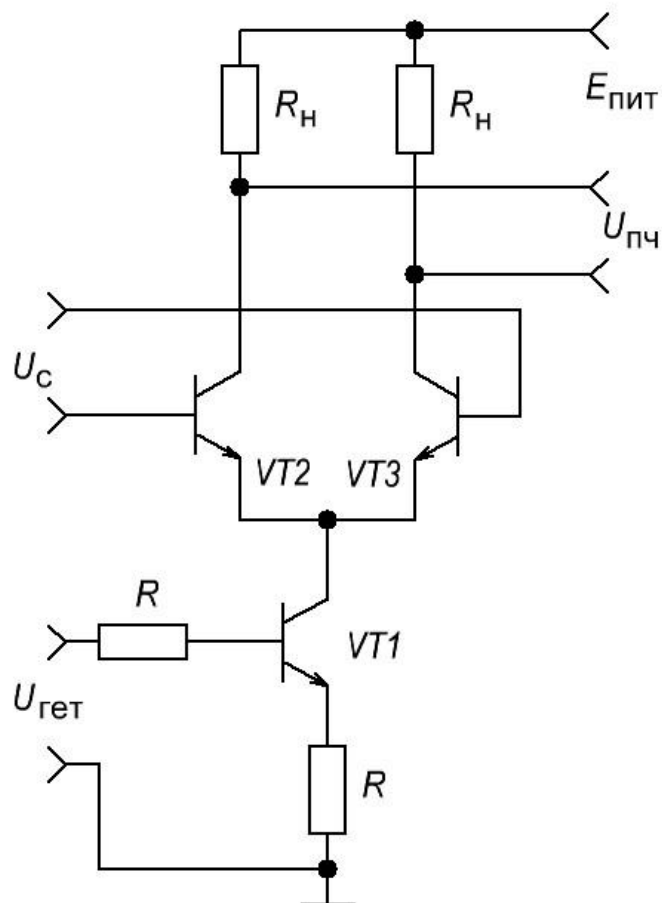


Рис. 7. Балансный смеситель на биполярном транзисторе

В данной схеме осуществляется аналоговое перемножение напряжений гетеродина и сигнала. Это происходит в силу того, что крутизна транзисторов VT2 и VT3 зависит от тока эмиттера, который в свою очередь определяется напряжением сигнала гетеродина. На рис. 8 приведена схема балансного смесителя со всеми необходимыми элементами.

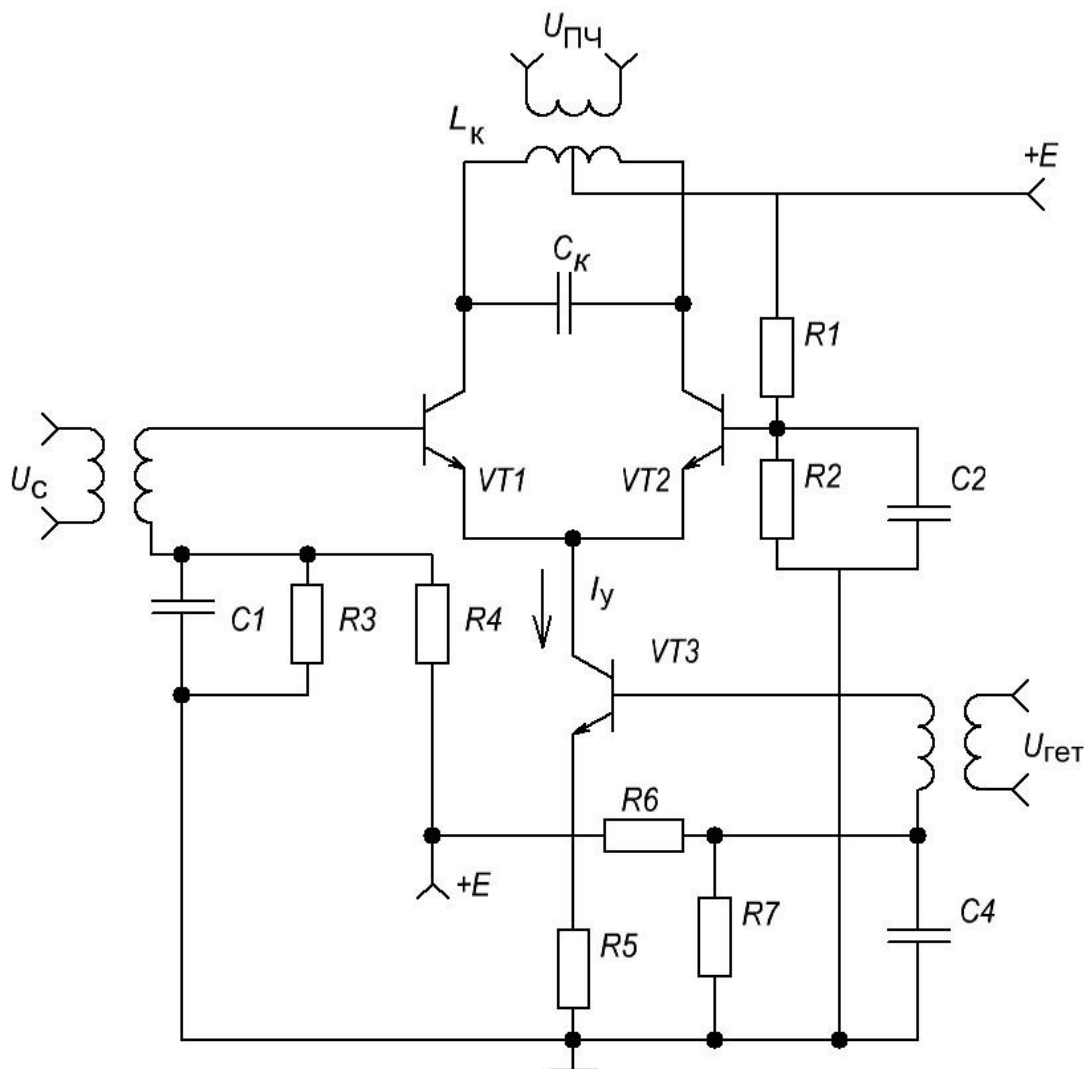


Рис. 8. Схема реализации аналогового перемножителя на дифференциальном каскаде

Напряжение сигнала управляет работой только транзистора  $VT1$ , поскольку база транзистора  $VT2$  по высокой частоте заземлена. Ток коллектора транзистора  $VT3$  равен сумме эмиттерных токов транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ . Если под воздействием сигнала  $U_C$  транзистор  $VT1$  открывается и ток  $I_{Э1}$  увеличивается, то транзистор  $VT2$  призапирается и его ток  $I_{Э1}$  уменьшается на такую же величину.

Разностное напряжение снимается с коллекторов  $VT1$  и  $VT2$ . Контур  $L_K C_K$  настроен на промежуточную частоту.

Следует отметить, что близкая к линейной операция перемножения получается лишь при напряжениях  $U_C(t)$  и  $U_T(t)$ , не превышающих нескольких милливольт.

Достоинством схемы являются: высокая точность, широкая полоса частот, простота реализации, подавление колебания гетеродина на выходе преобразователя частоты, так как токи с частотой гетеродина в катушке выход-

ного контура направлены навстречу друг другу. По той же причине в такой схеме происходит ослабление шумов гетеродина.

## 2.2. Смесители на полевых транзисторах

Смесители могут быть выполнены на полевых транзисторах. Их достоинством является более низкий уровень шума по сравнению со смесителями на диодах и транзисторах. Некоторые схемные решения таких смесителей приведены ниже.

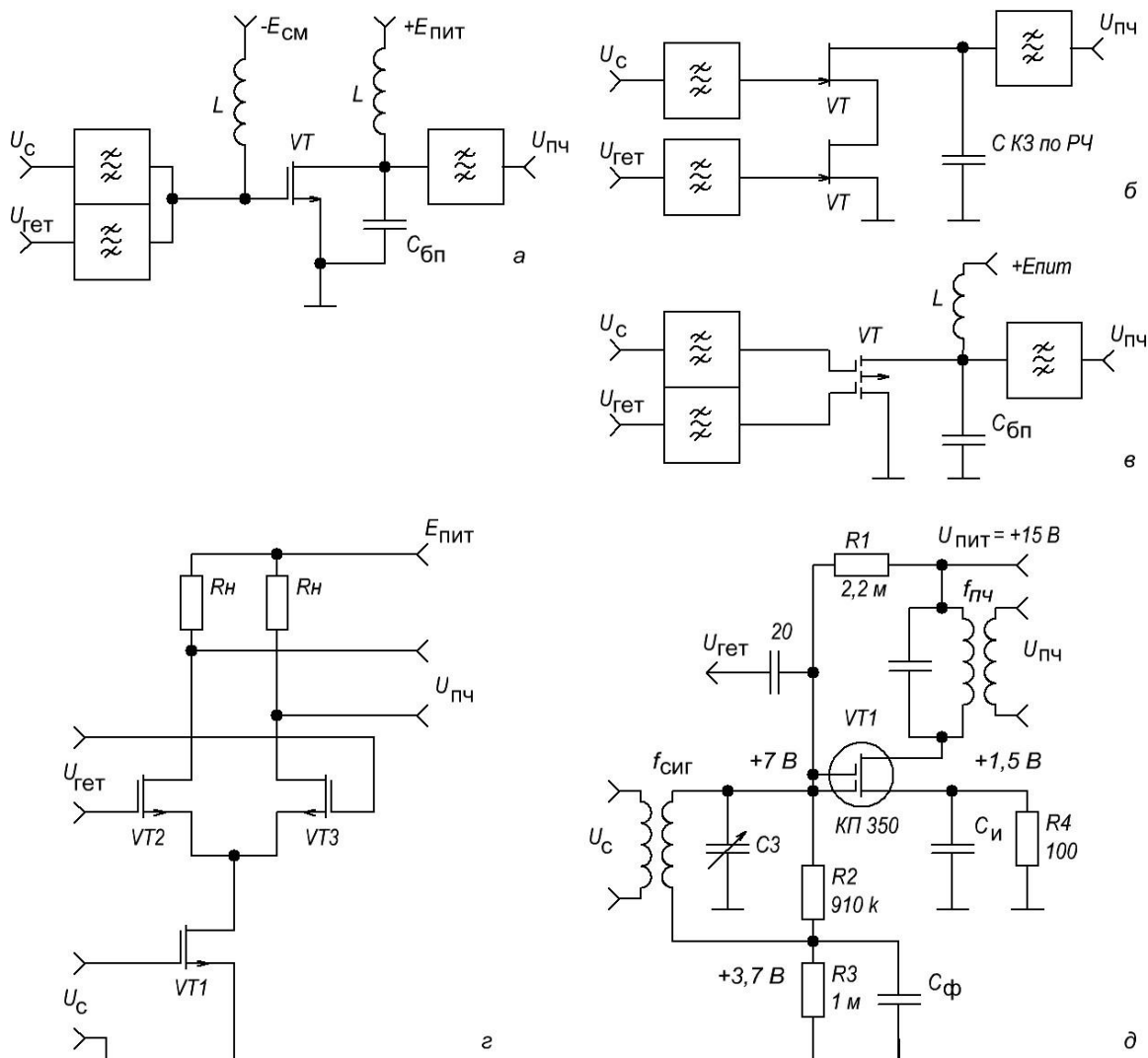


Рис. 9. Смесители: а) небалансный смеситель на полевом транзисторе, б) упрощенная схема смесителя на двух полевых транзисторах, в) смеситель на двухзатворном КМОП транзисторе, г) балансный смеситель, д) пример схемы

## 2.3. Смесители на диодах

В качестве нелинейных элементов смесителей могут быть использованы радиочастотные диоды различных типов. В современных диодных смесителях используют диоды Шоттки.

В диодном преобразователе частоты (рис. 10) источник выходного сигнала, сигнала гетеродина и источник смещения  $E_0$  включены последователь-

но. При значениях  $E_0$  много меньше  $U_C$ ,  $U_G$  в токе диода присутствуют составляющие с частотами  $\omega_C$ ,  $\omega_G$ ,  $2\omega_C$ ,  $2\omega_G$ ,  $\omega_G - \omega_C$ ,  $2\omega_C \pm \omega_G$ . Включив в качестве нагрузки частотно-избирательную цепь можно выделить составляющую с частотой  $\omega_{ПЧ} = \omega_G - \omega_C$ .

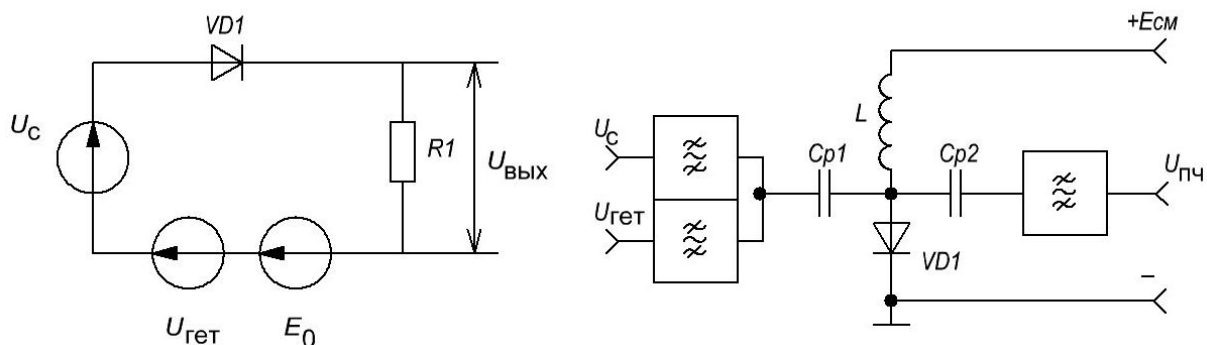


Рис. 10. Диодный преобразователь: а) упрощенная схема; б) схема небалансного диодного смесителя

Достоинства небалансных диодных смесителей:

- могут работать в очень широком диапазоне частот;
- схемотехническая простота.

Недостатки:

- настройки контуров гетеродина и сигнала оказываются взаимозависимыми;
- ток с частотой сигнала, замыкающийся через цепь гетеродина, может вызвать «захват» сигнала гетеродина;
- ток с частотой гетеродина, замыкающийся через цепь входного сигнала, определяет существенное излучение сигнала гетеродина антенной приемника.

### Балансные диодные смесители

В балансном диодном смесителе сигналы от гетеродина и источника радиочастоты (РЧ) складываются в противофазе, при этом происходит уменьшение уровня нежелательных компонент сигнала на выходе промежуточной частоты (ПЧ) смесителя и их подавление (рис. 11). Уровень подавления зависит от амплитудной и фазовой симметрии трансформатора.

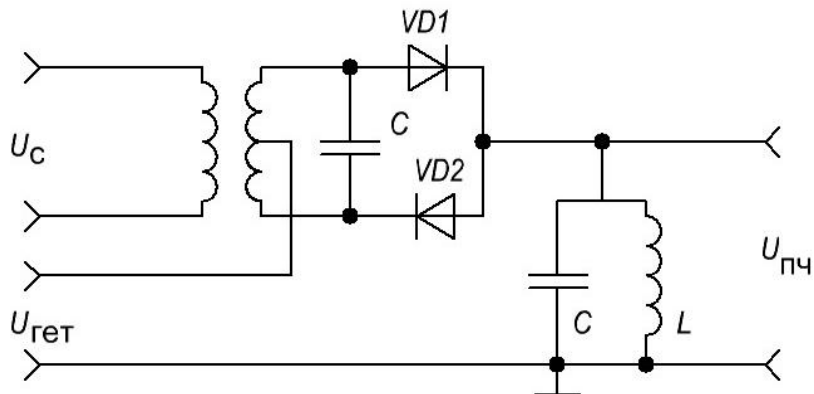


Рис. 11. Балансный смеситель с гибридным трансформатором

К недостаткам относятся: недостаточная развязка между входом и выходом, зависимость мощность полезного выходного сигнала от уровней входного и гетеродинного сигналов.

Этих недостатков лишен диодный балансный преобразователь (рис. 12), в котором диоды включены в кольцо и на его выходе при симметричном выполнении плеч должны отсутствовать гармонические колебания с частотами  $\omega_C$  и  $\omega_H$ . Для уменьшения нелинейных искажений при больших уровнях входного сигнала и сигнала гетеродина в каждое плечо преобразователя включаются несколько диодов. При этом общее входное напряжение делится между диодами. В результате на каждом диоде оказывается малое напряжение, что приводит к уменьшению нелинейных искажений.

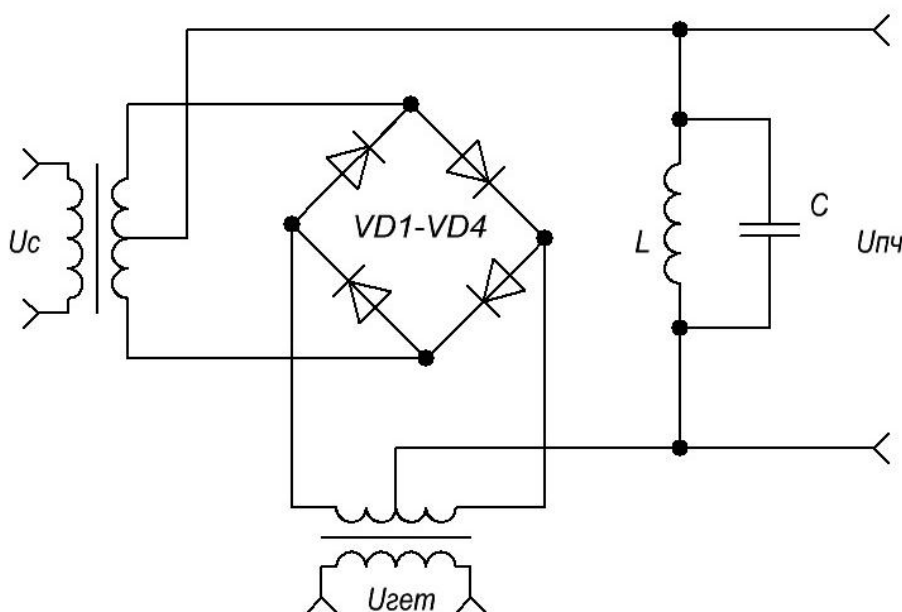


Рис. 12. Преобразователь частоты на диодном кольцевом балансном смесителе

Преимущества двойных (кольцевых) балансных диодных смесителей:

- повышенная линейность, большой динамический диапазон устройства;
- сигналы РЧ и гетеродина на выходе подавляются;
- на выходе смесителя подавляются комбинационные продукты сигналов гетеродина и РЧ четных порядков;
- хорошая взаимная изоляция входов и выходов смесителя.

Недостатки двойных (кольцевых) балансных диодных смесителей:

- использование двух симметрирующих РЧ трансформаторов, являющихся технологически сложными элементами, в силу чего затруднена реализация таких смесителей в интегральных структурах;
- реальный диапазон рабочих частот ограничен достигаемой технологической симметричностью РЧ трансформаторов;
- необходимость использования мощного сигнала гетеродина;
- необходимо применять полупроводниковые компоненты с идентичными характеристиками.

### **Контрольные вопросы**

1. На чем основан принцип работы преобразователей частоты?
2. Структура схемы преобразователя частоты и назначение ее узлов.
3. Основные показатели преобразователя частоты.
4. В чем состоят достоинства и недостатки смесителей, выполненных по простым и балансным схемам?
5. Вследствие чего появляются побочные каналы приемы?

### Рекомендуемая литература

1. Колосовский Е. А. Устройства приема и обработки информации : Учеб. пособие. М. : Горячая линия - Телеком, 2007. – 456 с.
2. Нефедов В. И. Основы радиоэлектроники и связи : Учеб. пособие/ В. И. Нефедов, А.С. Сигов ; Под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2009. – 735 с.
3. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов / Н. Н. Фомин, Н. Н. Буга, О. В. Головин [и др.] ; Под ред. Н. Н. Фомина. –3-е изд/, стер. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 520 с.

### СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Общие сведения	3
2. Преобразователи частоты	6
2.1. Смесители на биполярных транзисторах	7
2.2. Смесители на полевых транзисторах	11
2.3. Смесители на диодах	11
Контрольные вопросы	14
Рекомендуемая литература	15

Учебное издание  
Устройства приема и обработки сигнала  
Преобразователи частоты  
Методические указания

Составители: Бардин Вадим Михайлович  
Брагин Анатолий Валерьевич

*Печатается в авторской редакции в соответствии с представленным оригиналом.*

Подписано в печать 20.08.12. Формат 60\*84 1/16 цел. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. заказ №\_\_\_\_ Издательство Мордовского государственного университета 430005, г. Саранск, ул. Советская, 24.