

## 4. Усилители радиочастоты

### 4.1. Общие сведения об усилителях радиочастоты и их характеристики

Усилитель радиочастоты (УРЧ) размещается между входной цепью и преобразователем частоты (в супергетеродинном радиоприёмнике) или между входной цепью и демодулятором (в приёмнике прямого усиления).

**Назначение** усилителя радиочастоты:

- усиление сигнала непосредственно на частоте несущего колебания;
- обеспечение (совместно с входной цепью) частотной избирательности по паразитным каналам приёма супергетеродинного радиоприёмника – зеркальному, прямого прохождения и комбинационным;
- повышение чувствительности радиоприёмного устройства в целом.

#### Состав и виды УРЧ

В состав УРЧ входят **усилительный прибор и частотно-избирательный фильтр**.

В качестве **усилительных приборов** используются:

- транзисторы (биполярные и полевые);
- малощумящие широкополосные усилители в микронном исполнении;
- электронные лампы;
- лампы бегущей волны и лампы обратной волны (в диапазоне СВЧ).

Кроме того, эффект усиления радиочастотного сигнала может быть получен в параметрических УРЧ и усилителях на туннельных диодах, которые используются в некоторых случаях в диапазоне СВЧ.

В качестве **частотно-избирательного фильтра** используются:

- параллельный колебательный контур;
- система колебательных контуров;
- электронно-акустические резонаторы;
- микрополосковые резонансные цепи;
- объёмные резонаторы.

## Характеристики качества УРЧ

Наиболее важными *электрическими характеристиками качества УРЧ* являются следующие:

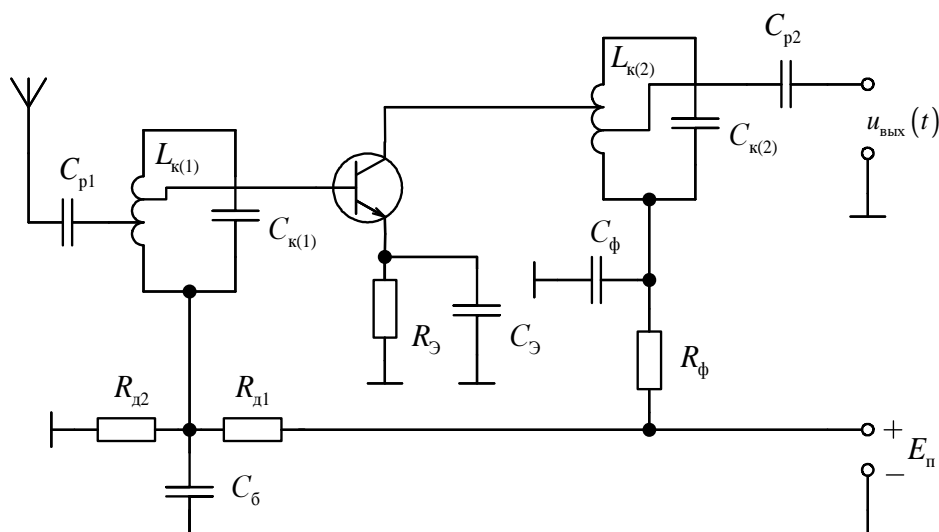
- резонансный коэффициент усиления по напряжению;
- частотная избирательность;
- коэффициент шума, характеризующий интенсивность собственных шумов, возникающих в усилителе;
- коэффициент устойчивости;
- степень искажений сигнала в усилителе;
- диапазон рабочих частот.

### 4.2. Типовые схемы транзисторных УРЧ

Мы будем рассматривать УРЧ диапазона умеренно высоких частот (до 200-300 МГц). Такие УРЧ обычно выполняются на биполярных или полевых транзисторах и состоят из одного или нескольких усилительных каскадов. В нашем курсе рассматриваются простейшие однокаскадные схемы УРЧ.

На рис. 4.1 показана схема преселектора, состоящего из входной цепи (контур  $L_{к(1)}C_{к(1)}$ ) и однокаскадного резонансного УРЧ на биполярном транзисторе, нагрузкой которого является колебательный контур  $L_{к(2)}C_{к(2)}$ . Оба колебательных контура настроены на частоту сигнала  $f_0$ . Связь контуров с элементами схемы – автотрансформаторная. Транзистор включён по схеме с общим эмиттером (ОЭ) (эмиттер соединён по переменному току с земляной шиной через блокировочный конденсатор  $C_э$ ). Сигнал с антенны через разделительный конденсатор  $C_{р1}$  подаётся на отвод катушки первого (входного) колебательного контура. Напряжение, снимаемое со второго отвода контурной катушки  $L_{к(1)}$ , прикладывается к переходу «база-эмиттер» транзистора. Переменная составляющая коллекторного тока протекает через второй (выходной) колебательный контур и конденсатор фильтра  $C_ф$ . Усиленное напряжение снимается со второго отвода катушки выходного колебательного контура и через разделительный конденсатор  $C_{р2}$  поступает на выход усилителя. Конденсатор  $C_б$  является блокировочным, он соединяет по переменному току нижнюю точку входного колебательного контура с земляной шиной. Конденсатор  $C_э$  – также блокировочный, он устраняет последовательную отрицательную об-

ратную связь по переменному току, которая при его отсутствии приводила бы к снижению коэффициента усиления каскада.



**Рис. 4.1. Преселектор с УРЧ на биполярном транзисторе**

Режим транзистора по постоянному току и температурная стабилизация обеспечиваются резисторами  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$ ,  $R_{э}$ :

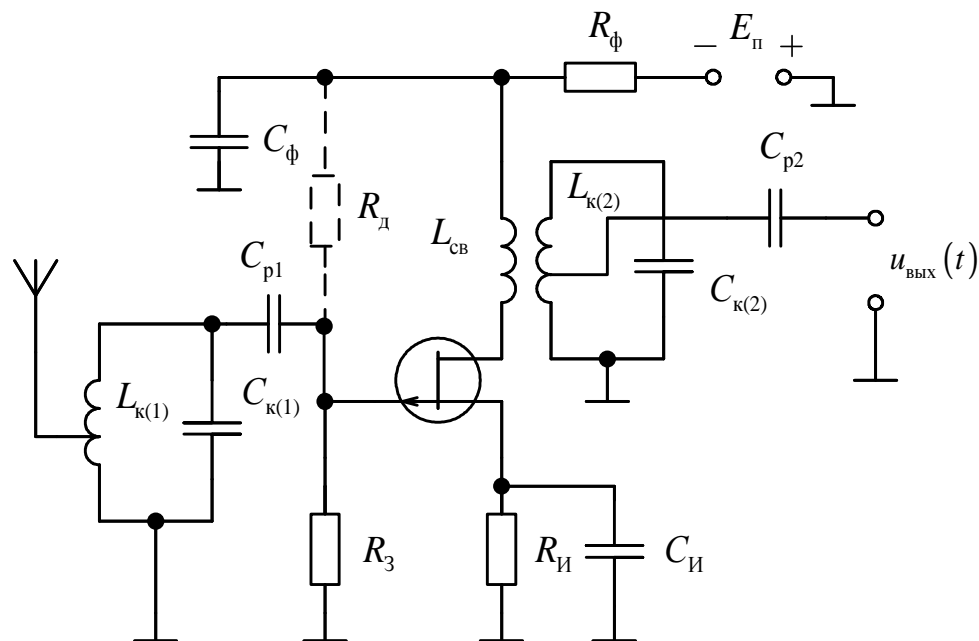
- резистор  $R_{э}$  создаёт отрицательную обратную связь по постоянному току и тем самым обеспечивает температурную стабилизацию каскада;
- резисторы  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$  образуют базовый делитель, обеспечивающий заданное положение рабочей точки на входной характеристике транзистора и входящий в состав цепи температурной стабилизации.

Резистор  $R_{ф}$  совместно с конденсатором  $C_{ф}$  образует развязывающий  $RC$ -фильтр, препятствующий попаданию высокочастотного напряжения усиленного сигнала в цепь питания; этим обеспечивается развязка по переменному току отдельных блоков радиоприёмника, что повышает устойчивость его работы.

Коэффициенты включения  $m_{1(1)}$ ,  $m_{2(1)}$  первого (входного) колебательного контура определяются исходя из заданного режима работы входной цепи (см. гл. 3). Выбор коэффициентов включения  $m_{1(2)}$ ,  $m_{2(2)}$  второго (выходного) контура будет рассмотрен позднее.

На рис. 4.2 показана схема УРЧ на полевом транзисторе с каналом  $p$ -типа, включённом с общим истоком (ОИ). В этой схеме используется автотрансформаторная связь первого контура (входной цепи) с антенной и трансформаторная связь цепи стока транзистора со вторым контуром. Основное отличие этой схемы от предыдущей заклю-

чается в полном включении транзистора в контур входной цепи. Это возможно благодаря очень высокому входному сопротивлению полевого транзистора (сопротивлению цепи «затвор-исток») и, следовательно, пренебрежимо малому шунтированию контура.



**Рис. 4.2. Преселектор с УРЧ на полевом транзисторе**

Назначение остальных элементов схемы аналогично назначению соответствующих элементов каскада на биполярном транзисторе:

$C_{р1}$ ,  $C_{р2}$  – разделительные конденсаторы;

$R_{и}$  – резистор обратной связи по постоянному току в цепи истока, обеспечивающий температурную стабилизацию каскада и требуемое напряжение смещения на затворе;

$C_{и}$  – блокировочный конденсатор, устраняющий отрицательную обратную связь по переменному току;

$R_3$  – резистор в цепи затвора, обеспечивающий подачу запирающего напряжения (напряжения автосмещения);

$R_{д}$  – дополнительный резистор, уменьшающий (при необходимости) запирающее напряжение на затворе;

$R_{ф}$ ,  $C_{ф}$  – элементы развязывающего RC-фильтра в цепи питания.

### **4.3. Обобщённая эквивалентная схема каскада УРЧ**

Рассмотрим обобщённую эквивалентную схему каскада УРЧ на биполярном транзисторе, включённом по схеме с ОЭ (рис. 4.3). Коэф-

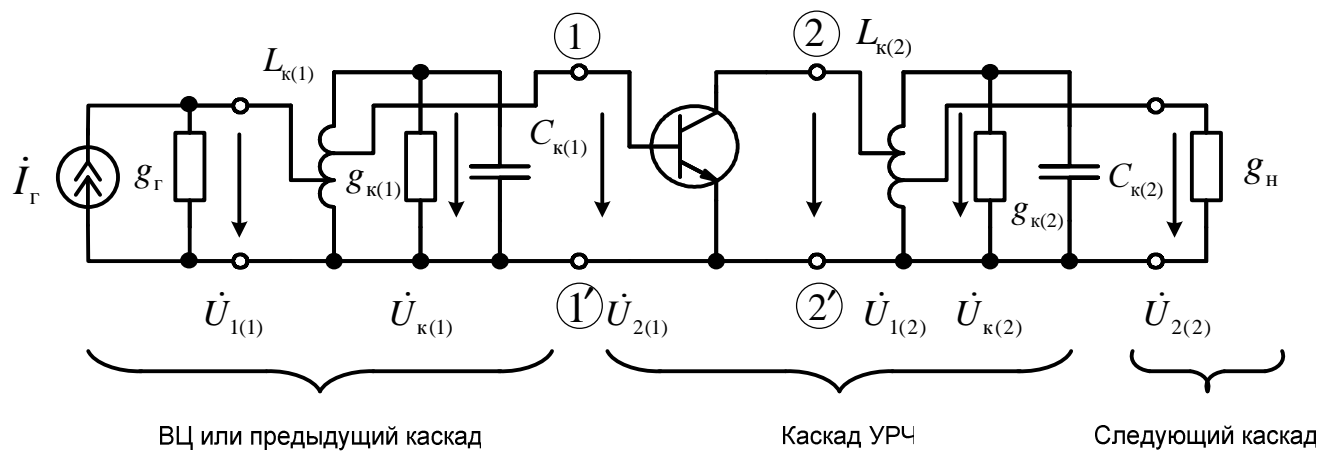
коэффициенты включения внешних цепей в колебательные контуры усилителя определяются следующими соотношениями:

- коэффициенты включения в первый (входной) контур:

$$m_{1(1)} = \frac{U_{1(1)}}{U_{к(1)}}, \quad m_{2(1)} = \frac{U_{2(1)}}{U_{к(1)}};$$

- коэффициенты включения во второй (выходной) контур:

$$m_{1(2)} = \frac{U_{1(2)}}{U_{к(2)}}, \quad m_{2(2)} = \frac{U_{2(2)}}{U_{к(2)}}.$$

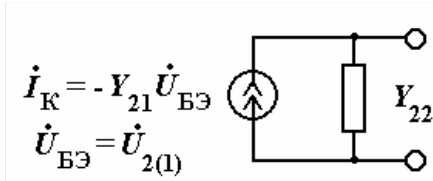


**Рис. 4.3. Эквивалентная схема каскада УРЧ**

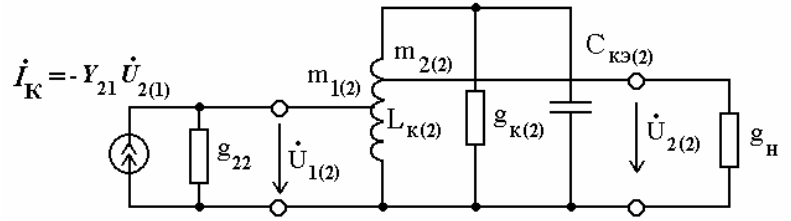
Найдём **комплексный коэффициент передачи каскада УРЧ на резонансной частоте**

$$\dot{K}_0 = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{\dot{U}_{2(2)}}{\dot{U}_{2(1)}}. \quad (4.1)$$

Поскольку УРЧ работает в режиме слабого сигнала, то по переменному току транзистор можно рассматривать как линейный четырёхполюсник. На частотах до 200-300 МГц транзистор описывается мало-сигнальными  $Y$ -параметрами. Коллекторная цепь транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, представляется эквивалентной схемой, показанной на рис. 4.4. Отнесём мнимую составляющую  $b_{22} = \text{Im } Y_{22}$  выходной проводимости транзистора к реактивным элементам выходного колебательного контура. Тогда получим эквивалентную схему цепи коллектора и выходного колебательного контура, изображённую на рис. 4.5.



**Рис. 4.4. Эквивалентная схема цепи коллектора**



**Рис. 4.5. Эквивалентная схема цепи коллектора и выходного колебательного контура**

Эта схема идентична рассмотренной в п. 3.2 обобщённой эквивалентной схеме входной цепи с той лишь разницей, что вместо источника тока  $\dot{I}_A$  здесь фигурирует источник тока  $\dot{I}_K = -Y_{21} \dot{U}_{2(1)}$ <sup>\*</sup>, а вместо проводимости антенны  $g_A$  – выходная проводимость транзистора  $g_{22}$ . Поэтому для определения резонансного коэффициента передачи каскада УРЧ используется такая же методика, что и для определения коэффициента передачи ВЦ.

Комплексная амплитуда напряжения на нагрузке усилительного каскада равна

$$\dot{U}_{2(2)} = \frac{m_{2(2)}}{m_{1(2)}} \dot{U}_{1(2)}. \quad (4.2)$$

Комплексная амплитуда напряжения на отводе катушки индуктивности  $L_{K(2)}$ , соединённом с коллектором транзистора, равна

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1(2)} &= \frac{\dot{I}_K}{g_{22} + g_{K(2)}} = \frac{-Y_{21} \dot{U}_{2(1)}}{g_{22} + \frac{g_{K(2)} + m_{2(2)}^2 g_H}{m_{1(2)}^2}} = \\ &= -Y_{21} \dot{U}_{2(1)} \frac{m_{1(2)}^2}{m_{1(2)}^2 g_{22} + g_{K(2)} + m_{2(2)}^2 g_H}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

где  $g_{K(2)}$  – собственная резонансная проводимость второго контура. Подставляя (4.3) в (4.2), а результат – в (4.1), получим выражение для комплексного коэффициента передачи каскада УРЧ на резонансной частоте:

<sup>\*</sup> Знак «–» в правой части равенства обусловлен тем, что для усилительного каскада, построенного по схеме с общим эмиттером, выходное напряжение находится в противофазе с током коллектора.

$$\dot{K}_0 = \frac{\dot{U}_{2(2)}}{\dot{U}_{2(1)}} = -\frac{m_{1(2)}m_{2(2)}Y_{21}}{g_{кэ(2)}}, \quad (4.4)$$

где

$$g_{кэ(2)} = m_{1(2)}^2 g_{22} + g_{к(2)} + m_{2(2)}^2 g_{н} \quad (4.5)$$

– эквивалентная резонансная проводимость второго (выходного) колебательного контура.

**Коэффициент усиления по напряжению** каскада УРЧ равен

$$K_0 = |\dot{K}_0| = \frac{m_{1(2)}m_{2(2)}|Y_{21}|}{g_{кэ(2)}}. \quad (4.6)$$

Другая важная характеристика УРЧ – **полоса пропускания**. Также, как и для входной цепи, изменение полосы пропускания выходного контура УРЧ за счёт шунтирующего влияния выходной проводимости транзистора  $g_{22}$  и входной проводимости следующего каскада  $g_{н}$  характеризуется коэффициентом расширения полосы

$$\gamma_{УРЧ} = \frac{П_{кэ(2)}}{П_{к(2)}} = \frac{g_{кэ(2)}}{g_{к(2)}} = 1 + m_{1(2)}^2 \frac{g_{22}}{g_{к(2)}} + m_{2(2)}^2 \frac{g_{н}}{g_{к(2)}}. \quad (4.7)$$

Из (4.7) следует, что коэффициент расширения полосы возрастает при увеличении проводимости нагрузки и выходной проводимости транзистора, а также при увеличении соответствующих коэффициентов включения.

#### 4.4. Устойчивость работы УРЧ

Одна из основных функций УРЧ – предварительное усиление сигнала на частоте несущей для ослабления влияния шумов преобразователя частоты, т.е. для повышения чувствительности радиоприёмника в целом. Однако возможность получения максимального коэффициента усиления ограничена дополнительным требованием, которое связано с понятием **устойчивости работы УРЧ**.

Поясним это понятие. До сих пор мы рассматривали входную цепь и УРЧ, а также различные каскады, входящие в состав многокаскадного УРЧ, раздельно. Реально же они связаны, поскольку существует паразитная обратная связь, действующая с выхода каскада УРЧ



на его вход. Эта обратная связь может быть вызвана следующими физическими причинами:

- прохождением высокочастотного колебания по цепям питания;
- индуктивной связью между катушками колебательных контуров;
- внутренней обратной связью в транзисторе, которая проявляет себя на относительно высоких частотах (свыше 100 МГц).

Обратная связь, обусловленная первыми двумя причинами, может быть достаточно эффективно ослаблена: обратная связь по цепи питания – с помощью развязывающего  $RC$ -фильтра; индуктивная связь – путём экранирования катушек индуктивности.

Внутренняя обратная связь принципиально неустранима, и поэтому будем рассматривать именно её влияние на характеристики УРЧ.

Наличие обратной связи приводит к тому, что высокочастотное напряжение на выходе усилительного прибора влияет на ток, протекающий через входной контур. Это влияние приводит к изменению параметров контура, в том числе его АЧХ, и при определенных условиях может вызвать самовозбуждение каскада. Поэтому устойчивость работы УРЧ можно косвенно охарактеризовать степенью искажения АЧХ входного колебательного контура. С учётом этого дадим следующее качественное определение устойчивого режима работы УРЧ (количественное определение будет сформулировано позднее, после введения количественной меры искажения АЧХ):

***устойчивый режим работы УРЧ – это такой режим, при котором искажение АЧХ входного колебательного контура не превышает некоторой допустимой величины и когда есть достаточно большой запас по усилению по сравнению с режимом, при котором наступает самовозбуждение.***

Рассмотрим влияние внутренней обратной связи на устойчивость каскада УРЧ на биполярном транзисторе, включённом по схеме с общим эмиттером. Для упрощения анализа примем следующие допущения:

- 1) будем рассматривать сравнительно узкополосный УРЧ, для которого в пределах полосы пропускания  $Y$ -параметры транзистора можно считать постоянными;
- 2) примем, что проводимость прямой передачи транзистора (крутизна)  $Y_{21}$  вещественна, т.е. рабочая частота УРЧ много меньше граничной частоты  $f_S$  транзистора по крутизне;



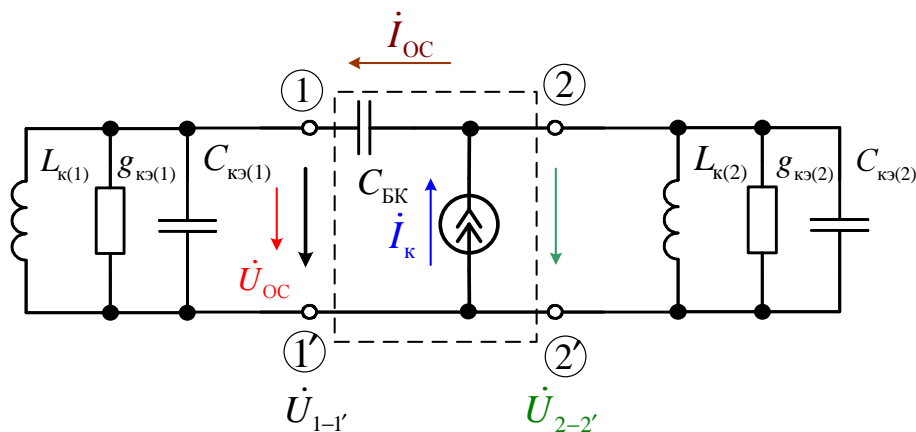
- 3) примем, что активная составляющая проводимости внутренней обратной связи пренебрежимо мала по сравнению с реактивной составляющей, которая имеет емкостной характер:

$$Y_{oc} \approx j\omega C_{БК} \approx j|Y_{12}|,$$

где  $C_{БК}$  – внутренняя ёмкость между базой и коллектором транзистора,  $Y_{12}$  – проводимость обратной передачи транзистора;

- 4) будем считать, что внешние проводимости включены во входной и выходной колебательные контуры полностью и что полосы пропускания контуров одинаковы.

Эквивалентная схема каскада с учётом внутренней обратной связи показана на рис. 4.6. Здесь входным контуром является контур ВЦ либо выходной контур предыдущего каскада УРЧ. Эквивалентная схема усилительного каскада включает в себя эквивалентные схемы колебательных контуров и транзистора. Здесь эквивалентная резонансная проводимость контуров определяется с учётом влияния входной  $g_{11}$  (для 1-го контура) и выходной  $g_{22}$  (для 2-го контура) проводимостей транзистора. Внутренняя обратная связь в транзисторе учитывается с помощью ёмкости между базой и коллектором  $C_{БК}$ .



**Рис. 4.6. Эквивалентная схема каскада УРЧ с учётом внутренней обратной связи**

Определим комплексную проводимость  $Y_{1-1'}^{oc}$  между точками 1–1' эквивалентной схемы с учётом влияния внутренней обратной связи. Эта проводимость складывается из проводимости 1-го колебательного контура  $Y_{1-1'}$  и дополнительного слагаемого  $\Delta Y_{BX}^{oc}$ , обусловленного изменением входной проводимости усилительного каскада из-за наличия внутренней обратной связи:

$$Y_{1-1'}^{\text{oc}} = Y_{1-1'} + \Delta Y_{\text{BX}}^{\text{oc}}. \quad (4.8)$$

Входная проводимость каскада с учётом влияния внутренней обратной связи равна

$$Y_{\text{BX}}^{\text{oc}} = Y_{11} + Y_{12} \frac{\dot{U}_{2-2'}}{\dot{U}_{1-1'}} = Y_{11} + Y_{12} \dot{K}, \quad (4.9)$$

где  $\dot{K} = \frac{\dot{U}_{2-2'}}{\dot{U}_{1-1'}}$  – комплексный коэффициент усиления. Изменение входной проводимости каскада под действием обратной связи определяется вторым слагаемым (4.9) \*):

$$\Delta Y_{\text{BX}}^{\text{oc}} = Y_{12} \dot{K} = -Y_{\text{oc}} \dot{K} \approx -j|Y_{12}| \dot{K}. \quad (4.10)$$

Поскольку комплексный коэффициент усиления каскада с нагрузкой в виде колебательного контура равен

$$\dot{K} = -\frac{K_0}{1 + j\xi}, \quad (4.11)$$

то

$$\Delta Y_{\text{BX}}^{\text{oc}} \approx -j|Y_{12}| \left( -\frac{K_0}{1 + j\xi} \right) = \frac{jB}{1 + j\xi} = \frac{B\xi}{1 + \xi^2} + j \frac{B}{1 + \xi^2}, \quad (4.12)$$

где  $\xi$  – обобщённая расстройка;  $B = |Y_{12}|K_0$  – параметр, характеризующий глубину обратной связи;  $K_0$  – резонансный коэффициент усиления.

Вещественная часть (4.12) определяет активную составляющую изменения входной проводимости каскада

$$\Delta g_{\text{BX}}^{\text{oc}} = \frac{B\xi}{1 + \xi^2}, \quad (4.13)$$

а мнимая часть – реактивную составляющую

$$\Delta b_{\text{BX}}^{\text{oc}} = \frac{B}{1 + \xi^2}. \quad (4.14)$$

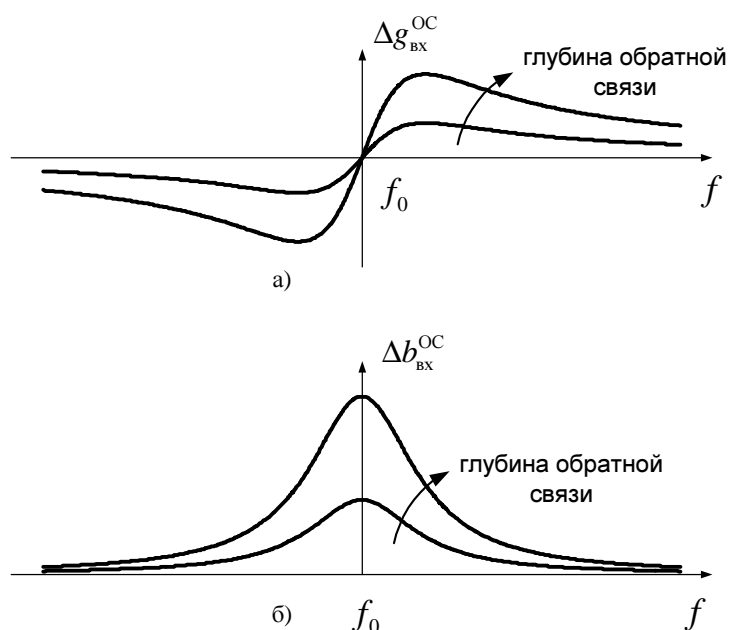
Графики зависимостей  $\Delta g_{\text{BX}}^{\text{oc}}$  и  $\Delta b_{\text{BX}}^{\text{oc}}$  от частоты при различной глубине обратной связи показаны на рис. 4.7. Отрицательное значение

---

\*) Знак «—» в этом выражении связан с тем, что при определении  $Y$ -параметров четырёхполюсника положительным считается входной ток, втекающий в четырёхполюсник, а реальный ток, проходящий через проводимость обратной связи при положительном напряжении на коллекторе транзистора, вытекает из четырёхполюсника.

$\Delta g_{\text{вх}}^{\text{oc}}$  при  $f < f_0$  означает, что на этих частотах обратная связь по своему характеру является положительной, и, следовательно, входной колебательный контур «подпитывается» энергией, поступающей по цепи обратной связи с выхода транзистора. В результате этого эквивалентное затухание входного контура в этой области частот уменьшается, что приводит к сужению его полосы пропускания и увеличению резонансного коэффициента передачи. Если глубина обратной связи будет настолько большой, что потери энергии в контуре будут полностью скомпенсированы (т.е. активная составляющая  $g_{1-1'}^{\text{oc}}$  суммарной проводимости  $Y_{1-1'}^{\text{oc}}$  станет равной нулю), то произойдёт самовозбуждение каскада.

Положительное значение величины  $\Delta b_{\text{вх}}^{\text{oc}}$  означает, что реактивная составляющая приращения входной проводимости каскада имеет емкостной характер. Это равнозначно тому, что параллельно входному контуру подключается некоторая дополнительная ёмкость, которая уменьшает его резонансную частоту.



**Рис. 4.7. Зависимости от частоты активной (а) и реактивной (б) составляющих изменения входной проводимости каскада УРЧ при различной глубине внутренней обратной связи**

В отсутствие обратной связи комплексная проводимость входного контура равна

$$Y_{1-1'} = g_{\text{кэ}(1)} (1 + j\xi) . \quad (4.15)$$

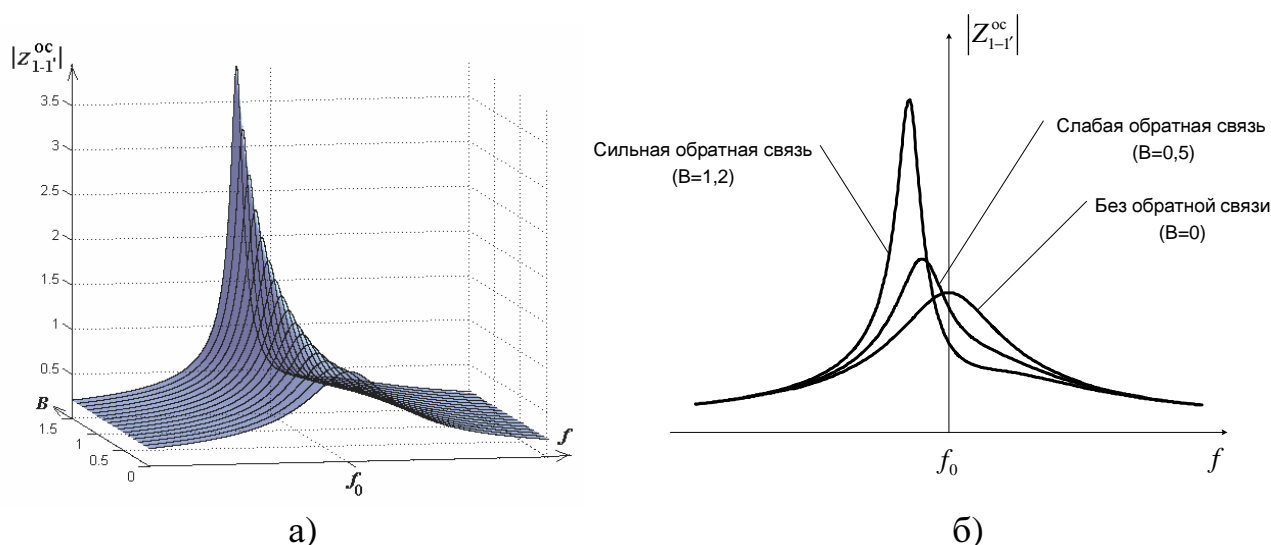
Подставляя (4.15) и (4.12) в (4.8), определим полную проводимость между точками 1–1':

$$Y_{1-1'}^{\text{oc}} = g_{\text{кэ}(1)} (1 + j\xi) + \frac{jB}{1 + j\xi}. \quad (4.16)$$

Форма АЧХ входного контура определяется частотной зависимостью модуля комплексного сопротивления между точками 1–1'

$$|Z_{1-1'}^{\text{oc}}| = \frac{1}{|Y_{1-1'}^{\text{oc}}|} = \left| \frac{1 + j\xi}{g_{\text{кэ}(1)} (1 + j\xi)(1 + j\xi) + jB} \right|. \quad (4.17)$$

Графики АЧХ входного контура, рассчитанной по формуле (4.17) при различной глубине обратной связи, а также при её отсутствии, приведены на рис. 4.8. Видно, что обратная связь приводит к уменьшению резонансной частоты, сужению полосы пропускания и увеличению резонансного сопротивления. Поскольку  $\Delta g_{\text{вх}}^{\text{oc}}$  и  $\Delta b_{\text{вх}}^{\text{oc}}$  зависят от частоты, то указанные изменения параметров входного контура сопровождаются искажением формы его АЧХ – она становится заметно несимметричной.



**Рис. 4.8. АЧХ входного контура каскада УРЧ при различной глубине внутренней обратной связи: а) трёхмерный график; б) семейство кривых**

Следует подчеркнуть, что при других способах включения транзистора (отличных от схемы с общим эмиттером) и в случае широкополосных УРЧ проведенный анализ устойчивости каскада не справедлив.

Количественно степень искажений АЧХ характеризуется **коэффициентом устойчивости** усилительного каскада, который определяется как отношение минимальной величины активной проводимо-

сти между точками  $1-1'$  к величине этой проводимости в отсутствие обратной связи (рис. 4.9):

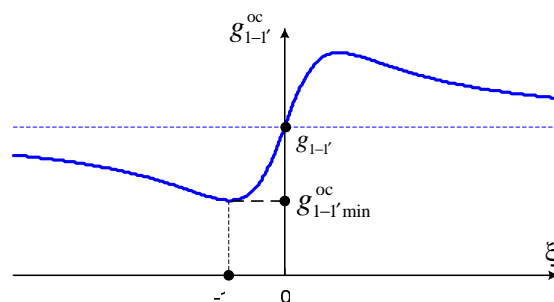
$$k_y = \frac{g_{1-1'}^{oc}}{g_{1-1'}}. \quad (4.18)$$

Поскольку при  $g_{1-1'}^{oc} = 0$  происходит самовозбуждение каскада, то коэффициент устойчивости всегда неотрицателен и может принимать значение от 0 до 1. При малой глубине внутренней обратной связи искажения АЧХ входного контура проявляются главным образом в уменьшении полосы пропускания. В этом случае

$$k_y \approx \frac{\Pi_{кз(1)}^{oc}}{\Pi_{кз(1)}}, \quad (4.19)$$

т.е. можно считать, что **коэффициент устойчивости характеризует относительное сужение полосы пропускания входного контура каскада УРЧ из-за внутренней обратной связи в транзисторе.**

Глубина внутренней обратной связи пропорциональна коэффициенту усиления каскада. Поэтому можно определить некоторый максимально допустимый коэффициент усиления каскада, при котором обеспечивается заданная величина коэффициента устойчивости – **коэффициент устойчивого усиления каскада.**



**Рис. 4.9. Активная проводимость между точками  $1-1'$**

Поскольку строгий количественный анализ устойчивости каскада УРЧ весьма громоздок, то приведём без вывода выражение, связывающее коэффициент устойчивости с параметрами транзистора и усилительного каскада,

$$k_y = 1 - \frac{|Y_{12}| |Y_{21}| m_{1(2)}^2 m_{2(1)}^2}{2 g_{кз(1)} g_{кз(2)}}, \quad (4.20)$$

а также выражение для коэффициента устойчивого усиления:

$$K_{0уст} = \frac{m_{2(2)}}{m_{2(1)}} \sqrt{2(1 - k_y) \frac{|Y_{21}| g_{кз(1)}}{|Y_{12}| g_{кз(2)}}}. \quad (4.21)$$

Здесь  $g_{кэ(1)} = m_{1(1)}^2 g_A + g_{к(1)} + m_{2(1)}^2 g_{вх.УРЧ}$  – эквивалентная резонансная проводимость контура ВЦ (см. (3.8));  $g_{вх.УРЧ}$  – входная проводимость каскада УРЧ.

Полагая в (4.21)  $k_y = 0$ , получим выражение для **предельного коэффициента усиления**, при котором наступает самовозбуждение каскада:

$$K_{0 \text{ пред}} = \frac{m_{2(2)}}{m_{2(1)}} \sqrt{2 \frac{|Y_{21}| g_{кэ(1)}}{|Y_{12}| g_{кэ(2)}}}. \quad (4.22)$$

Отношение  $K_{0 \text{ пред}} / K_{0 \text{ уст}}$  определяет запас по усилению каскада при заданном коэффициенте устойчивости:

$$\frac{K_{0 \text{ пред}}}{K_{0 \text{ уст}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - k_y}}. \quad (4.23)$$

Обычно считают, что искажения АЧХ входного контура допустимо малы, если  $k_y = 0,8 - 0,9$ . В частности, при  $k_y = 0,9$  отношение предельного коэффициента усиления к коэффициенту устойчивого усиления равно

$$\frac{K_{0 \text{ пред}}}{K_{0 \text{ уст}}} = \sqrt{10} \approx 3,2,$$

т.е. в данном случае имеется примерно трёхкратный запас по усилению. С учётом этого можно дать следующее количественное определение устойчивого режима работы каскада УРЧ:

**устойчивый режим работы каскада УРЧ – это такой режим, при котором коэффициент устойчивости не менее заданной величины (обычно 0,8 – 0,9). При этом есть достаточно большой запас по усилению (в 2 – 3 раза) по сравнению с режимом, в котором наступает самовозбуждение.**

Основной практический вывод из анализа устойчивости каскада УРЧ состоит в следующем:

**коэффициент усиления каскада не должен превышать коэффициента устойчивого усиления, который зависит от параметров транзистора и параметров каскада.**

### 4.5. Режимы работы УРЧ

В п. 4.3 было получено выражение (4.6) для резонансного коэффициента усиления каскада по напряжению

$$K_0 = \frac{m_{1(2)} m_{2(2)} |Y_{21}|}{g_{кэ(2)}}.$$

В зависимости от выбора коэффициентов включения  $m_{1(2)}$  и  $m_{2(2)}$  транзистора и нагрузки в выходной колебательный контур возможны различные режимы работы каскада УРЧ. Каждый из этих режимов характеризуется своим определенным значением коэффициента усиления, коэффициента устойчивого усиления и коэффициента расширения полосы. Рассмотрим эти режимы.

#### 4.5.1. Режим максимального усиления при заданной полосе пропускания

При заданной полосе пропускания выходного контура каскада УРЧ  $\Pi_{кэ(2)}$  известен коэффициент расширения полосы  $\gamma = \frac{\Pi_{кэ(2)}}{\Pi_{к(2)}}$ . Зная

$\gamma$ , выразим один из коэффициентов включения через другой – например,  $m_{1(2)}$  через  $m_{2(2)}$ . Для этого на основании (3.12) запишем коэффициент расширения полосы как отношение эквивалентной резонансной проводимости контура к собственной резонансной проводимости:

$$\gamma = \frac{g_{кэ(2)}}{g_{к(2)}} = \frac{g_{к(2)} + m_{1(2)}^2 g_{22} + m_{2(2)}^2 g_H}{g_{к(2)}} = 1 + \frac{m_{1(2)}^2 g_{22} + m_{2(2)}^2 g_H}{g_{к(2)}}. \quad (4.24)$$

Отсюда получим, что

$$(\gamma - 1) g_{к(2)} = m_{1(2)}^2 g_{22} + m_{2(2)}^2 g_H,$$

и, следовательно,

$$m_{1(2)} = \sqrt{\frac{(\gamma - 1) g_{к(2)} - m_{2(2)}^2 g_H}{g_{22}}}. \quad (4.25)$$

Затем, подставляя (4.25) в общую формулу (4.6) для коэффициента усиления и учитывая, что  $g_{кэ(2)} = \gamma g_{к(2)}$ , запишем коэффициент уси-



ления в рассматриваемом режиме как функцию только одного коэффициента включения –  $m_{2(2)}$ :

$$K_0 = \frac{m_{1(2)} m_{2(2)} |Y_{21}|}{\gamma g_{к(2)}} = \frac{m_{2(2)} |Y_{21}|}{\gamma g_{к(2)}} \sqrt{\frac{(\gamma-1) g_{к(2)} - m_{2(2)}^2 g_{н}}{g_{22}}}.$$

Для того чтобы определить оптимальное значение коэффициента включения, при котором коэффициент усиления будет максимальным, найдём производную  $\frac{dK_0}{dm_{2(2)}}$  и приравняем её нулю:

$$\frac{dK_0}{dm_{2(2)}} = \frac{|Y_{21}|}{\gamma g_{к(2)}} \left[ \sqrt{\frac{(\gamma-1) g_{к(2)} - m_{2(2)}^2 g_{н}}{g_{22}}} + \frac{m_{2(2)}}{2 \sqrt{\frac{(\gamma-1) g_{к(2)} - m_{2(2)}^2 g_{н}}{g_{22}}}} \left( -\frac{2 g_{н}}{g_{22}} m_{2(2)} \right) \right] = 0.$$

В результате получим уравнение

$$(\gamma-1) g_{к(2)} - 2 m_{2(2)}^2 g_{н} = 0,$$

решение которого определяет оптимальный коэффициент включения:

$$m_{2(2)м} = \sqrt{\frac{(\gamma-1) g_{к(2)}}{2 g_{н}}}. \quad (4.26)$$

Подставляя (4.26) в выражение (4.25), связывающее  $m_{1(2)}$  с  $m_{2(2)}$ , найдём оптимальное значение другого коэффициента включения:

$$m_{1(2)м} = \sqrt{\frac{(\gamma-1) g_{к(2)}}{2 g_{22}}}. \quad (4.27)$$

Сравним полученные выражения для оптимальных коэффициентов включения. Видно, что они имеют одинаковый вид и различаются только проводимостью, стоящей в знаменателе: в формуле (4.27) для коэффициента включения транзистора  $m_{1(2)м}$  в знаменателе стоит выходная проводимость транзистора  $g_{22}$ , а в формуле (4.26) для коэффициента включения нагрузки  $m_{2(2)м}$  – проводимость нагрузки  $g_{н}$ . Следовательно, справедливо следующее равенство:

$$m_{1(2)м}^2 g_{22} = m_{2(2)м}^2 g_{н}. \quad (4.28)$$

Его левая часть – это не что иное, как выходная проводимость транзистора, пересчитанная в контур, а правая часть – проводимость нагруз-

ки, пересчитанная в контур. Равенство этих проводимостей означает, что в рассматриваемом режиме выходной контур каскада УРЧ в одинаковой степени шунтируется как со стороны транзистора, так и со стороны нагрузки. В связи с этим режим максимального усиления при заданной полосе пропускания называют ещё *режимом равного шунтирования*.

Теперь, подставляя (4.26) и (4.27) в (4.6), найдём резонансный коэффициент усиления при оптимальных коэффициентах включения, т.е. максимально возможный коэффициент усиления:

$$K_{0м} = \frac{m_{1(2)м} m_{2(2)м} |Y_{21}|}{\gamma g_{к(2)}} = \frac{|Y_{21}|}{2\sqrt{g_{22}g_n}} \frac{\gamma - 1}{\gamma}. \quad (4.29)$$

Из полученного выражения следует, что для увеличения коэффициента усиления нужно:

1. уменьшать проводимость нагрузки, т.е. увеличивать входное сопротивление следующего каскада;
2. использовать транзистор с большой крутизной и малой выходной проводимостью;
3. увеличивать собственную добротность выходного контура, поскольку это приводит к сужению его полосы пропускания и, следовательно, к увеличению коэффициента расширения полосы.

Отметим, что режим максимального усиления – это единственный из режимов работы УРЧ, который позволяет реализовать узкополосный усилительный каскад с  $\gamma < 2$ . Из (4.29) следует, что этому режиму присуща интересная закономерность: по мере увеличения допустимого расширения полосы пропускания растёт и значение его коэффициента усиления.

При проектировании каскада УРЧ максимальный коэффициент усиления должен быть сопоставлен с коэффициентом устойчивого усиления для данного режима. Если окажется, что  $K_{0м} > K_{0уст}$ , то нужно отказаться от режима максимального усиления и использовать другие режимы работы усилительного каскада, некоторые из которых рассмотрены ниже.

### 4.5.2. Режим согласования с нагрузкой при заданной полосе пропускания

Режим согласования с нагрузкой, как следует из его названия, используется в том случае, когда необходимо обеспечить согласование выходного сопротивления каскада УРЧ с сопротивлением нагрузки, например, при работе УРЧ на кабель. При этом, как и ранее, накладывается ограничение на полосу пропускания каскада.

Условием согласования является равенство выходной проводимости контура каскада УРЧ со стороны нагрузки и проводимости нагрузки:

$$g_{\text{вых}(2)} = g_{\text{н}}. \quad (4.30)$$

Поскольку  $g_{\text{вых}(2)} = \frac{m_{1(2)}^2 g_{22} + g_{\text{к}(2)}}{m_{2(2)}^2}$ , то из условия согласования (4.30) следует, что

$$m_{1(2)}^2 g_{22} + g_{\text{к}(2)} = m_{2(2)}^2 g_{\text{н}}. \quad (4.31)$$

Для определения требуемого значения коэффициента включения  $m_{2(2)}$  в данном режиме дополним левую часть равенства (4.31) до выражения (4.5) для  $g_{\text{кэ}(2)}$ :

$$m_{1(2)}^2 g_{22} + g_{\text{к}(2)} + m_{2(2)}^2 g_{\text{н}} = 2m_{2(2)}^2 g_{\text{н}}, \quad (4.32)$$

а затем запишем  $g_{\text{кэ}(2)}$  как  $\gamma g_{\text{к}(2)}$ :

$$\gamma g_{\text{к}(2)} = 2m_{2(2)}^2 g_{\text{н}}. \quad (4.33)$$

Из (4.33) найдём коэффициент включения нагрузки в выходной контур в режиме согласования при заданной полосе пропускания:

$$m_{2(2)\text{с}} = \sqrt{\frac{\gamma g_{\text{к}(2)}}{2g_{\text{н}}}}. \quad (4.34)$$

Аналогичным образом, исходя из условия согласования (4.30) и дополняя правую часть этого равенства до выражения для  $g_{\text{кэ}(2)}$ , найдём коэффициент включения транзистора в выходной контур в режиме согласования с нагрузкой при заданной полосе пропускания:

$$m_{1(2)\text{с}} = \sqrt{\frac{(\gamma - 2) g_{\text{к}(2)}}{2g_{22}}}. \quad (4.35)$$

Поскольку подкоренное выражение должно быть положительным, то из (4.35) следует, что в отличие от режима максимального усиления, данный режим можно реализовать только при  $\gamma > 2$ .

Для определения резонансного коэффициента усиления в режиме согласования с нагрузкой подставим выражения (4.34) и (4.35) для коэффициентов включения в общую формулу (4.6) для коэффициента усиления и учтём, что  $g_{кэ(2)} = \gamma g_{к(2)}$ :

$$K_{0c} = \frac{m_{1(2)c} m_{2(2)c} |Y_{21}|}{\gamma g_{к2}} = \frac{|Y_{21}|}{2\sqrt{g_{22}g_n}} \sqrt{\frac{\gamma-2}{\gamma}}. \quad (4.36)$$

Поскольку условие согласования с нагрузкой накладывает дополнительные ограничения на значения коэффициентов включения, то усиление в этом режиме меньше, чем в режиме максимального усиления. Используя формулы (4.36) и (4.29), определим это уменьшение количественно:

$$\frac{K_{0c}}{K_{0м}} = \frac{\frac{|Y_{21}|}{2\sqrt{g_{22}g_n}} \sqrt{\frac{\gamma-2}{\gamma}}}{\frac{|Y_{21}|}{2\sqrt{g_{22}g_n}} \frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{\sqrt{\gamma(\gamma-2)}}{\gamma-1}. \quad (4.37)$$

При  $\gamma = 3$  отношение коэффициентов усиления равно  $\frac{K_{0c}}{K_{0м}} \approx 0,87$ . Следовательно, при  $\gamma > 3$  коэффициент усиления в режиме согласования практически такой же, как и в режиме максимального усиления.

Сопоставим по устойчивости режим максимального усиления и режим согласования. Поскольку при заданном коэффициенте расширения полосы  $\gamma$  различным режимам работы УРЧ соответствуют различные значения коэффициентов включения  $m_{1(2)}$  и  $m_{2(2)}$ , то посмотрим, каким образом от величины этих коэффициентов зависит коэффициент устойчивого усиления каскада. Для этого запишем формулу (4.21) для коэффициента устойчивого усиления в следующем виде:

$$K_{0уст} = \frac{m_{2(2)}}{m_{2(1)}} \sqrt{2(1-k_y) \frac{|Y_{21}| g_{кэ(1)}}{|Y_{12}| \gamma g_{к(2)}}}.$$

Видно, что при неизменности всех прочих параметров коэффициент устойчивого усиления прямо пропорционален коэффициенту включе-

ния  $m_{2(2)}$ . Значения этого коэффициента в режиме максимального усиления и в режиме согласования определяются формулами (4.26) и (4.34) соответственно:

$$m_{2(2)м} = \sqrt{\frac{(\gamma-1)g_{к(2)}}{2g_{н}}}, \quad m_{2(2)с} = \sqrt{\frac{\gamma g_{к(2)}}{2g_{н}}}.$$

Видно, что  $m_{2(2)с} > m_{2(2)м}$  и что, следовательно, в режиме согласования коэффициент устойчивого усиления больше, чем в режиме максимального усиления. В то же время, как было отмечено ранее, коэффициент усиления в режиме согласования меньше:

$$K_{0с} < K_{0м}.$$

Это позволяет сделать вывод, что если при проектировании каскада УРЧ окажется, что режим максимального усиления нереализуем с точки зрения устойчивости, то следует перейти к режиму согласования<sup>\*)</sup>. Если же и в режиме согласования условие устойчивости не выполняется, то нужно использовать **режим ограниченного усиления**, который рассматривается ниже.

### 4.5.3. Режим ограниченного усиления при заданной полосе пропускания

Режим ограниченного усиления применяется в том случае, когда в обоих рассмотренных выше режимах коэффициент усиления превышает коэффициент устойчивого усиления. В режиме ограниченного усиления коэффициенты включения коллекторной цепи транзистора и нагрузки в выходной колебательный контур определяются исходя из условия

$$K_{0огр} \leq K_{0уст}. \quad (4.38)$$

Подставляя в (4.38) выражение (4.6) для коэффициента усиления и (4.21) для коэффициента устойчивого усиления, получим неравенство

$$\frac{m_{1(2)}m_{2(2)}|Y_{21}|}{g_{кэ(2)}} \leq \frac{m_{2(2)}}{m_{2(1)}} \sqrt{2(1-k_y) \frac{|Y_{21}|g_{кэ(1)}}{|Y_{12}|g_{кэ(2)}}}, \quad (4.39)$$

которое после возведения в квадрат приводится к следующему виду:

<sup>\*)</sup> Если коэффициент расширения полосы  $\gamma \leq 3$ . В противном случае эти режимы практически не отличаются.

$$\frac{m_{1(2)}^2 |Y_{21}|}{g_{кэ(2)}} \leq \frac{2(1-k_y) g_{кэ(1)}}{m_{2(1)}^2 |Y_{12}|}. \quad (4.40)$$

Отсюда следует, что

$$m_{1(2)}^2 \leq \frac{2(1-k_y) g_{кэ(1)} g_{кэ(2)}}{m_{2(1)}^2 |Y_{12}| |Y_{21}|}. \quad (4.41)$$

Поскольку  $g_{кэ(2)} = \gamma g_{к(2)}$ , то (4.41) даёт следующее неравенство, определяющее допустимые значения коэффициента включения  $m_{1(2)}$ :

$$m_{1(2)огр} \leq \frac{1}{m_{2(1)}} \sqrt{\frac{2(1-k_y) g_{кэ(1)} \gamma g_{к(2)}}{|Y_{12}| |Y_{21}|}}. \quad (4.42)$$

После определения  $m_{1(2)огр}$  коэффициент включения  $m_{2(2)}$  находится из выражения для эквивалентной резонансной проводимости выходного контура в рассматриваемом режиме

$$g_{кэ(2)} = m_{1(2)огр}^2 g_{22} + g_{к(2)} + m_{2(2)огр}^2 g_{н}. \quad (4.43)$$

Подставляя в (4.43)  $g_{кэ(2)} = \gamma g_{к(2)}$ , получим:

$$m_{2(2)огр} = \sqrt{\frac{(\gamma-1) g_{к(2)} - m_{1(2)огр}^2 g_{22}}{g_{н}}}. \quad (4.44)$$

Если окажется, что рассчитанное по формуле (4.44) значение  $m_{2(2)огр}$  больше единицы, то нужно принять  $m_{2(2)огр} = 1$  (т.е. использовать полное включение нагрузки) и подключить параллельно контуру шунтирующий резистор с проводимостью

$$g_{ш} = g_{кэ(2)} - (g_{к(2)} + g_{н} + m_{1(2)огр}^2 g_{22}) = (\gamma-1) g_{к(2)} - (g_{н} + m_{1(2)огр}^2 g_{22}). \quad (4.45)$$

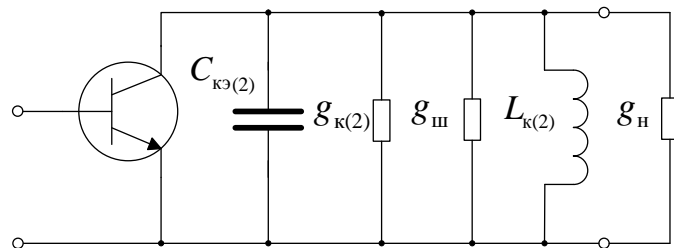
Коэффициент усиления каскада в режиме ограниченного усиления рассчитывается по общей формуле:

$$K_{0огр} = \frac{m_{1(2)огр} m_{2(2)огр} |Y_{21}|}{\gamma g_{к(2)}}. \quad (4.46)$$

Коэффициент устойчивого усиления может быть найден по формуле (4.21), однако практически в его определении нет необходимости, поскольку в рассматриваемом режиме условие устойчивости заведомо выполняется.

#### 4.5.4. Режим широкополосного усиления (режим непосредственного включения)

Данный режим используется в широкополосных УРЧ, когда нужно обеспечить требуемую широкую полосу пропускания. В этом случае применяется полное включение транзистора и нагрузки в колеба-



**Рис. 4.10. Эквивалентная схема каскада УРЧ в режиме непосредственного включения**

тельный контур:  $m_{1(2)} = m_{2(2)} = 1$ . Для дополнительного расширения полосы параллельно колебательному контуру включается шунтирующий резистор (шунт) (рис. 4.10). Определим требуемую проводимость шунта  $g_{ш}$ . Если необходимо получить полосу пропускания  $\Pi_{кэ(2)}^{тр}$ , а поло-

са пропускания изолированного контура равна  $\Pi_{к(2)}$ , то требуемый коэффициент расширения полосы определяется как

$$\gamma^{тр} = \frac{\Pi_{кэ(2)}^{тр}}{\Pi_{к(2)}} = \frac{g_{кэ(2)}^{тр}}{g_{к(2)}}, \quad (4.47)$$

где  $g_{кэ(2)}^{тр}$  – требуемая эквивалентная резонансная проводимость колебательного контура. Поскольку  $m_{1(2)} = m_{2(2)} = 1$ , то

$$g_{кэ(2)}^{тр} = g_{22} + g_{к(2)} + g_{н} + g_{ш}.$$

Следовательно,

$$g_{ш} = g_{кэ(2)}^{тр} - (g_{22} + g_{к(2)} + g_{н}) = (\gamma^{тр} - 1) g_{к(2)} - (g_{22} + g_{н}). \quad (4.48)$$

В соответствии с общей формулой (4.6) коэффициент усиления в режиме непосредственного включения равен

$$K_{0шир} = \frac{|Y_{21}|}{g_{кэ(2)}^{тр}} = \frac{|Y_{21}|}{2\pi C_{кэ(2)} \Pi_{кэ(2)}^{тр}}. \quad (4.49)$$

Видно, что в данном режиме, в отличие от режимов максимального усиления и согласования, при увеличении требуемой полосы пропускания каскада коэффициент усиления уменьшается. Это объясняется тем, что расширение полосы пропускания выходного колебательного контура достигается не за счёт увеличения коэффициентов включения, которые в режиме непосредственного включения имеют максимально возмож-



ную величину, равную единице, а за счёт подключения шунтирующего резистора. Из формулы (4.49) следует также, что для увеличения коэффициента усиления нужно уменьшать эквивалентную ёмкость контура.

В заключение раздела сформулируем условия практической реализуемости каскада УРЧ, которые должны выполняться при любом режиме работы:

1. коэффициенты включения транзистора и нагрузки в выходной колебательный контур должны быть не больше единицы;
2. резонансный коэффициент усиления не должен превышать коэффициента устойчивого усиления для данного режима;
3. элементы колебательного контура должны быть конструктивно реализуемы: индуктивность контурной катушки должна быть не менее  $L_{\text{к min}} = 0,05 \text{ мкГн}$ ; ёмкость конденсатора должна быть не менее  $C_{\text{к min}} = 2 - 5 \text{ пФ}$ .

## 4.6. Методы повышения устойчивости УРЧ

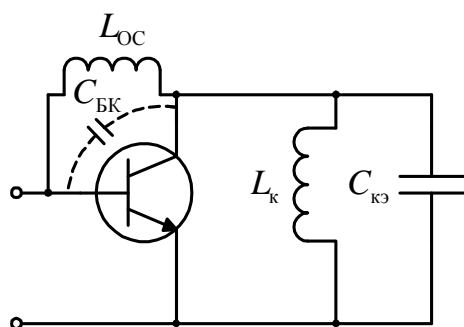
Существуют две группы методов повышения устойчивости каскада УРЧ:

- пассивные;
- активные.

**Пассивные методы** основаны на снижении усиления каскада до величины коэффициента устойчивого усиления выбором коэффициентов включения  $m_{1(2)}$  и  $m_{2(2)}$ . Такой подход использован в режиме ограниченного усиления.

**Активные методы** основаны на увеличении коэффициента устойчивого усиления. К таким методам относятся следующие два.

1) Нейтрализация внутренней обратной связи в усилительном приборе за счёт дополнительной внешней обратной связи. Пример использования этого метода показан на рис. 4.12. Здесь дополнительно включённая катушка индуктивности  $L_{OC}$  образует с внутренней паразитной ёмкостью  $C_{БК}$  параллельный колебательный контур (режекторный фильтр), настроенный на частоту сигнала  $f_0$ . Величина нейтрализующей индуктивности определяется из



**Рис. 4.12. Нейтрализация внутренней обратной связи**

условия резонанса:

$$2\pi f_0 C_{БК} = \frac{1}{2\pi f_0 L_{OC}} \Rightarrow L_{OC} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_{БК}}.$$

Данный способ повышения устойчивости каскада применяется сравнительно редко, т.к. паразитная ёмкость внутренней обратной связи имеет разброс и зависит от температуры.

2) Использование других способов включения транзистора: схемы с общей базой (ОБ) или каскодной схемы «общий эмиттер – общая база», содержащей два транзистора<sup>\*)</sup>.

<sup>\*)</sup> Для полевых транзисторов используются соответственно схема с общим затвором и каскодная схема «общий исток – общий затвор».

### Каскад УРЧ с общей базой

Рассмотрим схему и основные характеристики каскада УРЧ при включении транзистора с общей базой. Принципиальная схема каскада показана на рис. 4.13. По постоянному току эта схема не отличается от схемы с общим эмиттером, рассмотренной в п. 4.2. Усиливаемый сигнал подаётся с входного колебательного контура через разделительный конденсатор  $C_{p1}$  на эмиттер транзистора. База транзистора, которая является общим электродом для входного и выходного сигналов, заземлена по высокой частоте через блокировочный конденсатор  $C_6$ . Резистор  $R_\phi$  и конденсатор  $C_\phi$ , так же как и схеме с общим эмиттером, образуют развязывающий фильтр, который предотвращает попадание усиленного сигнала в цепь питания и тем самым устраняет паразитную межкаскадную обратную связь.  $C_{p2}$  – разделительный конденсатор.

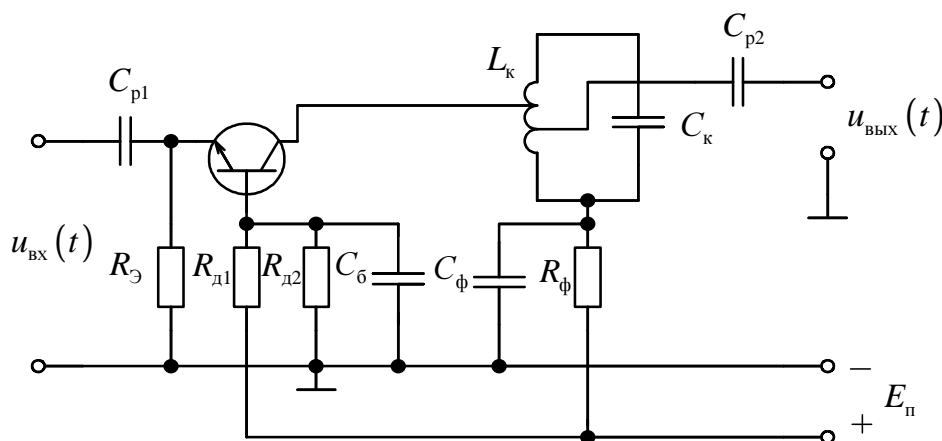


Рис. 4.13. Каскад УРЧ с общей базой

Схема с ОБ имеет следующие особенности по сравнению со схемой с ОЭ:

- в схеме с ОБ усиливаемый сигнал не инвертируется; это связано с тем, что в данной схеме управляющее напряжение транзистора  $u_{БЭ}(t)$  равно  $-u_{БХ}(t)$ , а не  $+u_{БХ}(t)$ , как в схеме с ОЭ (см. рис. 4.3);
- выходной (коллекторный) ток протекает через цепь эмиттера, который в данной схеме является входным электродом (см. рис. 4.14); в результате возникает 100%-я параллельная отрицательная обратная связь по току, которая значительно увеличивает входную проводимость каскада:

$$g_{\text{вх ОБ}} \gg g_{\text{вх ОЭ}}.$$

$Y$ -параметры транзистора, включённого по схеме с ОБ, выражаются через  $Y$ -параметры в схеме с ОЭ следующим образом:

$$Y_{11ОБ} = Y_{11ОЭ} + Y_{12ОЭ} + Y_{21ОЭ} + Y_{22ОЭ} \approx Y_{21ОЭ}, \quad (4.50,а)$$

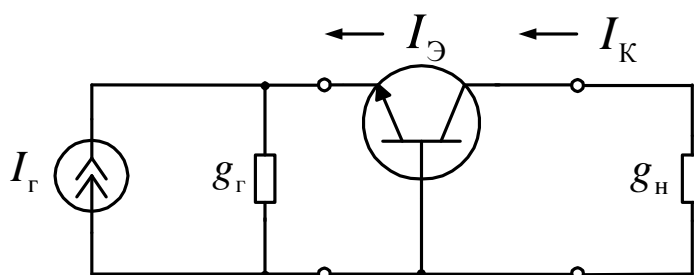
$$Y_{12ОБ} = -(Y_{12ОЭ} + Y_{22ОЭ}), \quad (4.50,б)$$

$$Y_{21ОБ} = -(Y_{21ОЭ} + Y_{22ОЭ}) \approx -Y_{21ОЭ}, \quad (4.50,в)$$

$$Y_{22ОБ} = Y_{22ОЭ}. \quad (4.50,г)$$

В соответствии с (4.6) резонансный коэффициент усиления по напряжению каскада с ОБ равен

$$K_{0ОБ} = \frac{m_{1(2)} m_{2(2)} |Y_{21ОБ}|}{g_{кэ(2)}}. \quad (4.51)$$



**Рис. 4.14. Эквивалентная схема каскада УРЧ с общей базой. Входной ток  $I_{вх} = I_{Э} \approx I_{К} \gg I_{Б}$**

Из (4.50,б) следует, что транзистор, включённый по схеме с ОБ, обладает большей проводимостью внутренней обратной связи  $Y_{12}$ , чем при включении по схеме с ОЭ. Следовательно, под действием

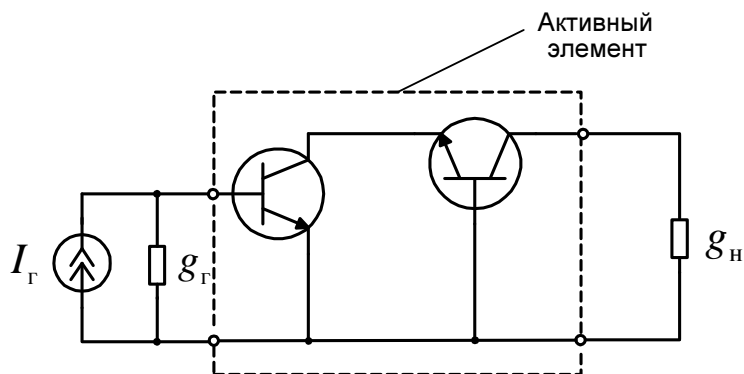
выходного напряжения по цепи обратной связи протекает большой ток. Однако, поскольку входная проводимость транзистора в схеме с ОБ значительно больше, чем в схеме с ОЭ (см. (4.50,а)), то этот ток обратной связи создаёт на входе транзистора меньшее падение напряжения, чем в схеме с ОЭ. Строгий количественный анализ также показывает, что при включении транзистора с ОБ коэффициент устойчивого усиления каскада больше, чем при использовании схемы с ОЭ.

Основной недостаток схемы с ОБ – низкое входное сопротивление каскада, что приводит к уменьшению коэффициента передачи ВЦ (если данный каскад УРЧ является первым) либо коэффициента усиления предыдущего каскада. Поэтому такая схема используется сравнительно редко. Гораздо большее распространение получила комбинированная схема, построенная на двух транзисторах, первый из которых включён по схеме с ОЭ, а второй – по схеме с ОБ. Такая схема называется **каскадной**.

### Каскодная схема УРЧ

Рассмотрим каскодную схему на биполярных транзисторах. Аналогичная схема может быть построена на полевых транзисторах (когда первый транзистор включён по схеме с общим истоком (ОИ), а второй – по схеме с общим затвором (ОЗ)) или на комбинации полевого транзистора (схема с ОИ) и биполярного (схема с ОБ).

Особенность каскодной схемы состоит в том, что два транзистора соединяются между собой непосредственно, без промежуточного колебательного контура (рис. 4.15). Такую пару транзисторов можно рассматривать как один активный элемент, характеризующий эквивалентными  $Y$ -параметрами:



**Рис. 4.15. Эквивалентная схема каскодно-соединённых транзисторов: первый транзистор включён по схеме с ОЭ, второй – по схеме с ОБ**

$$Y_{11к} = Y_{11ОЭ} - \frac{Y_{12ОЭ}Y_{21ОЭ}}{Y_{\Sigma} + Y_{22ОЭ}} \approx Y_{11ОЭ}, \quad (4.52,а)$$

$$Y_{12к} = \frac{Y_{12ОЭ}(Y_{12ОЭ} + Y_{22ОЭ})}{Y_{\Sigma} + Y_{22ОЭ}} \approx \frac{Y_{12ОЭ}Y_{22ОЭ}}{Y_{21ОЭ}}, \quad (4.52,б)$$

$$Y_{21к} = \frac{Y_{21ОЭ}(Y_{21ОЭ} + Y_{22ОЭ})}{Y_{\Sigma} + Y_{22ОЭ}} \approx Y_{21ОЭ}, \quad (4.52,в)$$

$$\begin{aligned} Y_{22к} &= Y_{22ОЭ} - \frac{(Y_{12ОЭ} + Y_{22ОЭ})(Y_{21ОЭ} + Y_{22ОЭ})}{Y_{\Sigma} + Y_{22ОЭ}} \approx \\ &\approx \frac{Y_{11ОЭ}Y_{22ОЭ} - Y_{12ОЭ}Y_{21ОЭ}}{Y_{21ОЭ} + Y_{11ОЭ}} \approx -Y_{12ОЭ}. \end{aligned} \quad (4.52,г)$$

Здесь  $Y_{\Sigma} = Y_{11ОЭ} + Y_{12ОЭ} + Y_{21ОЭ} + Y_{22ОЭ}$ .

Резонансный коэффициент усиления по напряжению каскада УРЧ, построенного по каскодной схеме, равен

$$K_{0к} = \frac{m_{1(2)} m_{2(2)} |Y_{21к}|}{g_{кэ(2)}}. \quad (4.53)$$

Поскольку  $|Y_{21к}| \approx |Y_{21оэ}|$ , то при тех же значениях коэффициентов включения, что и для схемы с ОЭ,

$$K_{0к} \approx K_{0оэ}. \quad (4.54)$$

Если же учесть, что  $g_{22к} \approx |g_{12оэ}| \ll g_{22оэ}$ , то можно увеличить коэффициент включения  $m_{1(2)}$  транзистора в колебательный контур. В этом случае коэффициент усиления каскодной схемы будет больше, чем схемы с ОЭ.

В каскодной схеме, так же как и в схеме с ОЭ, происходит инверсия усиливаемого сигнала.

Считая параметры транзисторов одинаковыми, определим, какой вклад вносит в результирующий коэффициент усиления каждый из транзисторов каскодной пары. Поскольку нагрузкой первого транзистора является входная проводимость второго транзистора, включённого по схеме с ОБ, то коэффициент усиления первого транзистора по напряжению равен

$$K_1 = \frac{|Y_{21оэ}|}{|Y_{22оэ} + Y_{11об}|}. \quad (4.55)$$

В соответствии с (4.50,а)  $Y_{11об} \approx Y_{21оэ}$ , а поскольку  $|Y_{22оэ}| \ll |Y_{21оэ}|$ , то знаменатель (4.55) приближённо равен  $|Y_{21оэ}|$ . Следовательно  $K_1 \approx 1$ . Таким образом, первый транзистор по напряжению сигнал не усиливает. Его функция состоит в том, что он, во-первых, усиливая сигнал по току, запитывает второй транзистор, а во-вторых, обеспечивает сравнительно высокое входное сопротивление каскодной пары. Другими словами, он создаёт развязку между источником сигнала и вторым транзистором, включённым по схеме с ОБ.

Коэффициент усиления по напряжению второго транзистора, включённого по схеме с ОБ, равен

$$K_2 = K_{0об} \approx K_{0оэ}.$$

Следовательно, усиление по напряжению в каскодной схеме обеспечивается вторым транзистором.

Коэффициент устойчивого усиления каскодной схемы рассчитывается по общей формуле (4.21), но с использованием эквивалентных  $Y$ -параметров (4.52). Оценим выигрыш в коэффициенте устойчивого усиления при переходе от схемы с ОЭ к каскодной схеме, считая значения эквивалентных резонансных проводимостей контуров  $g_{кэ(1)}$  и  $g_{кэ(2)}$  неизменными и принимая, что

$$|Y_{21к}| \approx |Y_{21ОЭ}|, \quad (4.56)$$

$$|Y_{12к}| \approx \left| \frac{Y_{12ОЭ} Y_{22ОЭ}}{Y_{21ОЭ}} \right|. \quad (4.57)$$

Подстановка (4.56) и (4.57) в (4.21) даёт приближённое выражение для коэффициента устойчивого усиления каскодной схемы:

$$K_{0 \text{ уст.к}} \approx \frac{m_{2(2)}}{m_{2(1)}} \sqrt{2(1 - k_y) \frac{g_{кэ(1)} |Y_{21ОЭ}|}{g_{кэ(2)} |Y_{12ОЭ}| |Y_{22ОЭ}| / |Y_{21ОЭ}|}}. \quad (4.58)$$

Разделив (4.58) на (4.21), найдём выигрыш в коэффициенте устойчивого усиления:

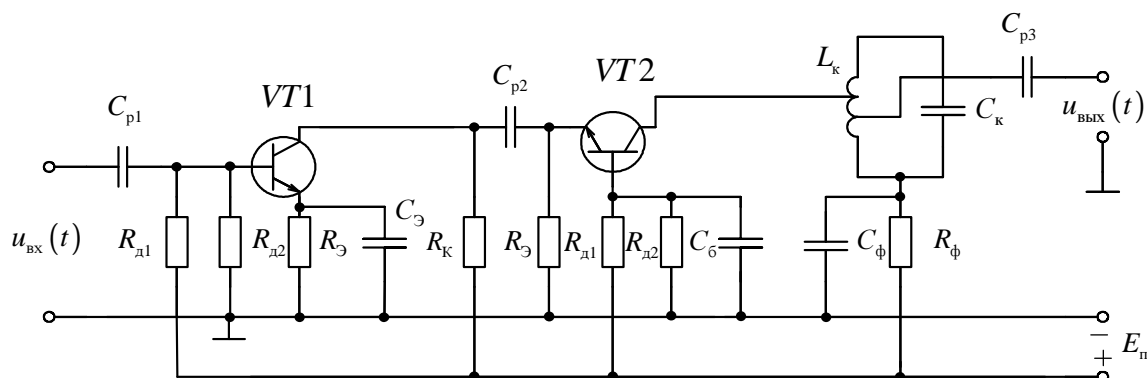
$$\frac{K_{0 \text{ уст.к}}}{K_{0 \text{ уст.ОЭ}}} \approx \sqrt{\frac{|Y_{21ОЭ}|}{|Y_{22ОЭ}|}}. \quad (4.59)$$

Поскольку в области средних частот крутизна транзистора, включённого по схеме с ОЭ,  $|Y_{21ОЭ}|$  обычно превышает выходную проводимость  $|Y_{22ОЭ}|$  в 4 – 25 раз, то выигрыш в коэффициенте устойчивого усиления составляет 2 – 5 раз. При этом, как правило, в УРЧ удаётся реализовать режим максимального усиления.

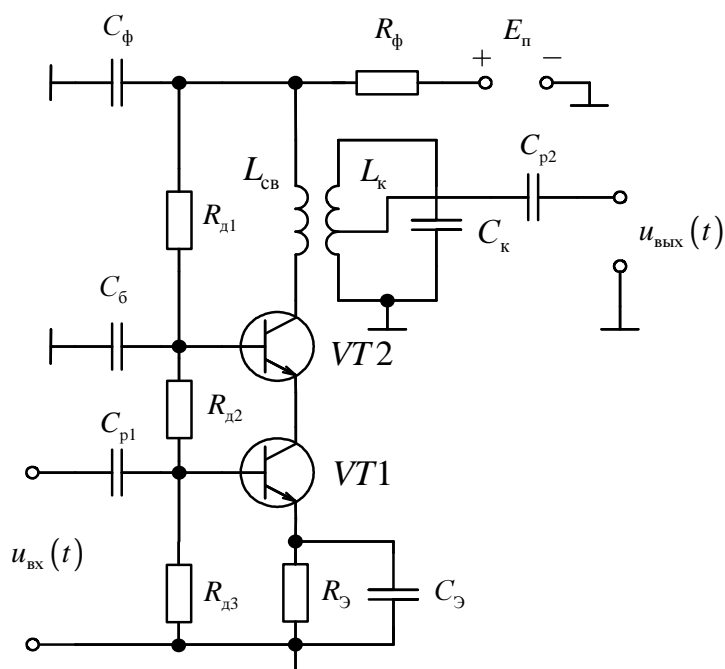
В каскодной схеме транзисторы включены по переменному току последовательно. При этом напряжение питания транзисторов может подаваться как последовательно, так и параллельно. На рис. 4.16 изображён вариант каскодной схемы каскада УРЧ с параллельным питанием, а на рис. 4.17 – с последовательным питанием. Назначение элементов этих схем – такое же как назначение аналогичных элементов ранее рассмотренных схем с ОЭ и ОБ. Достоинство схемы с последовательным питанием – отсутствие разделительного конденсатора между транзисторами, что делает её удобной для использования в микро-



схемах. Однако такая схема требует вдвое большего напряжения питания.



**Рис. 4.16. Каскодная схема каскада УРЧ с параллельным питанием**



**Рис. 4.17. Каскодная схема каскада УРЧ с последовательным питанием**

## 4.7. Контрольные вопросы и задачи

### Примеры ответа на типовые контрольные вопросы

**Вопрос 4.1.** Какие функции выполняет УРЧ в составе супергетеродинного радиоприёмника?

**Ответ.** В составе супергетеродинного радиоприёмника усилитель радиочастоты выполняет две основные функции: 1) совместно с входной

цепью обеспечивает избирательность приёмника по паразитным каналам приёма; 2) осуществляет предварительное усиление сигнала и тем самым повышает шумовую чувствительность приёмника.

**Вопрос 4.2.** При каком условии каскад УРЧ имеет максимальный резонансный коэффициент усиления при заданной полосе пропускания?

**Ответ.** В соответствии с (4.28) режим максимального усиления при заданной полосе пропускания реализуется при условии, что выходная проводимость транзистора и проводимость нагрузки в одинаковой степени шунтируют колебательный контур.

**Вопрос 4.3.** Что понимают под устойчивой работой каскада УРЧ? Что является количественной мерой устойчивости?

**Ответ.** Считается, что каскад УРЧ работает устойчиво, если искажение АЧХ входного контура усилителя, вызванное влиянием паразитной внутренней обратной связи в усилительном приборе, не превышает некоторой допустимой величины. Нарушение условия устойчивости не обязательно приводит к самовозбуждению каскада: в устойчивом режиме, как правило, существует большой (в 2-3 раза) запас по усилению по сравнению с режимом, в котором наступает самовозбуждение. Количественной мерой устойчивости является *коэффициент устойчивости*, который приблизительно равен относительному сужению полосы пропускания входного контура за счёт действия внутренней обратной связи.

### **Контрольные вопросы**

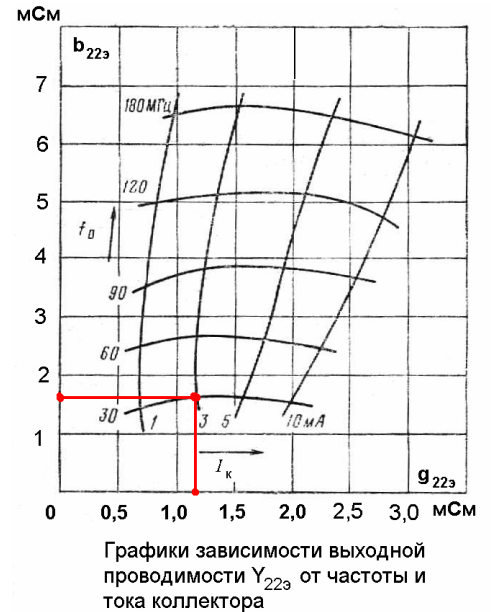
1. Как изменяются параметры входного колебательного контура из-за действия внутренней обратной связи в транзисторе?
2. Какая величина называется коэффициентом устойчивого усиления каскада УРЧ?
3. Какая величина называется предельным коэффициентом усиления каскада УРЧ?
4. Какие достоинства и недостатки имеет схема каскада УРЧ с общей базой?
5. В чём преимущество каскодной схемы УРЧ по сравнению со схемой с общей базой?

6. Как соотносятся между собой значения коэффициента устойчивого усиления в режиме максимального усиления и в режиме согласования с нагрузкой?
7. Какие существуют методы повышения устойчивости УРЧ?
8. Как зависит коэффициент усиления каскада УРЧ в режиме максимального усиления от полосы пропускания?
9. Как зависит коэффициент усиления каскада УРЧ в режиме широкополосного усиления от эквивалентной ёмкости колебательного контура?
10. Как зависит коэффициент усиления каскада УРЧ в режиме широкополосного усиления от полосы пропускания?

### **Примеры решения типовых задач**

**Задача 4.1.** Рассчитать резонансный коэффициент усиления по напряжению, коэффициенты включения и ёмкость колебательного контура одноконтурного УРЧ, резонансная частота которого  $f_0 = 30$  МГц, а полоса пропускания  $\Pi_{кэ(2)} = 0,48$  МГц. При расчёте использовать следующие данные:

- собственное затухание контура  $d_{к(2)} = 0,008$ ;
- индуктивность контурной катушки  $L_{к(2)} = 1$  мкГн;
- параметры нагрузки  $g_n = 3,5$  мСм,  $C_n = 10$  пФ;
- транзистор полностью включён во входной колебательный контур ( $m_{2(1)} = 1$ );
- эквивалентная резонансная проводимость входного контура  $g_{кэ(1)} = 7$  мСм;
- ёмкость монтажа  $C_m = 3$  пФ;
- коэффициент устойчивости  $k_y = 0,84$ ;
- транзистор типа КТ312, ток коллектора в рабочей точке 3 мА;
- для определения малосигнальных  $Y$ -параметров транзистора использовать графики на рис. 4.18; модуль проводимости обратной передачи принять равным  $|Y_{12}| = 0,2b_{22}$ .

Рис. 4.18. Малосигнальные  $Y$ -параметры транзистора КТ312**Решение**

1) По графикам на рис. 4.18 определим  $Y$ -параметры транзистора, необходимые для расчёта каскада УРЧ: на частоте сигнала 30 МГц при токе коллектора 3 мА  $Y_{21} = (25 - j 24)$  мСм,  $Y_{22} = (1,2 + j 1,6)$  мСм. Модуль крутизны равен  $|Y_{21}| = \sqrt{g_{21}^2 + b_{21}^2} = \sqrt{25^2 + 24^2} = 34,7$  мСм, модуль проводимости обратной передачи  $|Y_{12}| = 0,2b_{22} = 0,2 \cdot 1,6 = 0,32$  мСм.

2) Рассчитаем параметры УРЧ в режиме максимального усиления.

а) Резонансный коэффициент усиления по напряжению определяется формулой (4.29). Для его расчёта нужно найти коэффициент расширения полосы  $\gamma = \Pi_{кэ(2)} / \Pi_{к(2)}$ . Эквивалентная полоса пропускания выходного контура  $\Pi_{кэ(2)}$  задана, собственную полосу пропускания определим как  $\Pi_{к(2)} = d_{к(2)} f_0 = 0,008 \cdot 30 \text{ МГц} = 0,24 \text{ МГц}$ . Следовательно  $\gamma = 0,48 \text{ МГц} / 0,24 \text{ МГц} = 2$ . По формуле (4.29)

$$K_{0м} = \frac{|Y_{21}|}{2\sqrt{g_{22}g_n}} \frac{\gamma - 1}{\gamma} = \frac{34,7 \text{ мСм}}{2\sqrt{1,2 \text{ мСм} \cdot 3,5 \text{ мСм}}} \frac{2 - 1}{2} = 4,2.$$

б) Коэффициенты включения определяются формулами (4.27), (4.26). Для их расчёта нужно определить собственную резонансную проводимость контура  $g_{к(2)}$ . Поскольку по условиям задачи известны

собственное затухание контура  $d_{к(2)}$ , резонансная частота  $f_0$  и индуктивность  $L_{к(2)}$ , то воспользуемся следующим равенством:

$$g_{к(2)} = \frac{1}{R_{к(2)}} = \frac{1}{Q_{к(2)} \rho} = \frac{d_{к(2)}}{2\pi f_0 L_{к(2)}} =$$

$$= \frac{0,008}{2\pi \cdot (30 \cdot 10^6) \cdot (1 \cdot 10^{-6})} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ См} = 0,042 \text{ мСм}.$$

По формуле (4.27) найдём коэффициент включения коллекторной цепи транзистора в колебательный контур

$$m_{1(2)м} = \sqrt{\frac{(\gamma-1)g_{к(2)}}{2g_{22}}} = \sqrt{\frac{(2-1) \cdot 0,042 \text{ мСм}}{2 \cdot 1,2 \text{ мСм}}} = 0,13,$$

по формуле (4.26) найдём коэффициент включения нагрузки

$$m_{2(2)м} = \sqrt{\frac{(\gamma-1)g_{к(2)}}{2g_n}} = \sqrt{\frac{(2-1) \cdot 0,042 \text{ мСм}}{2 \cdot 3,5 \text{ мСм}}} = 0,08.$$

Оба коэффициента включения меньше единицы, следовательно, они физически реализуемы.

в) Проверим выполнение условия устойчивой работы каскада. Для этого рассчитаем коэффициент устойчивого усиления и сравним его с резонансным коэффициентом усиления. По формуле (4.21) коэффициент устойчивого усиления равен

$$K_{0\text{уст}} = \frac{m_{2(2)}}{m_{2(1)}} \sqrt{2(1-k_y) \frac{|Y_{21}|g_{кэ(1)}}{|Y_{12}|g_{кэ(2)}}}. \text{ Для}$$

его расчёта нужно найти эквивалентную резонансную проводимость  $g_{кэ(2)}$  выходного колебательного контура. Поскольку известны собственная резонансная проводимость (проводимость изолированного контура)  $g_{к(2)}$  и коэффициент расширения полосы  $\gamma$ , то определим эквивалентную проводимость как  $g_{кэ(2)} = \gamma g_{к(2)} = 2 \cdot 0,042 \text{ мСм} = 0,084 \text{ мСм}$ .

$$\text{Тогда } K_{0\text{уст}} = \frac{0,08}{1} \sqrt{2(1-0,84) \frac{34,7 \text{ мСм} \cdot 7 \text{ мСм}}{0,32 \text{ мСм} \cdot 0,084 \text{ мСм}}} = 4,3. \text{ Таким обра-}$$

зом, коэффициент устойчивого усиления больше резонансного коэффициента усиления. Следовательно, при заданном коэффициенте устойчивости можно реализовать в каскаде УРЧ режим максимального усиления.

г) Рассчитаем ёмкость конденсатора выходного колебательного контура. Для этого сначала определим эквивалентную ёмкость контура. Поскольку известны индуктивность контурной катушки и резонансная частота  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{к(2)}C_{кэ(2)}}}$ , то вычислим эквивалентную ём-

кость контура как  $C_{кэ(2)} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_{к(2)}} = \frac{1}{(2\pi \cdot 30 \cdot 10^6)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} =$

$= 28,1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 28,1 \text{ пФ}$ . Для определения ёмкости конденсатора (собственной ёмкости колебательного контура) необходимо из  $C_{кэ(2)}$  вычесть ёмкость монтажа и внешние ёмкости, вносимые в контур со стороны коллекторной цепи транзистора и со стороны нагрузки:

$C_{к(2)} = C_{кэ(2)} - C_{\text{м}} - (m_{1(2)}^2 C_{22} + m_{2(2)}^2 C_{\text{н}})$ . Здесь  $C_{22}$  – выходная ёмкость транзистора, которая может быть рассчитана по известной реактивной составляющей  $b_{22}$  выходной проводимости (параметра  $Y_{22}$ ) как

$C_{22} = \frac{b_{22}}{2\pi f_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 30 \cdot 10^6} = 8,5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 8,5 \text{ пФ}$ . Таким образом,

$C_{к(2)} = 28,1 - 3 - (0,13^2 \cdot 8,5 + 0,08^2 \cdot 10) = 24,9 \text{ пФ}$ .

**Ответ:** резонансный коэффициент усиления каскада по напряжению равен 4,2, коэффициент устойчивого усиления 4,3; коэффициент включения транзистора в выходной колебательный контур равен 0,13; коэффициент включения нагрузки в выходной колебательный контур равен 0,08; ёмкость конденсатора колебательного контура равна 24,9 пФ.

**Задача 4.2.** Каскад УРЧ работает в режиме максимального усиления при заданной полосе пропускания, которая на 60% превышает полосу пропускания изолированного контура. Как изменится усиление каскада, если полосу пропускания каскада уменьшить на 30%, сохранив режим максимального усиления? В обоих случаях каскад работает устойчиво.

### Решение

В режиме максимального усиления резонансный коэффициент усиления по напряжению определяется формулой (4.29). При изменении

полосы пропускания изменяется коэффициент расширения полосы  $\gamma$ . Поэтому относительное изменение коэффициента усиления равно

$$\frac{K'_{0M}}{K_{0M}} = \frac{|Y_{21}|}{2\sqrt{g_{22}g_n}} \frac{\gamma' - 1}{\gamma'} \bigg/ \frac{|Y_{21}|}{2\sqrt{g_{22}g_n}} \frac{\gamma - 1}{\gamma} = \frac{\gamma' - 1}{\gamma'} \bigg/ \frac{\gamma - 1}{\gamma}.$$

По условиям задачи  $\gamma = 1,6$ . После уменьшения полосы пропускания коэффициент расширения полосы будет равен  $\gamma' = (1 - 0,3)\gamma =$

$$= (1 - 0,3) \cdot 1,6 = 1,12. \quad \text{Следовательно,} \quad \frac{K'_{0M}}{K_{0M}} = \frac{\gamma' - 1}{\gamma'} \bigg/ \frac{\gamma - 1}{\gamma} =$$

$$= \frac{1,12 - 1}{1,12} \bigg/ \frac{1,6 - 1}{1,6} \approx 0,29.$$

**Ответ:** после уменьшения полосы пропускания усиление каскада УРЧ составит 0,29 от первоначального значения, т.е. уменьшится в  $1/0,29 = 3,5$  раза.

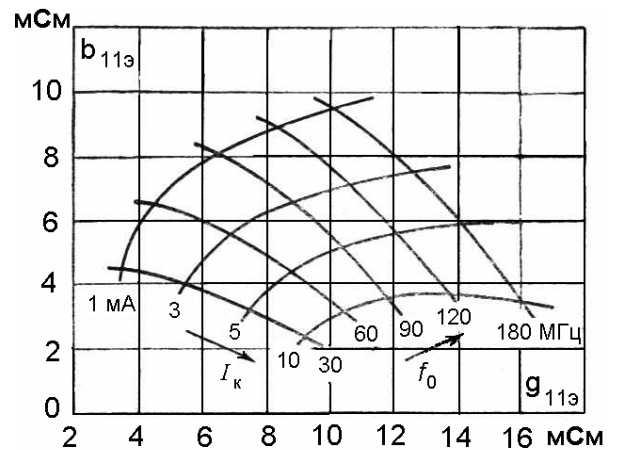
### **Контрольные задачи**

**Задача 4.3.** Рассчитать максимально реализуемый коэффициент усиления по напряжению одноконтурного УРЧ при заданной полосе пропускания 2 МГц. Параметры транзистора и элементов схемы имеют следующие значения:  $|Y_{21}| = 32$  мСм,  $|Y_{12}| = 0,4$  мСм,  $g_{22} = 1,3$  мСм,  $g_{кэ(1)} = 1$  мСм,  $C_{кэ(2)} = 15$  пФ,  $\gamma = 10$ ,  $g_n = 13$  мСм,  $m_{2(1)} = 1$ ,  $k_y = 0,84$ .

**Ответ:** расчёт показывает, что в режиме максимального усиления и в режиме согласования с нагрузкой не выполняется условие устойчивой работы: коэффициент усиления превышает коэффициент устойчивого усиления при заданном значении коэффициента устойчивости. Поэтому может быть реализован только режим ограниченного усиления. В этом режиме максимально возможный коэффициент усиления по напряжению, равный коэффициенту устойчивого усиления, составляет 1,3.



**Задача 4.4.** Провести расчёт одно-контурного УРЧ на транзисторе КТ312, включённом по схеме с ОЭ, при токе коллектора 5 мА. Необходимо обеспечить частоту настройки усилителя 120 МГц и полосу пропускания 40 МГц. Даны следующие параметры: собственное затухание колебательного контура 0,005, индуктивность контурной катушки 0,05 мкГн, ёмкость нагрузки 2 пФ, проводимость нагрузки 1 мСм, ёмкость монтажа 2 пФ, эквивалентная резонансная проводимость входного колебательного контура 25 мСм, коэффициент устойчивости 0,84. Транзистор полностью подключён к входному колебательному контуру.



**Рис. 4.19. Параметр  $Y_{11}$  транзистора КТ312**

**Указание:** для определения параметров  $Y_{21}$  и  $Y_{22}$  транзистора использовать графики на рис. 4.18, для определения параметра  $Y_{11}$  — график на рис. 4.19.

**Ответ:** поскольку рассчитываемый каскад УРЧ является широкополосным, то коэффициенты включения в выходной колебательный контур в режимах максимального усиления, согласования и ограниченного усиления превышают единицу (покажите это!); следовательно, может быть реализован только режим широкополосного усиления. При этом в выходной колебательный контур должен быть включён шунтирующий резистор с сопротивлением 182 Ом. Коэффициент усиления каскада 3,8, коэффициент устойчивого усиления 5,5. Ёмкость конденсатора колебательного контура 24,4 пФ.