

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Кафедра радиотехники

ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В СХЕМАХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Лабораторная работа по курсам:

Линейные методы в радиотехнике
Аналоговая электроника
Электронные методы физических исследований
Основы радиотехники
Радиотехника и схемотехника

Москва 2011

Составитель: Е.В. Воронов

Обратные связи в схемах усилителей. Лабораторная работа по курсам: *Линейные методы в радиотехнике, Аналоговая электроника, Электронные методы физических исследований, Основы радиотехники, Радиотехника и схемотехника.* – МФТИ., М., 2011, 31 с.

© Московский физико-технический институт
(государственный университет), 2011

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| Рекомендации по выполнению задания | 7 |
| Задание | 11 |
| 1. Однокаскадные усилители | 11 |
| 1.1. Эмиттерный повторитель: основные свойства .. | 11 |
| 1.2. Эмиттерный повторитель: входная цепь с большим сопротивлением по переменному току | 13 |
| 1.3. Эмиттерный повторитель: входная емкость | 15 |
| 1.4. Схема с не равным нулю сопротивлением в цепи эмиттера | 17 |
| 1.5. Схема со связью между цепями коллектора и базы | 19 |
| 2. Двухкаскадные усилители | 21 |
| 2.1. Схема с отрицательной обратной связью по напряжению на транзисторах одного типа проводимости | 21 |
| 2.2. Схема с отрицательной обратной связью по напряжению на транзисторах разного типа проводимости | 23 |
| 2.3. Схема с параллельной отрицательной обратной связью по току | 25 |
| 2.4. Эмиттерный повторитель с пониженной входной емкостью | 27 |
| 2.5. Резисторные усилители с параллельной положительной обратной связью | 29 |
| Список литературы | 30 |

Введение

Цель этой работы состоит в том, чтобы предоставить студенту возможность познакомиться с наиболее распространенными вариантами простых транзисторных схем, в которых обратные связи играют существенную роль.

В реальных схемах часто одновременно действует несколько обратных связей, и свойства схемы в целом определяются всей совокупностью этих связей. Принцип, по которому построена данная лабораторная работа, заключается в том, чтобы при выполнении конкретного пункта задания внимание было сосредоточено на обратной связи *определенного вида* и ее влиянии на характеристики усилителя (см. рисунки на с. 6, 7).

(Приведенные на с. 7 векторные диаграммы для напряжений $\tilde{U}_{ВХ}$, $\tilde{U}_{ОС}$ и $\tilde{U}'_{ВХ}$, относятся к схемам с последовательной обратной связью, а векторные диаграммы для токов $\tilde{I}_{ВХ}$, $\tilde{I}_{ОС}$, и $\tilde{I}'_{ВХ}$, – к схемам с параллельной обратной связью.)

Предполагается, что в соответствии с указаниями преподавателя студент исследует экспериментально лишь часть схем, приведенных в *Задании*, однако принцип функционирования и характеристики других схем могут стать предметом обсуждения при сдаче работы.

В каждом из пунктов *Задания* исследуемая схема представлена, как правило, в нескольких вариантах. Тот из них, на котором указаны конкретные значения сопротивлений и емкостей, служит рекомендацией, как лучше всего собрать такой усилитель на макетной плате студента: при таких величинах нагляднее проявляются свойства обратной связи *рассматриваемого вида*. Возможно отступление от приведенных значений.

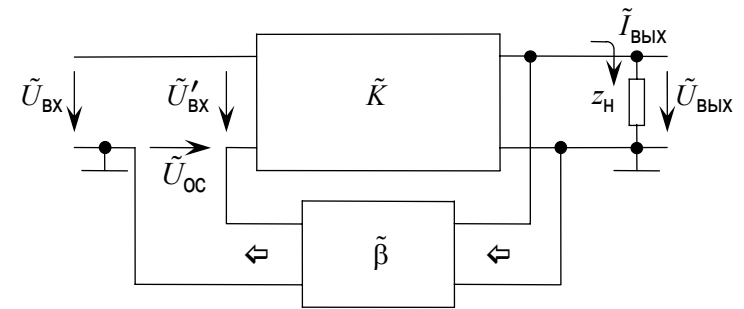
Символами C° и $C^{\circ\circ}$ на принципиальных схемах обозначены *развязывающие* и *блокировочные* конденсаторы, то есть конденсаторы большой емкости (обычно электролитические), назначение которых состоит в замыкании накоротко по переменному току точек, между которыми они включены.

В тексте *Задания* и на рисунках приняты также следующие обозначения.

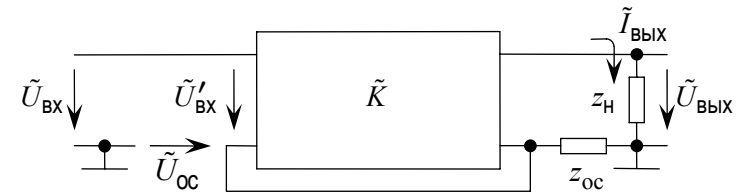
Коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления и верхняя граничная частота схемы с обратной связью *рассматриваемого вида* помечены штрихом ($'$). Величины, относящиеся к схеме, в которой обратная связь *рассматриваемого вида* исключена, обозначены теми же символами без штриха.

Там, где речь идет о коэффициентах усиления по отношению к эдс источника сигнала K_e' и K_e , под $f_{\text{верхн}}'$ и $f_{\text{верхн}}$ понимаются граничные частоты зависимостей $K_e'(f)$ и $K_e(f)$; в остальных случаях имеются в виду граничные частоты зависимостей $K'(f)$ и $K(f)$ соответственно.

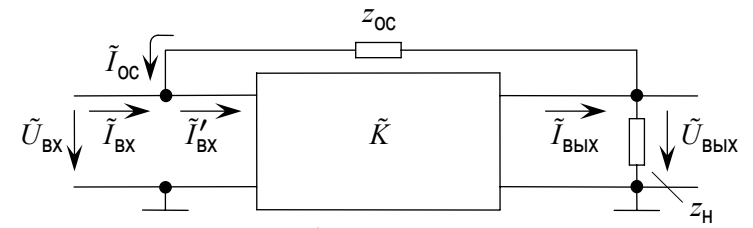
ВНИМАНИЕ!
НЕ ЗАБЫВАЙТЕ ВЫКЛЮЧАТЬ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ
ПЕРЕД ИЗМЕНЕНИЕМ СОЕДИНЕНИЙ В СХЕМЕ.



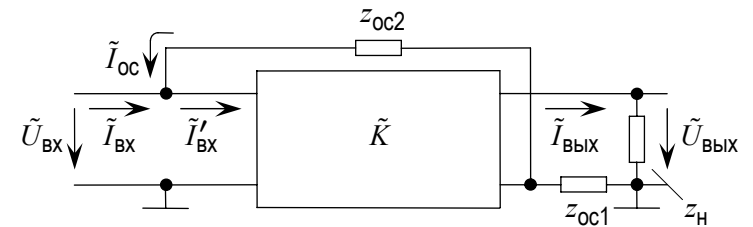
Последовательная обратная связь по напряжению



Последовательная обратная связь по току

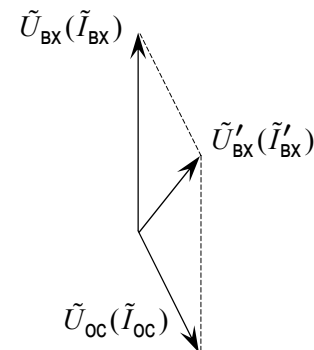


Параллельная обратная связь по напряжению

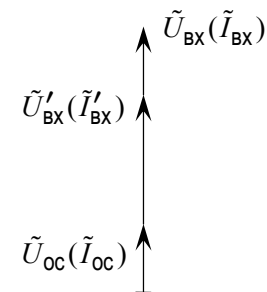


Параллельная обратная связь по току

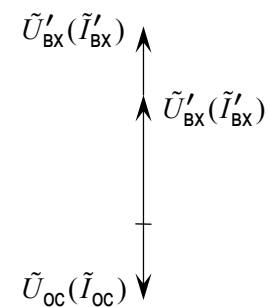
Классификация обратных связей



Общий случай



Положительная обратная связь



Отрицательная обратная связь

Рекомендации по выполнению задания

1. Включив источник питания, проверьте режим транзисторов по постоянному току: постоянные токи и напряжения в собранной вами схеме должны соответствовать ожидаемым значениям. Результаты измерения постоянных напряжений в различных точках следует надписать непосредственно на схеме в рабочей тетради.

2. При выборе величины сигнала, подаваемого на вход усилителя, руководствуются двумя соображениями:

а) сигнал должен быть достаточно малым, чтобы усилитель в целом оставался в линейном режиме и отсутствовали искажения сигнала на выходе;

б) желательно работать с возможно большим полезным сигналом, чтобы неконтролируемые помехи и наводки не были сколько-нибудь заметной составляющей измеряемых напряжений.

При определении выходного сопротивления (см. ниже п. 5) на вход усилителя нужно подавать сигнал *одной и той же величины* при двух значениях сопротивления нагрузки, и величина этого сигнала должна быть настолько малой, чтобы искажения сигнала на выходе усилителя заведомо отсутствовали в каждом из проводимых опытов.

3. Измерение коэффициентов усиления, входных и выходных сопротивлений производится в области средних частот.

4. Когда коэффициент усиления $K = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ велик и нет возможности непосредственно измерить $U_{\text{ВХ}}$, входное сопротивление $R_{\text{ВХ}}$ и значение K можно найти, выполнив наблюдения при двух значениях сопротивления $R_{\text{И}}$:

если $U_{\text{ВЫХ}} = U_1$ при

$\mathcal{E}_{\text{И}} = \mathcal{E}_1, R_{\text{И}} = R_1$

и $U_{\text{ВЫХ}} = U_2$ при

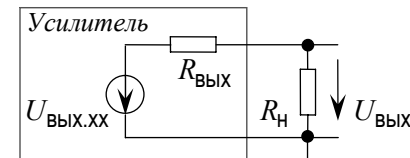
$\mathcal{E}_{\text{И}} = \mathcal{E}_2, R_{\text{И}} = R_2$, то

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{(\mathcal{E}_1 / \mathcal{E}_2) \cdot R_2 - (U_1 / U_2) \cdot R_1}{(U_1 / U_2) - (\mathcal{E}_1 / \mathcal{E}_2)}$$

Рисунок к п. 4 Рекомендаций

и $K = (U_1 / \mathcal{E}_1) \cdot (R_1 + R_{\text{ВХ}}) / R_{\text{ВХ}} = (U_2 / \mathcal{E}_2) \cdot (R_2 + R_{\text{ВХ}}) / R_{\text{ВХ}}$.

5. Выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}}$ по определению есть отношение выходного напряжения холостого хода $U_{\text{ВЫХ.ХХ}}$ к выходному току короткого замыкания $I_{\text{ВЫХ.КЗ}}$. Один из возможных способов экспериментального определения $R_{\text{ВЫХ}}$ заключается в измерении выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ при двух различных нагрузках, например, путем подключения к выходу усилителя через разделительный конденсатор внешней нагрузки R° и вычисления $R_{\text{ВЫХ}}$ по результатам этих измерений; одновременно можно найти $U_{\text{ВЫХ.ХХ}}$, когда это необходимо.



Если

$U_{\text{ВЫХ}} = U_1$ при $R_{\text{Н}} = R_1$ и

$U_{\text{ВЫХ}} = U_2$ при $R_{\text{Н}} = R_2$,

то

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_1 R_2 \cdot \frac{U_1 - U_2}{U_2 R_1 - U_1 R_2} \text{ и}$$

$$U_{\text{ВЫХ.ХХ}} = U_1 U_2 \cdot \frac{R_1 - R_2}{U_2 R_1 - U_1 R_2}.$$

Рисунок и расчетные соотношения
к п. 5 Рекомендаций

6. В работе предусмотрены измерения в области верхних частот. С их помощью находят входную емкость усилителя и определяют верхние граничные частоты $f_{\text{верхн}}$ и $f'_{\text{верхн}}$, на которых коэффициент усиления уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с его значением на средних частотах. Измерения в области верхних частот необходимо производить с использованием высокочастотного пробника измерительного прибора.

Для правильной интерпретации результатов измерений нужно знать входную емкость C_0 измерительного прибора; его омическое входное сопротивление в повседневной лабораторной практике пренебрежимо велико. Значение C_0 можно определить, измерив верхнюю граничную частоту $f_{\text{гр}_0}$ цепи, состоящей из резистора с известным сопротивлением ($R_{\text{и}}$) и емкости измерительного прибора: $f_{\text{гр}_0} = 1/(2\pi R_{\text{и}} C_0)$; сопротивление резистора $R_{\text{г}}$ рекомендуется выбрать равным 43...62 кОм.

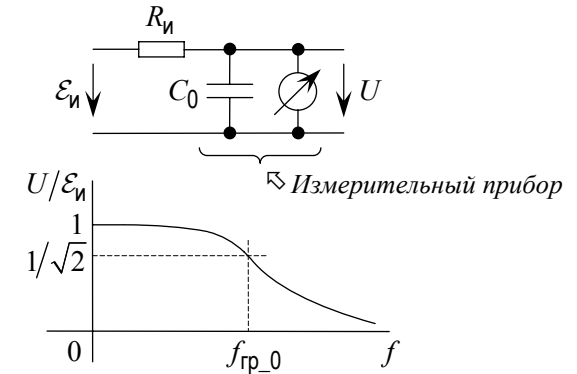
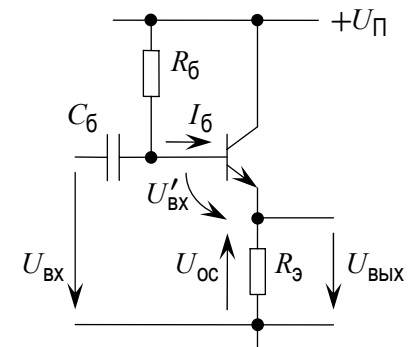
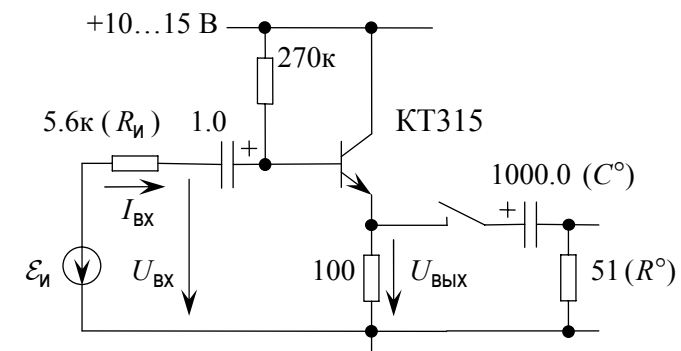


Рисунок к п. 6 Рекомендаций

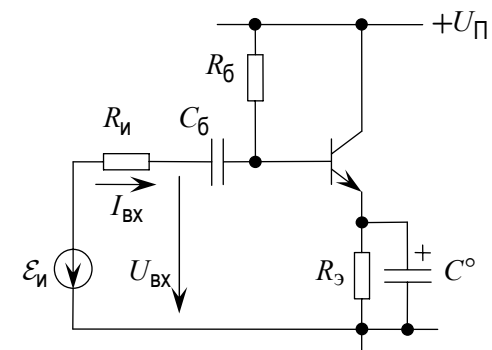
1.1-1



1.1-2



1.1-3



Рисунки к п. 1.1 Задания

Задание

1. Однокаскадные усилители

1.1. Эмиттерный повторитель: основные свойства

а) Для схемы, приведенной на рис. 1.1-1, измерить $K' = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$, $R'_{\text{ВХ.ТР}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{Б}}$ и $R'_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.ХХ}}/I_{\text{ВЫХ.КЗ}}$.

Указания

Собрать схему согласно рис. 1.1-2. $R'_{\text{ВХ.ТР}}$ находят из равенства $R'_{\text{ВХ.ТР}} \parallel R_{\text{Б}} = U_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}}$. $R'_{\text{ВЫХ}}$ находят по правилу двух нагрузок при одном и том же значении $U_{\text{ВХ}}$: $R_1 = R_{\text{Э}}$, $R_2 = R_{\text{Э}} \parallel R^{\circ}$.

б) Убедиться в справедливости соотношений

$$K' = \frac{K}{1 - K \cdot \beta} \text{ и } R'_{\text{ВХ.ТР}} = R_{\text{ВХ.ТР}} \cdot (1 - K \cdot \beta),$$

где $K = U_{\text{ВЫХ}}/U'_{\text{ВХ}}$, $\beta = U_{\text{ОС}}/U_{\text{ВЫХ}}$ и $R_{\text{ВХ.ТР}} = h_{11\text{Э}} = U'_{\text{ВХ}}/I_{\text{Б}}$ (см. рис. 1.1-1), а также в том, что выходное сопротивление приближенно удовлетворяет равенству

$$R'_{\text{ВЫХ}} = \frac{h_{11\text{Э}}}{h_{21\text{Э}} + 1};$$

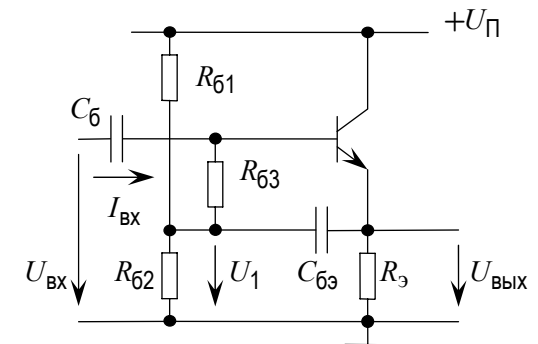
$h_{11\text{Э}}$ и $h_{21\text{Э}}$ – параметры транзистора.

Указания

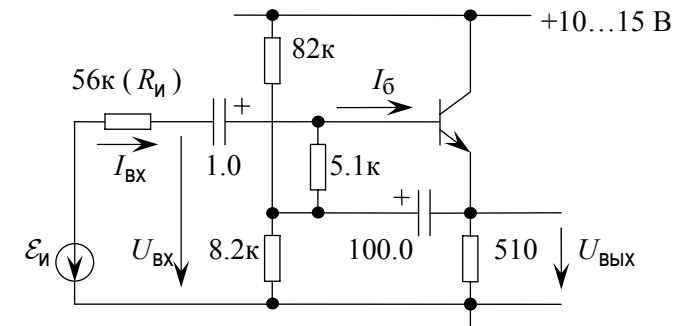
$U'_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}$; в данном случае $U_{\text{ОС}} = -U_{\text{ВЫХ}}$, $\beta = -1$ и фактически необходимо убедиться в том, что $K' = K/(1 + K)$, где $K \approx R_{\text{Э}}/r_{\text{Э}}$, $r_{\text{Э}} = U_T/I_{\text{Э}}$, $U_T \approx 25 \text{ мВ}$, а $I_{\text{Э}}$ – постоянная составляющая эмиттерного тока.

$h_{11\text{Э}}$ можно найти как входное сопротивление транзистора при заземленном по переменному току эмиттере (рис. 1.1-3); $h_{21\text{Э}} = (K \cdot h_{11\text{Э}}/R_{\text{Э}}) - 1$.

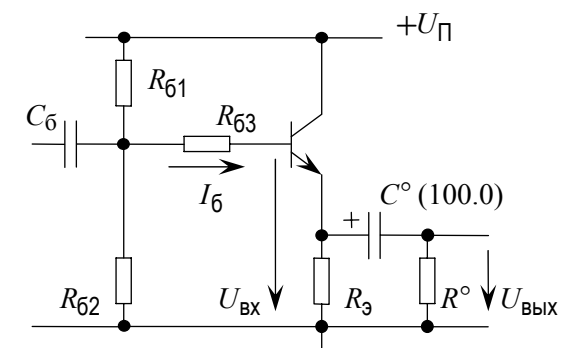
1.2-1



1.2-2



1.2-3



Рисунки к п. 1.2 Задания

**1.2. Эмиттерный повторитель: входная цепь
с большим сопротивлением по переменному току**

а) Для схемы, приведенной на рис. 1.2-1, измерить

$$R_{вх}^* = U_{вх} / I_{вх} .$$

Указание

Собрать схему согласно рис. 1.2-2 и определить $R_{вх}^*$ по измеренным значениям $\mathcal{E}_и$ и $U_{вх}$ с учетом известного $R_и$.

б) Убедиться в том, что сопротивление *базовой цепи*, состоящей из $R_{б1}$, $R_{б2}$ и $R_{б3}$, по переменному току (то есть отношение напряжения $U_{вх}$ к току, текущему по $R_{б3}$) равно

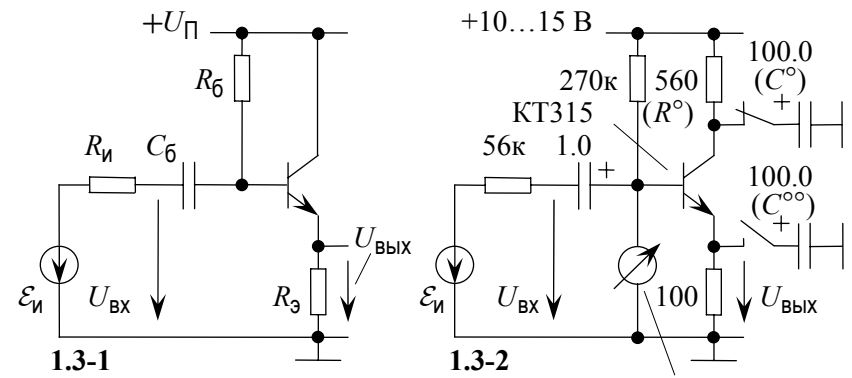
$$R_{б.ц.} = \frac{R_{б3}}{1 - K_1} ,$$

где $K_1 = U_1 / U_{вх}$, U_1 – напряжение между нижним концом резистора $R_{б3}$ и землей (см. рис. 1.2-1).

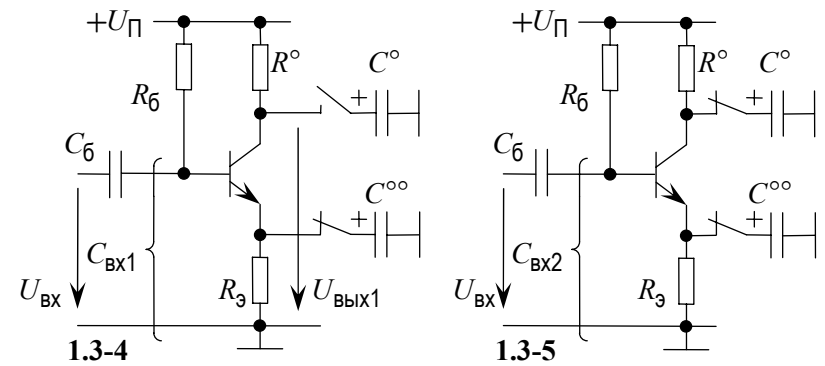
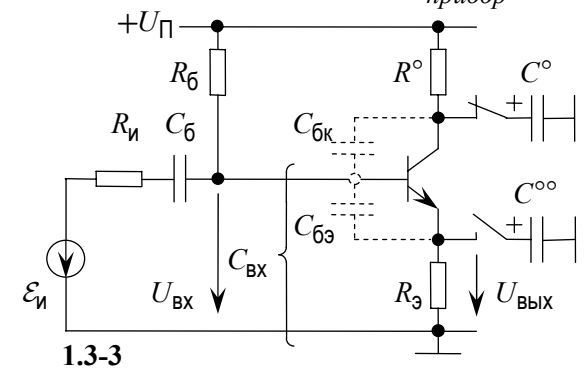
Указания

$R_{вх}^* = R_{б.ц.} \parallel R'_{вх.тр}$, $R'_{вх.тр}$ – сопротивление транзистора

со стороны базы (то есть отношение напряжения $U_{вх}$ к току $I_б$, текущему в базе транзистора в схеме на рис. 1.2-2). Для выполнения требуемой проверки необходимо принять во внимание, что на средних частотах $K_1 = K$, и независимо определить $R'_{вх.тр}$. Это можно сделать, измеряя отношение $U_{вх}$ к $I_б$ в схеме на рис. 1.2-3, выбрав значение R° приблизительно равным $R_{б1} \parallel R_{б2}$, чтобы значение $K = U_{вых} / U_{вх}$ оставалось неизменным при переходе от схемы, указанной на рис. 1.2-2, к схеме на рис. 1.2-3.



Измерительный прибор



Рисунки к п. 1.3 Задания

1.3. Эмиттерный повторитель: входная емкость

а) Измерить входную емкость $C'_{вх}$ эмиттерного повторителя (рис. 1.3-1) путем определения постоянной времени интегрирующей цепи, образуемой сопротивлением источника сигнала $R_{и}^*$ и входной емкостью.

Указания

Собрать схему согласно рис. 1.3-2 и определить верхнюю граничную частоту $f_{гр}$ входной цепи, поддерживая \mathcal{E}_T постоянным и измеряя $U_{вх}$:

$$C'_{вх} = 1/(2\pi f_{гр} R_{и}^*) - C_0,$$

где $R_{и}^* = R_{и} \parallel R_{б} \parallel R'_{вх.тр}$, а C_0 – емкость высокочастотного пробника измерительного прибора. Сопротивление $R'_{вх.тр}$ измеряется независимо, как в п. 1.1а *Задания*; об определении емкости C_0 см. п.6 *Рекомендаций*.

б) Проверить справедливость соотношения

$$C'_{вх} \approx C_{бк} + C_{бэ} \cdot (1 - K),$$

где $C_{бк}$ – емкость база–коллектор, $C_{бэ}$ – емкость база–эмиттер, $K = U_{вых}/U_{вх}$ на средних частотах (рис. 1.3-3).

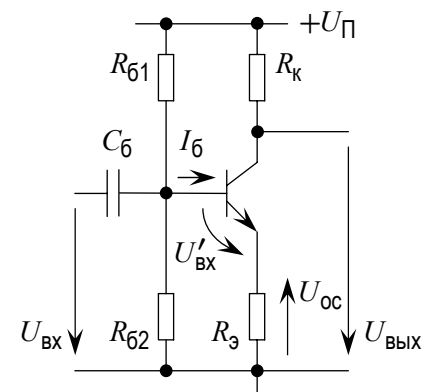
Указания

Чтобы экспериментально найти $C_{бк}$ и $C_{бэ}$, нужно измерить входную емкость $C_{вх1}$ схемы с общим эмиттером (рис. 1.3-4) и входную емкость $C_{вх2}$ схемы с одновременно заземленными по переменному току эмиттером и коллектором (рис. 1.3-5):

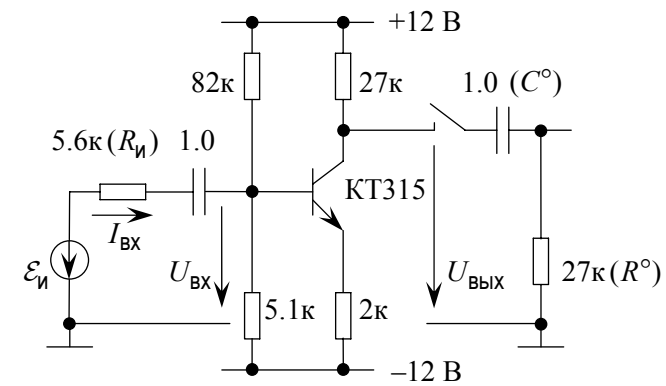
$$C_{бк} = (C_{вх1} - C_{вх2})/K_1 \text{ и } C_{бэ} = C_{вх2} - C_{бк},$$

где $K_1 = U_{вых1}/U_{вх}$ на средних частотах. Измерение $C_{вх1}$ и $C_{вх2}$ следует выполнить по правилу, сформулированному в *Указаниях* к п. 1.3а, заменяя $R'_{вх.тр}$ на $h_{1э}$ транзистора.

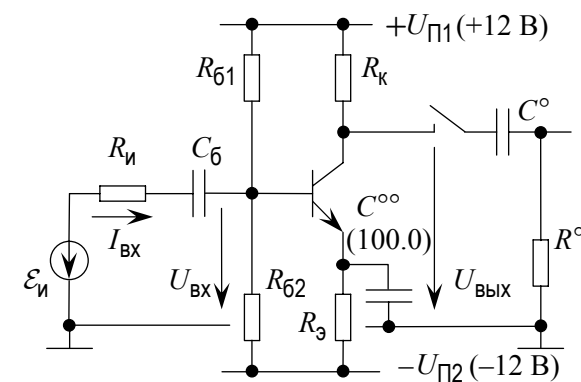
1.4-1



1.4-2



1.4-3



Рисунки к п. 1.4 задания

1.4. Схема с не равным нулю сопротивлением в цепи эмиттера

а) Для схемы, изображенной на рис. 1.4-1, измерить

$$K' = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}, R'_{\text{ВХ.ТР}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{Б}}, R'_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.ХХ}}/I_{\text{ВЫХ.КЗ}} \text{ и } f'_{\text{ВЕРХН}}.$$

Указания

Собрать схему согласно рис. 1.4-2. $R'_{\text{ВЫХ}}$ находят по правилу двух нагрузок *при одном и том же значении* $U_{\text{ВХ}}$: $R_1 = R_{\text{К}}$, $R_2 = R_{\text{К}} \parallel R^{\circ}$. $R'_{\text{ВХ.ТР}}$ находят из равенства $R'_{\text{ВХ.ТР}} \parallel R_{\text{Б}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}}$, где $R_{\text{Б}} = R_{\text{Б1}} \parallel R_{\text{Б2}}$.

б) Определить, в какой степени справедливы соотношения

$$K' = \frac{K}{1 - K \cdot \beta}, R'_{\text{ВХ.ТР}} = R_{\text{ВХ.ТР}} \cdot (1 - K \cdot \beta) \text{ и}$$

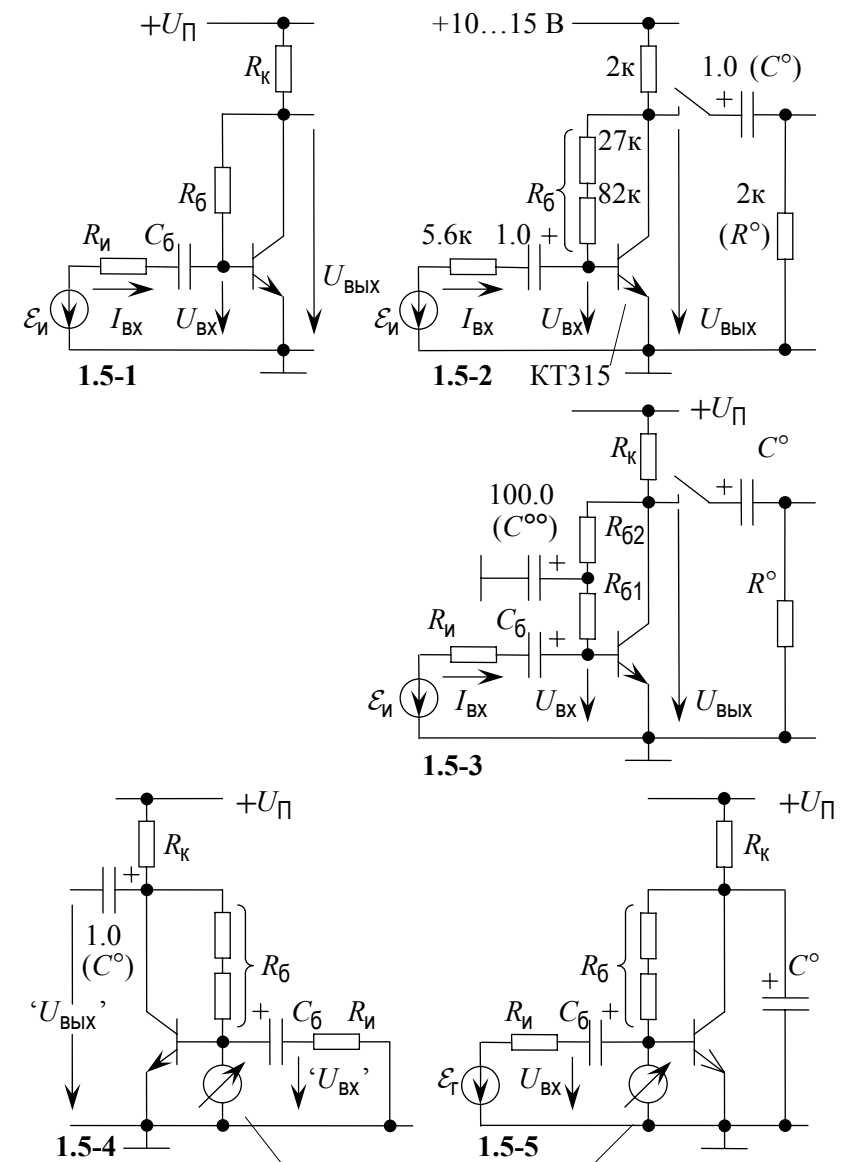
$$R'_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Э}} \cdot (1 - K_{\text{ХХ}}),$$

где $K = U_{\text{ВЫХ}}/U'_{\text{ВХ}}$, $\beta = U_{\text{ОС}}/U_{\text{ВЫХ}}$, $R_{\text{ВЫХ}}$ – выходное сопротивление транзистора со стороны коллектора, $K_{\text{ХХ}}$ – значение K в режиме холостого хода по выходу, $R_{\text{ВХ.ТР}} = h_{11\text{Э}} = U'_{\text{ВХ}}/I_{\text{Б}}$. Сравнить $f'_{\text{ВЕРХН}}$ с $f_{\text{ВЕРХН}}$ для усилителя без обратной связи (рис. 1.4-3).

Указания

$\beta = R_{\text{Э}}/R_{\text{К}}$. На средних частотах $K < 0$, поэтому знаменатель в K' фактически равен $1 + |K \cdot \beta|$. $R_{\text{ВЫХ}}$ и $K_{\text{ХХ}}$ находят по правилу двух нагрузок (см. п. 6 *Рекомендаций*) применительно к схеме без обратной связи: $K_{\text{ХХ}} = U_{\text{ВЫХ.ХХ}}/U'_{\text{ВХ}}$, R_1 и R_2 указаны выше; $K_{\text{ХХ}} < 0$, поэтому множитель в выражении для $R'_{\text{ВЫХ}}$ фактически равен $1 + |K_{\text{ХХ}}|$.

$h_{11\text{Э}}$ можно найти как входное сопротивление транзистора при заземленном по переменному току эмиттере.



Измерительный прибор
Рисунки к п. 1.5 Задания

1.5. Схема со связью между цепями коллектора и базы

а) Для схемы, изображенной на рис. 1.5-1, измерить

$$K'_e = U_{\text{вых}}/\mathcal{E}_\text{и}, R'_{\text{вх.тр}} = U_{\text{вх}}/I_6, R'_{\text{вых}} = U_{\text{вых.хх}}/I_{\text{вых.кз}} \text{ и } f'_{\text{верхн}}.$$

Указания

Собрать схему согласно рис. 1.5-2. $R'_{\text{вых}}$ находят по правилу двух нагрузок *при одном и том же значении* $\mathcal{E}_\text{и}$: если $R_\text{к}$ отнести «внутрь» охватываемого обратной связью усилителя, то $R_1 = \infty$, $R_2 = R^\circ$.

б) Убедиться в справедливости соотношений

$$K'_e = \frac{\gamma \cdot K}{1 - K \cdot \beta}, R'_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} \left\| \frac{R_{\text{св}}}{1 - K} \right. \text{ и } R'_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 - K \cdot \beta},$$

где $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$, $\beta = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} \Big|_{\mathcal{E}_\text{и}=0}$, $\gamma = \frac{U_{\text{вх}}}{\mathcal{E}_\text{и}} \Big|_{U_{\text{вых}}=0}$; $R_{\text{вх}} = h_{113}$,

$R_{\text{св}} = R_6$, $R_{\text{вых}} = R_\text{к}$. Сравнить $f'_{\text{верхн}}$ с $f_{\text{верхн}}$ для усилителя без обратной связи (рис. 1.5-3).

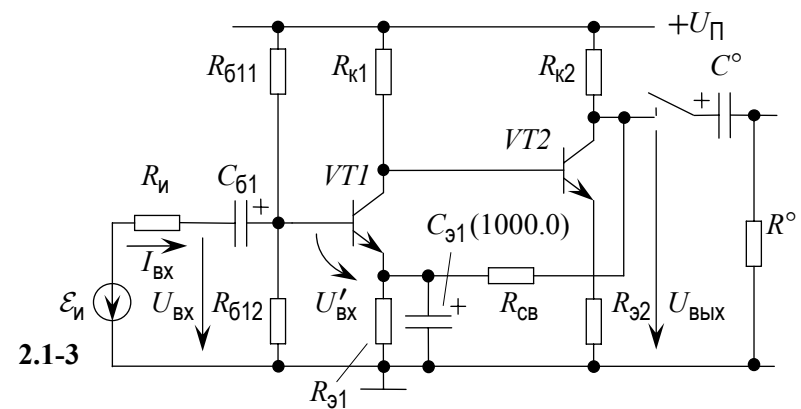
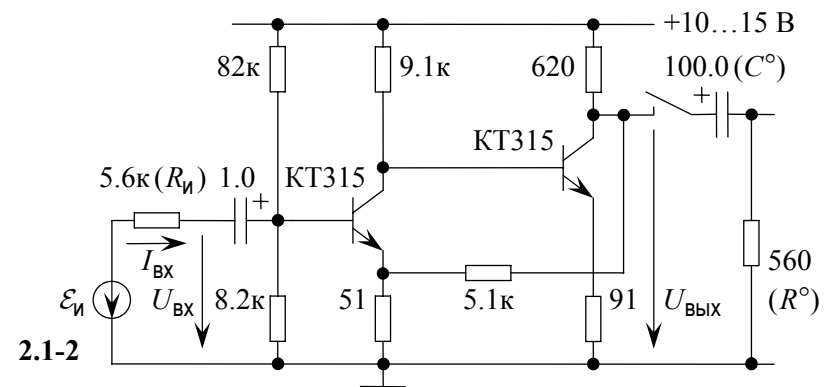
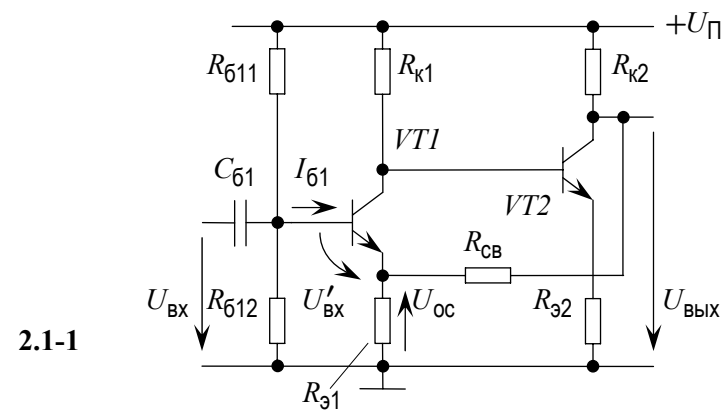
Указания

Прежде всего следует экспериментально убедиться в том, что $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ имеет практически одно и то же значение в схеме с обратной связью (рис. 1.5-2) и в схеме без обратной связи (рис. 1.5-3); на средних частотах $K < 0$. $R_{\text{вх}}$ и $R_{\text{вых}}$ – входное и выходное сопротивление схемы, в которой обратная связь исключена (рис. 1.5-3), при этом $U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$ равно $R_{\text{вх}} \left\| R_{61} \right.$, а $R_{\text{вых}}$ определяется по правилу двух нагрузок *при одном и том же значении* $\mathcal{E}_\text{и}$: $R_1 = \infty$, $R_2 = R^\circ$. Коэффициенты β и γ можно найти путем расчета по формулам

$$\beta = (R_\text{и} \parallel R_{\text{вх}}) / [R_{\text{св}} + (R_\text{и} \parallel R_{\text{вх}})],$$

$$\gamma = (R_{\text{вх}} \parallel R_{\text{св}}) / [R_\text{и} + (R_{\text{вх}} \parallel R_{\text{св}})],$$

либо измерить непосредственно: $\beta = 'U_{\text{вх}}'/'U_{\text{вых}}'$ в схеме на рис. 1.5-4, где сигнал $'U_{\text{вых}}'$ подается извне *на выход усилителя*, и $\gamma = U_{\text{вх}}/\mathcal{E}_\text{и}$ в схеме на рис. 1.5-5.



Рисунки к п.2.1 Задания

2. Двухкаскадные усилители

2.1. Схема с последовательной отрицательной обратной связью по напряжению на транзисторах одного типа проводимости

а) Для схемы, изображенной на рис. 2.1-1, измерить

$$K' = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}, R'_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{б1}}, R'_{\text{вых}} = U_{\text{вых.хх}} / I_{\text{вых.кз}} \text{ и } f'_{\text{верхн}}.$$

Указания

Собрать схему согласно рис. 2.1-2. Изменяя $R_{\text{б12}}$, добиться того, чтобы постоянное напряжение на коллекторе транзистора VT2 относительно земли находилось в интервале $(0,4...0,6) \cdot U_{\text{П}}$. Величину $R'_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{б1}}$ определяют из соотношения $R'_{\text{вх}} \parallel R_{\text{б11}} \parallel R_{\text{б12}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$. Величину $R'_{\text{вых}}$ находят по правилу двух нагрузок при одном и том же значении $U_{\text{вх}}$: если $R_{\text{к2}}$ отнести «внутрь» охватываемого обратной связью усилителя, то $R_1 = \infty$, $R_2 = R^\circ$.

б) Исследовать, выполняются ли на средних частотах соотношения

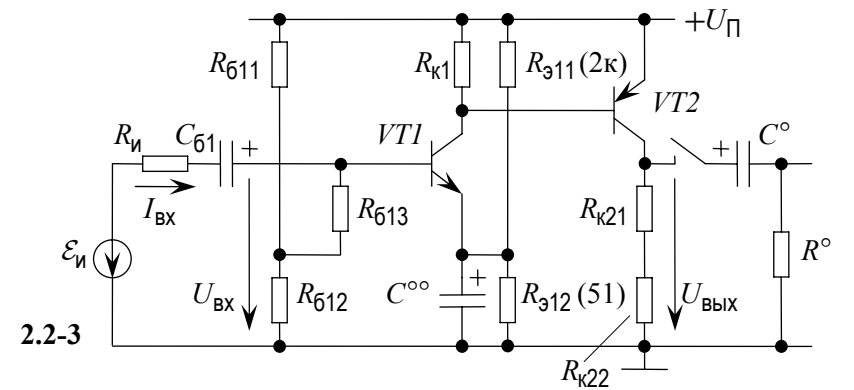
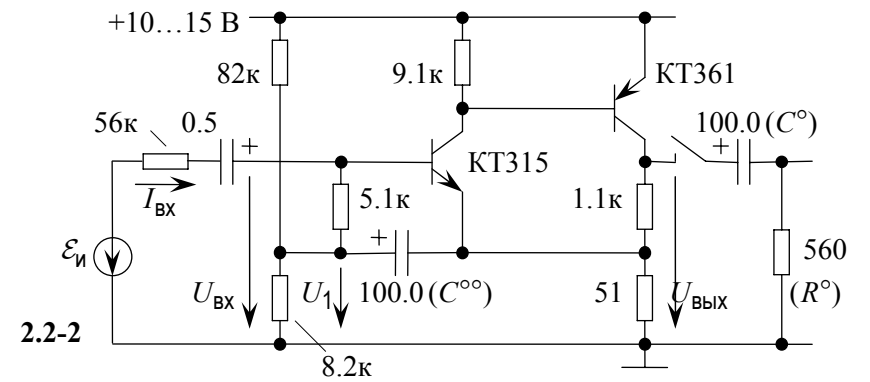
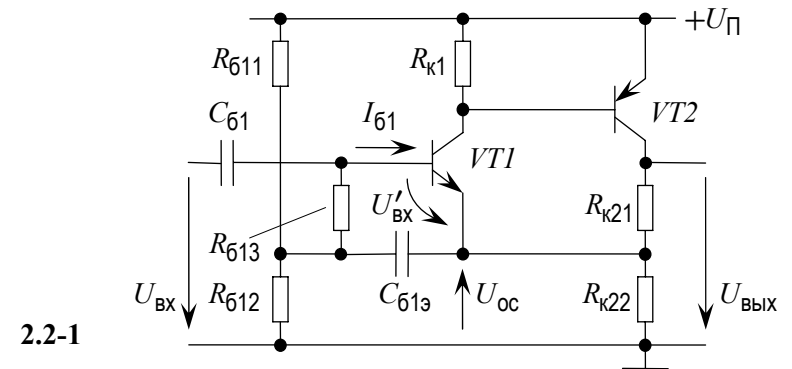
$$K' = \frac{(1-\gamma)K}{1+K\beta^*}, R'_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} \cdot \frac{1+K\beta^*}{1-\gamma} \text{ и } R'_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1+K\beta^*}, \text{ где}$$

$$K = U_{\text{вых}} / U'_{\text{вх}}, U_{\text{ос}} = -(\gamma U_{\text{вх}} + \beta^* U_{\text{вых}}), \gamma = \frac{U_{\text{э1}}}{U_{\text{вх}}} \bigg|_{U_{\text{вых}}=0}, \beta^* = \frac{U_{\text{э1}}}{U_{\text{вых}}} \bigg|_{U_{\text{вх}}=0},$$

$R_{\text{вх1}} = h_{113}(\text{VT1})$ и $R_{\text{вых}} = R_{\text{к2}} \parallel R_{\text{св}}$ (см. рис. 2.1-1); $U_{\text{э1}}$ – переменное напряжение на резисторе $R_{\text{э1}}$ ($U_{\text{э1}} = -U_{\text{ос}}$). Сравнить $f'_{\text{верхн}}$ со значением $f_{\text{верхн}}$ для усилителя без обратной связи.

Указания

При измерении K и $R_{\text{вх}}$ в схеме без обратной связи $U'_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}$ (рис. 2.1-3); $R_{\text{вх}}$ находится из соотношения $R_{\text{вх}} \parallel R_{\text{б11}} \parallel R_{\text{б12}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$; равенство $R_{\text{вых}} = R_{\text{к2}} \parallel R_{\text{св}}$ проверяется по правилу двух нагрузок. Величины γ и β^* находятся по схеме, приведенной на рис. 2.1-2, путем измерения напряжения $U_{\text{э1}}$ на эмиттере транзистора VT1 в следующих случаях: 1) чтобы найти γ , сигнал $U_{\text{вх}}$ подается, как обычно, на вход усилителя, а коллектор транзистора VT2 замыкается по переменному току на землю с помощью конденсатора C° ; 2) чтобы найти β^* , левая обкладка конденсатора $C_{\text{б1}}$ замыкается на землю и на коллектор транзистора VT2 через конденсатор C° извне подается сигнал, называемый в данном случае $U_{\text{вых}}$.



Рисунки к п. 2.2 Задания

2.2. Схема с последовательной отрицательной обратной связью по напряжению на транзисторах разного типа проводимости

а) Для схемы, изображенной на рис. 2.2-1, измерить

$$K' = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}, R'_{\text{вх.тр}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{б1}}, R'_{\text{вых}} = U_{\text{вых.хх}}/I_{\text{вых.кз}} \text{ и } f'_{\text{верхн}}.$$

Указания

Собрать схему согласно рис. 2.2-2. Если постоянное напряжение на коллекторе транзистора VT2 относительно земли не принадлежит интервалу $(0,4 \dots 0,6) \cdot U_{\text{п}}$, то следует изменить $R_{\text{б12}}$ так, чтобы это условие выполнялось. $R'_{\text{вх.тр}}$ определяют из соотношения $R'_{\text{вх.тр}} \parallel [R_{\text{б13}} / (1 - K_1)] = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$, где $K_1 = U_1/U_{\text{вх}}$. $R'_{\text{вых}}$ находят по правилу двух нагрузок при одном и том же значении $U_{\text{вх}}$: если $R_{\text{к2}} = R_{\text{к21}} + R_{\text{к22}}$ отнести «внутрь» охватываемого обратной связью усилителя, то $R_1 = \infty$, $R_2 = R^\circ$.

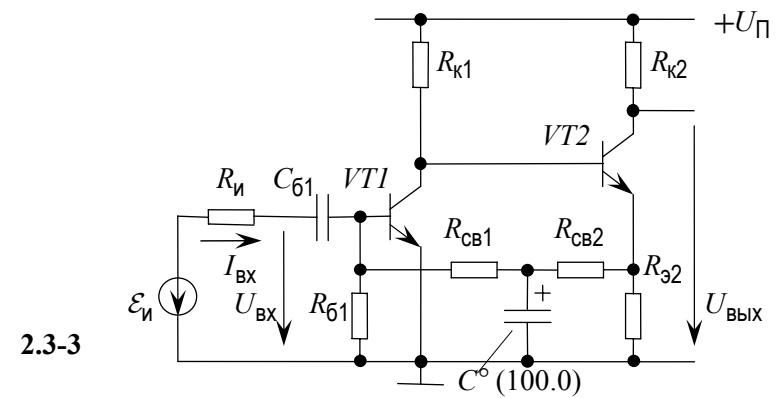
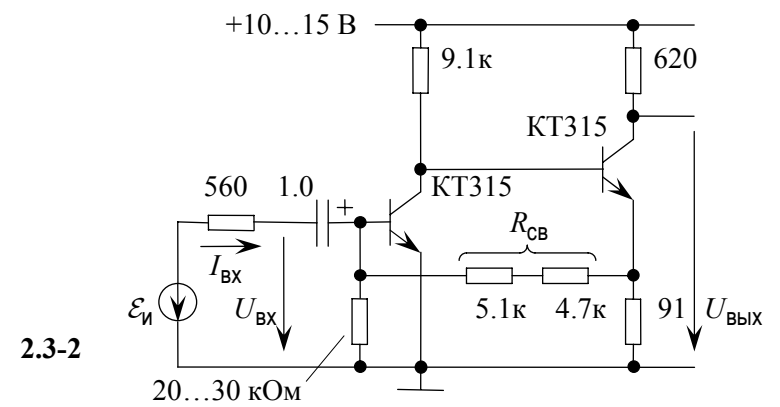
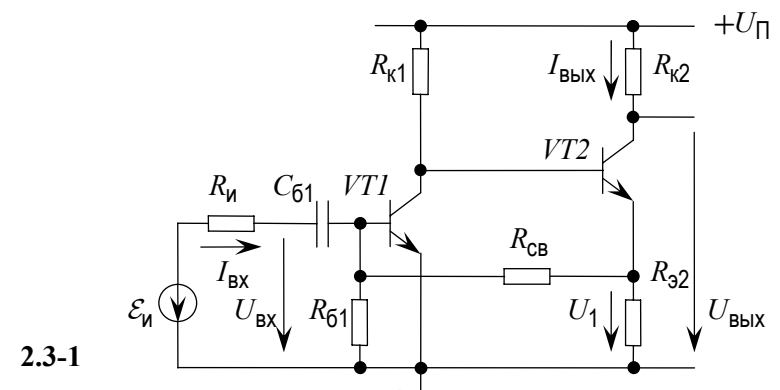
б) Исследовать, с какой точностью выполняются соотношения

$$K' = \frac{K}{1 - K \cdot \beta}, R'_{\text{вх.тр}} = R_{\text{вх}} \cdot (1 - K \cdot \beta) \text{ и } R'_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 - K \cdot \beta},$$

где $K = U_{\text{вых}}/U'_{\text{вх}}$, $\beta = U_{\text{ос}}/U_{\text{вых}}$, $R_{\text{вх}} = h_{113}(VT1)$, $R_{\text{вых}} = R_{\text{к21}} + R_{\text{к22}}$ (см. рис. 2.2-1). Сравнить $f'_{\text{верхн}}$ со значением $f_{\text{верхн}}$ для усилителя без обратной связи.

Указания

K и $R_{\text{вх}}$ измеряются в схеме без обратной связи (рис. 2.2-3). $R_{\text{э11}}$ подбирается так, чтобы постоянное напряжение на коллекторе VT2 относительно земли имело прежнее значение. $\beta = -R_{\text{к22}}/R_{\text{к2}}$, поэтому на средних частотах $1 - K \cdot \beta = 1 + K \cdot |\beta|$. По результатам измерений $U_{\text{вх}}$ и $I_{\text{вх}}$ при заземленном по переменному току эмиттере VT1 находят $R_{\text{вх}}$ из соотношения $R_{\text{вх}} \parallel [R_{\text{б13}} + (R_{\text{б11}} \parallel R_{\text{б12}})] = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$.



Рисунки к п.2.3 Задания

2.3. Схема с параллельной отрицательной обратной связью по току

а) Для схемы, изображенной на рис. 2.3-1, измерить

$$K'_e = U_{\text{вых}}/\mathcal{E}_\text{и}, R'_{\text{вх}} \text{ и } f'_{\text{верхн}}.$$

Указания

Собрать схему согласно рис. 2.3-2. Если постоянное напряжение на коллекторе транзистора VT2 относительно земли не принадлежит интервалу $(0,5 \dots 0,7) \cdot U_\Pi$, то следует изменить $R_{\text{б1}}$ так, чтобы это условие выполнялось.

$$R'_{\text{вх}} \approx U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} \text{ при условии, что } R_{\text{б1}} \gg U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}.$$

б) Исследовать, выполняются ли соотношения

$$K'_e = \frac{\gamma \cdot K}{1 - K \cdot \beta} \text{ и } R'_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} \left\| \frac{R_{\text{св}}}{1 - K_1} \right\|,$$

$$\text{где } K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}, \beta = \left. \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} \right|_{\mathcal{E}_\text{и}=0}, \gamma = \left. \frac{U_{\text{вх}}}{\mathcal{E}_\text{и}} \right|_{I_{\text{вых}}=0}, R_{\text{вх}} = h_{113}(VT1)$$

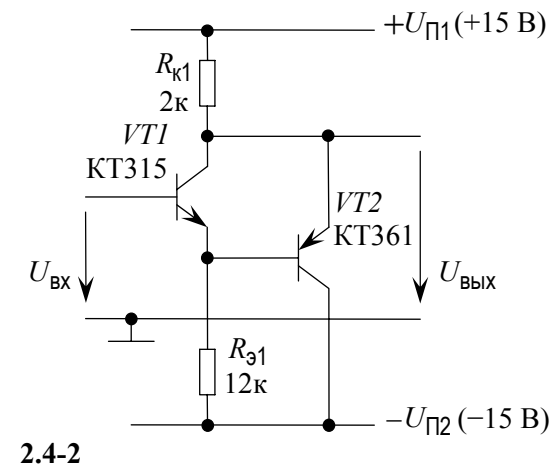
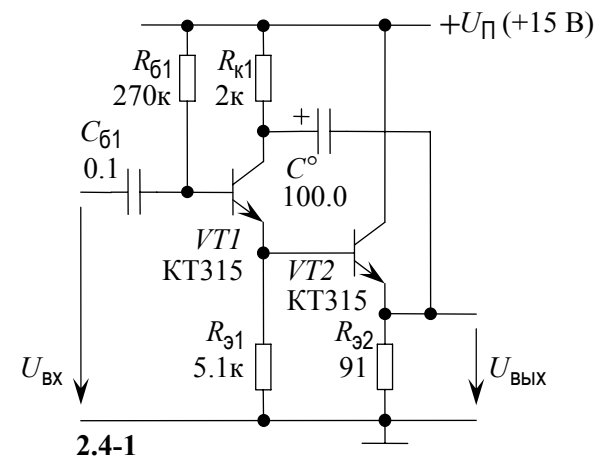
и $K_1 = U_1/U_{\text{вх}}$ (см. рис. 2.3-1). Сравнить $f'_{\text{верхн}}$ со значением $f_{\text{верхн}}$ для усилителя без обратной связи.

Указания

Прежде всего следует экспериментально убедиться в том, что K имеет одно и то же значение в схемах на рис. 2.3-2 и 2.3-3. $R_{\text{вх}}$ определяется из соотношения $R_{\text{вх}} \left\| R_{\text{св1}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$ для схемы на рис. 2.3-3. Коэффициенты β и γ можно найти путем расчета по формулам

$$\beta = -\frac{R_{\text{э2}}}{R_{\text{к2}}} \cdot \frac{R_\text{и} \parallel R_{\text{вх}}}{R_{\text{св}} + (R_\text{и} \parallel R_{\text{вх}})} \text{ и } \gamma = \frac{R_{\text{вх}} \parallel R_{\text{св}}}{R_\text{и} + (R_{\text{вх}} \parallel R_{\text{св}})}$$

или определить экспериментально путем измерений, подобных указанным в п. 1.5б. Значение K_1 приблизительно равно коэффициенту усиления первого каскада; на средних частотах $K_1 < 0$.



Рисунки к п.2.4 Задания

2.4. Эмиттерный повторитель с пониженной входной емкостью

а) Исследовать двухкаскадный повторитель с внутренней обратной связью, собранный по одной из схем, представленных на рис. 2.4-1 и 2.4-2: измерить

$$K' = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}, R'_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}} \text{ и } R'_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.ХХ}}/I_{\text{ВЫХ.КЗ}},$$

определить входную емкость $C'_{\text{ВХ}}$.

Указания

Подав на вход схемы сигнал от источника с эдс $\mathcal{E}_{\text{и}}$ и выходным сопротивлением $R_{\text{и}} \approx 56 \text{ кОм}$, убедитесь в том, что K' практически не зависит от частоты вплоть до 10 МГц, оставаясь близким к 1. При выполнении этого условия

$$C'_{\text{ВХ}} = 1/(2\pi f'_{\text{верхн}} R_{\text{и}}^*),$$

где $f'_{\text{верхн}}$ – граничная частота для зависимости $K'_e(f) = U_{\text{ВЫХ}}/\mathcal{E}_{\text{и}}$, $R_{\text{и}}^* = R_{\text{и}} \parallel R'_{\text{ВХ}}$. $I_{\text{ВХ}}$ – ток, потребляемый схемой от источника сигнала. $R'_{\text{ВЫХ}}$ находится по правилу двух нагрузок *при одном и том же значении* $U_{\text{ВХ}}$.

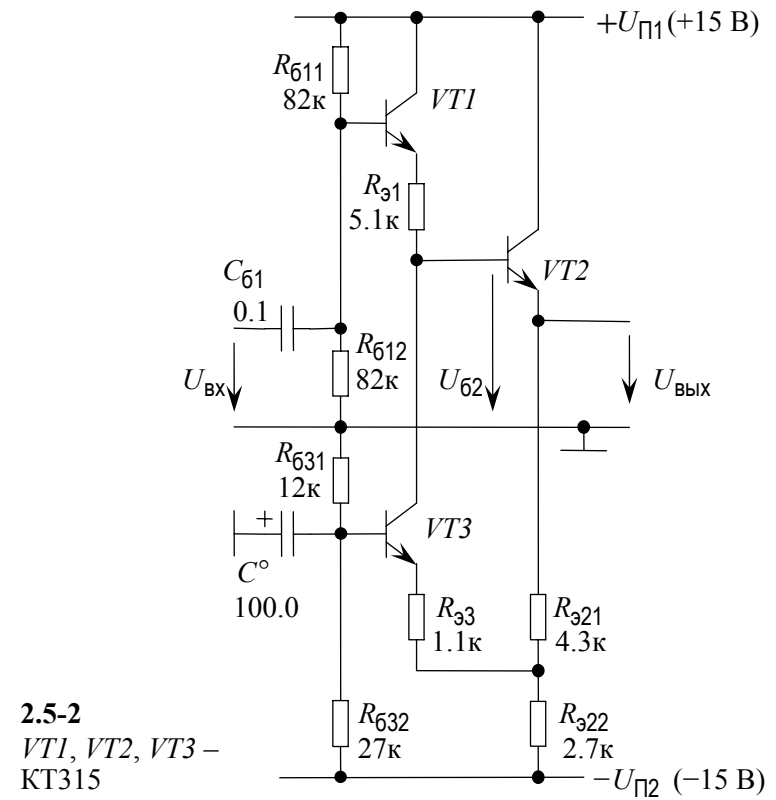
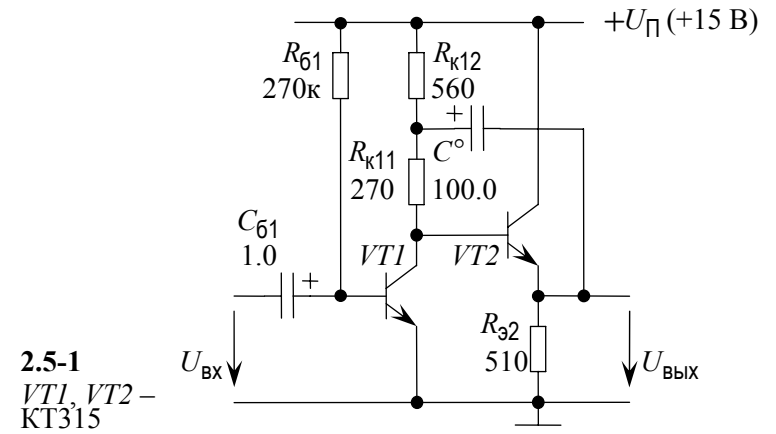
б) Исследовать теоретически работу выбранной схемы и проверить экспериментально справедливость полученных формул. В частности, должно выполняться равенство

$$C'_{\text{ВХ}} \approx C_{\text{бэ}} \cdot (1 - K_1) + C_{\text{бк}} \cdot (1 - K'),$$

где $C_{\text{бэ}}$ и $C_{\text{бк}}$ – емкости база–эмиттер и база–коллектор транзистора VTI , а K_1 – коэффициент передачи по напряжению от базы этого транзистора к его эмиттеру.

Указание

Задача экспериментального исследования заключается в том, чтобы в серии опытов определить фактические значения параметров используемых транзисторов. Требуемую проверку осуществляют, подставляя эти значения в полученные формулы и сравнивая результаты расчета с результатами измерений в п. 2.4а.



Рисунки к п. 2.5 Задания

2.5. Резисторные усилители с параллельной положительной обратной связью

а) Для одной из схем, изображенных на рис. 2.5-1 и 2.5-2, измерить $K' = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ и $f'_{\text{верхн}}$.

Указание.

В схеме на рис. 2.5-2. подбором R_{33} , если это необходимо, добиваются, чтобы постоянное напряжение на выходе не выходило за пределы $-2 \dots +2$ В.

б) Убедиться в том, что схема на рис. 2.5-1 эквивалентна – с точки зрения значений K' и $f'_{\text{верхн}}$ – однокаскадному усилителю на транзисторе VT1 с нагрузкой

$$\frac{R_{к11}}{1 - K_2} \parallel R_{\text{вх.тр2}},$$

где K_2 и $R_{\text{вх.тр2}}$ – коэффициент передачи и входное сопротивление повторителя на транзисторе VT2, а для схемы на рис. 2.5-2

$$K' = \frac{\gamma \cdot K}{1 - K \cdot \beta},$$

где K – собственный коэффициент передачи эмиттерного повторителя на транзисторе VT2, $\beta = U_{62}/U_{\text{вых}}$ при $U_{\text{вх}} = 0$, $\gamma \approx 1$.

Указания

Рекомендуется получить аналитические выражения для K' и $f'_{\text{верхн}}$, подставить типичные значения параметров транзисторов и сравнить между собой результаты расчета и эксперимента. В схеме на рис. 2.5-1 петля обратной связи размыкается путем переключения правой пластины C° с эмиттера VT2 на землю, а в схеме на рис. 2.5-2 – путем замены R_{33} двумя последовательно включенными резисторами и заземления средней точки между ними по переменному току. Для схемы на рис. 2.5-2

$$\beta = \frac{R_{322} \parallel R_{33}}{R_{321} + (R_{322} \parallel R_{33})} \cdot \frac{1}{R_{33}} \cdot R_{31}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронов Е. В., Ларин А. Л.* Радиоэлектроника. Обратные связи в линейных устройствах: Учеб. пособие. – М.: МФТИ, 1978.
2. *Габидулин Э. М., Куклев Л. П.* Линейные усилители: Учеб. пособие. – М.: МФТИ, 1979.
3. *Ларин А. Л.* Аналоговая электроника: Учеб. пособие. – М.: МФТИ, 2007.
4. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1990.
5. *Озерский Ю. П.* Линейные методы в радиотехнике: Учеб. пособие. – М.: МФТИ, 2008.

ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ
В СХЕМАХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Лабораторная работа
по курсам:
Линейные методы в радиотехнике
Аналоговая электроника
Электронные методы физических исследований
Основы радиотехники
Радиотехника и схемотехника

Составитель: **Воронов Евгений Валентинович**

Редактор *И. А. Волкова*. Корректор *О. П. Котова*.

Подписано в печать --.--.2009.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Тираж 600 экз. Заказ № ф- .

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский физико-технический институт (государственный университет)
Отдел автоматизированных издательских систем “ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ”
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

4. Когда коэффициент усиления $K = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ велик и нет возможности непосредственно измерить $U_{\text{ВХ}}$, входное сопротивление $R_{\text{ВХ}}$ и значение K можно найти, выполнив наблюдения при двух значениях сопротивления $R_{\text{И}}$:

если $U_{\text{ВЫХ}} = U_1$ при

$\mathcal{E}_{\text{И}} = \mathcal{E}_1, R_{\text{И}} = R_1$

и $U_{\text{ВЫХ}} = U_2$ при

$\mathcal{E}_{\text{И}} = \mathcal{E}_2, R_{\text{И}} = R_2$, то

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{(\mathcal{E}_1 / \mathcal{E}_2) \cdot R_2 - (U_1 / U_2) \cdot R_1}{(U_1 / U_2) - (\mathcal{E}_1 / \mathcal{E}_2)}$$

и $K = (U_1 / \mathcal{E}_1) \cdot (R_1 + R_{\text{ВХ}}) / R_{\text{ВХ}} = (U_2 / \mathcal{E}_2) \cdot (R_2 + R_{\text{ВХ}}) / R_{\text{ВХ}}$.

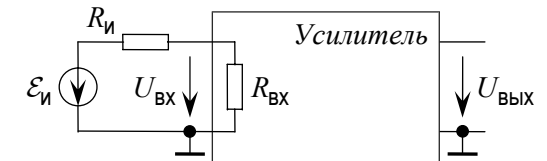


Рисунок к п. 4 Рекомендаций