

**Л.И.Шарыгина**

**СБОРНИК ЗАДАЧ  
ПО УСИЛИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВАМ**

**Учебное пособие**

2 издание

**Томск, 2012**

УДК 621.396 (075)

Л.И.Шарыгина. Сборник задач по усилительным устройствам. Учебное пособие, рекомендованное Учебно-методическим объединением для студентов специальности «Радиотехника». – 2-е изд. – Электрон, опт. диск (CD-ROM) - Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012. - 116 с.

(Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области автоматике, электроники, микроэлектроники и радиотехники Министерства образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов вузов специальности "Радиотехника")

Рецензенты:

- кафедра радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники,
- доктор технических наук, профессор Ройтман М.С.,
- доктор физико-математических наук, профессор Детинко В.Н.

---

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники. 634050, Томск, пр. Ленина, 40.

ISBN 5-86889-069-8

© Л.И.Шарыгина, 2012

## Оглавление

Предисловие .....	4
Глава первая. Качественные показатели аналоговых электронных устройств (линейные параметры) .....	5
<i>Задачи к главе 1</i> .....	6
Глава вторая. Качественные показатели аналоговых электронных устройств (амплитудная характеристика, нелинейные искажения, динамический диапазон) .....	13
<i>Задачи к главе 2</i> .....	14
Глава третья. Режим работы транзисторов, его стабилизация и динамические характеристики .....	17
3.1 Общие сведения о динамических характеристиках .....	17
3.1.1 Динамическая характеристика постоянного тока .....	17
3.1.2 Динамические характеристики переменного тока при активной нагрузке .....	19
3.2 Использование динамических характеристик .....	20
3.3 Оценка уровня нелинейных искажений .....	22
3.4 Стабилизация режима биполярных транзисторов .....	23
3.5 Стабилизация режима полевого транзистора .....	26
<i>Задачи к главе 3</i> .....	27
Глава четвертая. Реостатный каскад на полевом транзисторе .....	41
<i>Задачи к главе 4</i> .....	44
Глава пятая. Реостатный каскад на биполярном транзисторе .....	48
<i>Задачи к главе 5</i> .....	50
Глава шестая. Определение вида обратной связи .....	56
<i>Задачи к главе 6</i> .....	56
Глава седьмая. Обратные связи в усилителях .....	77
<i>Задачи к главе 7</i> .....	78
Глава восьмая. Исправление ошибок в схемах .....	90
<i>Задачи к главе 8</i> .....	90
Приложение 1. Параметры и характеристики транзисторов .....	103
Приложение 2. Шкала номинальных параметров радиодеталей .....	116

## Предисловие

Книга представляет собой существенно доработанное издание двух ранее вышедших книг автора: «Сборник задач по усилительным устройствам» (1979 г.) и «Аналоговые электронные устройства. Сборник задач» (1994 г.). Автор постарался подготовить материал книги так, чтобы она соответствовала современному уровню электроники.

Сборник задач предназначен для использования в качестве учебного пособия при изучении основных разделов курса аналоговой схемотехники, который входит под разными названиями в государственные образовательные стандарты по всем радиотехническим специальностям высших учебных заведений. Содержание задачника соответствует программам курса «Аналоговые электронные устройства» («Схемотехника аналоговых электронных устройств») специальности «Радиотехника», курса «Усилительные и электротехнические устройства» специальности «Радиоэлектронные системы» и других подобных дисциплин.

Дисциплина «Аналоговые электронные устройства» является одной из первых инженерных дисциплин радиотехнических специальностей вузов. Изучение ее важно для будущего радиоинженера потому, что оно способствует формированию инженерного мышления на базе общетеоретических дисциплин – математики, физики, теории цепей, электронных приборов.

Пособие содержит более 200 задач, сгруппированных в 8 главах. Рассматриваются качественные показатели аналоговых электронных устройств (линейные параметры, амплитудная характеристика, нелинейные искажения, динамический диапазон), режим работы транзисторов, его стабилизация и динамические характеристики, реостатные каскады на полевых и биполярных транзисторах, обратные связи в усилителях. Последняя глава посвящена задачам по отысканию и исправлению ошибок в принципиальных схемах усилительных устройств. В конце задачника приведена краткая сводка данных о параметрах и характеристиках транзисторов, использующихся при решении задач.

Каждая глава начинается с краткого конспекта основных сведений и расчетных соотношений по рассматриваемому разделу. Этот материал может непосредственно использоваться при решении задач, но он имеет также и самостоятельную ценность как справочный источник тезисного изложения материала дисциплины, весьма полезен при подготовке к практическим занятиям, зачетам и экзаменам. В каждой главе после теоретического раздела приводится достаточное для работы со студенческой группой количество задач (от 12 до 48), имеющих сквозную нумерацию.

При решении задач следует выполнять разумное округление вычисляемых величин, а при выборе элементов схем ориентироваться на существующие номинальные значения (см. Приложение 2 настоящего пособия).

## Глава первая

### Качественные показатели аналоговых электронных устройств (линейные параметры)

К линейным качественным показателям относятся те, значения которых не зависят от амплитуды приложенного сигнала.

- Коэффициент передачи напряжения

$$\dot{K} = \dot{U}_2 / \dot{U}_1,$$

где  $\dot{U}_2$  - напряжение на нагрузке;

$\dot{U}_1$  - напряжение на входных зажимах усилительного устройства.

$$\dot{K} = K e^{j\varphi_k},$$

где  $K = U_2 / U_1$  - модуль коэффициента передачи,

$\varphi_k$  - фазовый сдвиг коэффициента передачи.

В ряде случаев представляет интерес сквозной коэффициент передачи, равный отношению напряжения на нагрузке к ЭДС источника сигнала ( $\dot{e}_c$ ):

$$\dot{K}_{скв} = \dot{U}_2 / \dot{e}_c = \dot{U}_2 / \dot{U}_1 \cdot \dot{U}_1 / \dot{e}_c = \dot{K}_{вых} \dot{K}$$

или произведению коэффициента передачи входной цепи и коэффициента передачи устройства.

- Коэффициент усиления  $K_o$  – значение модуля коэффициента передачи на средних частотах.

Коэффициент усиления нескольких последовательно включенных каскадов  $K_{oN}$  определяется произведением коэффициентов усиления этих каскадов:

$$K_{oN} = K_{o1} \cdot K_{o2} \dots K_{on} = \prod_{i=1}^n K_{oi},$$

поскольку

$$\dot{K}_N = \dot{K}_1 \cdot \dot{K}_2 \dots \dot{K}_n = \prod_{i=1}^n \dot{K}_i.$$

Модуль относительного коэффициента передачи и коэффициент усиления могут выражаться в децибелах:

$$K, \text{дБ} = 20 \lg K.$$

Тогда 
$$K_N, \text{дБ} = \sum_{i=1}^n K_i, \text{дБ}.$$

- Относительный коэффициент передачи  $\dot{K}/K_o$  и его модуль  $K/K_o$ .  
Для многокаскадного усилителя

$$\dot{K}/K_{o_N} = \dot{K}_1/K_o \cdot \dot{K}_2/K_o \dots \dot{K}_n/K_o = \prod_{i=1}^n \dot{K}_i/K_{o_i}.$$

- Коэффициент частотных искажений – величина, обратная относительному коэффициенту передачи:

$$K_o/K, \\ (K_o/K), \text{дБ} = 20 \lg(K_o/K).$$

- Амплитудно-частотная характеристика – зависимость модуля коэффициента передачи от частоты; нормированная амплитудно-частотная характеристика – зависимость модуля нормированного коэффициента передачи от частоты. Фазо-частотная характеристика – зависимость фазового сдвига коэффициента передачи от частоты.
- Комплексное входное сопротивление устройства  $\dot{Z}_{\text{вх}}$  представляет собой в большинстве случаев параллельное соединение входного сопротивления  $R_{\text{вх}}$  и входной емкости  $C_{\text{вх}}$ .

### *Задачи к главе 1*

#### Задача 1.1

Сколько нужно взять одинаковых каскадов с коэффициентом усиления каждого 12, чтобы получить общий коэффициент усиления не менее 10 600?

#### Задача 1.2

Коэффициент усиления двухкаскадного усилителя 45дБ, коэффициент усиления первого каскада 12. Во сколько раз (на сколько децибел) больше (или меньше) коэффициент усиления второго каскада?

#### Задача 1.3

Определите коэффициент усиления первого каскада трехкаскадного усилителя, если общий коэффициент усиления 83 дБ, а коэффициент усиления второго каскада на 6 дБ меньше коэффициента усиления третьего, равного 12 относительным единицам (разам).

#### Задача 1.4

Определите коэффициент частотных искажений каждой ступени четырехкаскадного усилителя с одинаковыми каскадами, если допустимые частотные искажения усилителя на верхних и нижних частотах соответственно равны 3 дБ и 4 дБ. Определите значения относительных коэффициентов передачи каждого каскада на этих частотах и всего усилителя в относительных единицах и соответствующие значения модулей коэффициентов передачи, если коэффициент усиления усилителя равен 980.

#### Задача 1.5

Определите коэффициент частотных искажений трехкаскадного усилителя, составленного из одинаковых каскадов, на частотах, где общий коэффициент усиления 71 дБ, а коэффициент усиления каждого из каскадов равен 17 относительным единицам.

#### Задача 1.6

Определите коэффициент передачи, модуль коэффициента передачи, коэффициент усиления и модуль относительного коэффициента передачи четырехполюсника, изображенного на рис. 1.1. Постройте частотную характеристику и определите верхнюю граничную частоту на уровне минус 3 дБ.

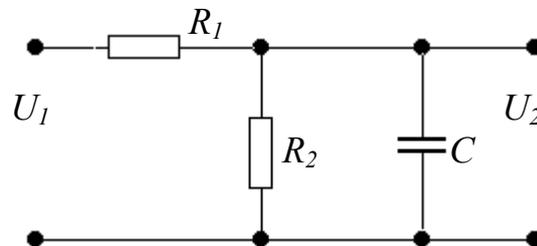


Рис. 1.1

#### Задача 1.7

Определите комплексное входное сопротивление, его активную и емкостную составляющие для четырехполюсника, изображенного на рис.1.1. Постройте зависимость от частоты входного сопротивления, входной емкости и модуля  $\dot{Z}_{вх}$ . Объясните полученные зависимости.

### Задача 1.8

Определите коэффициент передачи, модуль коэффициента передачи, коэффициент усиления и модуль относительного коэффициента передачи четырехполюсника, изображенного на рис. 1.2. Постройте частотную характеристику и определите верхнюю граничную частоту на уровне минус 3 дБ.

### Задача 1.9

Определите комплексное входное сопротивление, его активную и емкостную составляющие для четырехполюсника, изображенного на рис.1.2. Постройте зависимость от частоты входного сопротивления, входной емкости и модуля  $\dot{Z}_{ex}$ . Объясните полученные зависимости.

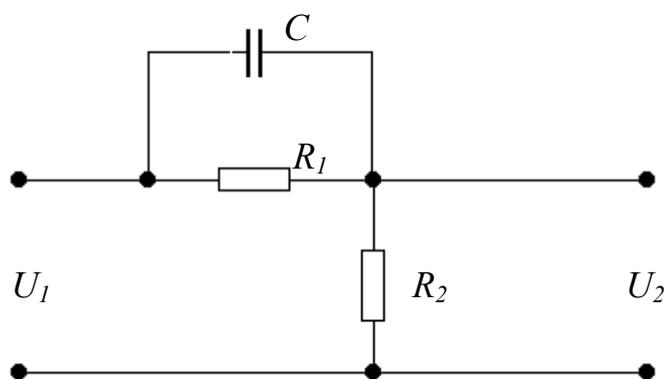


Рис. 1.2

### Задача 1.10

Для схемы, изображенной на рис. 1.3, определите коэффициент передачи. При каком соотношении между параметрами элементов схемы ее коэффициент передачи не зависит от частоты (неискаженная передача)?

### Задача 1.11

Определите входное сопротивление и входную емкость четырехполюсника, изображенного на рис. 1.3, при выполнении условия неискаженной передачи (компенсированный делитель напряжения). Сравните входное сопротивление и входную емкость делителя с  $R_2$  и  $C_2$  (величинами, имитирующими входное сопротивление и входную емкость без делителя). Как зависит входная емкость делителя от его коэффициента деления?

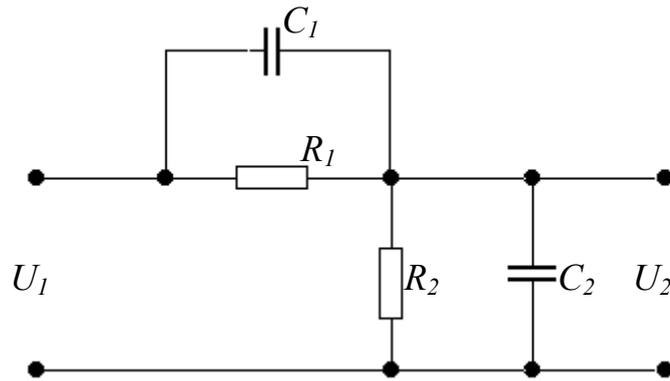


Рис. 1.3

### Задача 1.12

Постройте зависимости  $R_{ex}$  и  $C_{ex}$  компенсированного делителя напряжения от коэффициента деления на фиксированной частоте (диапазон изменения коэффициента деления от 1 ( $R_1$  равно нулю) до 100). Объясните полученные результаты.

### Задача 1.13

Определите сквозной коэффициент передачи  $\dot{K}_{скв}$  и модуль относительного сквозного коэффициента передачи схемы, изображенной на рис. 1.4, при выполнении условия  $R_1 C_1 = R_2 C_2$ . Изобразите частотную характеристику схемы для двух различных значений  $R_c, C_2$  и отношений  $R_2 / (R_1 + R_2)$ .

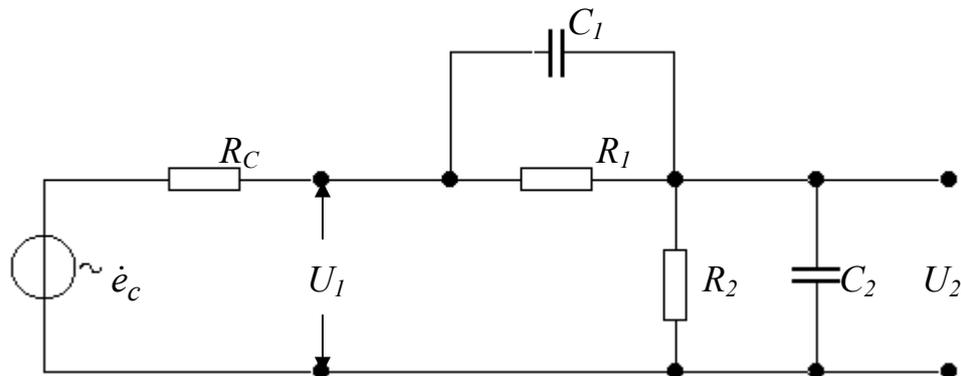


Рис. 1.4

### Задача 1.14

Определите значение частоты, на которой модуль относительного коэффициента передачи входной цепи четырехполюсника, изображенного на рис. 1.5, равен минус 3 дБ. Коэффициент передачи определяется отношением  $\dot{U}_{ex} / \dot{e}_c$ .  $R_c = 1$  кОм,  $R_{ex} = 1$  кОм,  $C_{ex} = 10$  пФ.

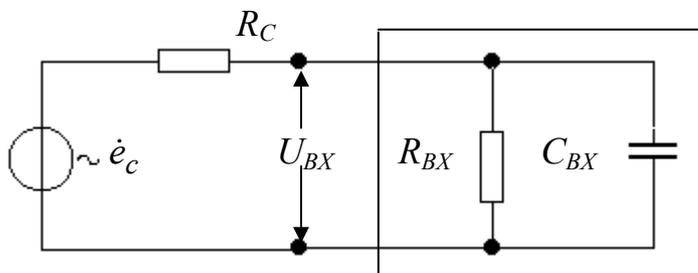


Рис. 1.5

### Задача 1.15

Определите, при какой входной емкости четырехполюсника, изображенного на рис. 1.5, коэффициент частотных искажений входной цепи на частоте 10 МГц равен 1 дБ.  $R_c = 1$  кОм,  $R_{ex} = 1$  кОм.

### Задача 1.16

Постройте частотную характеристику цепи, изображенной на рис.1.5,  $R_c = 1$  кОм,  $R_{ex} = 1$  кОм,  $C_{ex} = 100$  пФ. Определите полосу пропускания на уровне минус 3дБ. Как изменится полоса пропускания, если отсчет сделать на уровне минус 1 дБ?

### Задача 1.17

Определите, в каком положении регулятора, изображенного на рис. 1.6, искажения входной цепи на верхних частотах максимальны:

- а)  $R_c = 0$ ,  $R_{ex} = \infty$ ;
- б)  $R_c \neq 0$ ,  $R_{ex}$  соизмеримо с  $R_p$ .

### Задача 1.18

Выберите максимально возможное значение регулировочного сопротивления  $R_p$  в схеме на рис. 1.6, если  $C_{ex} = 100$  пФ, а допустимое значение модуля относительного коэффициента передачи входной цепи на частоте 8 МГц не ниже минус 2 дБ.

- а)  $R_c = 0$ ,  $R_{ex}$  много больше возможного  $R_p$ ;

б)  $R_c = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{вх}}$  много больше возможного  $R_p$ ;

в)  $R_c = 0$ ,  $R_{\text{вх}} = 1 \text{ кОм}$ ;

г)  $R_c = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{вх}} = 1 \text{ кОм}$ .

Варианты в) и г) целесообразно решать вне аудитории.

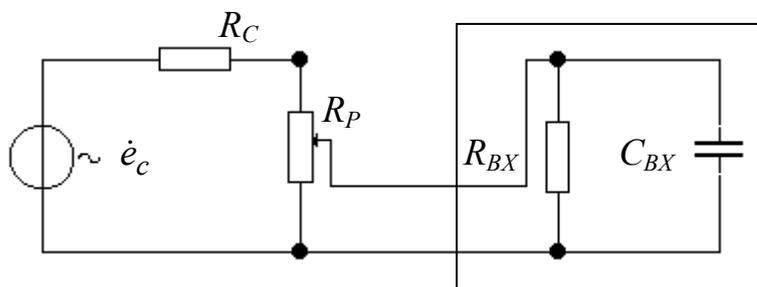


Рис. 1.6

### Задача 1.19

Постройте регулировочные характеристики (зависимость коэффициента усиления от положения движка потенциометра) и зависимость верхней граничной частоты регулятора от положения движка потенциометра схем регулировки усиления (рис.1.6 и 1.7), сравните показатели схем регулировки усиления и дайте рекомендации по их применению. Построения выполните, задавшись значением  $R_p$  таким образом, чтобы при  $C_{\text{вх}} = 100 \text{ пФ}$  значение модуля относительного коэффициента передачи входной цепи на частоте 8 МГц было не ниже минус 2 дБ.  $R_c = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{вх}} = 1 \text{ кОм}$ .

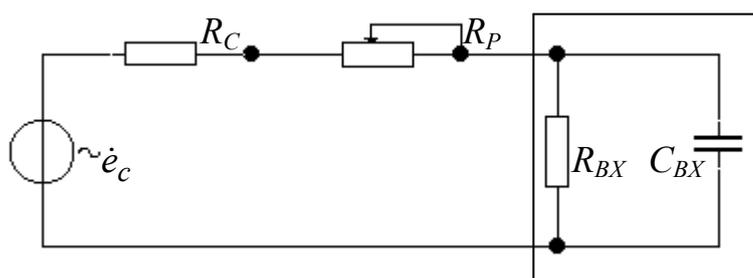


Рис. 1.7

### Задача 1.20

Необходимая амплитуда напряжения на выходе усилителя 1,5 В, ЭДС источника сигнала 23 мВ. Определите необходимый коэффициент усиления усилителя (без учета коэффициента передачи входной цепи) при условии, что внутреннее сопротивление источника сигнала 1 кОм и входное сопротивление усилителя 3 кОм.

### Задача 1.21

Определите  $K_o$  и  $K_{o_{xx}}$  усилителя, согласованного по входу, если ЭДС источника сигнала 0,05 В, а выходное напряжение на нагрузке 100 Ом составляет 1,2 В. Выходное сопротивление усилителя 200 Ом.

## Глава вторая

### Качественные показатели аналоговых электронных устройств (амплитудная характеристика, нелинейные искажения, динамический диапазон)

Амплитудная характеристика представляет собой зависимость амплитуды первой гармоники выходного напряжения (тока) от амплитуды входного сигнала.

Динамический диапазон  $D$  определяется отношением максимального входного напряжения, при котором нелинейные искажения на выходе не превышают допустимый уровень ( $U_{ex_{max}}$ ), к минимальному входному напряжению при заданном отношении сигнал/шум на выходе ( $U_{ex_{min}}$ ):

$$D = U_{ex_{max}} / U_{ex_{min}}.$$

Нелинейные искажения на выходе в случае, когда сопротивление нагрузки не зависит от частоты и имеет одно и то же значение на частотах всех гармонических составляющих, можно описать, например, коэффициентом гармоник

$$\begin{aligned} \kappa_2 &= \frac{\sqrt{P_2 + P_3 + \dots}}{\sqrt{P_1}} = \frac{\sqrt{I_{m_2}^2 + I_{m_3}^2 + \dots}}{\sqrt{I_{m_1}^2}} = \\ &= \frac{\sqrt{U_{m_2}^2 + U_{m_3}^2 + \dots}}{\sqrt{U_{m_1}^2}}, \end{aligned}$$

где  $P_1, P_2, P_3$  - мощность первой, второй и т.д. гармоник;

$I_{m_1}, I_{m_2}, I_{m_3}$  - амплитуда тока первой, второй и т.д. гармоник;

$U_{m_1}, U_{m_2}, U_{m_3}$  - амплитуда напряжения первой, второй и т.д. гармоник.

Другой способ задания уровня нелинейных искажений состоит в том, чтобы определить по амплитудной характеристике, как зависит коэффициент усиления от амплитуды входного сигнала, и задать значение  $U_{ex_{max}}$ , при котором коэффициент усиления станет меньше, чем при малом сигнале (линейное усиление) на заданное число децибел («сжатие»).

Для «идеального» линейного усилителя динамический диапазон по входу совпадает с динамическим диапазоном по выходу.

## Задачи к главе 2

### Задача 2.1

Определите максимальную мощность на выходе усилителя, если сопротивление нагрузки 8 Ом, коэффициент усиления 45 дБ, динамический диапазон усиливаемых услителем сигналов 32 дБ и минимальное входное напряжение 0,8 мВ (действующее значение).

### Задача 2.2

Определите динамический диапазон усилителя, если минимальное напряжение на его входе на 16 дБ выше уровня шумов, составляющих 10 мкВ (действующее значение). Максимальная выходная мощность на нагрузке 10 Ом составляет 10 Вт, коэффициент усиления 70 дБ.

### Задача 2.3

Каково действующее значение уровня шумов на входе усилителя, обладающего коэффициентом усиления 65 дБ и динамическим диапазоном 20 дБ, если максимальное напряжение на нагрузке 10 В, а минимальный входной сигнал на 20 дБ превышает уровень шумов?

### Задача 2.4

Каково сопротивление нагрузки усилителя, если выделяющаяся на нем максимальная мощность 15 Вт, коэффициент усиления 48 дБ, динамический диапазон 50 дБ и минимальное входное напряжение 120 мкВ?

### Задача 2.5

Определите максимальную мощность на выходе усилителя, если динамический диапазон усиливаемых сигналов 62 дБ, сопротивление нагрузки 10 Ом, напряжение шумов на выходе усилителя 2 мВ (действующее значение) и минимальный сигнал в 3,16 раза превышает напряжение шума (сам усилитель дополнительных шумов не вносит).

### Задача 2.6

Определите коэффициент усиления усилителя по мощности, если отдаваемая им в нагрузку мощность равна 7,2 Вт. Входное сопротивление усилителя 1 кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала 200 Ом и ЭДС источника  $e_c = 0,5$  В.

### Задача 2.7

Определите коэффициент полезного действия усилителя на биполярных транзисторах, отдающего в нагрузку мощность 1 Вт. Напряжение источника питания 9 В, средний ток, потребляемый коллекторными цепями, 410 мА, а потребляемый базовыми цепями - 80 мА.

### Задача 2.8

На рис. 2.1 приведена частотная характеристика усилителя, на вход которого подано искаженное напряжение: амплитуда первой гармоники 100 мВ, амплитуда второй и третьей гармоник соответственно 10 мВ и 8 мВ. Определите коэффициент гармоник входного и выходного сигналов. Частота первой гармоники 10 кГц.

а) Зависимость сопротивления нагрузки от частоты совпадает с частотной характеристикой.

б) Сопротивление нагрузки не зависит от частоты.

Объясните полученные результаты.

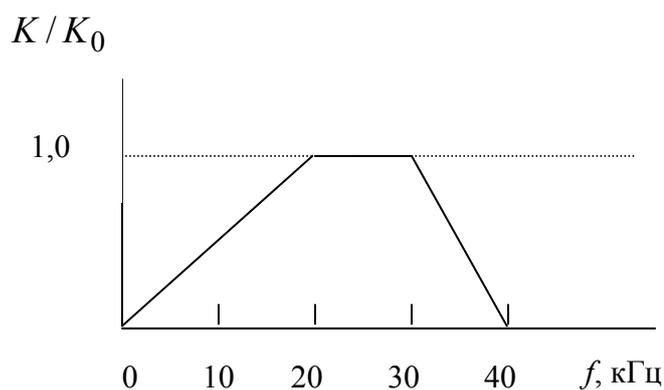


Рис. 2.1

### Задача 2.9

Амплитудная характеристика усилителя описывается уравнением (сопротивление нагрузки не зависит от амплитуды сигнала):

$$I_{\text{вых}} = a_0 + a_1 U_{\text{вх}} + a_2 U_{\text{вх}}^2, \quad (2.1)$$

$a_0, a_1, a_2$  - известны,

$$U_{\text{вх}} = U_m \cos(\omega t).$$

Определите коэффициент гармоник на выходе четырехполюсника. Каков физический смысл и какова размерность коэффициентов  $a_0, a_1, a_2$  ?

### Задача 2.10

Амплитудная характеристика четырехполюсника описывается уравнением:

$$I_{\text{вых}} = a_0 + a_1 U_{\text{вх}} + a_3 U_{\text{вх}}^3,$$

$a_0, a_1, a_3$  - ИЗВЕСТНЫ.

Сопротивление нагрузки не зависит от амплитуды сигнала. Определите уровень входного сигнала, при котором коэффициент усиления уменьшается на 1 дБ по сравнению с линейным режимом, когда  $I_{\text{вых}} = a_0 + a_1 U_{\text{вх}}$ .

### Задача 2.11

Амплитудная характеристика усилителя аппроксимируется выражением (2.1),  $a_1 = 0,1 \text{ A/V}$ . При каком значении  $a_2$  коэффициент гармоник составляет 10% при  $U_m = 100 \text{ мВ}$ ? Постройте амплитудную характеристику и покажите форму сигнала на выходе (при  $U_m = 100 \text{ мВ}$  и  $U_m = 200 \text{ мВ}$ ). Сопротивление нагрузки от частоты не зависит.

### Задача 2.12

Изобразите форму сигнала, представляющего собой

- а) чистую синусоиду;
- б) синусоиду плюс вторую гармонику с амплитудой, составляющей 20% от амплитуды первой гармоники;
- в) синусоиду плюс третью гармонику с амплитудой, составляющей 15% от амплитуды первой гармоники;
- г) синусоиду плюс вторую гармонику с амплитудой, составляющей 20% от амплитуды первой гармоники и третью гармонику с амплитудой, составляющей 15% от амплитуды первой гармоники.

Фазовые сдвиги между сигналами различных гармонических составляющих примите равными нулю.

## Глава третья

### Режим работы транзисторов, его стабилизация и динамические характеристики

#### 3.1 Общие сведения о динамических характеристиках

##### 3.1.1 Динамическая характеристика постоянного тока

Простейшая схема усилительного каскада на полевом транзисторе приведена на рис. 3.1.

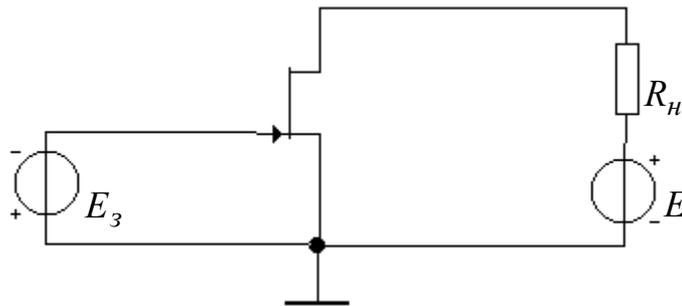


Рис. 3.1. Схема каскада на полевом транзисторе

Напряжение на стоке определяется напряжением питания  $E$ , сопротивлением нагрузки  $R_n$  и протекающим в выходной цепи током  $i_{cm}$ :

$$U_{cm} = E - i_{cm}R_n . \quad (3.1)$$

В соответствии с (3.1), динамическая характеристика представляет собой прямую линию, проходящую через точку  $U_{cm} = E$  на оси напряжения под углом, тангенс которого обратно пропорционален сопротивлению нагрузки, и через точку  $R/R_n$  на оси токов.

После выбора необходимого напряжения смещения на затворе (рис. 3.2,  $E_3 = U_{з0}$ ) определяется положение рабочей точки, которая задает напряжение на стоке  $U_{cm0}$ , и ток стока  $i_{cm0}$  при отсутствии сигнала на входе (на рис. 3.2  $U_{cm0}$  определяется напряжением на затворе  $U_{з3}$ ).

При изменении напряжения питания нагрузочная прямая перемещается параллельно самой себе (сплошные линии на рис. 3.3). Если напряжение питания постоянно, а меняется сопротивление нагрузки, прямая изменяет угол наклона (штриховая линия на рис. 3.3).

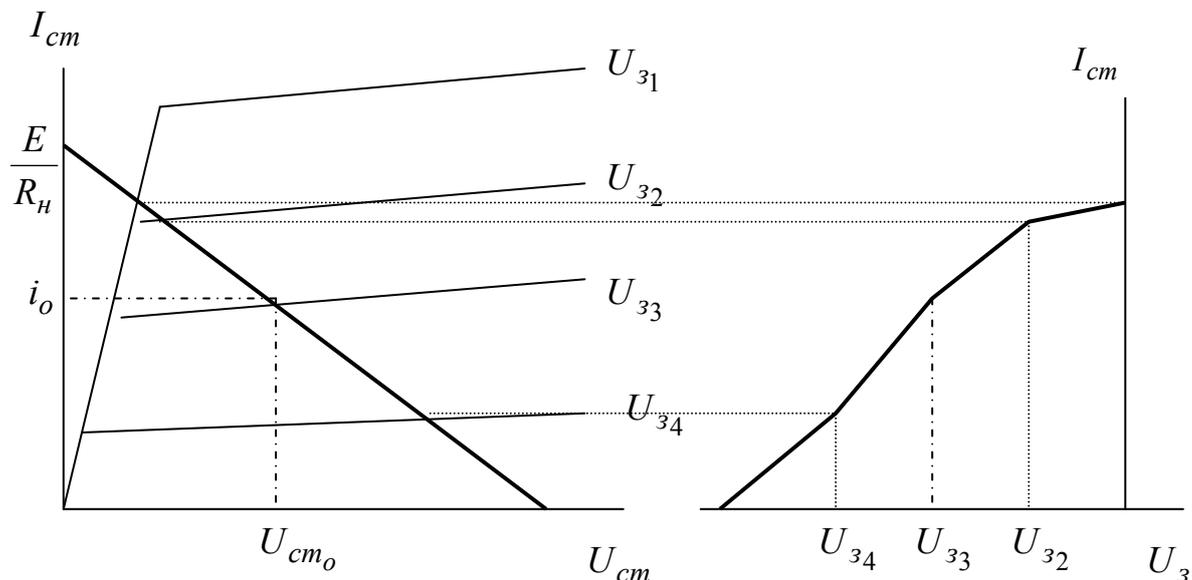


Рис. 3.2. Динамическая характеристика постоянного тока

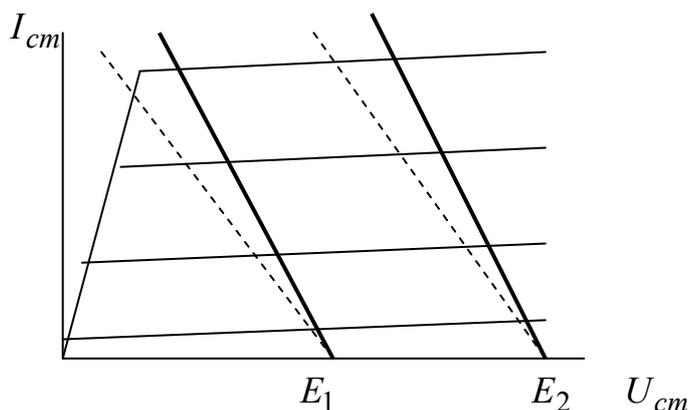


Рис. 3.3. Влияние изменений сопротивления нагрузки и напряжения источника питания

По построенной выходной динамической характеристике постоянного тока строится проходная динамическая характеристика (рис. 3.2).

Построение выходной динамической характеристики постоянного тока для биполярного транзистора не отличается от соответствующего построения для полевого.

Динамические характеристики постоянного тока используются для определения положения рабочей точки в соответствии с требуемым режимом работы усилительного элемента. После того, как положение рабочей точки зафиксировано, определяются параметры транзистора в рабочей точке (что особенно важно для биполярных транзисторов, параметры которых существенно зависят от режима).

### 3.1.2 Динамические характеристики переменного тока при активной нагрузке

При подведении к входным зажимам усилительного каскада напряжения сигнала выходной ток, помимо постоянной составляющей, содержит и переменную. При этом мгновенное значение тока определяется суммой постоянной и переменной составляющих

$$i = i_o + i_{\approx} \quad (3.2)$$

и уравнение (3.1) в случае полевого транзистора принимает вид

$$U_{cm} = (E - i_{cm_o} R_{H=}) - i_{cm_{\approx}} R_{H_{\approx}} \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) представляет собой уравнение прямой и определяет выходную динамическую характеристику переменного тока. Эта прямая проходит через рабочую точку с координатами  $U_{cm_o}$ ,  $i_{cm_o}$  под углом, тангенс угла наклона которого обратно пропорционален активной составляющей сопротивления нагрузки переменному току. Поскольку построения динамических характеристик полевого и биполярного транзисторов принципиально не отличаются одно от другого, на рис. 3.4 выполнено построение для биполярного транзистора.

Как видно из рис. 3.4, входная динамическая характеристика постоянного и переменного токов практически совпадает со статической характеристикой при напряжении на коллекторе больше (1-2) В.

Сквозная динамическая характеристика  $i_k = f(e_c)$ . Сквозная динамическая характеристика строится обычно для переменных составляющих токов и напряжений. Для этого начало координат перемещается в рабочую точку. Поскольку во входной цепи каскада на биполярном транзисторе протекает ток, напряжение сигнала холостого хода  $e_c$  отличается от напряжения на входных зажимах транзистора (напряжения между базой и эмиттером):

$$\Delta e_c = \Delta U_{вх} + \Delta i_{вх} R_H \quad (3.4)$$

Здесь  $R_H$  – внутреннее сопротивление источника сигнала.

Сквозная динамическая характеристика построена на рис. 3.5.

Иногда не совсем удобно пользоваться приращениями токов и напряжений, вызванными сигналом и связанными с переменной составляющей. Удобнее выполнить построения для мгновенных значений токов и напряжений (штриховые оси на рис. 3.5). При этом, однако,  $e_c$  теряет физический смысл и становится чисто формальной величиной.

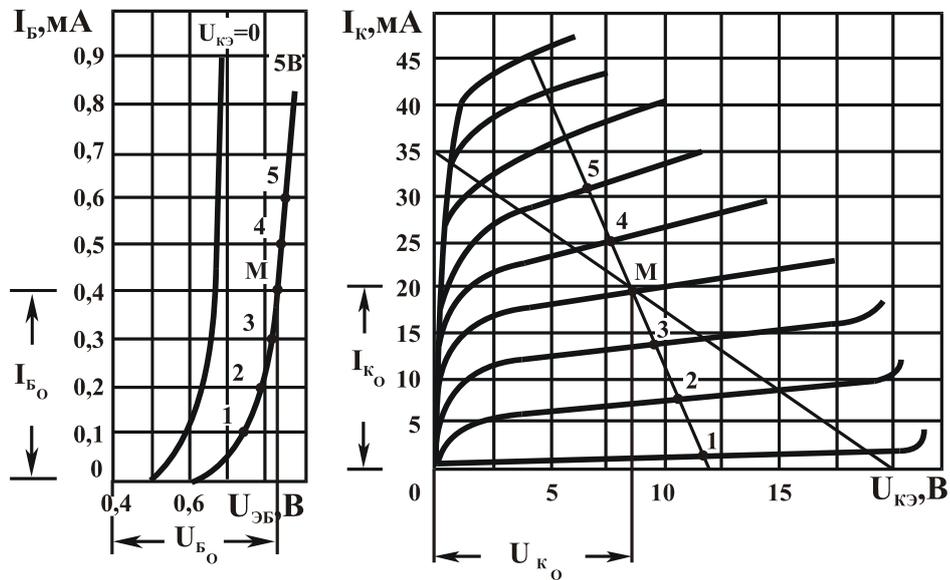


Рис. 3.4. Динамические характеристики постоянного и переменного токов биполярного транзистора

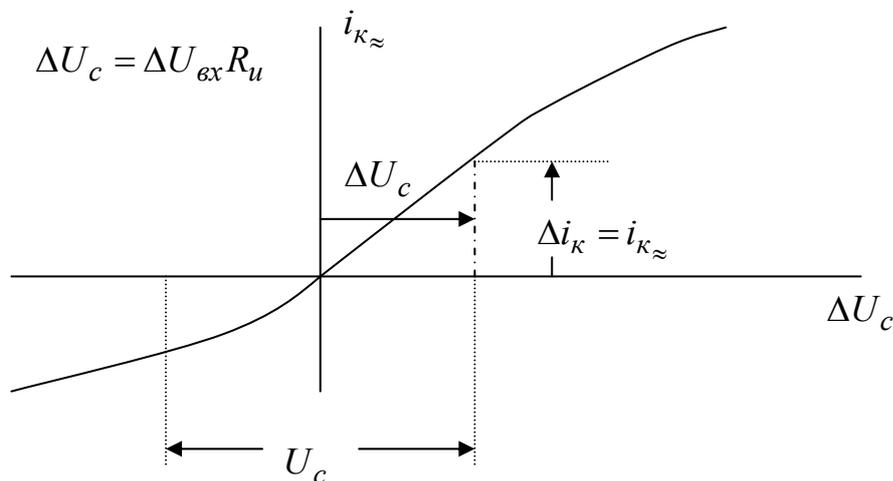


Рис. 3.5. Сквозная динамическая характеристика каскада на биполярном транзисторе

### 3.2 Использование динамических характеристик

Динамические характеристики обычно используются для определения качественных показателей каскадов, работающих при больших входных сигналах. Изменение параметров усилительных элементов за период колебаний и возникающие нелинейные искажения не позволяют использовать для расчета этих каскадов эквивалентные схемы замещения активных элементов с квазилинейными генераторами тока и напряжения. Расчеты, выполненные с помощью динамических характеристик, отличаются большей точностью.

Выходная мощность и коэффициент полезного действия каскада определяются по выходным динамическим характеристикам:

$$P_{\text{вых}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{i_{k \text{ max}} - i_{k \text{ min}}}{2} \cdot \frac{U_{k \text{ max}} - U_{k \text{ min}}}{2}, \quad (3.5)$$

$$k\eta\theta = \frac{P_{\text{полезн.}}}{P_{\text{потребл.}}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot i_{k \approx} \cdot U_{k \approx}}{i_{k0} \cdot U_{k0}}. \quad (3.6)$$

Уровень нелинейных искажений и полезная мощность первой гармоники в каскадах на полевых транзисторах определяются по проходной и выходной характеристикам переменного тока, для каскада на биполярном транзисторе – по сквозной динамической характеристике. Входная динамическая характеристика биполярного транзистора используется для определения входной проводимости для средних и нижних частот, а совместно с выходной динамической характеристикой переменного тока – для определения коэффициента усиления.

Коэффициент усиления и входное сопротивление вычисляются по формулам:

$$K_o = \frac{U_{\text{вых max}} - U_{\text{вых min}}}{U_{\text{вх max}} - U_{\text{вх min}}}, \quad (3.7)$$

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\bar{o} \text{ max}} - U_{\bar{o} \text{ min}}}{i_{\bar{o} \text{ max}} - i_{\bar{o} \text{ min}}}. \quad (3.8)$$

При таком вычислении входного сопротивления учитывается его изменение за период действия сигнала (обозначения величин, входящих в формулы 3.7 и 3.8, поясняются рисунком 3.6).

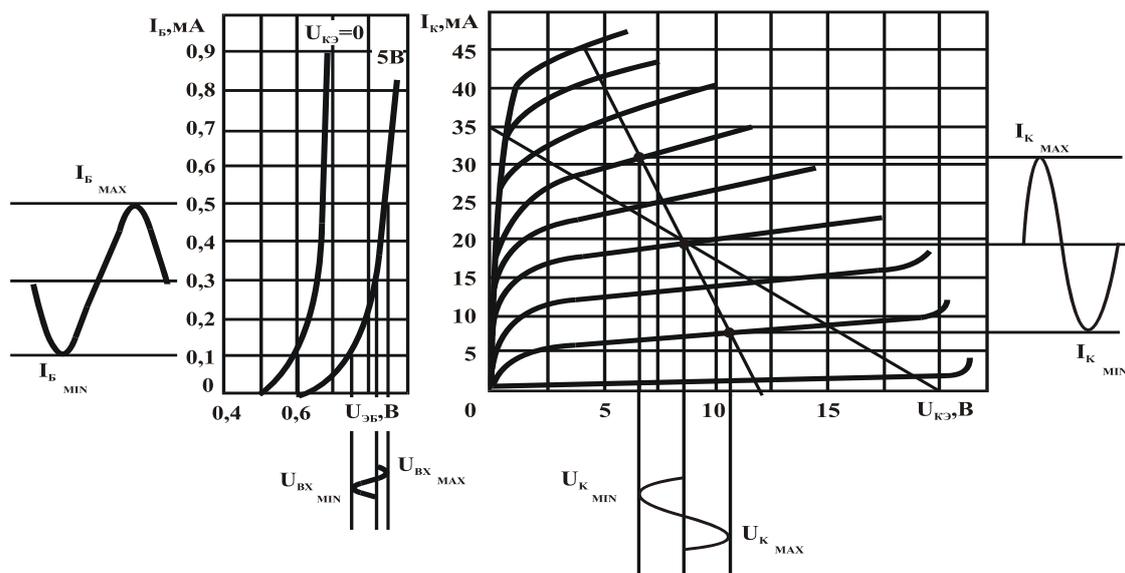


Рис. 3.6. Динамические характеристики биполярного транзистора

### 3.3. Оценка уровня нелинейных искажений

Нелинейные искажения, вносимые усилительным каскадом, количественно обычно оценивают коэффициентом гармоник или коэффициентом нелинейных искажений. При этом имеется в виду, что зависимость выходного тока от напряжения на входе аппроксимируется рядом:

$$i_{\text{вых}} = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + a_3 U^3 + \dots \quad (3.9)$$

При гармоническом входном сигнале  $U = U_m \cos \omega t$

$$i_{\text{вых}} = a_0 + a_1 U_m \cos \omega t + a_2 U_m^2 \cos^2 \omega t + a_3 U_m^3 \cos^3 \omega t + \dots = I_{cp} I_{m1} \cos \omega t + I_{m2} \cos 2\omega t + I_{m3} \cos 3\omega t + \dots$$

При этом амплитуда тока отдельных гармонических составляющих вычисляется по формулам:

$$I_{cp} = \frac{i_{\max} + i_{\min} + 2(i_1 + i_2)}{6}, \quad I_{m1} = \frac{i_{\max} - i_{\min} + i_1 - i_2}{2},$$

$$I_{m2} = \frac{i_{\max} + i_{\min} - 2I_o}{4}, \quad I_{m3} = \frac{i_{\max} - i_{\min} - 2(i_1 - i_2)}{6},$$

$$I_{m4} = \frac{i_{\max} + i_{\min} - 4(i_1 + i_2) + 6I_o}{12}.$$

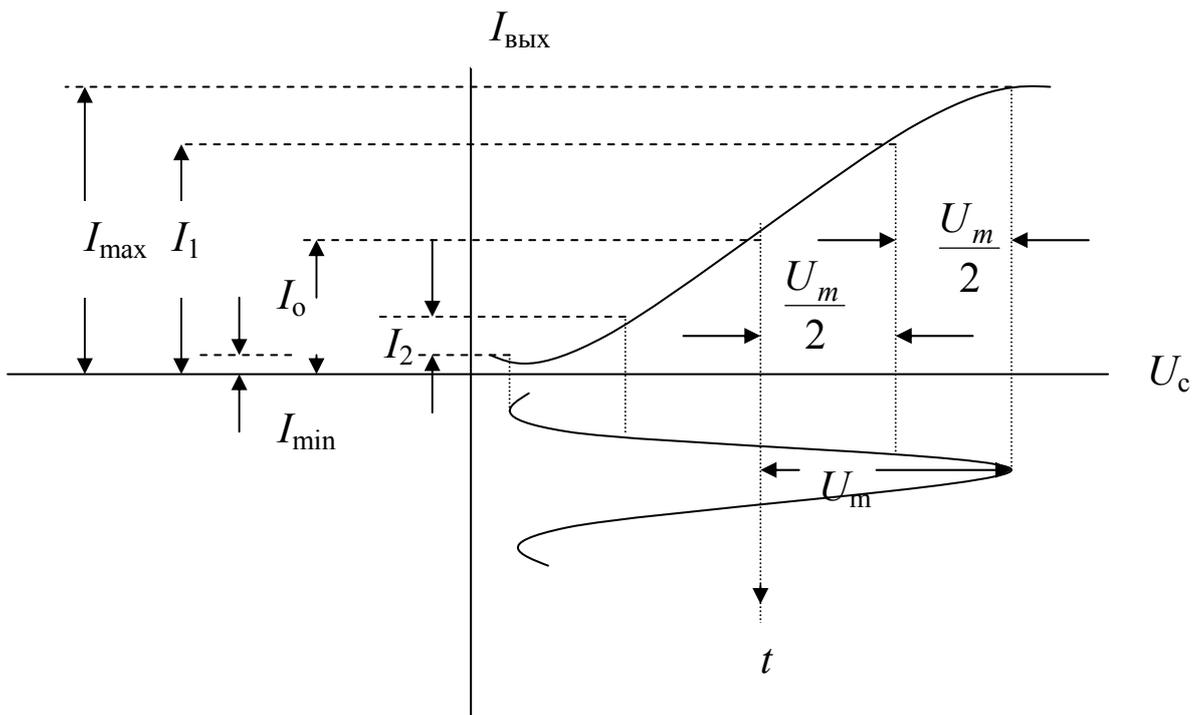


Рис. 3.7. Выбор величин для расчета коэффициента гармоник

Обозначения входящих в формулы величин поясняются на рис. 3.7.

Если сопротивление нагрузки линейно, характеристики для выходных тока  $i_{\text{вых}} = f(U_{\text{max}})$  и напряжения  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{max}})$  совпадают.

Максимально допустимая амплитуда входного напряжения задается уменьшением («сжатием») коэффициента усиления ( $U_{m_{\text{вых}}} / U_{m_{\text{вх}}}$ ) на один децибел (см. рис. 3.8).

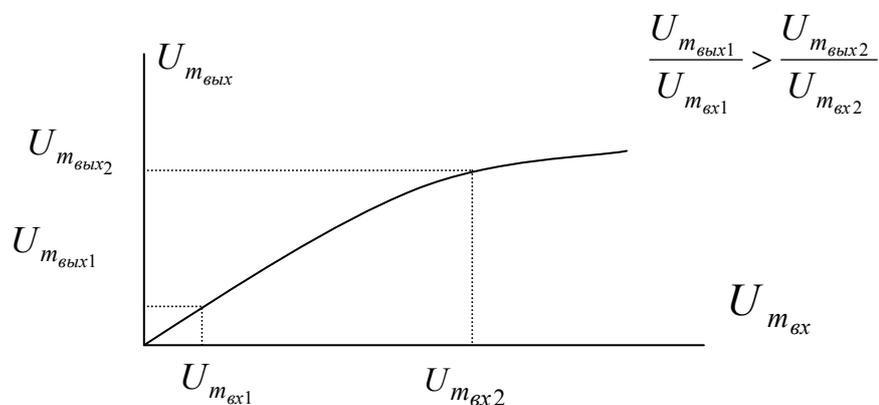


Рис. 3.8. Амплитудная характеристика каскада.

### 3.4. Стабилизация режима биполярных транзисторов

Вычисление температуры перехода:

$$T_{\text{пер}} = T_{\text{ср}} + i_{\text{к}_0} U_{\text{к}_0} R_T,$$

где  $T_{\text{пер}}$  - температура перехода;

$T_{\text{ср}}$  - температура среды;

$i_{\text{к}_0}, U_{\text{к}_0}$  - ток коллектора и напряжение на коллекторе в рабочей точке;

$R_T$  - тепловое сопротивление переход-среда.

$$\Delta I_{\text{к}} = \Delta I_{\text{к}1} + \Delta I_{\text{к}2},$$

где  $\Delta I_{\text{к}}$  - полный уход нестабилизированного коллекторного тока,

$\Delta I_{\text{к}1}$  - уход тока основных носителей;

$\Delta I_{\text{к}2}$  - уход тока неосновных носителей.

$$\Delta I_{\text{к}1} = \Delta U_{\text{б}_T} S_o,$$

где  $\Delta U_{\text{б}_T} [\text{мВ}] = 2.2 \Delta T + 60$ ;

$\Delta T = T_{\text{пер}} - 25^\circ \text{C}$ ;

$S_o$  - крутизна транзистора (при расчете на постоянном токе можно брать значение, вычисленное как  $I_{\kappa_o} / U_{\kappa_o}$  - деление тока покоя на напряжение на коллекторе при отсутствии сигнала).

$$\Delta I_{\kappa 2} = I_{\kappa_{обр}}(T_{пер}) [h_{21}(T_{пер}) + 1] - I_{\kappa_{обр}}(25^\circ\text{C}) [h_{21}(25^\circ\text{C} + 1)],$$

где  $I_{\kappa_{обр}}$  - обратный ток коллектора, т.е. ток через обратно смещенный переход коллектор-база;

$h_{21}$  - коэффициент передачи тока базы при включении с общим эмиттером,  $h_{21} = \Delta I_{\kappa} / \Delta I_{\sigma}$ .

Обычно при расчетах в качестве коэффициента передачи базового тока берут паспортное значение статического коэффициента передачи тока базы и пересчитывают его значение к температуре перехода, но более разумно было бы на постоянном токе вместо  $h_{21}$  брать коэффициент передачи постоянного тока  $B(25^\circ\text{C}) = I_{\kappa_o} / I_{\sigma_o}$  (в рабочей точке). При уменьшении температуры коэффициент передачи базового тока уменьшается на 0,3% на градус, при увеличении - увеличивается на 0,5% на градус.

Изменение тока неосновных носителей определяется изменением тока через обратно смещенный переход коллектор-база ( $I_{\kappa_{обр}}$ ). Значение  $I_{\kappa_{обр}}(T_{пер})$  точнее всего определить по графикам в справочнике. Если таких графиков нет, производят вычисления.

Вариант 1. В справочнике приводятся два значения  $I_{\kappa_{обр}}$  - при температуре  $25^\circ\text{C}$  и при температуре  $85^\circ\text{C}$ .

$$I_{\kappa_{обр}}(25^\circ\text{C}) = I_{\kappa_{обр}}(25^\circ\text{C}) + I_{утечки},$$

$$I_{\kappa_{обр}}(85^\circ\text{C}) = I_{\kappa_{обр}}(25^\circ\text{C}) \exp[-0.3(85^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})] + I_{утечки}.$$

Эти два уравнения позволяют, используя справочные данные, вычислить две неизвестные величины - ток через обратно смещенный переход  $I_{обр}$  и ток утечки  $I_{утечки}$ , а затем вычислить

$$I_{\kappa_{обр}}(T_{пер}) = I_{\kappa_{обр}}(25^\circ\text{C}) \exp[-0.3(T_{пер} - 25^\circ\text{C})] + I_{утечки}.$$

Вариант 2. Если обратный ток коллектора в справочнике указан лишь для одной температуры (как правило, для  $25^\circ\text{C}$ ), вычисления производятся по формуле

$$I_{\kappa_{обр}}(T_{пер}) = I_{\kappa_{обр}}(25^\circ\text{C}) \exp[-0.3(T_{пер} - 25^\circ\text{C})].$$

Результат при этом довольно далек от истины, но для более точных расчетов информации недостаточно.

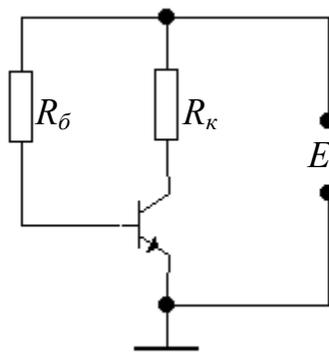
После определения полного ухода тока коллектора  $\Delta I_{\kappa} = \Delta I_{\kappa 1} + \Delta I_{\kappa 2}$  оценивается его изменение за счет стабилизации режима. Коэффициентом стабилизации называется отношение стабилизированного ухода тока к нестабилизированному:

$$S_{T1} = \Delta I_{\kappa 1 \text{ стаб}} / \Delta I_{\kappa 1},$$

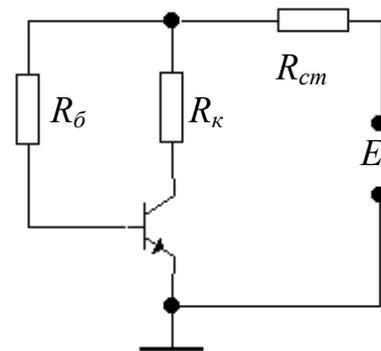
$$S_{T2} = \Delta I_{\kappa 2 \text{ стаб}} / \Delta I_{\kappa 2},$$

$$S_T = \Delta I_{\kappa \text{ стаб}} / \Delta I_{\kappa}.$$

Формулы для коэффициентов стабилизации различных схем приводятся ниже. В этих формулах, помимо элементов схем, используются обозначения:  $g$  - входная проводимость транзистора,  $r_{\delta}$  - объемное сопротивление базы.

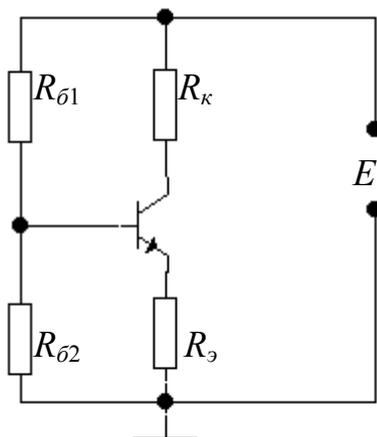


$$S_{T1} = \frac{1}{1 + gR_{\delta}} \quad , \quad S_{T2} = \frac{gR_{\delta}}{1 + gR_{\delta}}.$$



$$S_{T1} = \frac{1}{1 + gR_{\delta} + S_o R_{cm}},$$

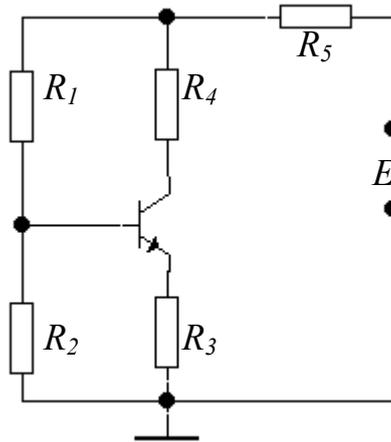
$$S_{T2} = \frac{gR_{\delta}}{1 + gR_{\delta} + R_{cm}}.$$



$$S_{T1} = \frac{1}{1 + g(R_{12} + R_{\epsilon}) + S_o R_{\epsilon}} \approx \frac{1}{S_o R_{\epsilon}},$$

где  $R_{12} = \frac{R_{\delta 1} R_{\delta 2}}{R_{\delta 1} + R_{\delta 2}},$

$$S_{T2} = \frac{1 + gr_{\delta}}{h_{21}} \left[ 1 + \frac{R_{\epsilon}}{R_{12}} \right].$$



$$S_{T1} = \frac{R_1 + R_2 + R_5}{R_1 + R_2 + R_5 + (g + S_o)[R_3(R_1 + R_2 + R_5) + R_2R_5] + gR_1R_2},$$

$$S_{T2} = \frac{R_1 + R_2 + R_5 + (g + S_o)[R_3(R_1 + R_2 + R_5) + R_2(R_1 + R_5)]}{(1 - h_{21})\{R_1 + R_2 + R_5 + (g + S_o)[R_3(R_1 + R_2 + R_5) + R_2R_5] + gR_1R_2\}}.$$

Поскольку схема эмиттерной стабилизации предоставляет некоторую свободу выбора элементов, при выбранном сопротивлении в цепи эмиттера ток делителя (а, следовательно, и его сопротивления) может быть выбран с учетом допустимого ухода стабилизированного тока  $S_T = \Delta I_{кстаб} / \Delta I_{к}$ :

$$i_{дел} = \frac{\Delta I_{кобр}}{S_T - \left[ \frac{\Delta I_{кобр}}{I_{кобр}} + \frac{\Delta U_{бТ}}{U_{э}} \right]},$$

где  $\Delta I_{кобр} = I_{кобр}(T_{пер}) - I_{кобр}(25^{\circ}\text{C})$ ,  $I_{кo}$  – ток коллектора в точке покоя,  $U_{э}$  – падение напряжения на сопротивлении в цепи эмиттера.

### 3.5. Стабилизация режима полевого транзистора

Сопротивление в цепи истока выполняет две функции – создание смещения на затворе и стабилизацию режима транзистора с целью поддерживать неизменной его крутизну. В первом случае  $R_u$  рассчитывается по формуле

$$R_u = \frac{|U_3|}{I_{cm}},$$

где  $U_3$  – необходимое смещение на затворе и  $I_{cm}$  – ток стока в рабочей точке. При этом сопротивление в цепи затвора определяется током утечки:

$$R_3 = 0,1 \frac{|U_3|}{I_{ут.з}}$$

Во втором случае определяется уход крутизны, вызванный изменением режима,  $\Delta S$  и его относительная величина  $\Delta S_T = \Delta S / S$ . Сопротивление в цепи истока при этом вычисляется как

$$R_u \geq \frac{(\Delta S_T / \Delta S_{T.дон}) - 1}{S(1 + \Delta S_T)},$$

где  $\Delta S_{T.дон}$  – допустимое относительное изменение крутизны.

Из двух вычисленных значений сопротивления в цепи истока ставится большее, так как, если большим оказалось первое значение, стабилизация крутизны обеспечивается автоматически, и относительное изменение крутизны определяется как

$$\Delta S_{T.реал} = \frac{\Delta S_T}{1 + S(1 + \Delta S_T)R_u}.$$

Если выбрано второе значение, смещение на затворе оказывается больше необходимого, и для его обеспечения в цепь затвора ставится делитель.

### Задачи к главе 3

#### Задача 3.1

В схемах на рис. 3.9-3.20 укажите, чем определяется сопротивление нагрузки постоянной и переменной составляющим коллекторного тока. Запишите в общем виде  $R_+$  (сопротивление нагрузки постоянному току) и  $R_~$  (сопротивление нагрузки переменному току) каждого транзистора.

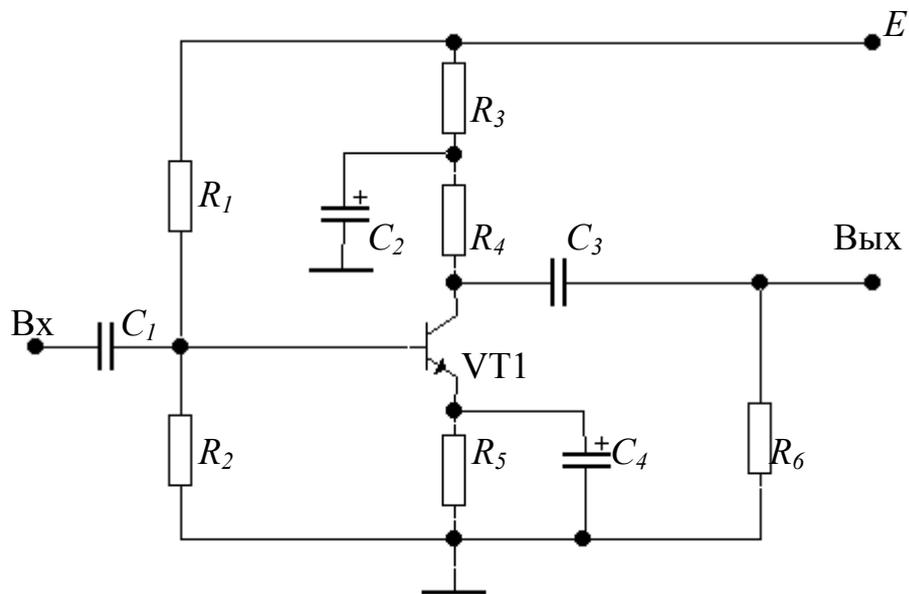


Рис. 3.9

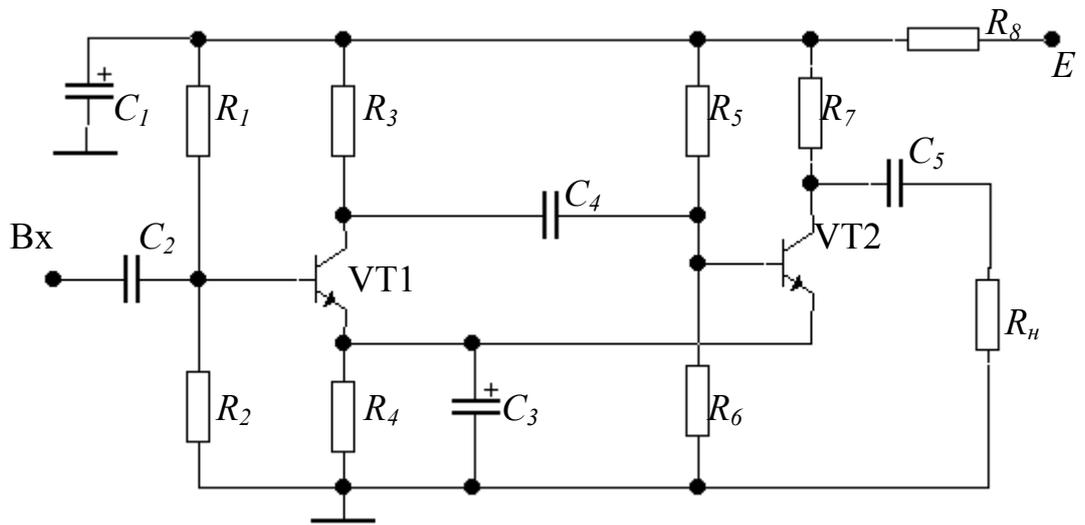


Рис.3.10

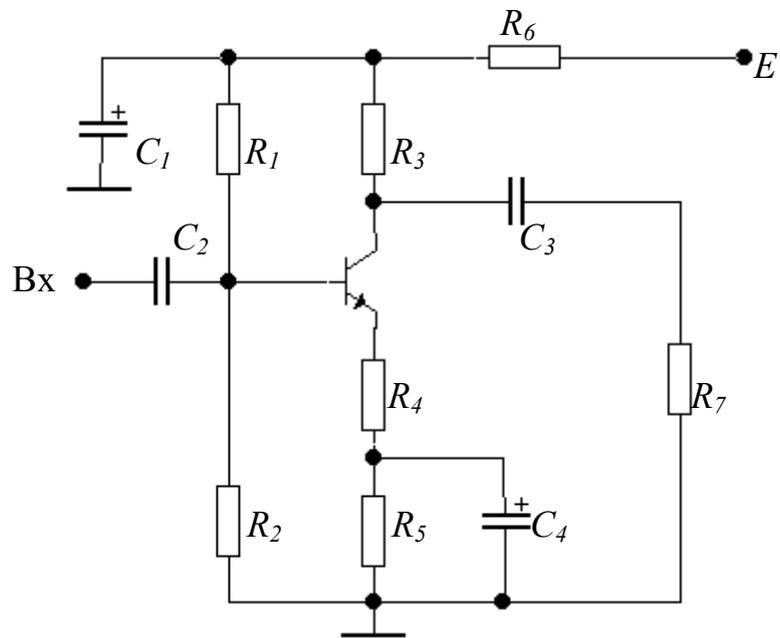


Рис. 3.11

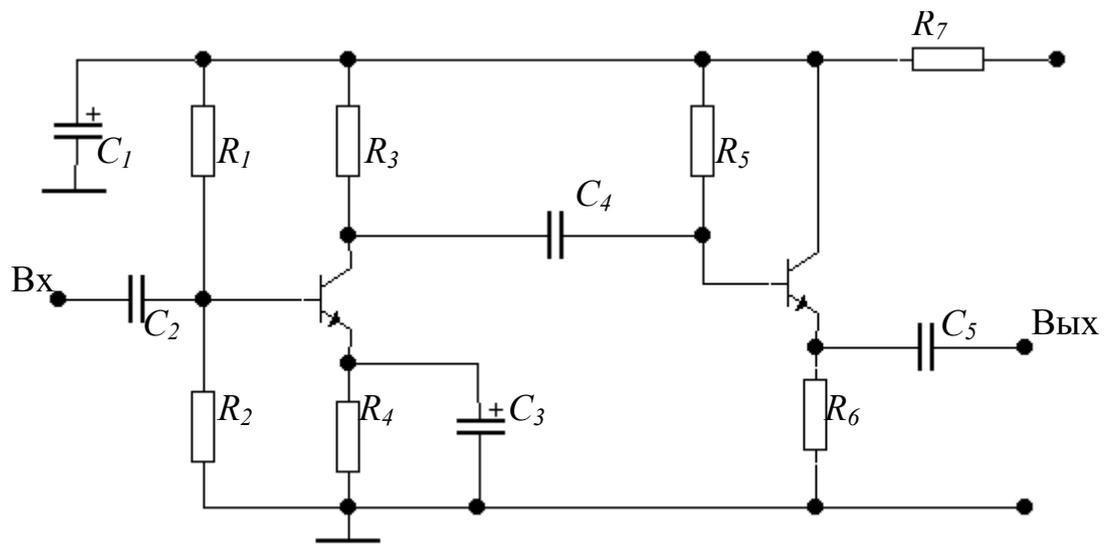


Рис. 3.12

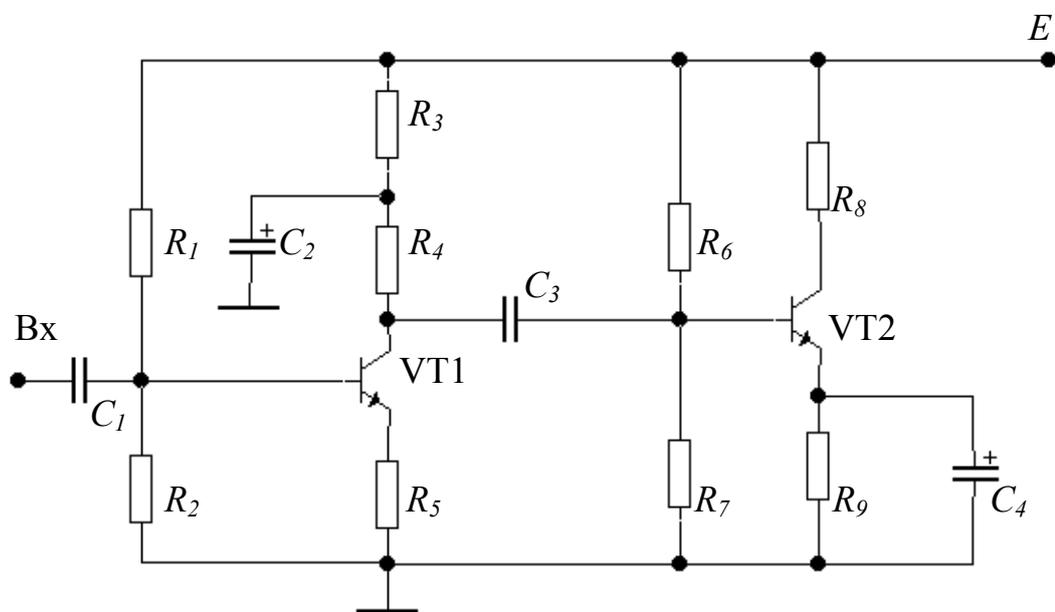


Рис. 3.13

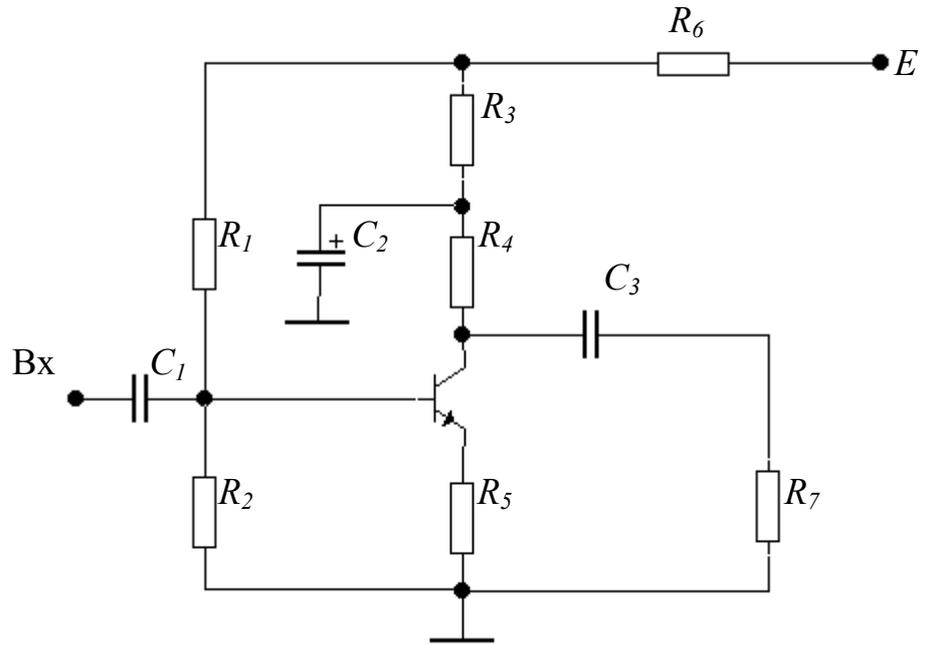


Рис. 3.14

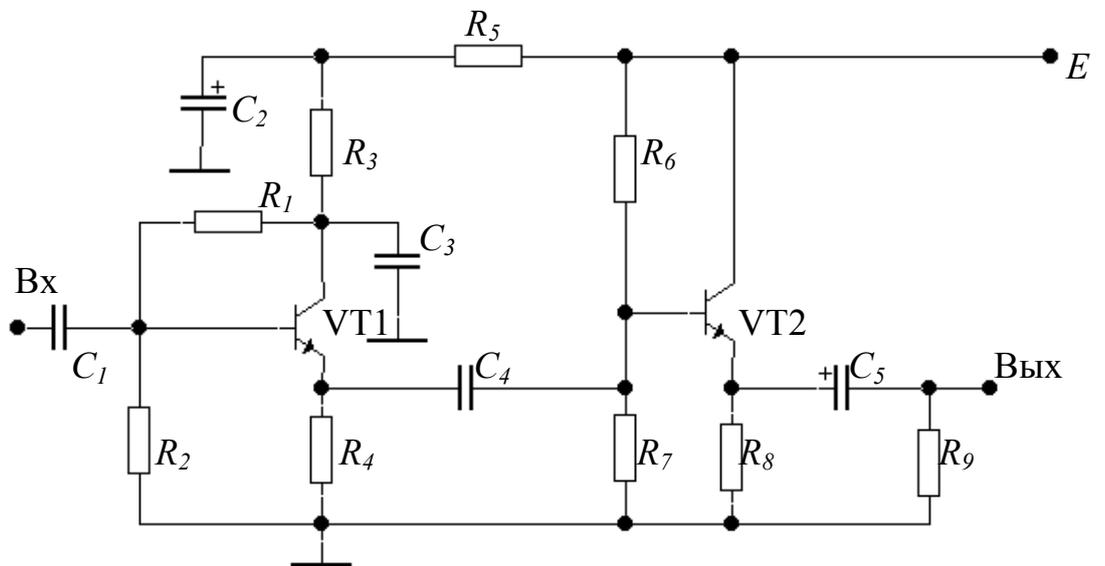


Рис. 3.15

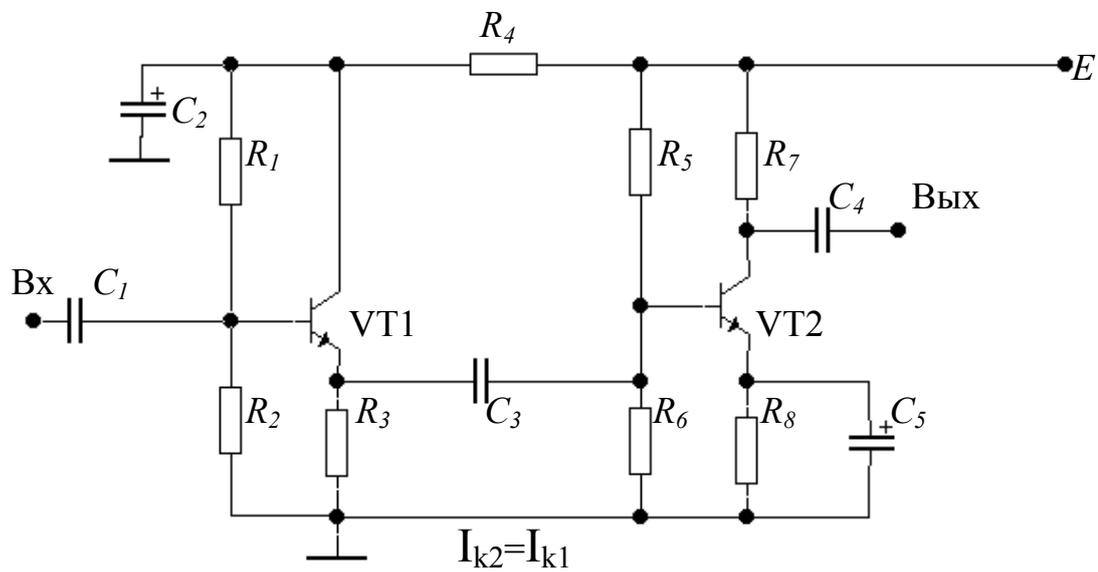


Рис. 3.16

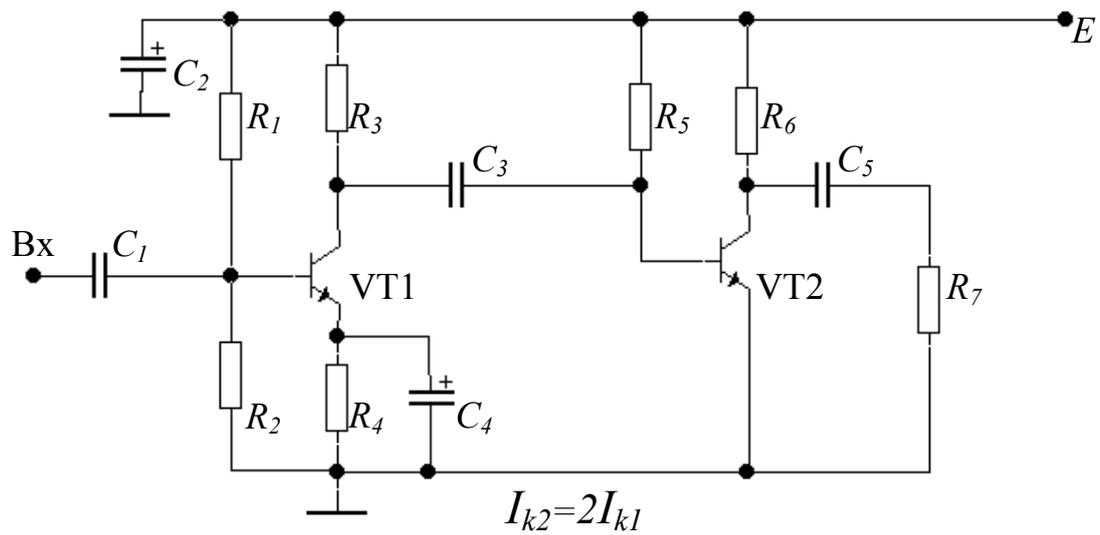


Рис. 3.17

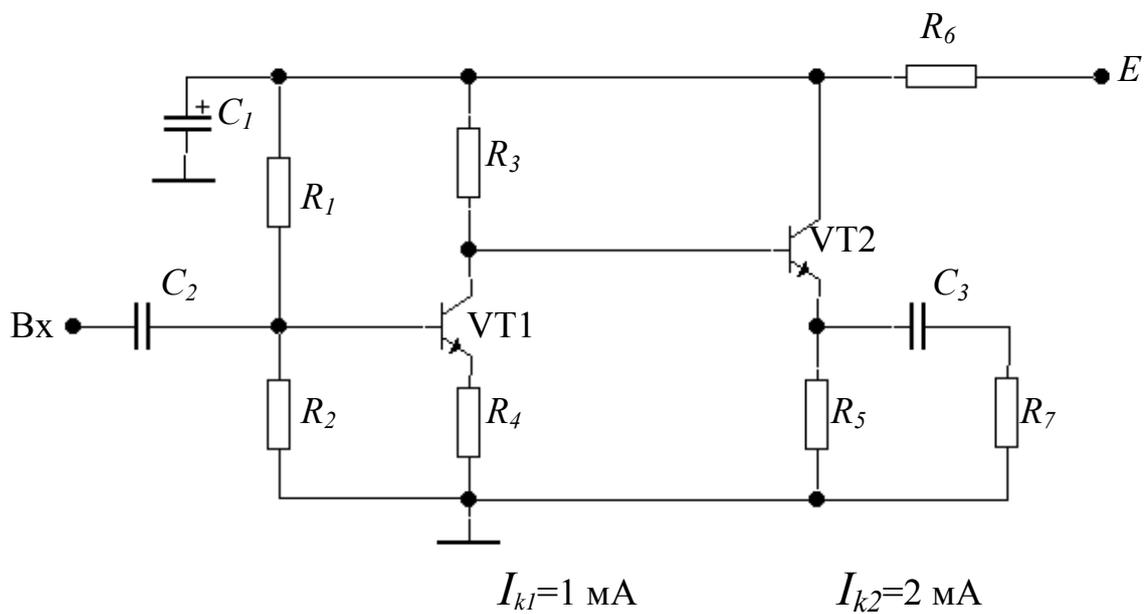


Рис. 3.18

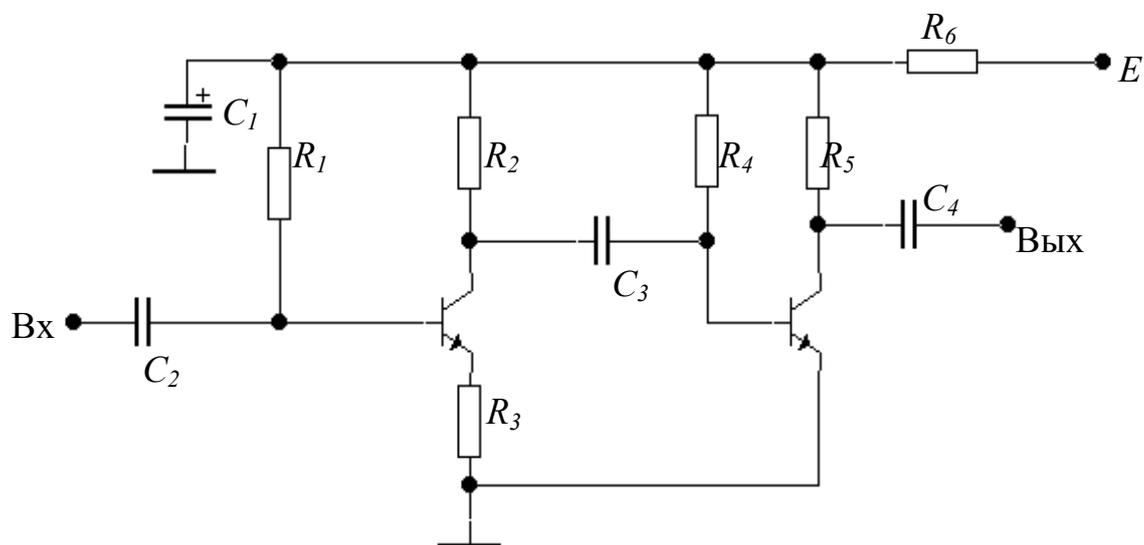


Рис. 3.19

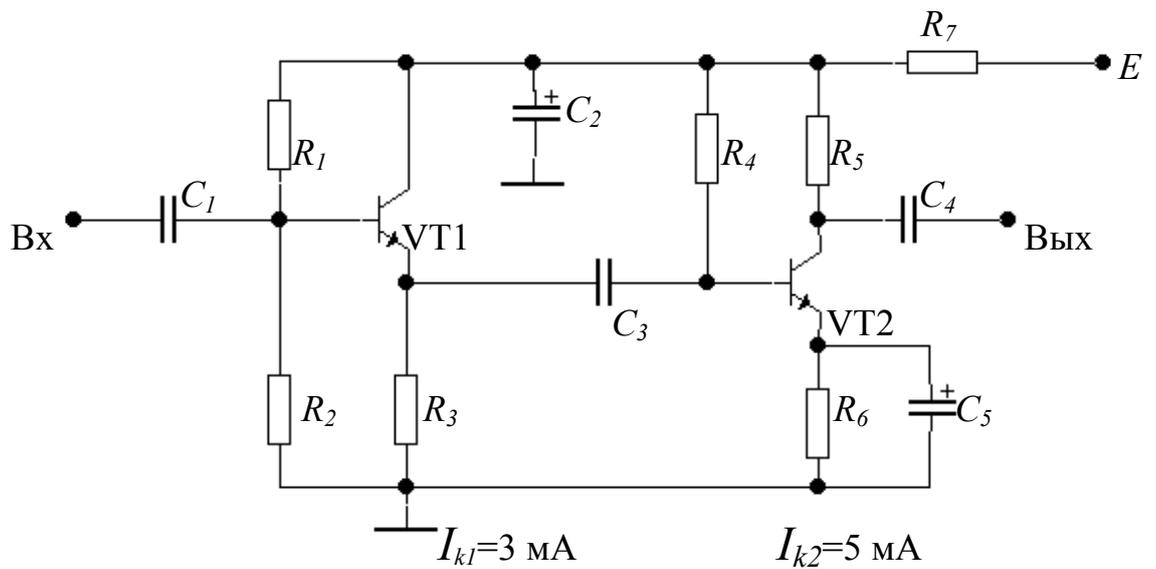


Рис. 3.20

### Задача 3.2

Определите режим покоя транзистора КТ312А (то есть  $I_{к0}$ ,  $U_{к0}$ ,  $U_{б0}$ ) в каскаде, принципиальная схема которого изображена на рис. 3.21, если напряжение питания  $E = 15$  В,  $R_k = 1$  кОм,  $R_n = 1$  кОм и  $I_{б0} = 0,1$  мА.

Определите сопротивление резистора  $R_б$ , обеспечивающего заданный режим.  $C_{p1} = C_{p2} = 1$  мкФ, их сопротивлением на средних частотах можно пренебречь.

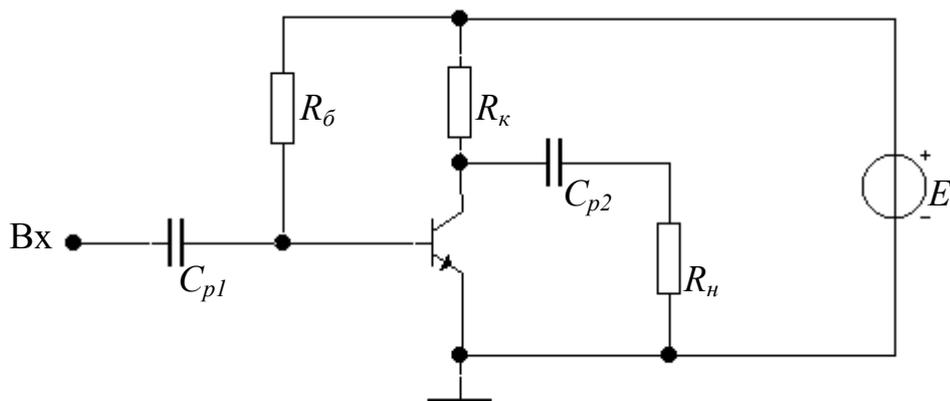


Рис. 3.21

### Задача 3.3

Определите сопротивление нагрузки постоянному и переменному току коллектора транзистора КТ312А в схеме на рис. 3.22, если  $R_{\kappa} = R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{э}} = 510 \text{ Ом}$ ,  $C_{\text{p1}} = C_{\text{p2}} = 1 \text{ мкФ}$ ,  $C_{\text{э}} = 50 \text{ мкФ}$ . Сопротивлением конденсаторов на средних частотах можно пренебречь.

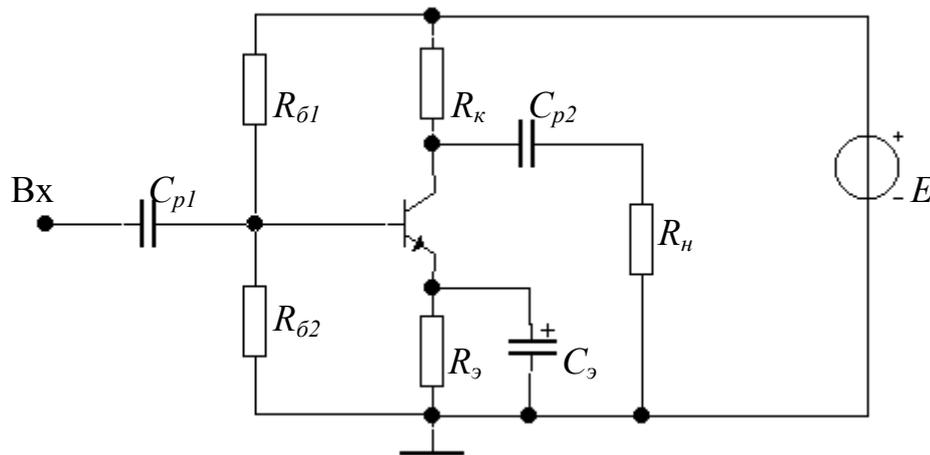


Рис. 3.22

### Задача 3.4

Определите напряжение покоя на эмиттере транзистора в каскаде, принципиальная схема которого показана на рис. 3.22. Напряжение питания  $E = 15 \text{ В}$ ,  $R_{\kappa} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{э}} = 510 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{к0}} = 6 \text{ мА}$ .

### Задача 3.5

Определите ток делителя в схеме на рис. 3.22, если напряжение питания  $E = 15 \text{ В}$ ,  $R_{\kappa} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{э}} = 510 \text{ Ом}$ ,  $U_{\text{к0}} = 5 \text{ В}$  и  $R_{\text{б1}} = 10 \text{ кОм}$ . Транзистор КТ312А.

### Задача 3.6

В схеме на рис. 3.22 определите сопротивление делителя, если напряжение питания  $E = 15 \text{ В}$ ,  $R_{\kappa} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{э}} = 510 \text{ Ом}$ ,  $U_{\text{к0}} = 5 \text{ В}$  и ток делителя  $5 \text{ мА}$ . Транзистор КТ312А.

### Задача 3.7

Определите токи покоя коллектора, эмиттера и базы:

а) Схема на рис. 3.21. Транзистор КТ312А, напряжение питания  $E = 12$  В,  $R_k = 1,2$  кОм,  $U_{к_о} = 5$  В;

б) Схема на рис. 3.22. Транзистор КТ312А, напряжение питания  $E = 15$  В,  $R_k = 1$  кОм,  $R_э = 200$  Ом и  $U_{к_о} = 5$  В.

### Задача 3.8

Определите элементы  $R_k$  и  $R_б$  принципиальной электрической схемы, изображенной на рис. 3.23,а, таким образом, чтобы при напряжении питания  $E = 15$  В получить  $U_{к_о} = 5$  В и  $I_{к_о} = 6$  мА (транзистор КТ312А).

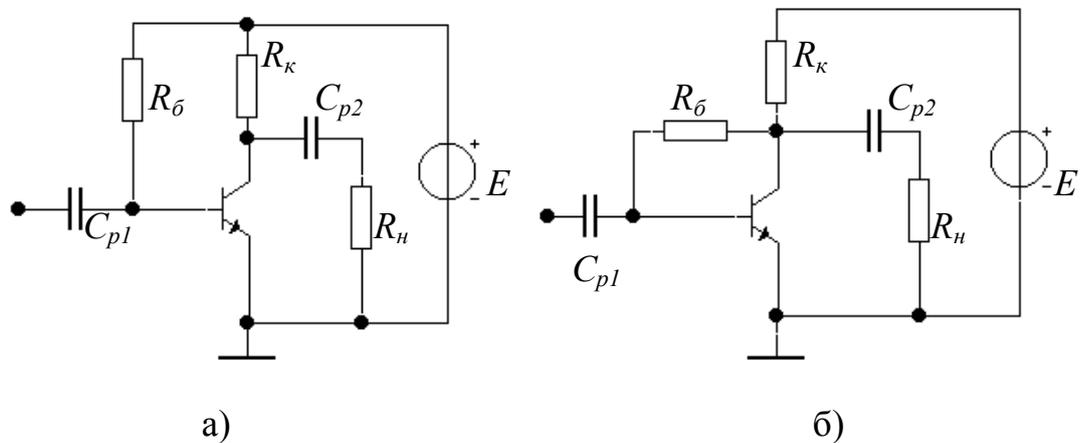


Рис. 3.23

Как изменятся эти сопротивления при включении по схеме 3.23, б)?

### Задача 3.9

Постройте нагрузочные прямые постоянного и переменного токов каскада на транзисторе КТ312А (схема на рис. 3.22), если напряжение питания  $E = 15$  В,  $R_k = 1$  кОм,  $R_э = 510$  Ом,  $U_{к_о} = 5$  В и  $R_н = 300$  Ом. Графически определите амплитуду выходного тока и напряжения, если амплитуда входного сигнала 50 мВ.

Определите параметры транзистора в рабочей точке, вычислите коэффициент усиления каскада и сравните с найденным графически.

### Задача 3.10

Для предыдущей задачи постройте сквозную динамическую характеристику (сопротивление источника сигнала 100 Ом и  $R_б$  велико по

сравнению с входным сопротивлением транзистора. Определите коэффициент гармоник по второй гармонике выходного тока при ЭДС источника сигнала 75 мВ и 150 мВ.

### Задача 3.11

Нагрузочная прямая проходит через точки  $U_{к_0} = 5$  В,  $I_{к_0} = 7$  мА и  $E = 15$  В,  $I_{к} = 0$ . Определите сопротивление нагрузки усилителя. Изобразите схему исследуемого каскада, если в нем сопротивления нагрузки постоянному и переменному токам одинаковы.

### Задача 3.12

Как изменится положение нагрузочной прямой в задаче 3.11, если при той же рабочей точке напряжение питания  $E = 18$  В? Изобразите возможный вариант схемы, если сопротивление в цепи коллектора осталось неизменным.

### Задача 3.13

Как изменится положение нагрузочной прямой в задаче 3.11, если при той же рабочей точке сопротивление нагрузки увеличить в 1,43 раза? Каким для этого должно стать напряжение источника питания? Изобразите возможный вариант схемы, если сопротивление в цепи коллектора осталось неизменным.

### Задача 3.14

Постройте динамические характеристики постоянного и переменного токов (выходную, входную и сквозную) каскада, собранного на транзисторе КТ312А, при следующих исходных данных:

напряжение питания	12 В,
сопротивление нагрузки постоянному току	1 кОм,
сопротивление нагрузки переменному току	310 Ом,
напряжение на коллекторе в рабочей точке	5 В,
сопротивление источника сигнала	100 Ом.

Определите напряжения и токи в точке покоя, считая, что в схеме используется эмиттерная стабилизация (фильтр в коллекторной цепи отсутствует). Определите сопротивление в цепи эмиттера и сопротивления делителя, если ток делителя 1 мА, а сопротивление нагрузки переменному току образуется сопротивлением в цепи коллектора и сопротивлением внешней нагрузки 620 Ом. Изобразите схему рассчитываемого каскада, выбрав емкость разделительных конденсаторов по 10 мкФ и емкость в цепи эмиттера 100 мкФ.

### Задача 3.15

Насколько нужно увеличить напряжение питания в предыдущей задаче, если в коллекторную цепь добавить фильтр с сопротивлением 300 Ом, а рабочую точку оставить прежней? Рассмотрите два случая: сопротивление делителя подключено непосредственно к источнику питания и сопротивление делителя подключено в точки соединения сопротивлений коллектора и фильтра. Изобразите обе схемы.

### Задача 3.16

Для условий, приведенных в задаче 3.14, определите амплитуду выходного тока и напряжения и сквозной коэффициент усиления, если ЭДС источника сигнала 100 мВ. Постройте амплитудную характеристику каскада. При какой амплитуде входного сигнала произойдет «сжатие» коэффициента усиления на 3 дБ?

### Задача 3.17

Определите, каким будет напряжение на стоке  $U_{cmo}$  и напряжение на затворе  $U_{зo}$  по отношению к истоку в рабочей точке транзистора в схеме на рис. 3.24, ток стока в этой точке 3,9 мА.

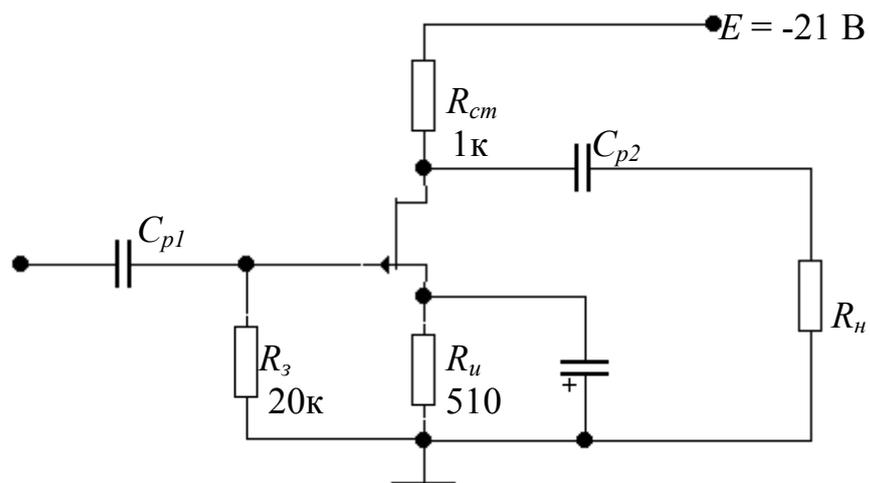


Рис.3.24

### Задача 3.18

Выберите сопротивления истока и затвора транзистора КП301Б с тем, чтобы обеспечить рабочую точку  $U_{cm_o} = 15$  В и  $I_{cm_o} = 7$  мА. Изобразите схему.

### Задача 3.19

Как изменится схема и параметры элементов задачи 3.18, если  $R_u$  выбрать таким образом, чтобы при увеличении температуры окружающей среды до 40°C крутизна транзистора не изменялась больше, чем на 5%?

### Задача 3.20

Определите, в каких пределах изменяется температура перехода транзистора КТ324 при изменении температуры окружающей среды от -20°C до +30°C, если при температуре перехода 25°C напряжение на коллекторе в рабочей точке  $U_{к_о} = 5$  В и ток покоя  $I_{к_о} = 5$  мА. Каким будет изменение тока при уменьшении температуры среды от 25°C до -20°C и при ее увеличении от 25°C до +30°C?

### Задача 3.21

Какой может быть максимальная температура окружающей среды, чтобы приращение тока основных носителей в схеме питания фиксированным напряжением на базе транзистора КТ324 ( $U_{к_о} = 5$  В,  $I_{к_о} = 5$  мА,  $E = 9$  В) было не больше 5%? Как изменится эта температура при питании фиксированным током базы?

### Задача 3.22

Каким будет полное изменение тока покоя транзистора КТ312А ( $U_{к_о} = 5$  В,  $R_+ = 1$  кОм,  $E = 12$  В), если температура среды увеличилась от 25°C до +40°C? Изобразите схему каскада, если никаких мер для стабилизации тока покоя не принимается (питание фиксированным напряжением на базе).

### Задача 3.23

Как изменится полный уход тока по сравнению с результатами в задаче 3.22, если используется схема питания фиксированным током базы? Выполните расчеты и изобразите схему.

### Задача 3.24

Как изменится полный уход тока по сравнению с результатами задачи 3.22, если используется коллекторная схема стабилизации? Выполните расчеты и изобразите схему.

### Задача 3.25

Как изменится полный уход тока по сравнению с результатами задачи 3.22, если в схему добавлено сопротивление коллекторного фильтра ( $R_\phi = 1$  кОм), и с его помощью реализована коллекторная стабилизация. Выполните расчеты, изобразите схему и объясните полученные результаты.

### Задача 3.26

Как изменится полный уход тока по сравнению с результатами в задаче 3.22, если используется эмиттерная схема стабилизации ( $R_e = 1$  кОм)? Расчеты выполните для двух значений тока делителя:

$$I_{дел} = 3 I_{б_о}, \quad I_{дел} = 10 I_{б_о}.$$

Изобразите схему. Сравните и объясните результаты расчетов. Сравните полученные результаты с уходом тока в задаче 3.25.

### Задача 3.27

Выберите ток делителя при эмиттерной стабилизации ( $R_e = 510$  Ом, исходные данные задачи 3.22) таким образом, чтобы полный относительный уход коллекторного тока не превышал 5%. Изобразите схему и рассчитайте ее элементы.

### Задача 3.28

Выберите транзистор, его рабочую точку и сопротивление в цепи коллектора таким образом, чтобы потребление мощности от источника питания было минимальным.

Постройте динамические характеристики (выходную, входную и сквозную) при  $R_c = 0,5 R_n$ , если  $R_n > 1$  кОм, и  $R_c = R_n$ , если  $R_n$  меньше или равно 1 кОм, покажите на характеристиках входные и выходные токи и напряжения в рабочей точке. Определите параметры транзистора в рабочей точке. По динамическим характеристикам определите коэффициент усиления и сравните его с расчетным. Предварительно покажите на характеристиках, как обеспечено заданное выходное напряжение.

Для выбранного транзистора определите уход коллекторного тока при уменьшении температуры от 25°C до -14°C и при ее увеличении от 25°C до 40°C. Убедитесь по динамическим характеристикам, обеспечивается ли амплитуда выходного напряжения при таком уходе тока.

Рассчитайте схемы питания фиксированным током базы и коллекторной стабилизации и оцените, каким будет уход тока в них. Увеличьте напряжение питания на (3-5) В. Используйте это напряжение для включения сопротивления фильтра (коллекторная стабилизация без обратной связи на переменном токе) или для включения сопротивления эмиттерной стабилизации (при двух значениях токов делителя:  $I_{дел} = 3 I_{б_0}$  и  $I_{дел} = 10 I_{б_0}$ ). Сравните стабилизирующее действие одного и того же сопротивления, поставленного в коллекторную и эмиттерную цепи.

Сделайте выводы по проделанной работе.

### *Исходные данные для расчета*

На сопротивлении  $R_n$  обеспечить амплитуду напряжения  $U_{вых}$

№	$R_n$ , Ом	$U_{вых}$ , В	№	$R_n$ , кОм	$U_{вых}$ , В
1	50	1	13	5	10
2	100	2	14	3	9
3	50	2,5	15	2	8,5
4	100	3	16	1	8
5	200	3,5	17	0,5	7,5
6	100	4	18	1	7
7	300	4,5	19	0,2	6
8	200	5	20	2	5,5
9	300	6	21	3	5
10	500	7	22	1	4
11	200	8	23	0,2	3
12	500	10	24	0,2	2

## Глава четвертая

### Реостатный каскад на полевом транзисторе

Принципиальная электрическая схема реостатного усилителя (усилителя на сопротивлениях, усилителя с  $RC$ -связями) на двух полевых транзисторах изображена на рис.4.1.

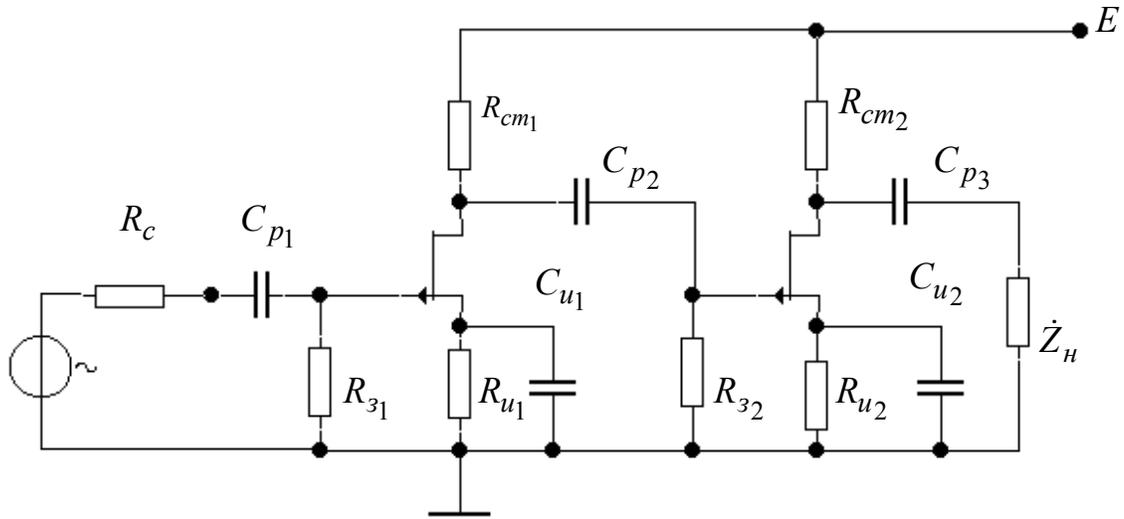


Рис. 4.1

Коэффициент усиления (модуль коэффициента передачи на средних частотах) определяется как

$$K_o = SR_{экв}, \quad (4.1)$$

где  $R_{экв}$  - параллельное включение выходного (внутреннего) сопротивления транзистора, сопротивления в цепи стока  $R_{cm}$  и сопротивления нагрузки  $R_H$ . Для промежуточного каскада функцию сопротивления нагрузки выполняет входное сопротивление следующего каскада, которое на средних частотах определяется сопротивлением (сопротивлениями) в цепи затвора, так как входное сопротивление полевого транзистора много больше сопротивления в цепи затвора.

Искажения, создаваемые каскадом на верхних частотах (в области малых времен), определяются постоянной времени верхних частот  $\tau_\epsilon$ :

$$\tau_\epsilon = C_o R_{\text{экв}},$$

где  $C_o = C_{\text{вых}} + C_n + C_m$ ;

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{си}} + C_{\text{зс}};$$

$C_m$  - емкость монтажа;

$C_n$  - емкость нагрузки; для промежуточного каскада функцию емкости нагрузки выполняет входная динамическая емкость следующего каскада, определяемая как

$$C_{\text{вх}_{\text{дин}}} = C_{\text{зи}} + C_{\text{зс}}(1 + K_o).$$

$C_{\text{ис}}, C_{\text{зи}}, C_{\text{зс}}$  - выходная, входная и проходная емкости транзистора соответственно.

$$\frac{\dot{K}_\epsilon}{K_o} = \frac{1}{1 + j\omega\tau_\epsilon}, \quad (4.2)$$

$$\frac{K_\epsilon}{K_o} = \frac{1}{\sqrt{(1 + (\omega\tau_\epsilon)^2)}}, \quad (4.3)$$

фазовый сдвиг на верхних частотах

$$\varphi_\epsilon = -\text{arctg}(\omega\tau_\epsilon). \quad (4.4)$$

Время нарастания переходной характеристики

$$t_n = 2,2\tau_\epsilon. \quad (4.5)$$

Искажения, создаваемые каскадом на нижних частотах (в области больших времен), определяются постоянной времени нижних частот

$$\tau_n = C_p(R_l + R_n), \quad (4.6)$$

$R_n, R_n$  - сопротивления соответственно между левой, правой обкладками разделительной емкости и землей (общим проводом).

$$\frac{\dot{K}_n}{K_o} = \frac{1}{1 + j\omega\tau_n}, \quad (4.7)$$

$$\frac{K_n}{K_o} = \frac{1}{\sqrt{(1 + (\omega\tau_n)^2)}}, \quad (4.8)$$

фазовый сдвиг на нижних частотах

$$\varphi_n = \text{arctg}(\omega\tau_n). \quad (4.9)$$

Спад плоской вершины импульса длительностью  $\tau_u$  за счет разделительной емкости  $C_p$

$$\Delta = \frac{\tau_u}{\tau_n}. \quad (4.10)$$

Соответствующие искажения, создаваемые емкостью в цепи истока

$$\frac{\dot{K}_{n_u}}{K_o} = \frac{1 + j\omega C_u R_u}{(1 + SR_u) + j\omega C_u R_u}, \quad (4.11)$$

$$\frac{K_{n_u}}{K_o} = \frac{\sqrt{(1 + (\omega C_u R_u)^2)}}{\sqrt{(1 + SR_u)^2 + (\omega C_u R_u)^2}}, \quad (4.12)$$

$$\Delta_u = \frac{\tau_u}{\tau_{n_u}}, \quad (4.13)$$

$$\tau_{n_u} \approx \frac{C_u}{S}. \quad (4.14)$$

## Задачи к главе 4

### Задача 4.1

На сколько децибел возрастет коэффициент усиления каскада на полевом транзисторе, если при прочих равных условиях сопротивление нагрузки, первоначально равное сопротивлению стока, утроить?

### Задача 4.2

На проходных характеристиках транзистора КП103И выберите рабочую точку и определите сопротивления в цепях истока и затвора, необходимые для создания смещения, если максимальная амплитуда входного напряжения 0,5 В, а усиление, по возможности, должно быть наибольшим. Изобразите схему каскада.

Как изменится схема питания транзистора, если сопротивление в цепи истока удвоить, а смещение должно остаться прежним?

### Задача 4.3

Используя данные задачи 4.2, определите сопротивление в цепи стока, необходимое, чтобы выходное напряжение было наибольшим при работе в квазилинейном режиме. Определите это выходное напряжение и коэффициент усиления, если  $E_{пит} = 20$  В и  $R_n = R_{ст}$ . Сравните значение графически найденного коэффициента усиления с вычисленным по формуле.

### Задача 4.4

Верхняя граничная частота реостатного каскада на полевом транзисторе измерена на уровне  $-3$  дБ и составляет 10 МГц. Как изменится эта частота, если измерить ее на уровне  $-1$  дБ?

### Задача 4.5

На сколько децибел изменится коэффициент усиления реостатного каскада на полевом транзисторе, если необходимо расширить полосу пропускания на уровне  $-3$  дБ в 4 раза? Расширение полосы пропускания осуществляется за счет изменения сопротивления нагрузки. При каком соотношении  $R_{ст}$  и  $R_n$  задача не может быть решена?

#### Задача 4.6

На верхней граничной частоте реостатный каскад на полевом транзисторе создает фазовый сдвиг  $-20^\circ$ . На сколько децибел изменится модуль коэффициента передачи на этой частоте, если общая паразитная емкость каскада  $C_o$  удвоится?

#### Задача 4.7

Как изменится входная емкость каскада на полевом транзисторе КП103М, если сопротивление нагрузки, первоначально равное сопротивлению стока, утроить?  $R_{cm} = 5,1$  кОм.

#### Задача 4.8

Определите сопротивление в цепи стока и коэффициент усиления каскада на транзисторе КП103М, если сопротивление внешней нагрузки равно  $7,5$  кОм, а модуль относительного коэффициента передачи на частоте  $5$  МГц не ниже  $-3$  дБ. Емкость нагрузки  $12$  пФ, емкость монтажа  $8$  пФ. Изобразите схему рассчитываемого каскада.

#### Задача 4.9

Определите сопротивление в цепи стока и коэффициент усиления каскада на транзисторе КП103М, если сопротивление внешней нагрузки равно  $300$  Ом, а модуль относительного коэффициента передачи на частоте  $10$  МГц не ниже  $-3$  дБ. Емкость нагрузки  $12$  пФ, емкость монтажа  $8$  пФ. Изобразите схему рассчитываемого усилителя. Оцените целесообразность применения каскада на полевом транзисторе при нагрузке  $300$  Ом.

#### Задача 4.10

Определите сопротивление в цепи стока и коэффициент усиления каскада на транзисторе КП103М, если нагрузкой служит входное сопротивление каскада на таком же транзисторе с усилением  $10$  раз и сопротивлением в цепи затвора  $20$  кОм. Модуль относительного коэффициента передачи на частоте  $1$  МГц не ниже  $-3$  дБ. Емкость монтажа  $5$  пФ. Изобразите схему рассчитываемого усилителя.

#### Задача 4.11

Определите нижнюю граничную частоту реостатного каскада, если искажения на нижних частотах создают только разделительные емкости.

Каскад собран на транзисторе КП103М. Сопротивление источника сигнала и сопротивление в цепи стока равны 1,5 кОм каждое. Сопротивление внешней нагрузки 20 кОм. Емкость разделительных конденсаторов 0,1 мкФ.  $R_3 = 20$  кОм.

а)  $K / K_o = -1$  дБ,

б)  $K / K_o = -0,5$  дБ.

#### Задача 4.12

Определите  $K_o$  и емкость разделительного конденсатора на выходе реостатного каскада на полевом транзисторе КП103В, если нагрузкой служит сопротивление 10 кОм, а модуль относительного коэффициента передачи на частоте 100 Гц не ниже  $-2$  дБ.  $R_{cm} = 3,9$  кОм. Изобразите схему рассчитываемого каскада.

#### Задача 4.13

Определите искажения, создаваемые реостатным каскадом на полевом транзисторе КП301В на частоте 100 Гц, если  $R_{cm} = R_n = 2$  кОм,  $R_3 = 10$  кОм.  $C_{p1} = C_{p2} = 1$  мкФ.  $R_u = 1$  кОм,  $C_u = 10$  мкФ. Внутреннее сопротивление источника сигнала 1 кОм. Изобразите схему рассчитываемого каскада.

#### Задача 4.14

Определите  $K_o$ , время нарастания и входную динамическую емкость каскада на полевом транзисторе КП301Б, если  $R_n = R_3 = 10$  кОм,  $C_n$ , включая емкость монтажа, равна 15 пФ. Внутреннее сопротивление источника сигнала 500 Ом и  $R_{cm} = 2$  кОм.

#### Задача 4.15

Определите искажения, создаваемые входной цепью реостатного каскада на полевом транзисторе КП301Б на частоте 10 МГц,  $R_n = 10$  кОм,  $R_{cm} = 2$  кОм, емкость монтажа для входной цепи равна 5 пФ. Сопротивление в цепи затвора 20 кОм. Внутреннее сопротивление источника сигнала 500 Ом.

#### Задача 4.16

Определите искажения, создаваемые входной цепью реостатного каскада на полевом транзисторе КП301Б на частоте 100 Гц. Сопротивление

в цепи затвора равно 20 кОм. Емкость разделительного конденсатора во входной цепи равна 0,1 мкФ. Внутреннее сопротивление источника сигнала 500 Ом.

#### Задача 4.17

Определите время нарастания переходной характеристики входной цепи реостатного каскада на полевом транзисторе КП301Б.  $R_n = 10$  кОм,  $R_{cm} = 2$  кОм, сопротивление в цепи затвора 20 кОм. Емкость монтажа для входной цепи равна 5 пФ. Внутреннее сопротивление источника сигнала 500 Ом.

#### Задача 4.18

Определите спад плоской вершины импульса, создаваемый совместно входной и выходной цепью реостатного каскада на полевом транзисторе КП301Б.  $R_n = 10$  кОм,  $R_{cm} = 2$  кОм, сопротивление в цепи затвора 20 кОм. Емкость каждого из разделительных конденсаторов равна 1 мкФ. Внутреннее сопротивление источника сигнала 500 Ом. Усилению подлежит периодическая последовательность прямоугольных импульсов со скважностью 2 и периодом следования 200 мкс.

**Реостатный каскад на биполярном транзисторе**

Принципиальная электрическая схема реостатного усилителя (усилителя на сопротивлениях, усилителя с RC-связями) на двух биполярных транзисторах изображена на рис. 5.1

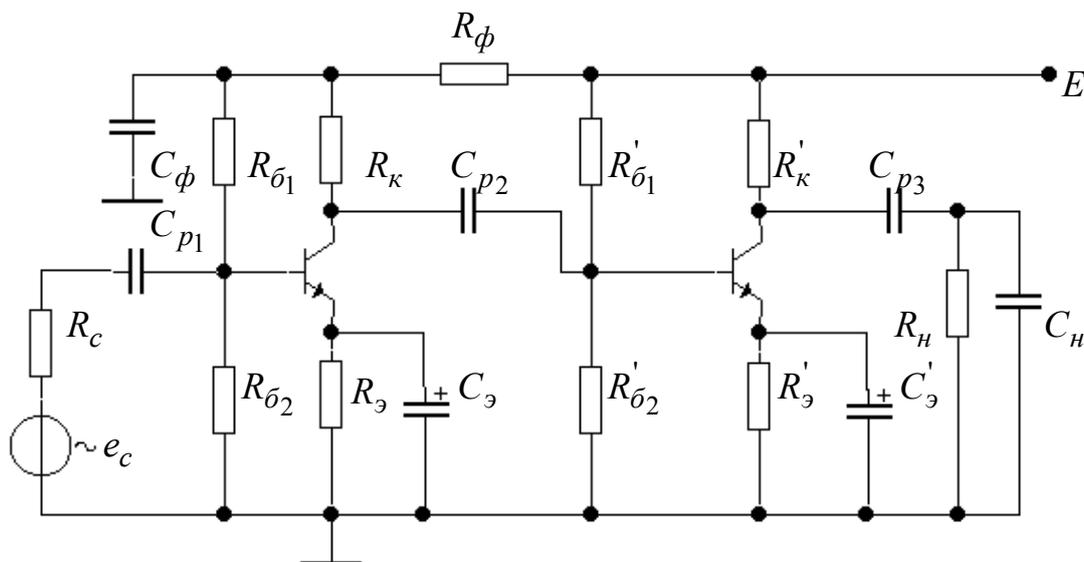


Рис. 5.1

Коэффициент усиления (модуль коэффициента передачи на средних частотах) определяется соотношением, подобным (4.1), с тем отличием, что у крутизны  $\dot{S}$  берется ее низкочастотное значение  $S_o$ , и вместо сопротивления  $R_{cm}$  берется соответствующее  $R_k$ . Входное сопротивление каскада на биполярном транзисторе на средних частотах определяется параллельным включением  $R_{б1}$ ,  $R_{б2}$  и  $R_{exT}$ .

$$R_{exT} = r_{б} + r_{э}(1 + H_{21}), \quad (5.1)$$

где  $r_{б}$  - объемное сопротивление базы;

$r_{э}$  - сопротивление эмиттерного перехода:

$$r_{э} = \frac{25,6}{I_{эo}} + \frac{3}{\sqrt{I_{эo}}} + \Delta r, \quad (5.2)$$

где  $r_o$  в омах, если  $I_{э_о}$  в миллиамперах. Для токов  $I_{э_о} < 10-12$  мА в формуле (5.1) учитывается только первое слагаемое, для больших токов ( $10-12$  мА  $< I_{э_о} < 40$  мА) – два слагаемых. При токах, превышающих 40 мА, формула (5.2) может дать большую погрешность, даже если учитывается третье слагаемое, величина которого определяется конструкцией транзистора и изменяется в широких пределах.

Искажения, создаваемые каскадом на верхних частотах (в области малых времен), определяются, как и в случае полевого транзистора, формулами (4.2 - 4.4) и постоянной времени верхних частот  $\tau_в$ . Сама постоянная времени верхних частот  $\tau_в$  в случае биполярного транзистора определяется несколько иначе:

$$\tau_в = \tau + C_{бк}(1 + S_o r_o) R_{экв} + (C_n + C_m) R_{экв}.$$

Постоянная времени транзистора

$$\tau = \frac{S_o r_o}{2\pi f_T},$$

где  $f_T$  - граничная частота усиления тока транзистора,  $C_{бк}$  - емкость коллекторного перехода.

Для промежуточного каскада функцию емкости нагрузки выполняет входная динамическая емкость следующего (нагружающего) каскада

$$C_{вх_{дин}} = \frac{\tau}{r_o} + C_{бк}(1 + K_o).$$

Эквивалентные схемы каскадов на полевом и биполярном транзисторах для средних частот совпадают, поэтому формулы (4.7 - 4.14) справедливы и для каскада на биполярном транзисторе при условии замены  $S$  на  $S_o$ ,  $R_u$  на  $R_o$  и  $C_u$  на  $C_o$ .

При наличии корректирующего фильтра в коллекторной цепи (для коррекции искажений, создаваемых разделительной емкостью между коллектором и нагрузкой) коэффициент передачи определяется выражением

$$\frac{K}{K_o} = \frac{d + 1 + j\omega R_k C_\phi}{d + j\omega R_k C_\phi} \cdot \frac{j\omega \tau_n}{1 + j\omega \tau_n},$$

где  $d = R_k / R_\phi$  и  $\tau_n = C_p (R_k + R_\phi)$ .

При выполнении условий  $R_k C_\phi = \tau_n (1 - b)$  и  $d = 0$  частотная и переходная характеристики были бы идеальными (к сожалению, условие  $d = 0$  невыполнимо). Условие же  $R_k C_\phi = \tau_n (1 - b)$  обеспечивает оптимальную коррекцию и используется при проектировании. При этом

$$\frac{\dot{K}}{K_o} = \frac{d + 1 + j\omega\tau_n}{d + j\omega\tau_n} \cdot \frac{j\omega\tau_n}{1 + j\omega\tau_n},$$

и спад плоской вершины импульса длительностью  $\tau_u$  определяется выражением

$$\Delta = \frac{d\tau_u^2}{2\tau_n^2(1-b)},$$

где  $b = g_n / (g_k + g_n)$ .

### **Задачи к главе 5**

#### **Задача 5.1**

Реостатный каскад собран на транзисторе КТ312А (ток коллектора в рабочей точке 5 мА). Определите искажения, создаваемые входной цепью на частоте 8 МГц, если  $R_k = 100$  Ом, а нагрузкой служит параллельное включение сопротивления 100 Ом и емкости 20 пФ. Внутреннее сопротивление источника сигнала 100 Ом. Входное сопротивление транзисторов много меньше сопротивления делителей. Емкостью монтажа можно пренебречь.

#### **Задача 5.2**

Реостатный каскад собран на транзисторе КТ312А (ток коллектора в рабочей точке 5 мА). Определите искажения, создаваемые входной цепью на частоте 8 МГц, если  $R_k = 100$  Ом, а нагрузкой служит входное сопротивление аналогичного каскада. Внутреннее сопротивление источника сигнала 100 Ом. Входное сопротивление транзисторов много меньше сопротивления делителей. Емкостью монтажа можно пренебречь.

#### **Задача 5.3**

Реостатный каскад собран на транзисторе КТ312А (ток коллектора в рабочей точке 5 мА). Выберите  $R_k$  таким образом, чтобы при  $C_n = 30$  пФ верхняя граничная частота выходной цепи на уровне  $-2$  дБ была не ниже

5 МГц.  $R_n = 100$  Ом. Определите  $K_o$  и входную динамическую емкость каскада.

#### Задача 5.4

Реостатный каскад собран на транзисторе КТ312А (ток коллектора в рабочей точке 5 мА). Выберите  $R_k$  таким образом, чтобы при  $C_n = 30$  пФ верхняя граничная частота выходной цепи на уровне  $-2$  дБ была не ниже 5 МГц.  $R_n = 1$  кОм. Определите  $K_o$  и входную динамическую емкость каскада.

#### Задача 5.5

Реостатный каскад собран на транзисторе КТ324А (ток коллектора в рабочей точке 1 мА). Выберите  $R_k$  таким образом, чтобы при  $C_n = 30$  пФ время нарастания выходной цепи было не более 50 нс.  $R_n = 100$  Ом. Определите  $K_o$  и входную динамическую емкость каскада. Как изменится выбор  $R_k$ , если  $R_n = 1$  кОм?

#### Задача 5.6

Определите искажения, создаваемые реостатным каскадом на транзисторе КТ324А (ток коллектора в рабочей точке 1 мА) на частоте 20 Гц, если  $R_o \gg R_{ex}$ ,  $R_k = R_n = 1$  кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала 100 Ом,  $C_{p1} = C_{p2} = 10$  мкФ,  $R_3 = 1$  кОм и  $C_3 = 1000$  мкФ.

#### Задача 5.7

Определите спад плоской вершины импульса длительностью 50 мкс, создаваемый разделительными емкостями на входе и выходе реостатного каскада на транзисторе КТ312А (ток коллектора в рабочей точке 5 мА). Нагрузкой служит входное сопротивление каскада на аналогичном транзисторе, работающем в том же режиме.  $R_k = 100$  Ом, внутреннее сопротивление источника сигнала 100 Ом,  $C_{p1} = C_{p2} = 10$  мкФ,  $R_o \gg R_{ex}$ .

#### Задача 5.8

Определите спад плоской вершины импульса длительностью 50 мкс, создаваемый разделительными емкостями на входе и выходе реостатного каскада на полевом транзисторе КП103М (ток стока в рабочей точке 1 мА). Нагрузкой служит входное сопротивление каскада на транзисторе КТ324А (ток коллектора в рабочей точке 1 мА).  $R_{cm} = 5,1$  кОм,  $R_3 = 10$  кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала 100 Ом,  $C_{p1} = C_{p2} = 1$  мкФ. Вычислите  $K_o$  каскада на полевом транзисторе.

### Задача 5.9

Определите нижнюю граничную частоту реостатного каскада на транзисторе КТ324А (ток коллектора в рабочей точке 1 мА) на уровне  $-3$  дБ, если искажения создаются разделительными конденсаторами на входе и выходе ( $C_{p1} = C_{p2} = 5$  мкФ).  $R_c = R_k = 1$  кОм. Нагрузкой служит входное сопротивление каскада на аналогичном транзисторе (ток коллектора в рабочей точке 2 мА).

### Задача 5.10

Реостатный каскад собран на транзисторе КТ324А (ток коллектора в рабочей точке 5 мА). Определите время нарастания каскада (учитывая одновременно входную и выходную цепи) при  $R_k = 200$  Ом,  $C_n = 30$  пФ и емкости монтажа 7 пФ. Сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника сигнала и составляет 100 Ом. Определите  $K_o$  и сквозной коэффициент усиления.

### Задача 5.11

Как изменится режим работы транзисторов в схеме на рис.5.2 при пробое разделительной емкости  $C_{p2}$ ? Характеристики транзисторов одинаковы и показаны на рис. 5.3. Как изменится результат, если идеализированную входную характеристику (линейную) заменить квадратичной?

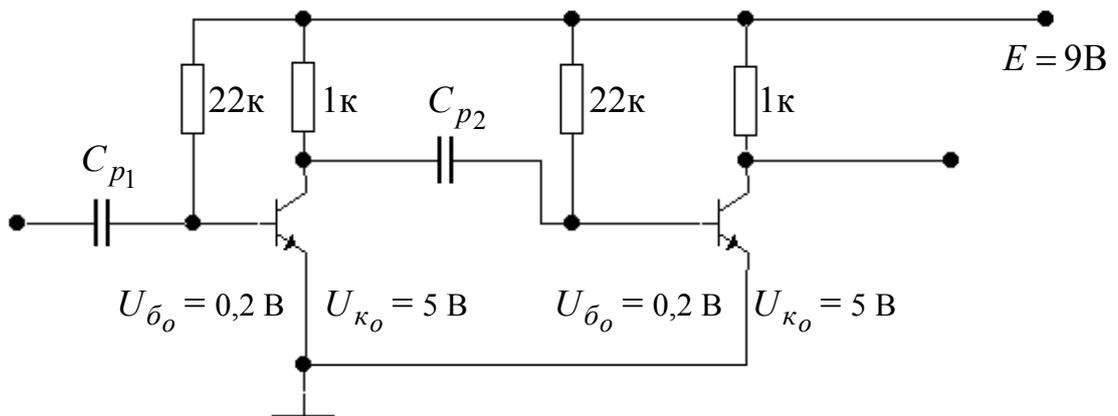


Рис. 5.2

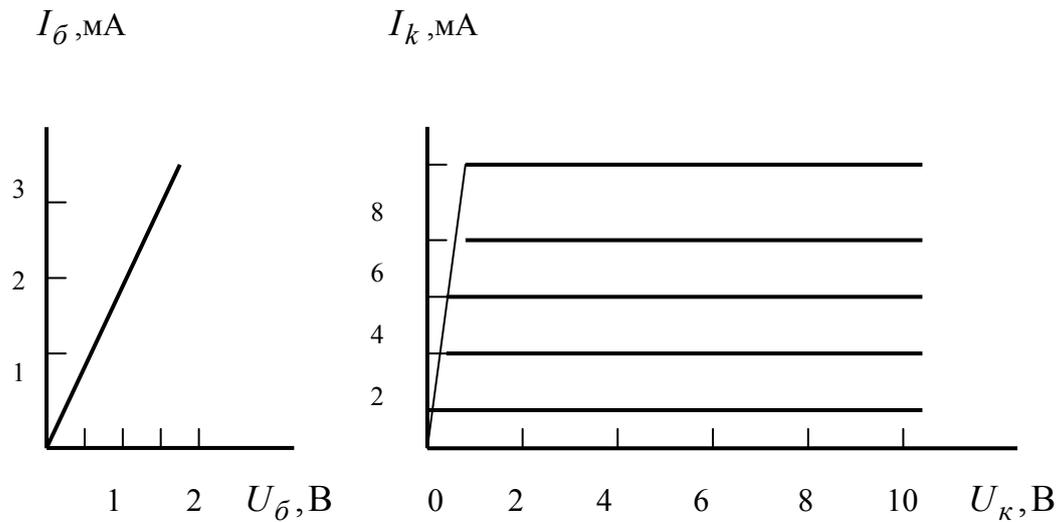


Рис. 5.3

### Задача 5.12

В схеме на рис.5.4 определите элементы таким образом, чтобы при напряжении источника питания  $E = 12$  В и сопротивлении в цепи коллектора транзистора VT1  $R_{k1} = 200$  Ом обеспечить следующий режим работы транзисторов:  $U_{k_{o1}} = 4,8$  В,  $U_{k_{o2}} = 5$  В,  $I_{k_{o1}} = I_{k_{o2}} = 5$  мА,  $U_{\bar{o}1} = 0,2$  В,  $U_{\bar{o}2} = -0,2$  В и  $I_{\bar{o}1} = I_{\bar{o}2} = 0,1$  мА.

Ток делителя принять равным десяти токам базы.

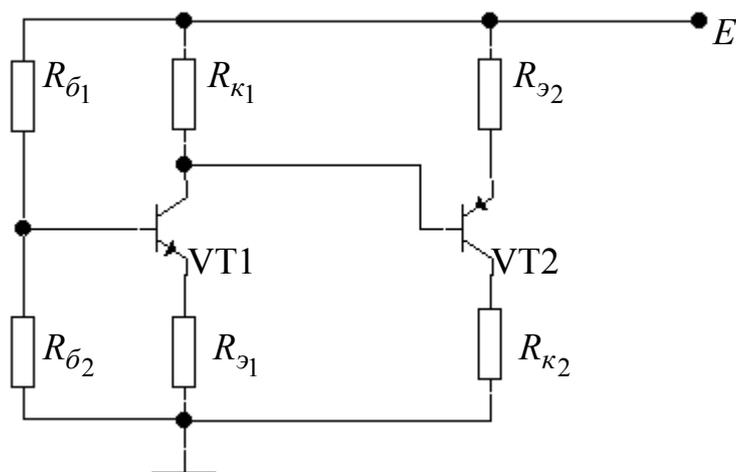


Рис.5.4

### Задача 5.13

Постройте эпюры напряжений, иллюстрирующие процесс появления искажений отрицательных (на входе) импульсов большой скважности за счет разделительной емкости между каскадами ( $C_{p2}$  на рис. 5.1). Как изменятся эти эпюры, если при прочих равных условиях входное сопротивление нагружающего каскада уменьшится?

### Задача 5.14

Покажите, какой станет форма прямоугольного импульса, прошедшего через усилитель, имеющий частотные характеристики, изображенные на рис. 5.5.

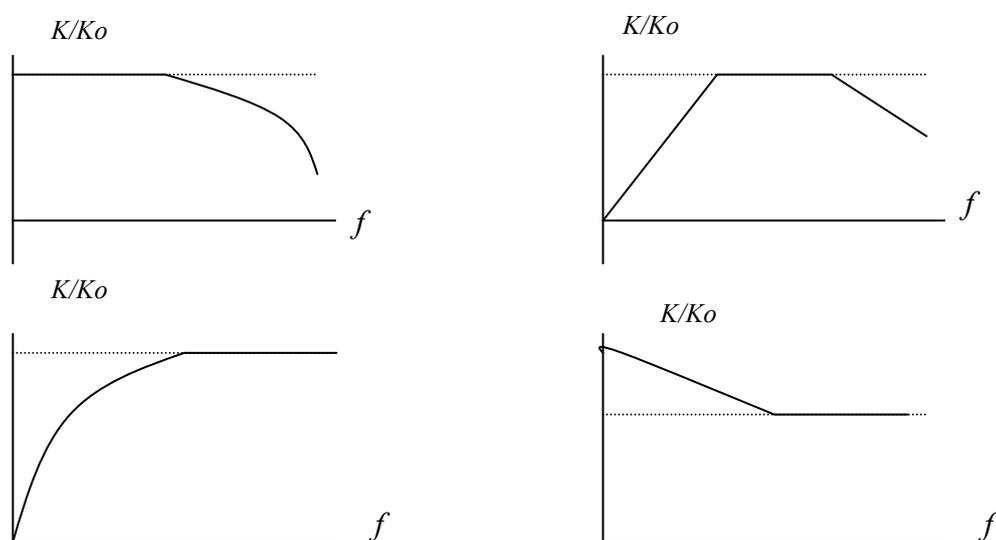


Рис. 5.5

### Задача 5.15

Реостатный каскад с корректирующим фильтром в коллекторной цепи собран на транзисторе КТ312А (ток коллектора в рабочей точке 3 мА,  $R_k = 510$  Ом,  $C_p$  на выходе 5 мкФ). Нагрузкой служит входное сопротивление каскада на аналогичном транзисторе, работающем при токе покоя 5 мА. Какими должны быть  $R_\phi$  и  $C_\phi$ , если усилению подлежат прямоугольные импульсы длительностью 100 мкс, и спад в конце импульсов при оптимальной коррекции не должен превышать 1%? Изобразите схему рассчитываемого каскада.

### Задача 5.16

Как изменятся значения  $R_\phi$  и  $C_\phi$  в предыдущей задаче, если фильтр должен скорректировать искажения не только выходной цепи каскада, но и его входной цепи? Внутреннее сопротивление источника сигнала 200 Ом, разделительная емкость на входе 10 мкФ, сопротивление делителя в цепи базы (параллельное включение  $R_{\sigma_1}$  и  $R_{\sigma_2}$ ) 7,2 кОм.

### Задача 5.17

Как изменятся значения  $R_\phi$  и  $C_\phi$  в предыдущей задаче, если нагрузкой служит активное сопротивление

- а) 3 кОм?                      б) 200 Ом?

### Задача 5.18

Усилитель, собранный на транзисторе КТ312А ( $I_{k_0} = 5\text{мА}$ ,  $R_k = R_\phi = 300\text{ Ом}$ ), работает на нагрузку 1 кОм. Какой должна быть емкость корректирующего фильтра при оптимальной коррекции, если усилению подлежат импульсы длительностью 140 мкс? Емкость разделительного конденсатора 1 мкФ.

Определите спад в конце импульса. Сравните этот спад с тем, который получился бы в этой схеме при работе на высокоомную нагрузку ( $R_n \geq 10R_k$ ) и со спадом, создаваемым вышеописанным усилителем, но без корректирующего фильтра.

### Задача 5.19

Изобразите частотную характеристику каскада на биполярном транзисторе с корректирующим фильтром в коллекторной цепи и разделительными конденсаторами на входе и на выходе. Как изменится частотная характеристика, если емкость конденсатора в цепи фильтра

- а) увеличить в 2-3 раза,  
б) увеличить в 20-30 раз,  
в) уменьшить в 2-3 раза,  
г) уменьшить в 20-30 раз?

### Задача 5.20

Проиллюстрируйте эпюрами напряжения процесс создания подъема плоской вершины прямоугольного импульса корректирующим фильтром в коллекторной цепи.

**Определение вида обратной связи**

*Задачи к главе 6*

В приведенных ниже схемах необходимо обнаружить все цепочки обратной связи и для каждой из них определить вид обратной связи (по способу снятия напряжения обратной связи из последующей цепи, по способу введения обратной связи в предыдущую цепь), определить знак обратной связи (фазовый сдвиг между напряжением сигнала и напряжением обратной связи), указать, осуществляется обратная связь на постоянном или переменном токе (в последнем случае определить, является ли обратная связь частотно-зависимой). Если номиналы элементов на схеме не указаны, предполагается, что емкость конденсаторов велика и их сопротивление в пределах рабочего диапазона стремится к нулю.

В следующих ниже схемах приняты обозначения:

- если рядом со значением сопротивления или емкости отсутствует буква, это означает омы (для сопротивлений) и пикофарады (для емкостей);
- буква «к» возле сопротивления обозначает килоомы;
- буква «М» возле сопротивления обозначает мегаомы;
- буква «н» при емкости обозначает нанофарады;
- запятая у величины емкости обозначает микрофарады.

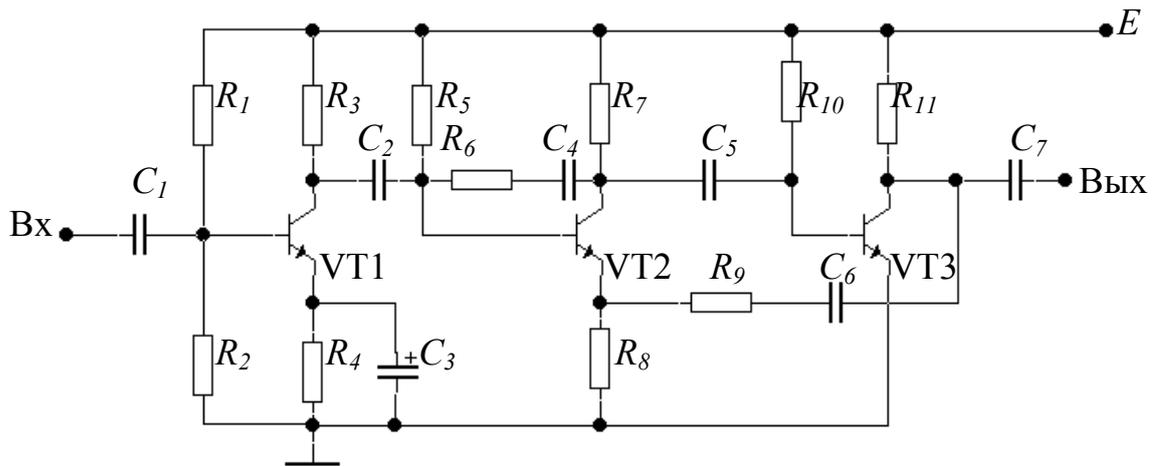


Рис.6.1

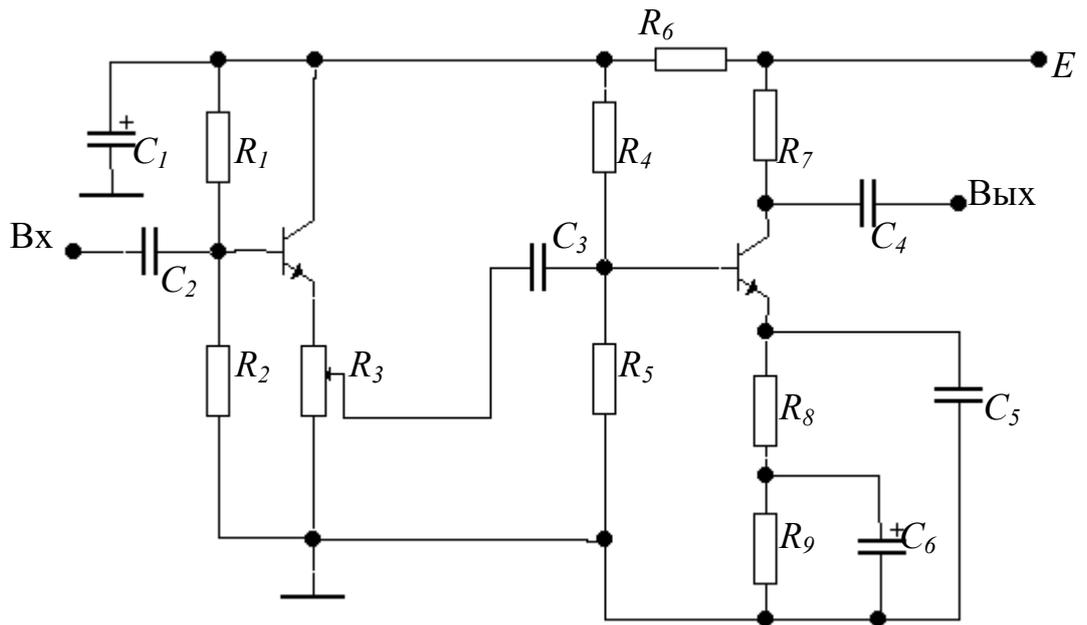


Рис. 6.2

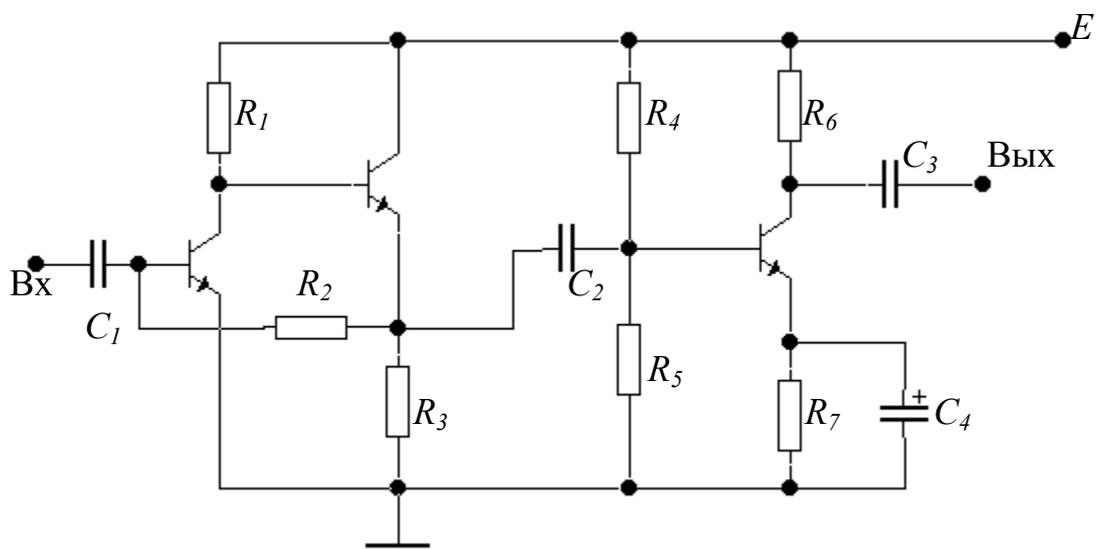


Рис. 6.3

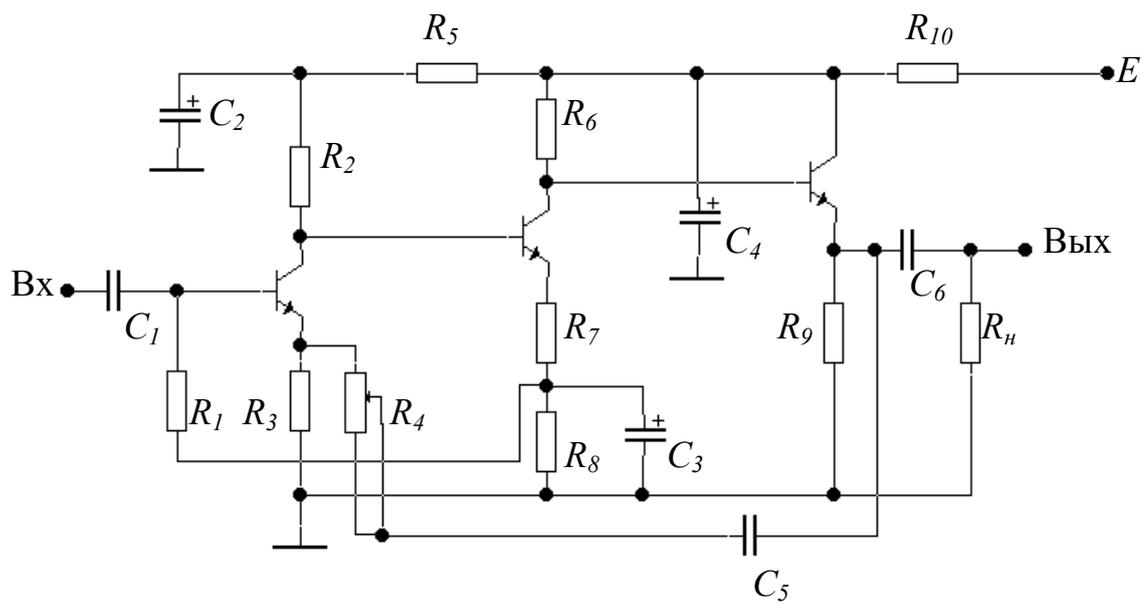


Рис. 6.4

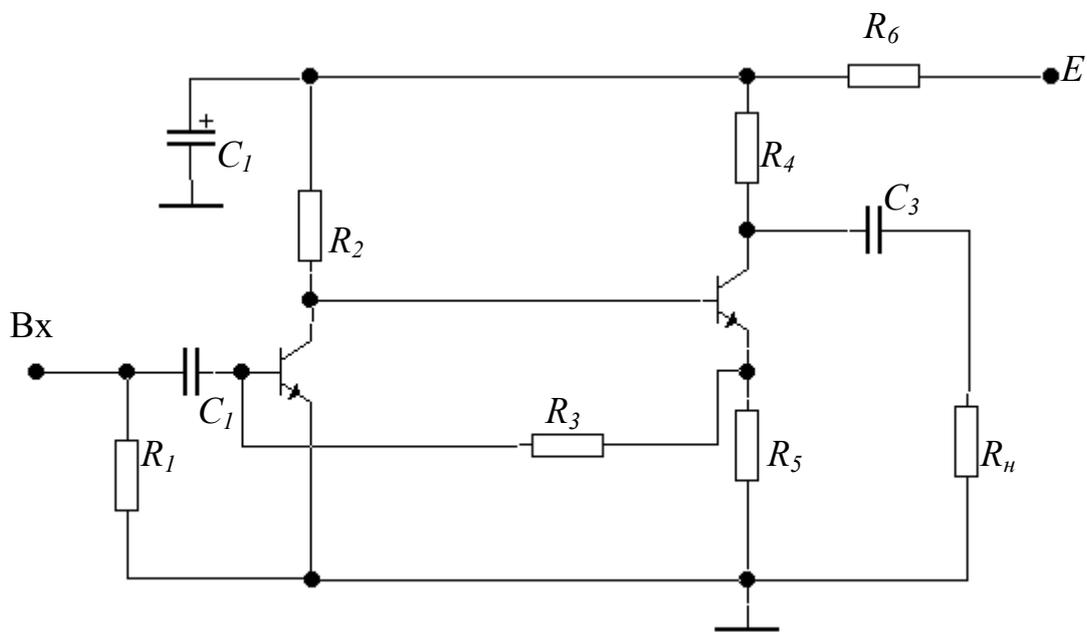


Рис. 6.5

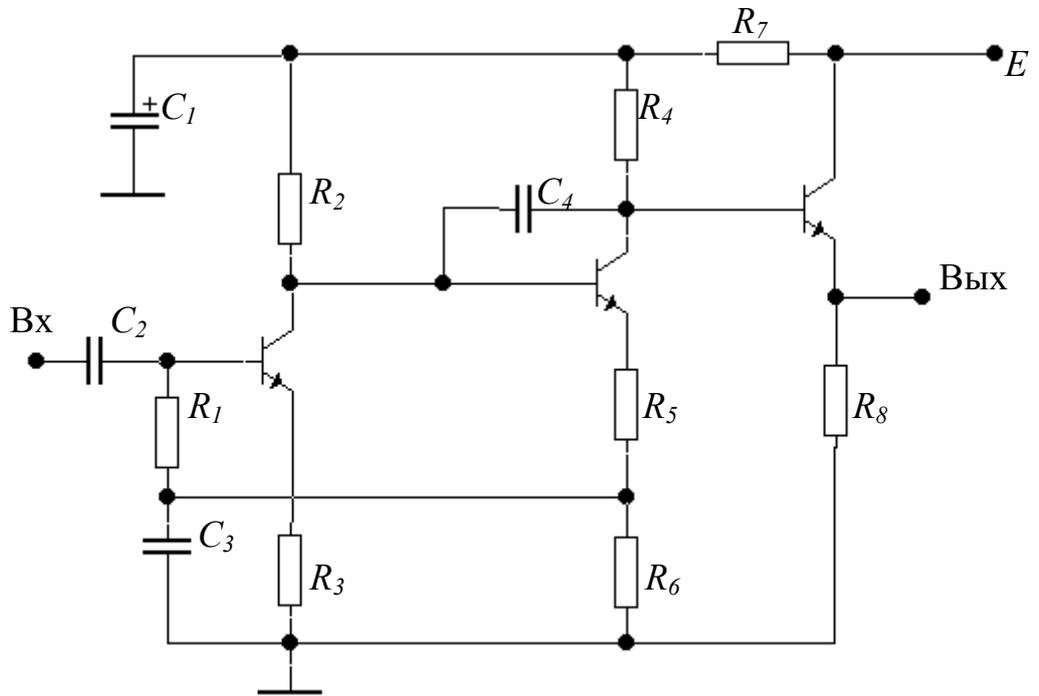


Рис. 6.6

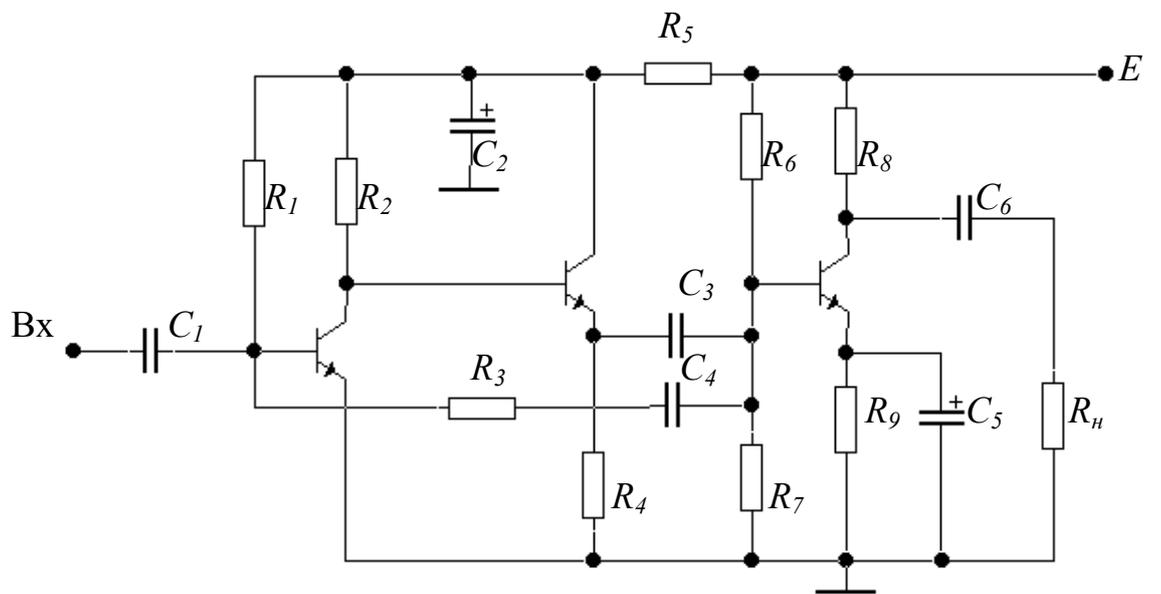


Рис. 6.7

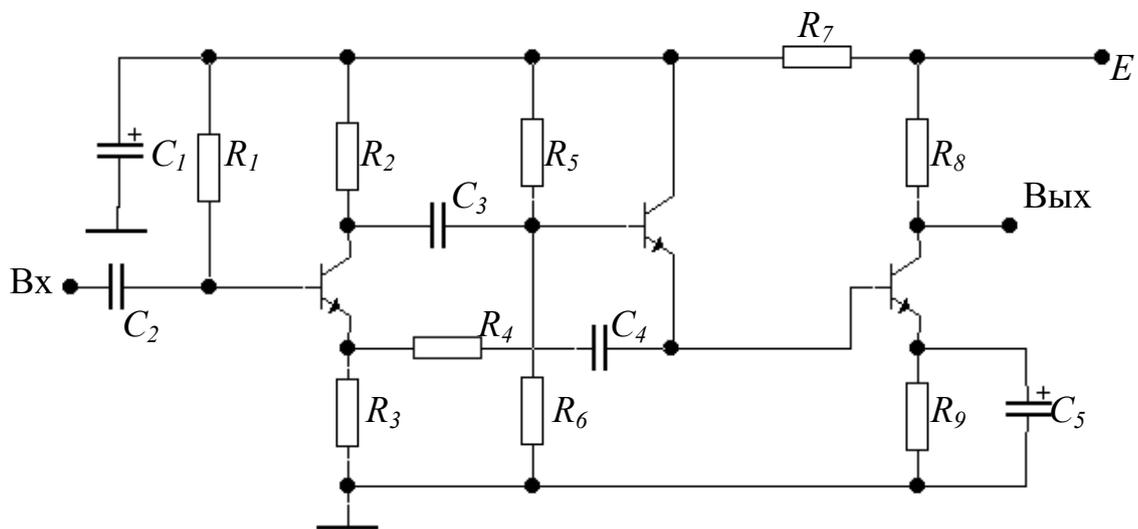


Рис. 6.8

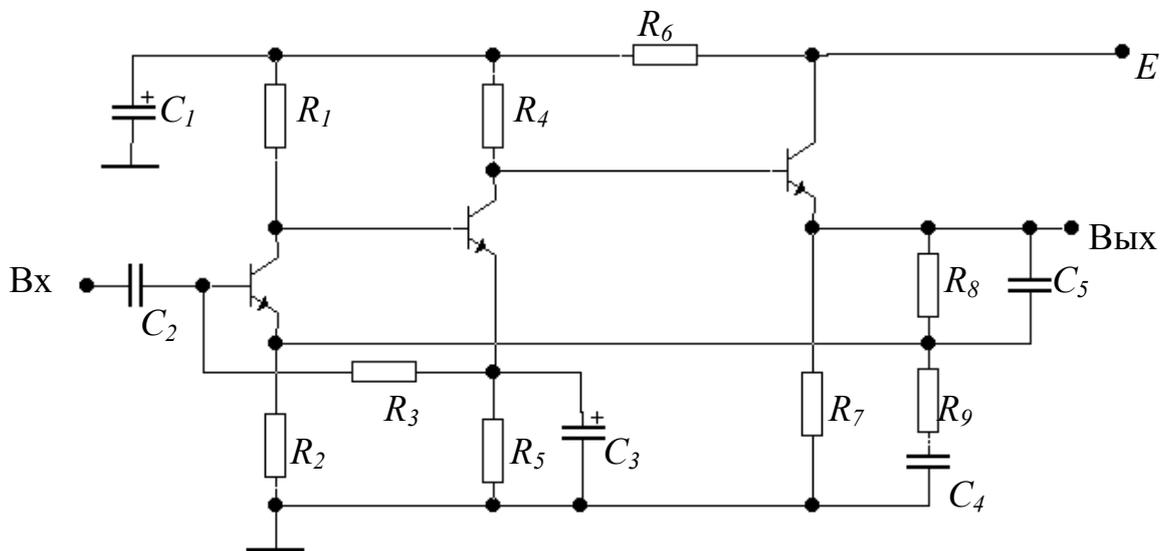


Рис. 6.9

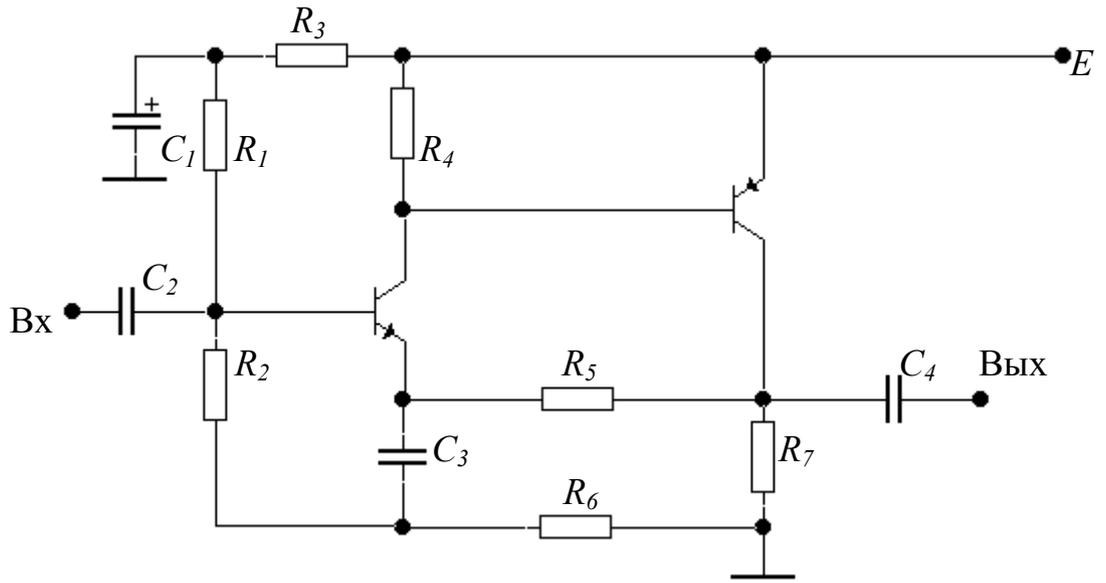


Рис. 6.10

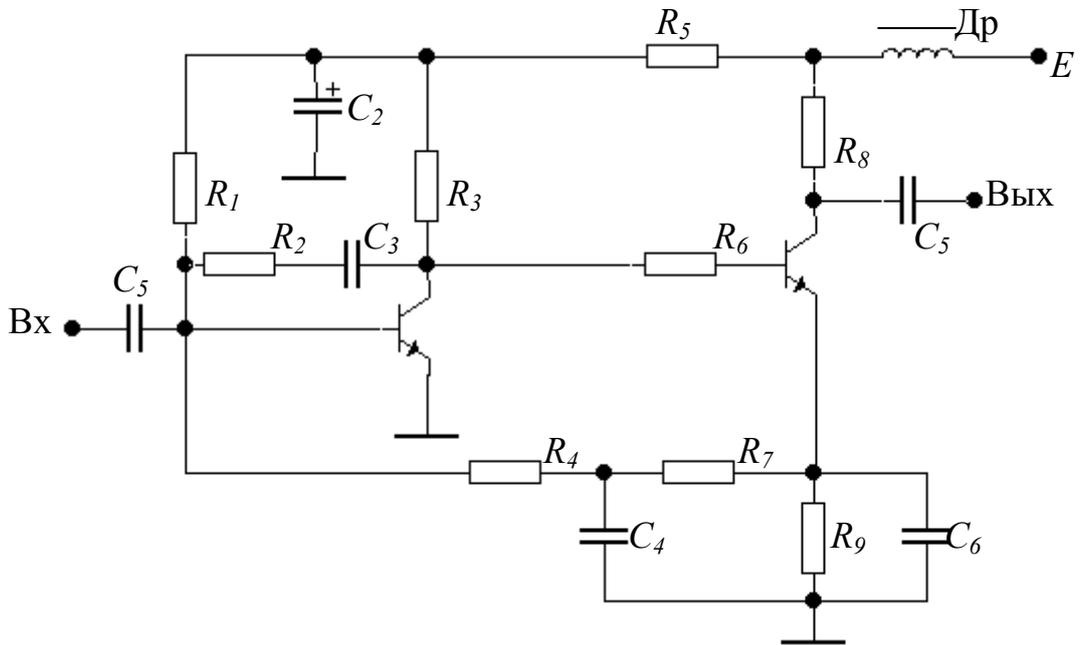


Рис. 6.11

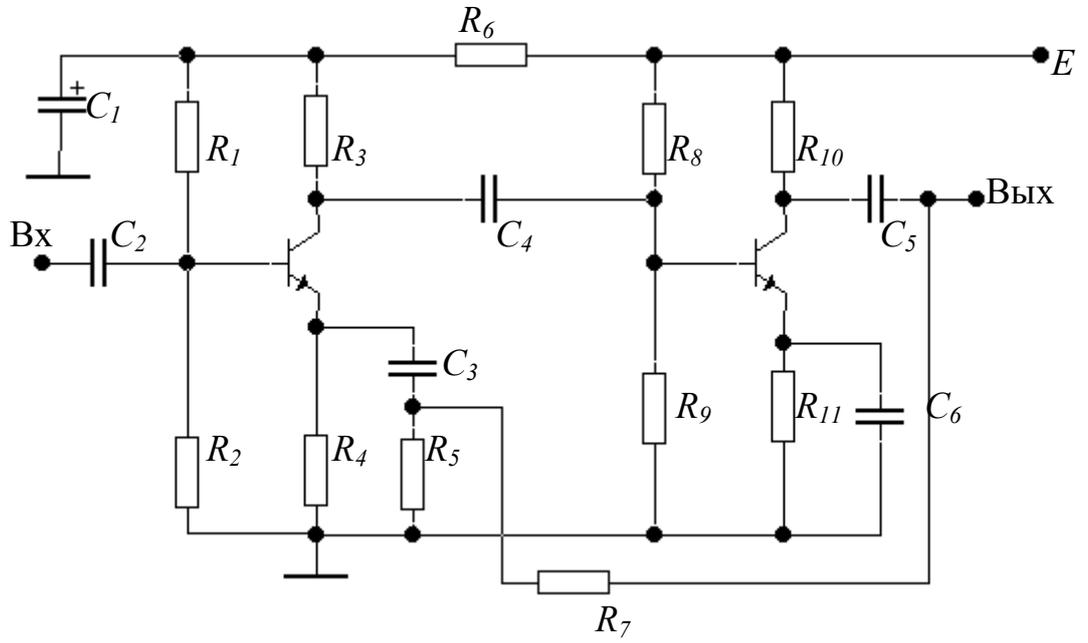


Рис. 6.12

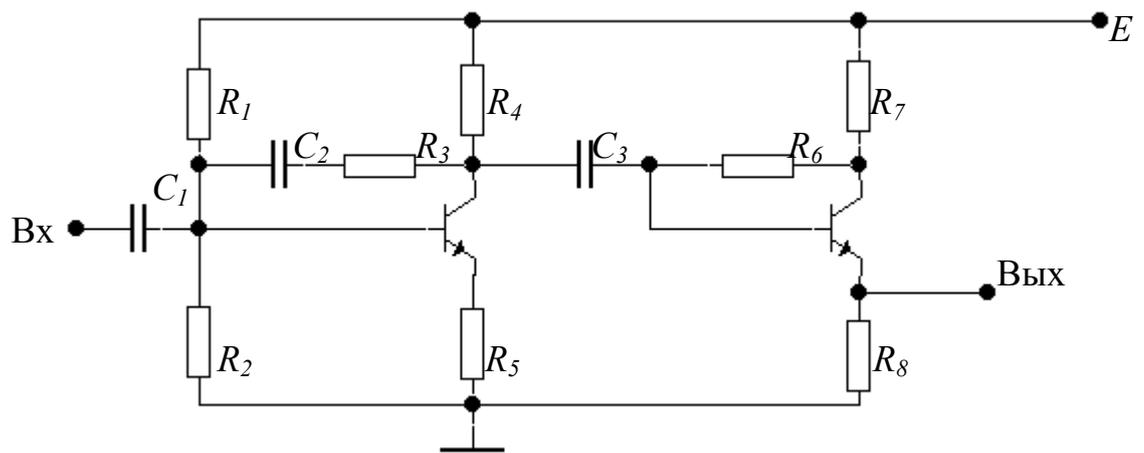


Рис. 6.13

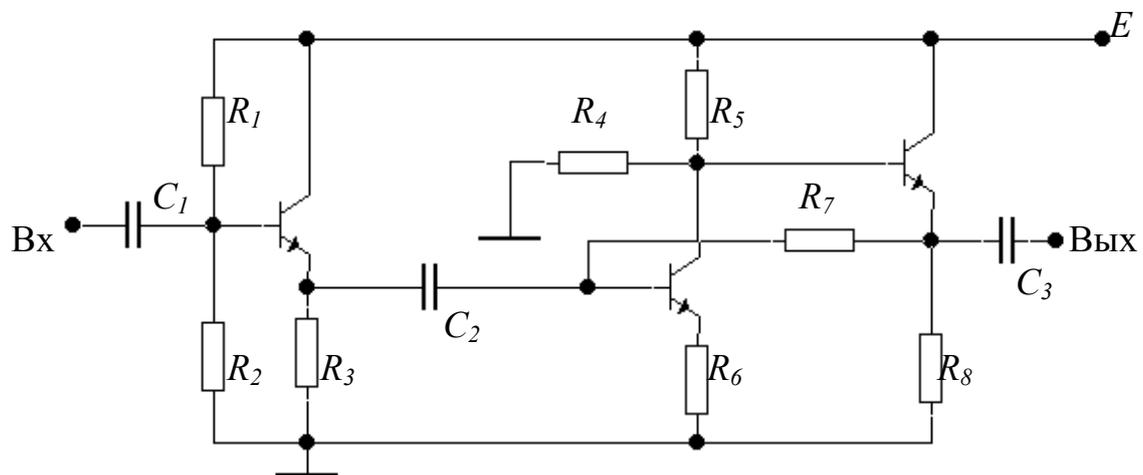


Рис. 6.14

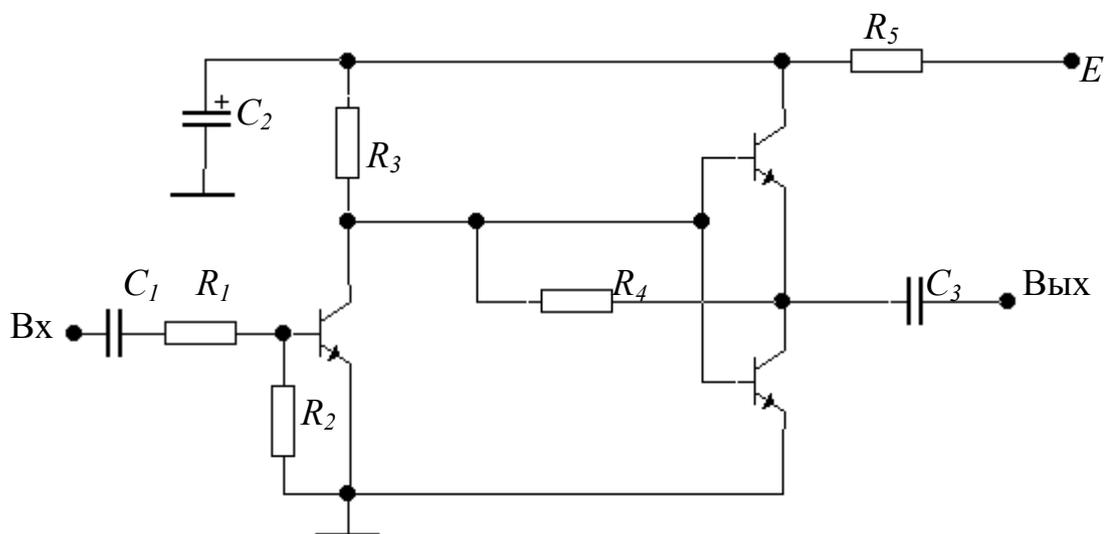


Рис. 6.15

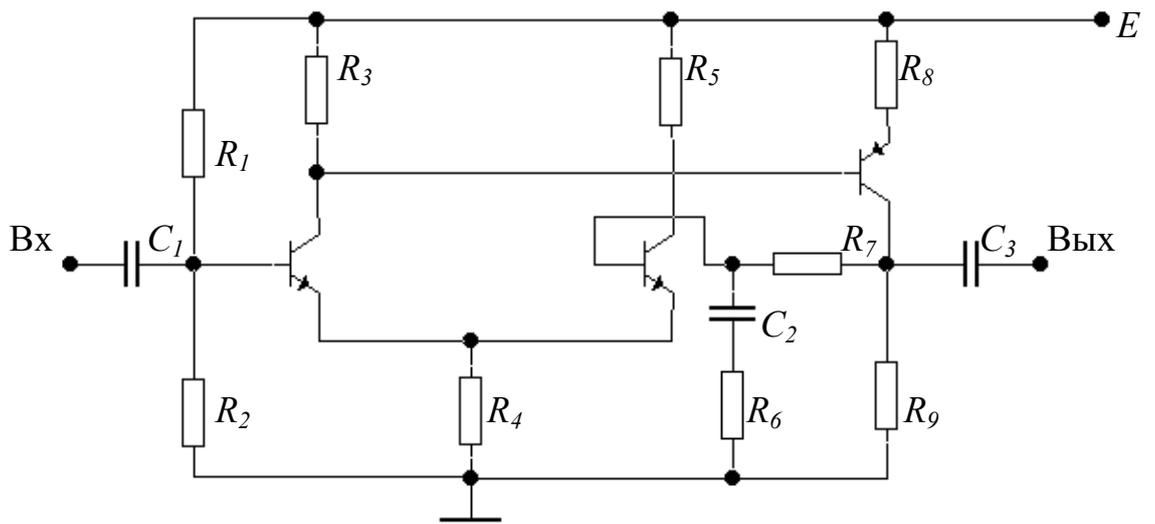


Рис. 6.16

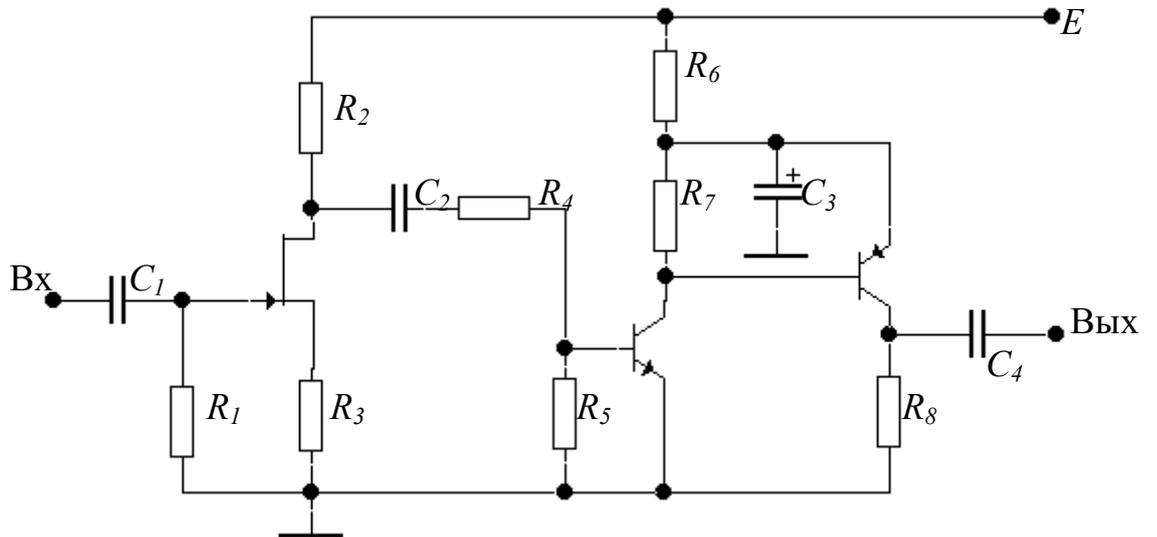


Рис. 6.17

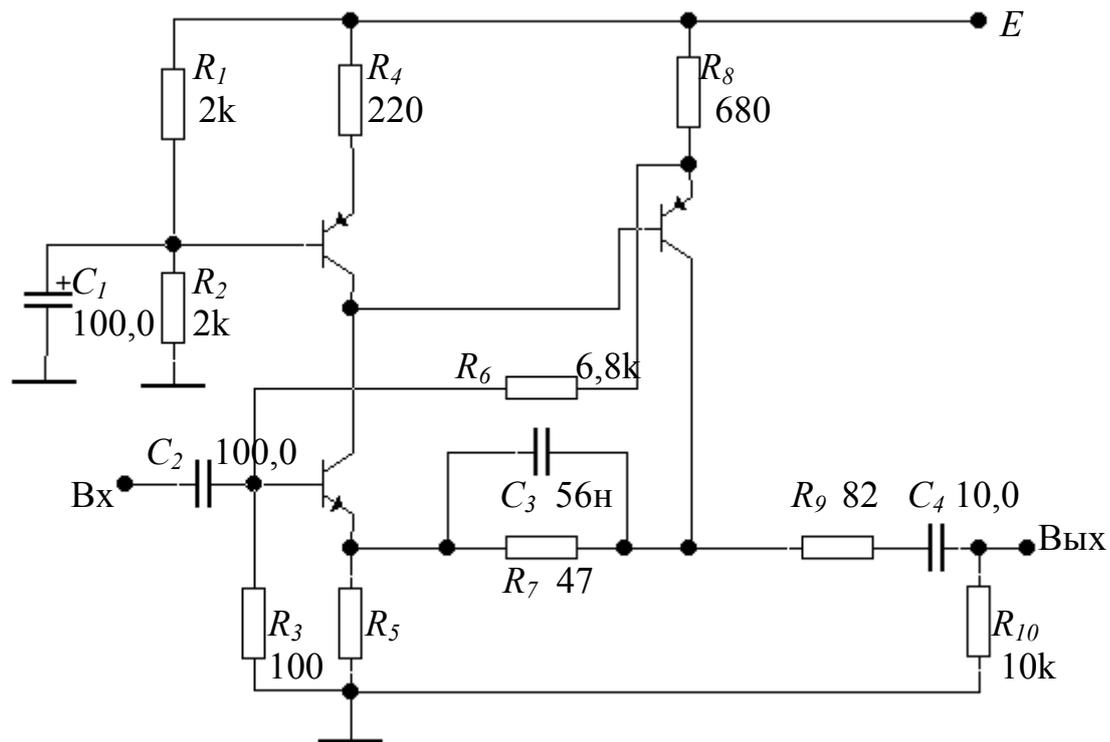


Рис. 6.18

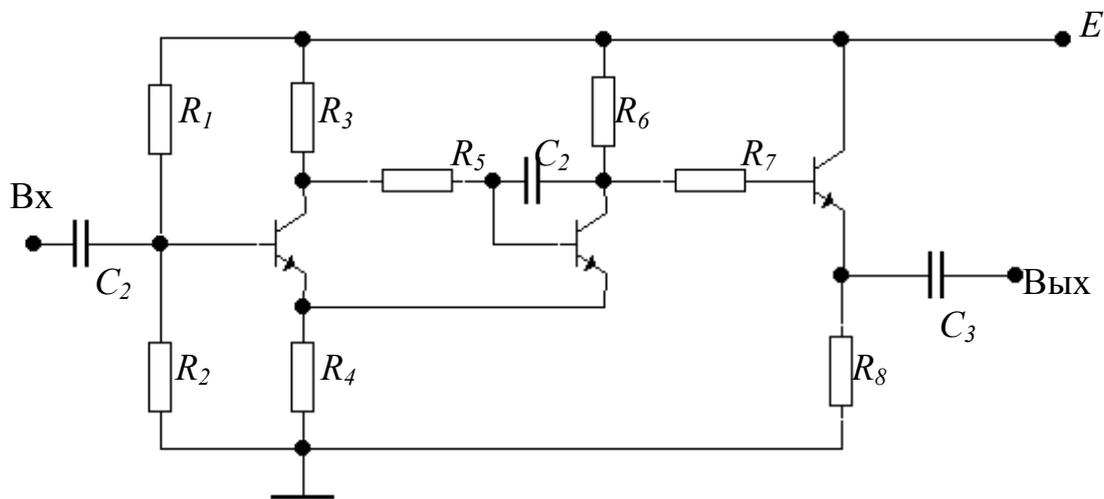


Рис. 6.19

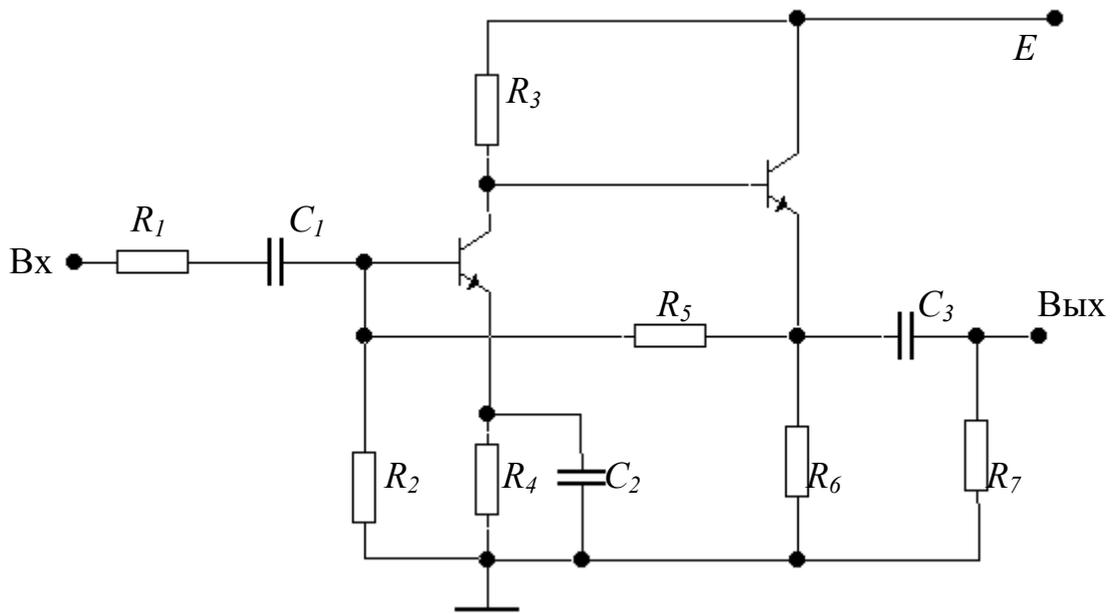


Рис 6.20

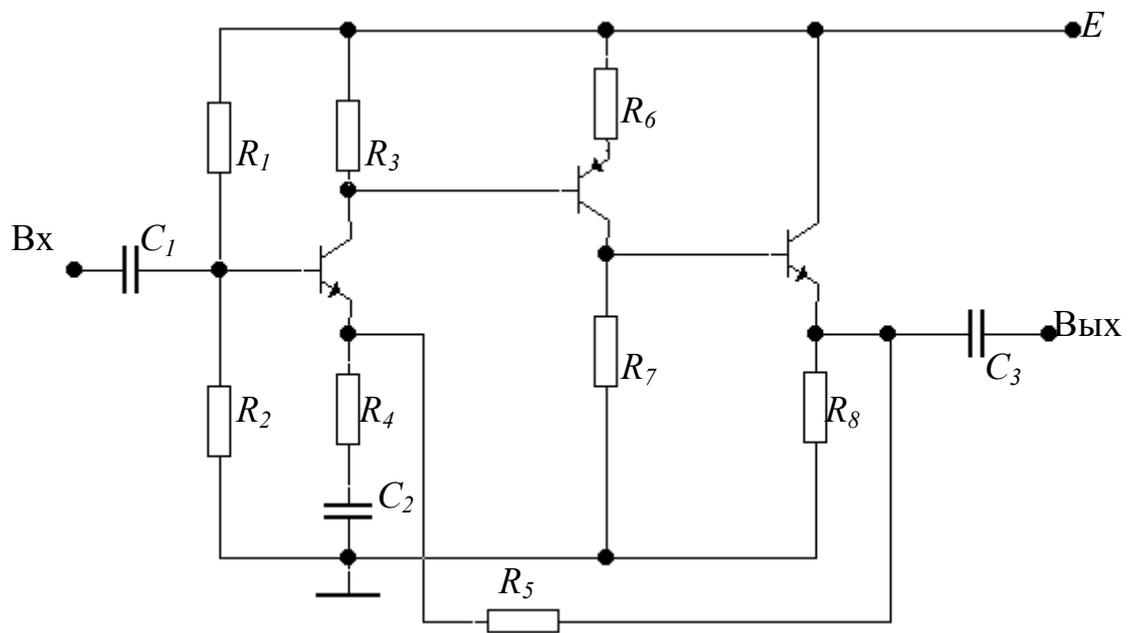


Рис. 6.21

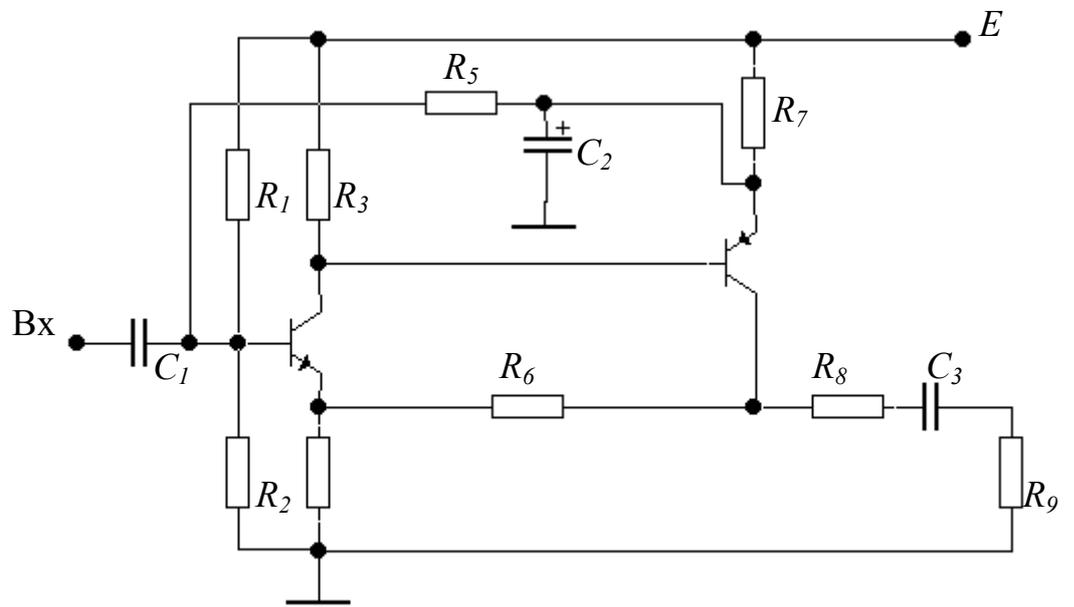


Рис. 6.22

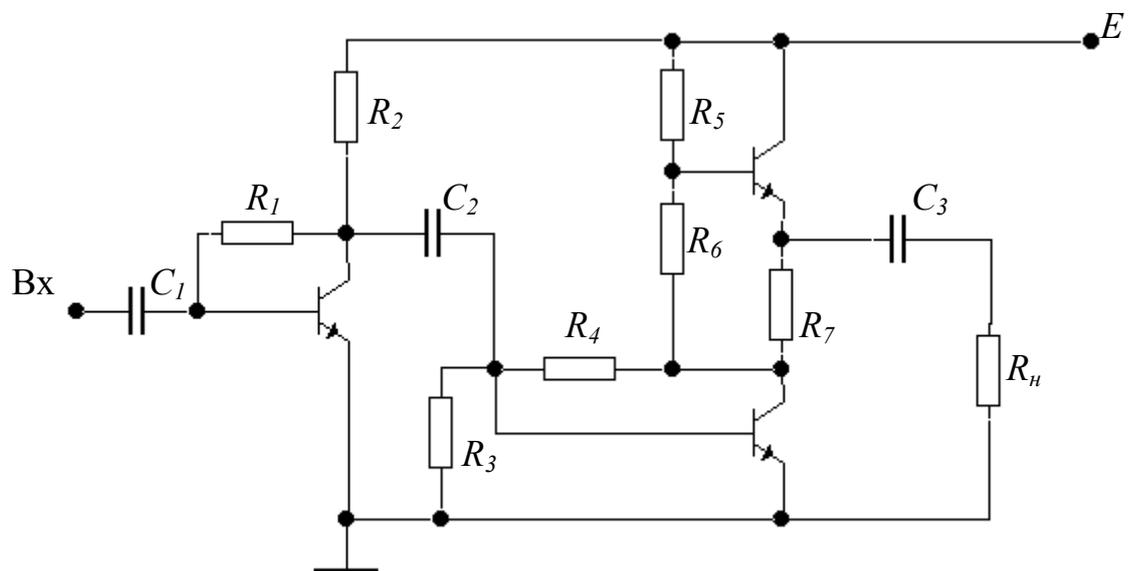


Рис. 6.23

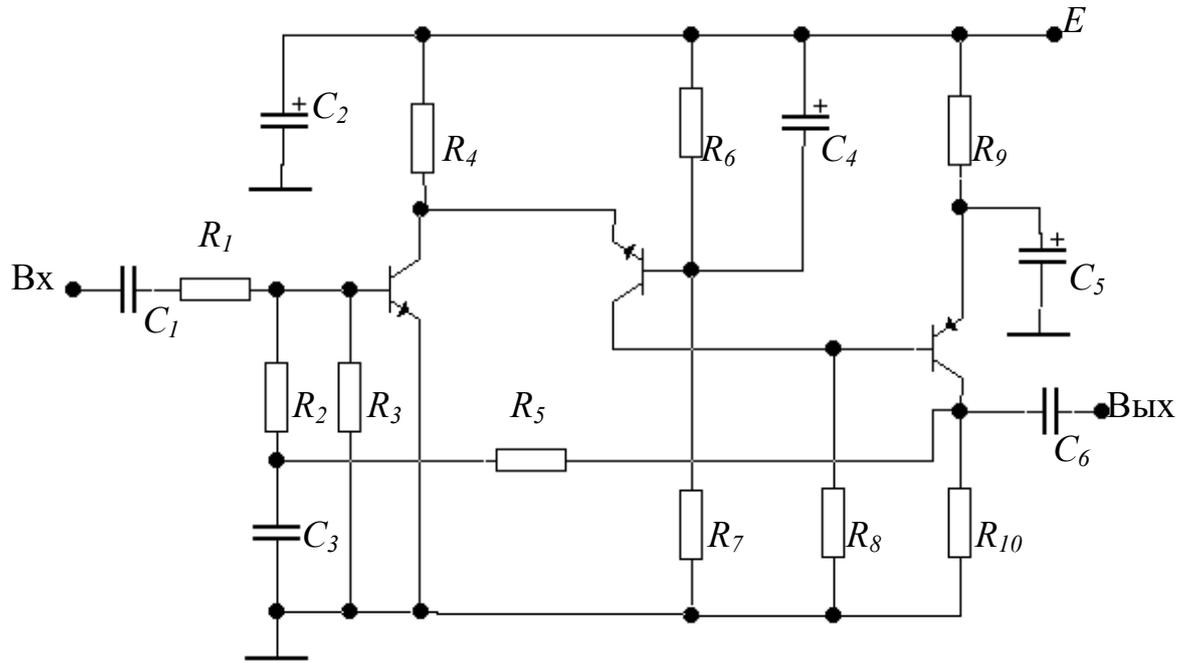


Рис. 6.24

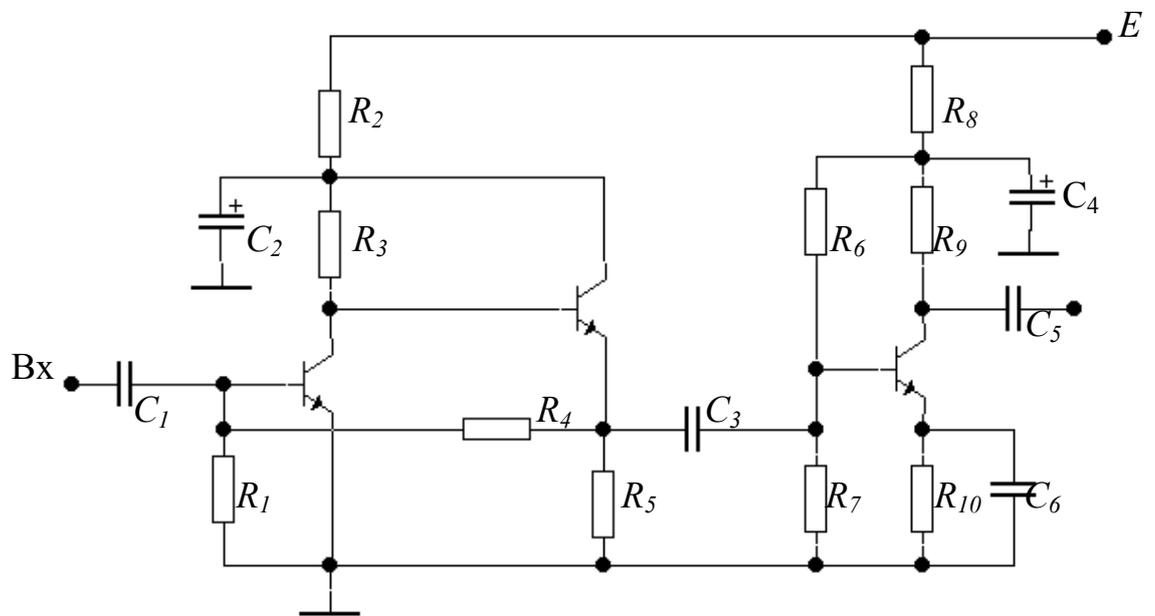


Рис. 6.25

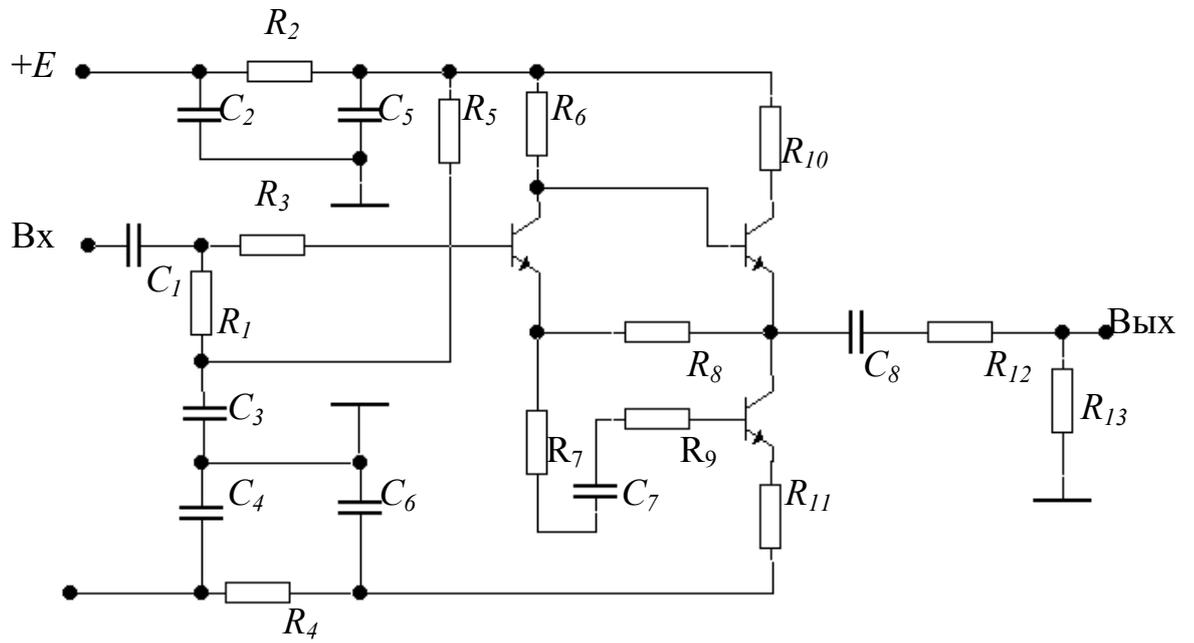


Рис. 6.26

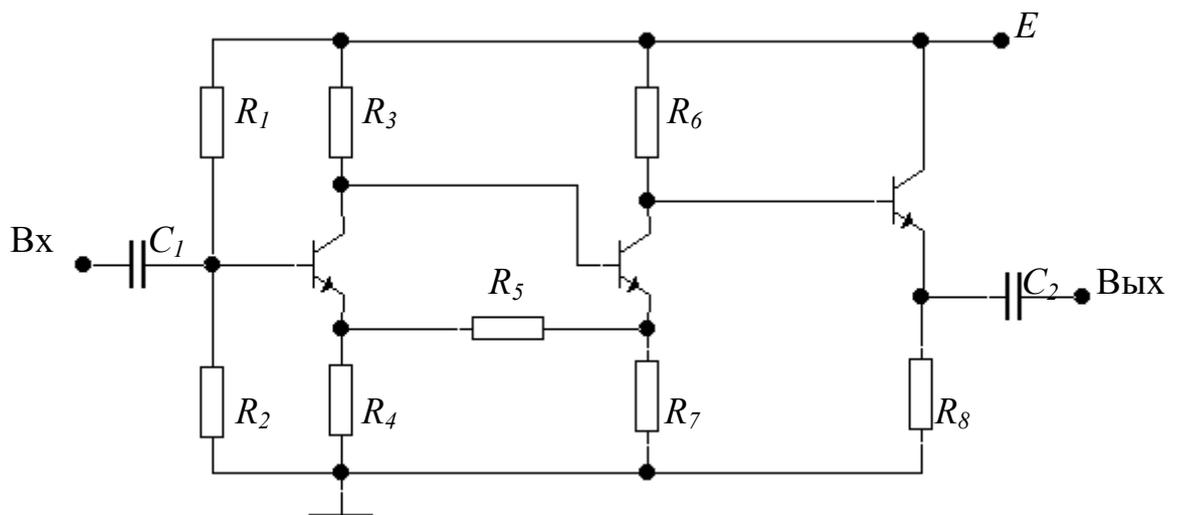


Рис. 6.27

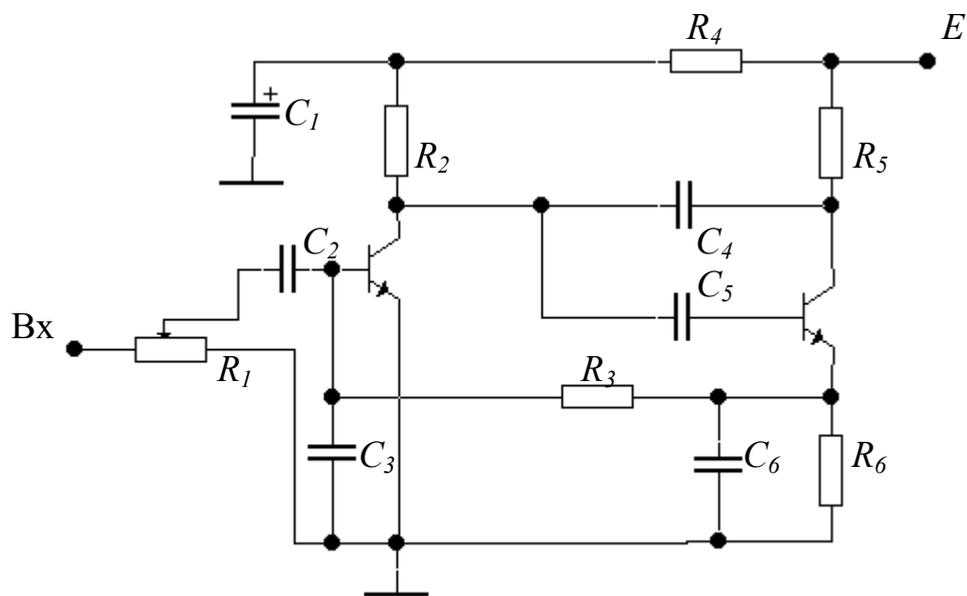


Рис. 6.28

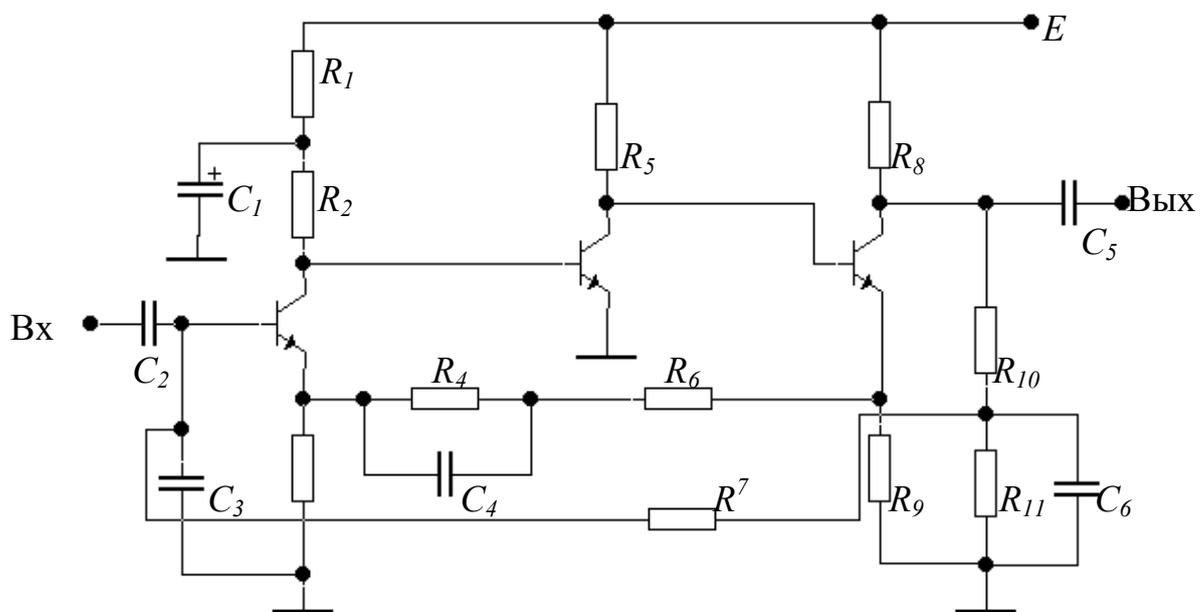


Рис. 6.29

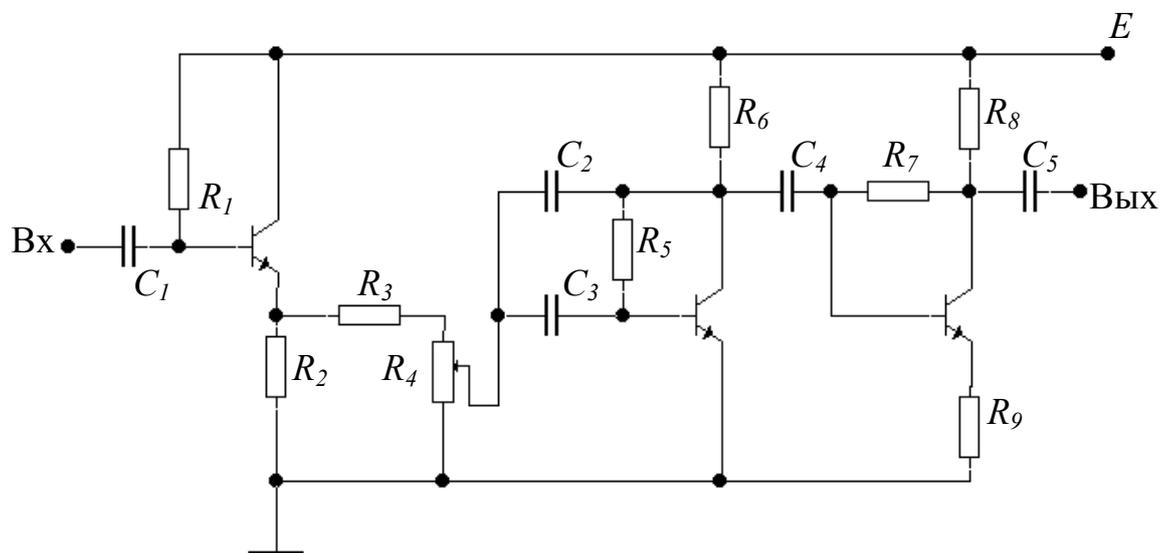


Рис. 6.30

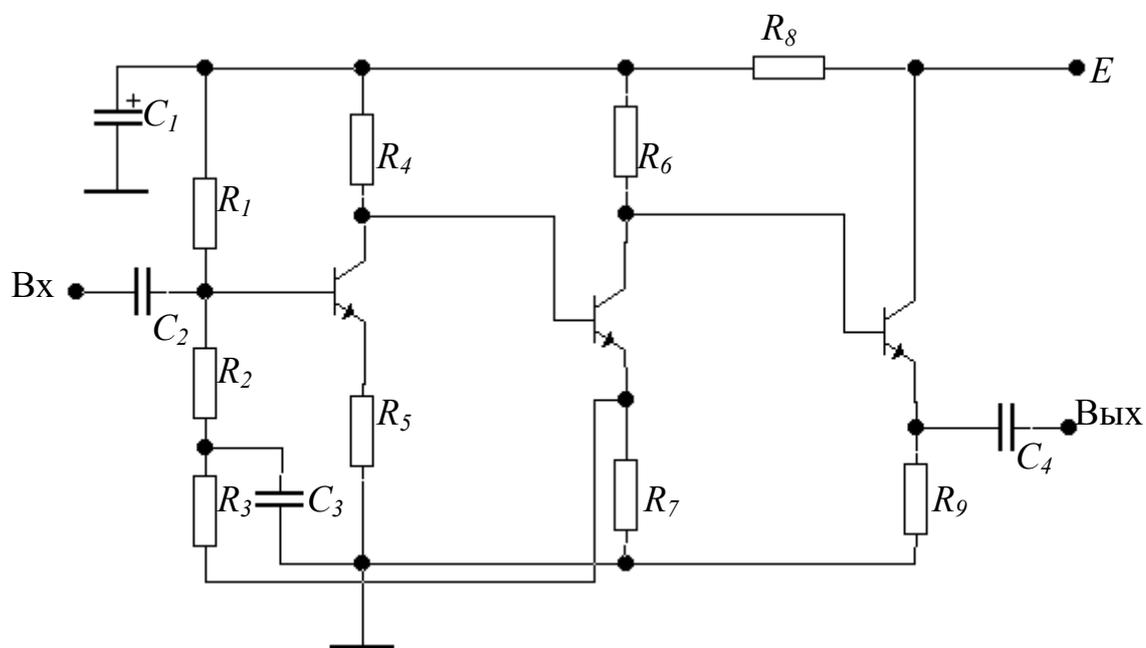


Рис. 6.31

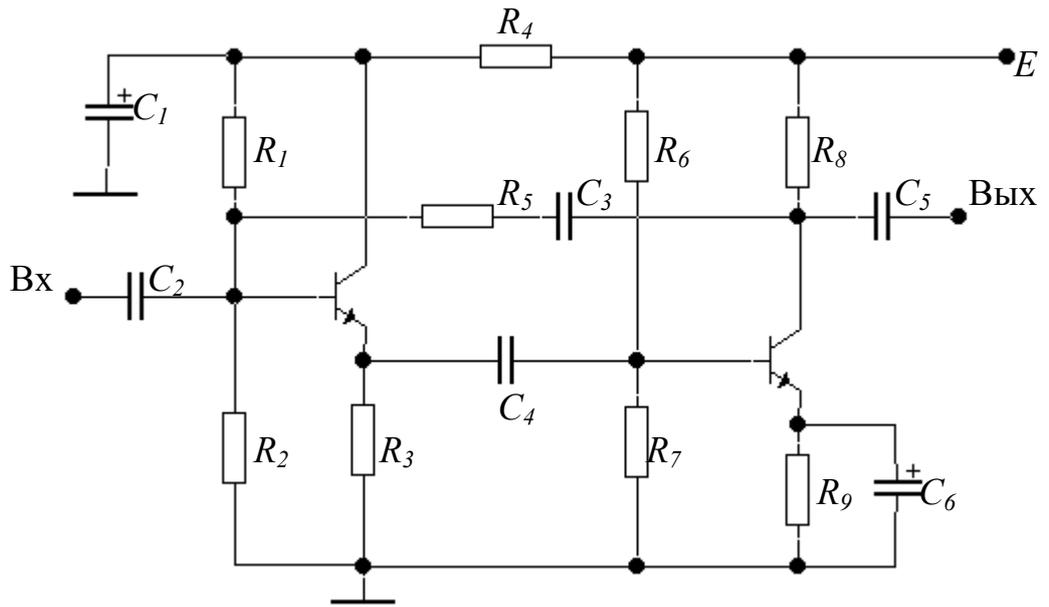


Рис. 6.32

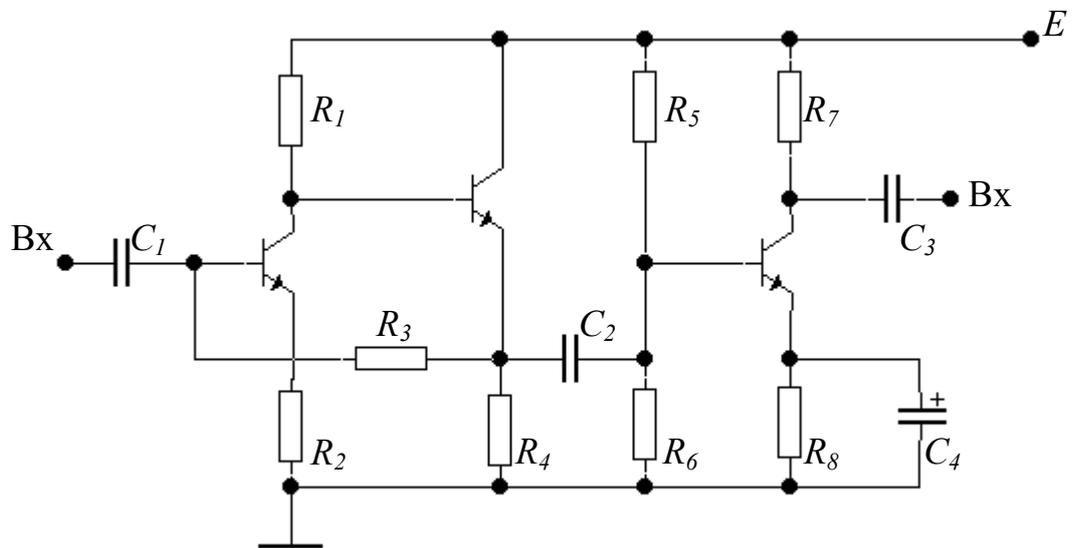


Рис. 6.33

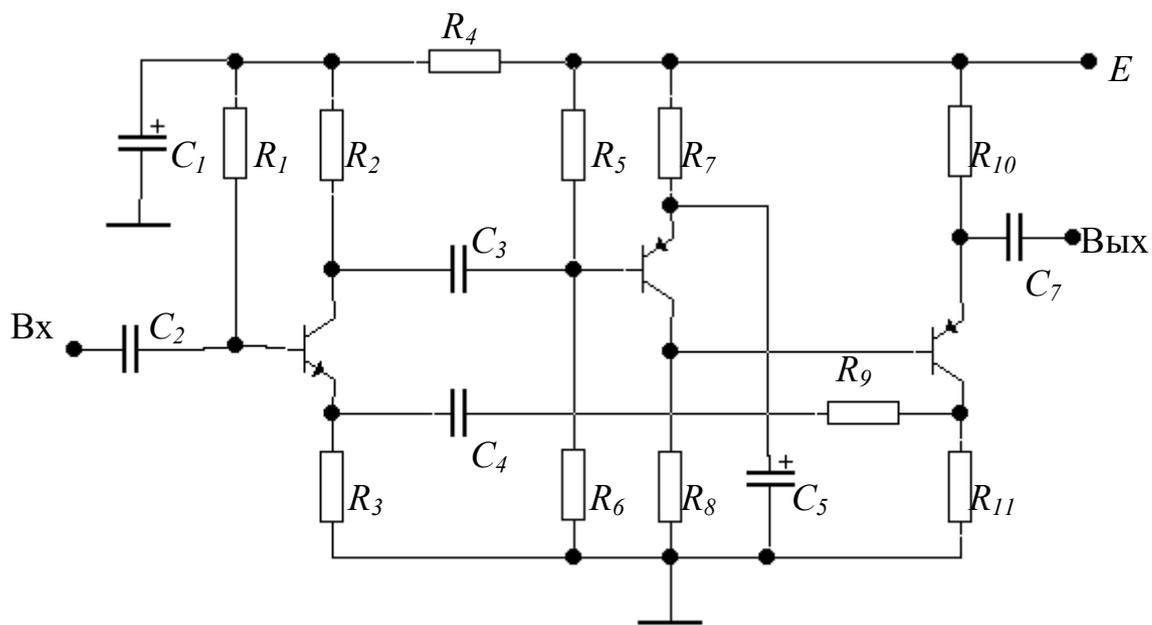


Рис. 6.34

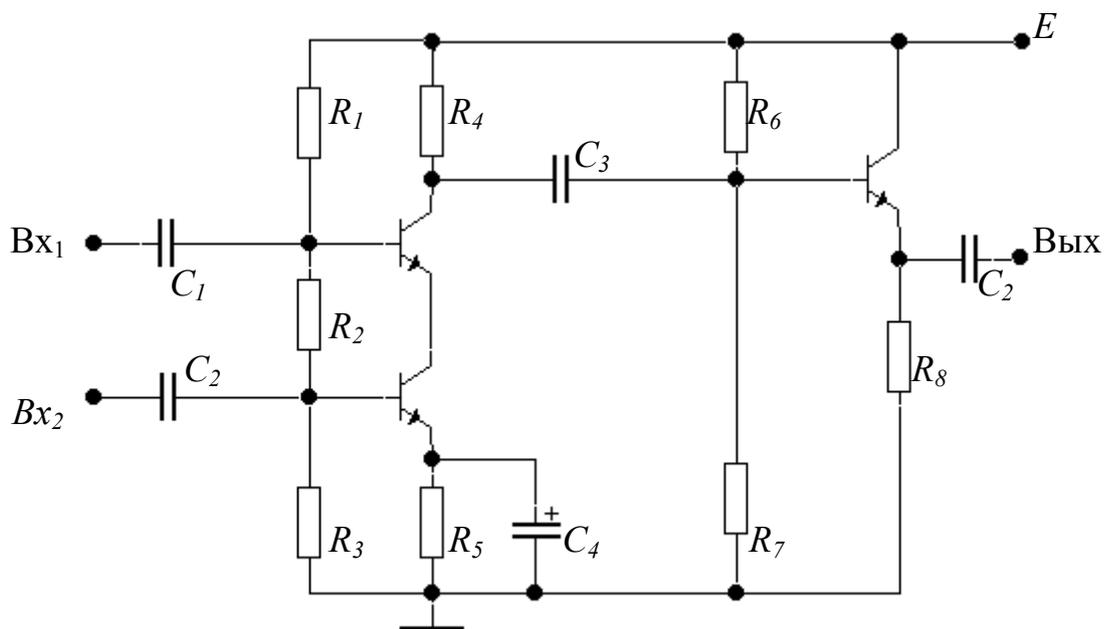


Рис. 6.35

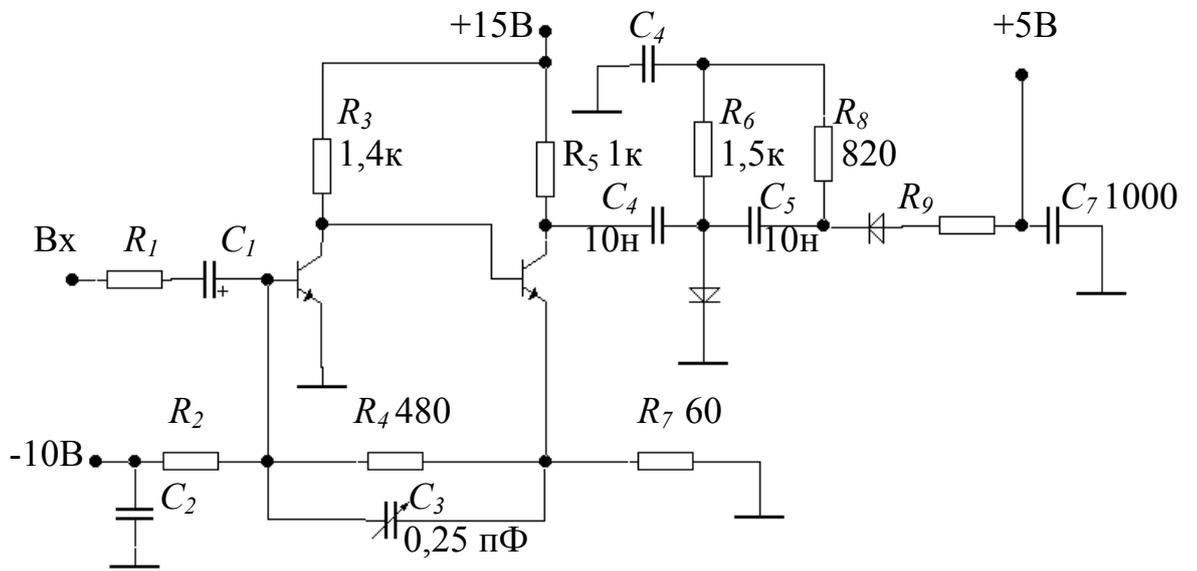


Рис. 6.36

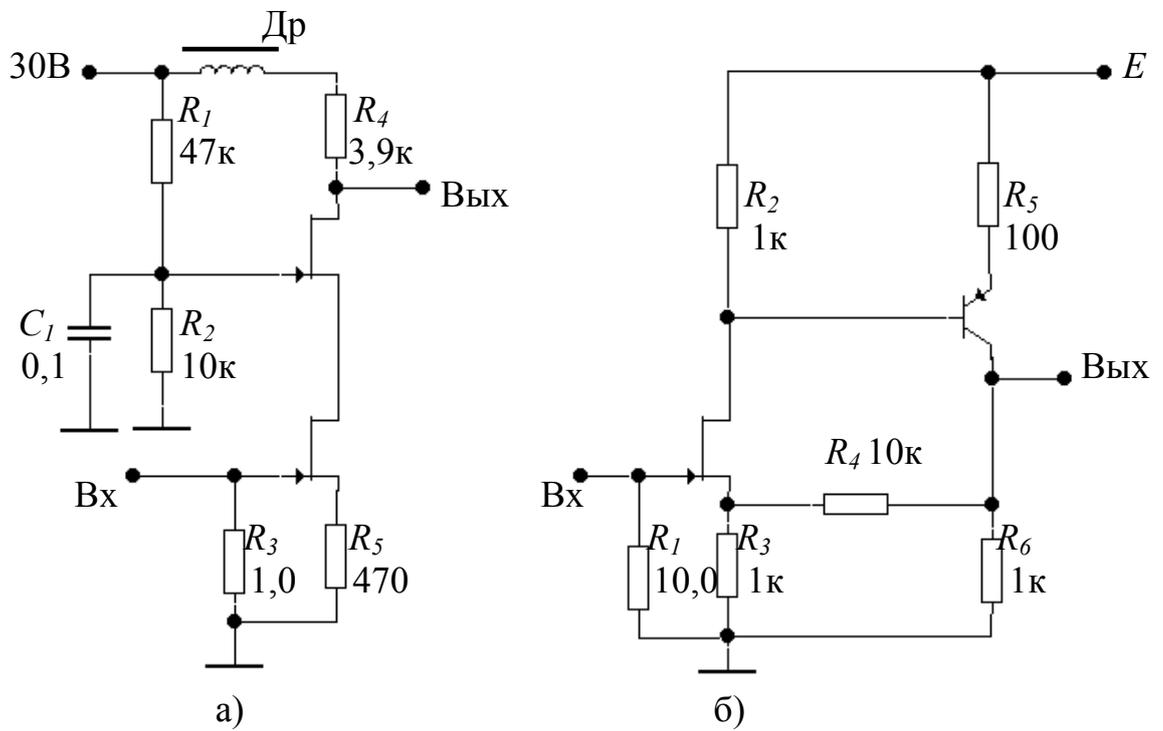


Рис. 6.37

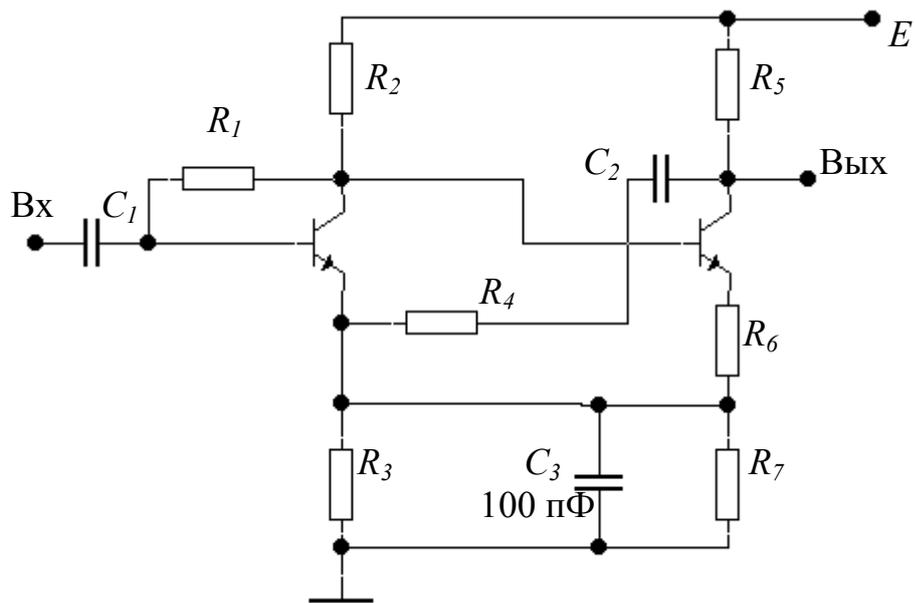


Рис. 6.38

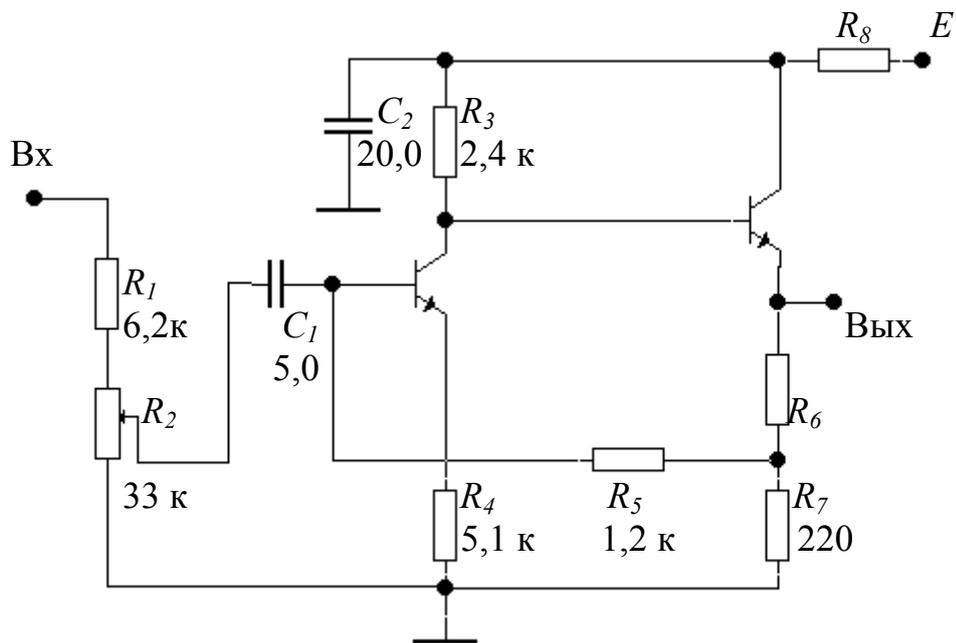


Рис. 6.39

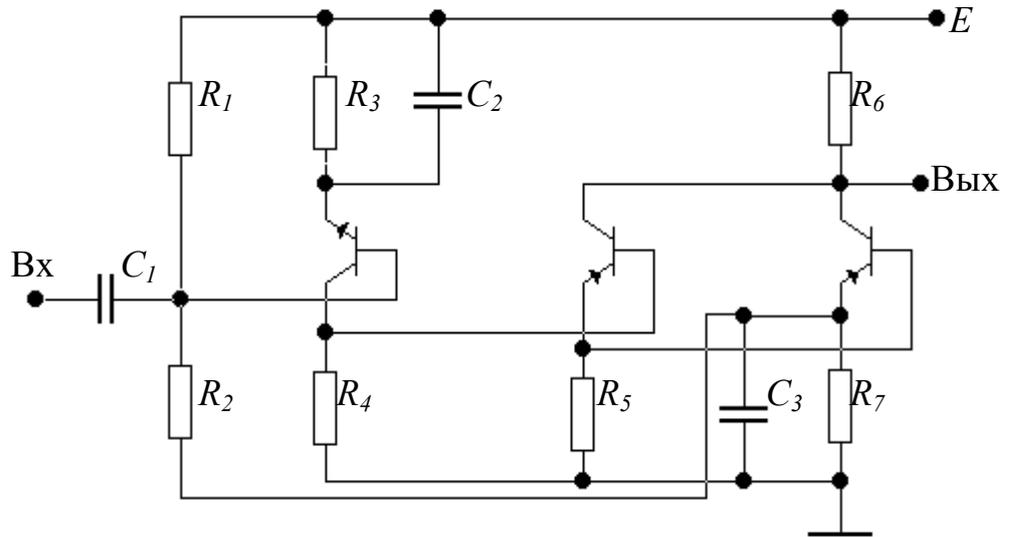


Рис. 6.40

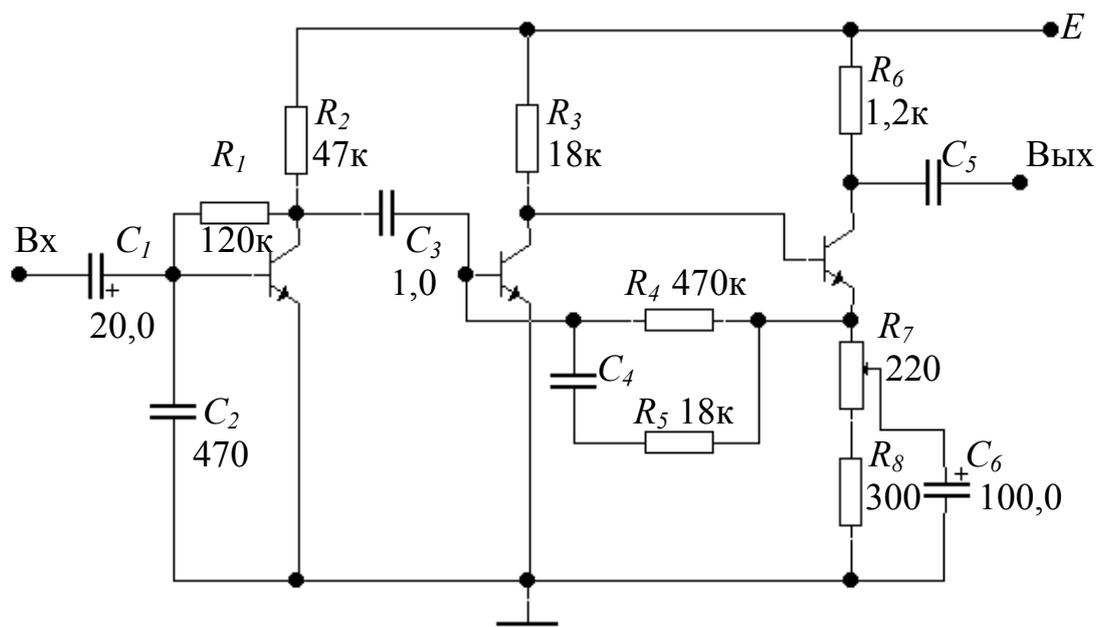


Рис. 6.41

## Глава седьмая

### Обратные связи в усилителях

Обратные связи (ОС) влияют на качественные показатели усилительных устройств. Изменяется коэффициент передачи:

$$\dot{K}_{oc} = \frac{\dot{K}}{1 + \dot{K}\dot{\beta}},$$

где  $\dot{K}_{oc}$  - коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью,  $\dot{\beta}$  - коэффициент передачи четырехполюсника обратной связи,  $1 + \dot{K}\dot{\beta}$  - глубина ОС, знак «+» соответствует отрицательной обратной связи.

Коэффициент усиления

$$K_{oc_o} = \frac{K_o}{1 + K_o\beta_o},$$

где  $K_{oc_o}, K_o$  - коэффициенты усиления усилителя с ОС и без нее,  $\beta_o$  - модуль коэффициента передачи четырехполюсника обратной связи на средних частотах.

Одновременно изменяются входное и выходное сопротивления. При последовательной ОС входное сопротивление увеличивается:

$$\dot{Z}_{вх_{oc}} = \dot{Z}_{вх}(1 + \dot{K}\dot{\beta}).$$

При параллельной ОС увеличивается входная проводимость:

$$\dot{Y}_{вх_{oc}} = \dot{Y}_{вх} + \dot{Y}_{\beta_i}(1 + \dot{K}\dot{\beta}_{xx}),$$

где  $\dot{Y}_{\beta_i}$  - выходная проводимость четырехполюсника обратной связи;

$\dot{\beta}_{xx}$  - коэффициент передачи четырехполюсника обратной связи на холостом ходу.

При обратной связи по напряжению выходное сопротивление уменьшается:

$$\dot{Z}_{вых_{oc}} = \frac{\dot{Z}_{вых}}{1 + \dot{K}_{xx}\dot{\beta}},$$

а при обратной связи по току - растет:

$$\dot{Z}_{вых_{oc}} = \dot{Z}_{вых} + \dot{Z}_{\beta}(1 + \dot{K}_{xx}\dot{\beta}).$$

Здесь  $\dot{Z}_{\beta}$  - сопротивление, с которого снимается напряжение ОС.

При эмиттерной коррекции, как и в эмиттерном повторителе, входное сопротивление

$$R_{ex_{oc}} = R_{ex}(1 + K_o\beta_o) = R_{ex}(1 + S_oR_{oc}),$$

где  $S_o$  – крутизна транзистора в рабочей точке или вычисленная в среднем за период;

$R_{oc}$  – сопротивление ОС (корректирующее сопротивление в цепи эмиттера);

$R_{ex}$  – входное сопротивление транзистора в рабочей точке или вычисленное в среднем за период.

Другой способ вычисления:

$$R_{ex_{oc}} = R_{ex} + R_{oc}(1 + H_{21_3}),$$

где  $H_{21_3}$  - коэффициент передачи тока базы.

### Задачи к главе 7

#### Задача 7.1

В результате введения обратной связи напряжение на выходе усилителя, измеренное на средних частотах, уменьшилось на 15 дБ. Определите коэффициент усиления без обратной связи, если  $\beta = 0,1$ .

#### Задача 7.2

В результате введения ОС усиление выходного каскада упало на 12 дБ. Определите  $K_o$  выходного каскада на рис. 7.1,  $U_{св}$  и  $U_{ex}$  после введения ОС, если и до введения ОС, и после введения ОС добиваются

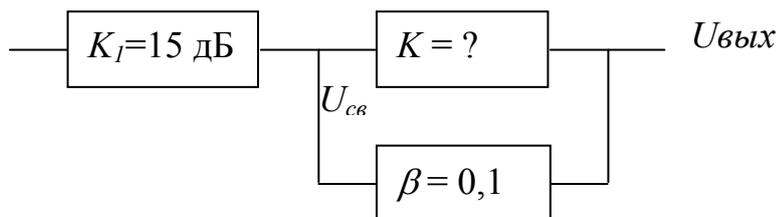


Рис. 7.1

$U_{\text{вых}} = 10 \text{ В}$ , а  $\beta = 0,1$ . Каким было входное напряжение до введения ОС? Каково соотношение  $U_{\text{св}}$  и напряжение на выходе первого каскада?

### Задача 7.3

Какими должны быть  $U_c$  без ОС,  $U_{\text{св}}$  на входе выходного каскада на рис. 7.2 и глубина ОС, вводимой для снижения коэффициента гармоник по второй гармонике с 8% до 2%? Глубина ОС на частоте второй гармоники на 20% ниже, чем на частоте первой. Каковы  $U_{\text{вх}}$  усилителя без ОС и при ее наличии? Чему равен коэффициент передачи  $\beta$  четырехполосника ОС?

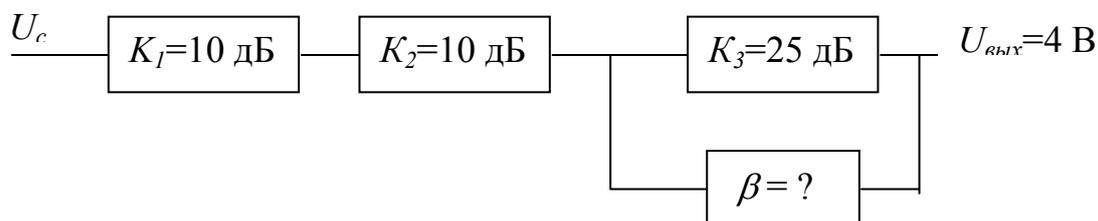


Рис. 7.2

### Задача 7.4

Определите вид ОС и амплитуду напряжения обратной связи  $U_{\text{св}}$  в схеме на рис. 7.3, если  $R_{\kappa 1} = R_{\kappa 2} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_{\delta 1} = 39 \text{ кОм}$ ,  $R_{\delta 2} = 20 \text{ кОм}$ ,  $U_{\text{вых}} = 4 \text{ В}$  (амплитудное значение). Параметры транзистора:  $g = 1 \text{ мСм}$ ,  $g_i = 10 \text{ мкСм}$ ,  $H_{21} = 100$ .

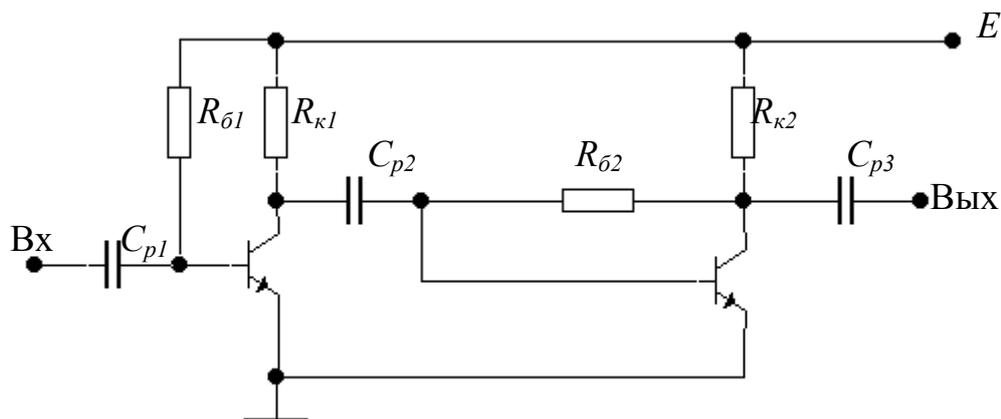


Рис. 7.3

### Задача 7.5

Найдите входные сопротивления первого и второго каскадов в схеме на рис. 7.3, сравните их и объясните, почему эти сопротивления различны, если транзисторы одинаковы и работают в одинаковых режимах. Параметры транзисторов:  $g = 1 \text{ мСм}$ ,  $g_i = 10 \text{ мкСм}$ ,  $H_{21} = 100$ .

### Задача 7.6

Определите сквозной коэффициент усиления усилителя, изображенного на рис. 7.3, если внутреннее сопротивление источника сигнала равно 200 Ом. Параметры транзистора:  $g = 1$  мСм,  $g_i = 10$  мкСм,  $H_{21} = 100$ .

### Задача 7.7

Постройте частотную характеристику усилителя, схема которого приведена на рис. 7.3, для нижних частот и определите нижнюю граничную частоту на уровне  $-3$  дБ, если  $C_{p1} = C_{p2} = C_{p3} = 1$  мкФ, а внутреннее сопротивление источника сигнала равно 200 Ом. Параметры транзистора:  $g = 1$  мСм,  $g_i = 10$  мкСм,  $H_{21} = 100$ .

### Задача 7.8

Определите  $R_k$  и  $R_{\sigma}$  ( $U_{ko} = 5$  В,  $I_{ko} = 1$  мА,  $U_{\sigma o} = 0,3$  В,  $I_{\sigma o} = 0,01$  мА),  $R_n = 1$  кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала равно 200 Ом. Определите  $C_{p1}$ , если на частоте 2 кГц  $K/K_o = -1,5$  дБ. Схема каскада показана на рис. 7.4. Параметры транзистора:  $g = 1$  мСм,  $g_i = 10$  мкСм,  $H_{21} = 100$ .

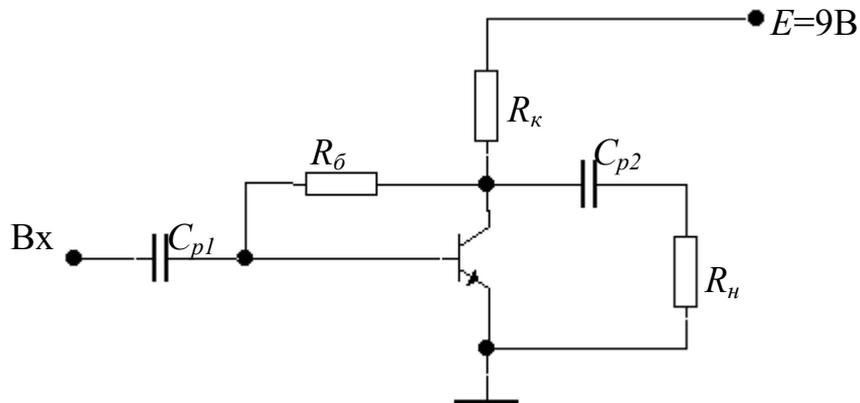


Рис. 7.4

### Задача 7.9

Определите  $R_k$  и  $R_{\sigma}$  в схеме на рис. 7.4 ( $U_{ko} = 5$  В,  $I_{ko} = 1$  мА,  $U_{\sigma o} = 0,3$  В,  $I_{\sigma o} = 0,01$  мА),  $R_n = 1$  кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала равно 200 Ом. Каким будет спад плоской вершины прямоугольного импульса длительностью 50 мкс, создаваемый разделительными емкостями  $C_{p1} = C_{p2} = 10$  мкФ? Параметры транзистора:  $g = 1$  мСм,  $g_i = 10$  мкСм,  $H_{21} = 100$ .

### Задача 7.10

В схеме, изображенной на рис. 7.4, определите  $R_k$  и  $R_{\bar{o}}$  ( $U_{ko} = 5\text{В}$ ,  $I_{ko} = 1\text{ мА}$ ,  $U_{\bar{o}o} = 0,3\text{ В}$ ,  $I_{\bar{o}o} = 0,01\text{ мА}$ ),  $R_n = 1\text{ кОм}$ . Какой должна быть емкость разделительного конденсатора  $C_{p2}$ , если создаваемые им искажения на частоте 150 Гц не превышают 2 дБ? Параметры транзистора:  $g = 1\text{ мСм}$ ,  $g_i = 10\text{ мкСм}$ ,  $H_{21} = 100$ .

### Задача 7.11

В схеме, изображенной на рис. 7.4, определите  $R_k$  и  $R_{\bar{o}}$  ( $U_{ko} = 5\text{В}$ ,  $I_{ko} = 1\text{ мА}$ ,  $U_{\bar{o}o} = 0,3\text{ В}$ ,  $I_{\bar{o}o} = 0,01\text{ мА}$ ),  $R_n = R_c = 1\text{ кОм}$ . Какими будут спады, создаваемые разделительными емкостями  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$ , и суммарный спад при длительности импульса 30 мкс? Параметры транзистора:  $g = 1\text{ мСм}$ ,  $g_i = 10\text{ мкСм}$ ,  $H_{21} = 100$ .

### Задача 7.12

В схеме, изображенной на рис. 7.4, определите  $R_k$  и  $R_{\bar{o}}$  ( $U_{ko} = 5\text{В}$ ,  $I_{ko} = 1\text{ мА}$ ,  $U_{\bar{o}o} = 0,3\text{ В}$ ,  $I_{\bar{o}o} = 0,01\text{ мА}$ ),  $R_n = 1\text{ кОм}$ ,  $R_c = 200\text{ Ом}$ . Каким будет время нарастания переходной характеристики входной цепи и суммарное время нарастания переходной характеристики каскада? Параметры транзистора:  $g = 1\text{ мСм}$ ,  $H_{21} = 100$ ,  $C_{\bar{o}k} = 10\text{ пФ}$  при  $U_{k\bar{o}} = 5\text{ В}$ ,  $f_T = 350\text{ МГц}$ ,  $r_{\bar{o}} = 15\text{ Ом}$ .

### Задача 7.13

Как изменится время нарастания переходной характеристики входной цепи в задаче 7.12, если  $R_n$  уменьшить в два раза?

### Задача 7.14

В схеме, изображенной на рис. 7.4, определите  $R_k$  и  $R_{\bar{o}}$  ( $U_{ko} = 5\text{В}$ ,  $I_{ko} = 1\text{ мА}$ ,  $U_{\bar{o}o} = 0,3\text{ В}$ ,  $I_{\bar{o}o} = 0,01\text{ мА}$ ),  $R_n = 1\text{ кОм}$ ,  $R_c = 200\text{ Ом}$ . Как изменится сквозной коэффициент усиления каскада, если  $R_n$  увеличить до 3 кОм? Укажите причины увеличения и уменьшения сквозного коэффициента усиления. Параметры транзистора:  $g = 1\text{ мСм}$ ,  $g_i = 10\text{ мкСм}$ ,  $H_{21} = 100$ .

### Задача 7.15

Определите модуль нормированного коэффициента передачи каскада, изображенного на рис. 7.5, на частоте 1 кГц. Параметры транзистора и элементов схемы:  $g = 1\text{ мСм}$ ,  $g_i = 10\text{ мкСм}$ ,  $H_{21} = 100$ ,  $R_c = 200\text{ Ом}$ ,  $R_{\bar{o}1} = 3,9\text{ кОм}$ ,  $R_{\bar{o}2} = 5,6\text{ кОм}$ ,  $R_k = 1\text{ кОм}$ ,  $R_{\text{эк}} = 20\text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1\text{ кОм}$  и  $R_n = 1\text{ кОм}$ ,  $C_{p1} = C_{p2} = 1\text{ мкФ}$ ,  $C_3 = 50\text{ мкФ}$ .

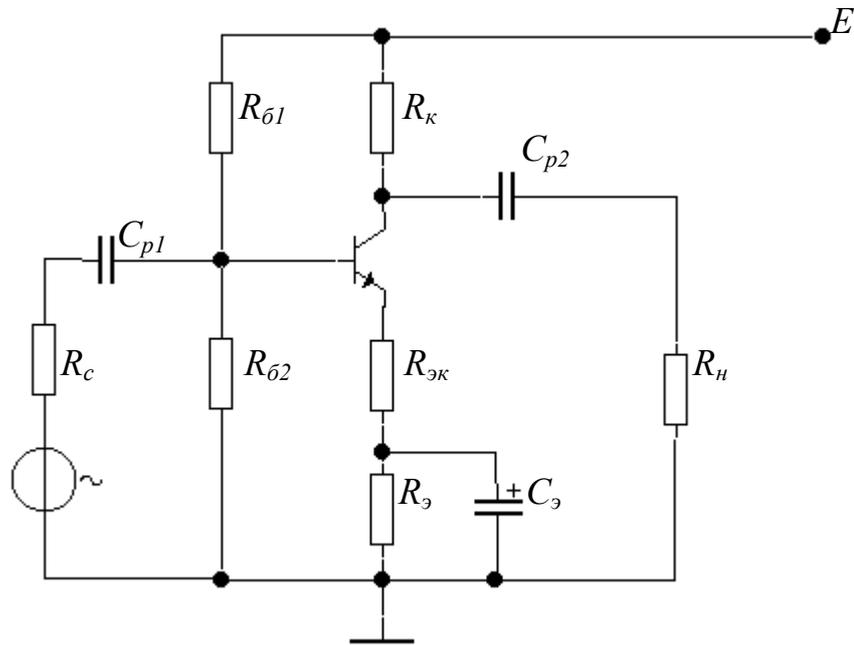


Рис. 7.5

#### Задача 7.16

Для схемы на рис. 7.5 (параметры транзистора и элементов схемы такие же, как в задаче 7.15) определите сквозной коэффициент усиления. Как изменится этот коэффициент усиления, если

- а)  $R_H = 3 \text{ кОм}$ ,
- б)  $R_{\delta 3} = 30 \text{ Ом}$ ?

Объясните причины изменения сквозного коэффициента усиления в случаях а) и б).

#### Задача 7.17

Для схемы на рис. 7.5 (параметры транзистора и элементов схемы такие же, как в задаче 7.15) определите спад плоской вершины импульса длительностью 50 мкс, создаваемый емкостью  $C_{\delta 3}$ . Как изменится этот спад, если  $H_{21}$  транзистора увеличится до 150? Объясните причину изменения спада.

#### Задача 7.18

Для схемы на рис. 7.5 (параметры транзистора и элементов схемы такие же, как в задаче 7.15) определите спад плоской вершины импульса длительностью 50 мкс, создаваемый совместно конденсаторами  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$ .

Как изменится этот спад, если  $H_{21}$  транзистора увеличится до 150? Объясните причину изменения спада.

#### Задача 7.19

Для схемы на рис. 7.5 определите коэффициент передачи входной цепи на средних частотах и модуль относительного коэффициента передачи входной цепи на частоте 2 МГц. Параметры транзистора и элементов схемы:  $g = 1$  мСм,  $g_i = 10$  мкСм,  $H_{21} = 100$ ,  $C_{бк} = 10$  пФ при  $U_{кб} = 5$  В,  $f_T = 350$  МГц,  $r_b = 15$  Ом,  $R_c = 200$  Ом,  $R_{б1} = 3,9$  кОм,  $R_{б2} = 5,6$  кОм,  $R_k = 1$  кОм,  $R_{эк} = 20$  Ом,  $R_3 = 1$  кОм и  $R_n = 1$  кОм,  $C_{p1} = C_{p2} = 1$  мкФ,  $C_3 = 50$  мкФ.

#### Задача 7.20

Для схемы на рис. 7.5 определите время нарастания входной и выходной цепей. Параметры транзистора и элементов схемы:  $g = 1$  мСм,  $g_i = 10$  мкСм,  $H_{21} = 100$ ,  $C_{бк} = 10$  пФ при  $U_{кб} = 5$  В,  $f_T = 350$  МГц,  $r_b = 15$  Ом,  $R_c = 200$  Ом,  $R_{б1} = 3,9$  кОм,  $R_{б2} = 5,6$  кОм,  $R_k = 1$  кОм,  $R_{эк} = 20$  Ом,  $R_3 = 1$  кОм и  $R_n = 1$  кОм,  $C_{p1} = C_{p2} = 1$  мкФ,  $C_3 = 50$  мкФ.

#### Задача 7.21

Проиллюстрируйте эпюрами напряжений процесс появления искажений прямоугольных импульсов цепью  $R_3C_3$  (рис. 7.5). Как изменятся эти искажения при изменении (допустим, на (15-20)%) величины сопротивления или емкости (режим транзистора в обоих случаях не меняется)? Как изменятся эти искажения, если отключить  $C_3$ ?

#### Задача 7.22

Каскад собран на биполярном транзисторе ( $g = 1$  мСм,  $g_i = 10$  мкСм,  $H_{21} = 100$ ,  $R_{б1} = 3,9$  кОм,  $R_{б2} = 5,6$  кОм,  $R_3 = 1$  кОм). Как следует построить схему каскада, чтобы его входное сопротивление было не менее 1,5 кОм? Определите коэффициент усиления такого каскада, если  $R_k = R_n = 300$  Ом.

#### Задача 7.23

Реостатный каскад с фильтром в цепи стока собран на полевом транзисторе ( $S = 5$  мА/В,  $R_{ст} = 1$  кОм,  $R_n = 10$  кОм). Как изменится сквозной коэффициент усиления этого каскада, если отключить емкость фильтра, при условии, что сопротивление в цепи затвора, равное 10 кОм, подключено между  $R_{ст}$  и  $R_f$ ? Внутреннее сопротивление источника сигнала равно 510 Ом.

### Задача 7.24

Как изменится входное сопротивление каскада с фильтром в цепи стока при отключении емкости фильтра? Сопротивление между затвором и «землей» 20 кОм, сопротивление между затвором и точкой соединения  $R_{cm}$  и  $R_{\phi}$  10 кОм.

### Задача 7.25

Как изменится  $\tau_e$  и  $\tau_n$  входной цепи каскада с фильтром в цепи стока при отключении емкости фильтра? Одно из сопротивлений делителя в цепи затвора подключено между затвором и «землей», второе – между затвором и точкой соединения  $R_{cm}$  и  $R_{\phi}$ . Решите задачу в общем виде.

### Задача 7.26

Как изменится время нарастания выходной цепи каскада с фильтром в цепи стока при отключении емкости фильтра? Одно из сопротивлений делителя в цепи затвора подключено между затвором и «землей», второе – между затвором и точкой соединения  $R_{cm}$  и  $R_{\phi}$ . Решите задачу в общем виде.

### Задача 7.27

Как изменится коэффициент усиления каскада с фильтром в цепи коллектора при отключении емкости фильтра? Одно из сопротивлений делителя в цепи затвора подключено между затвором и «землей», второе – между затвором и точкой соединения  $R_k$  и  $R_{\phi}$ . Решите задачу в общем виде.

### Задача 7.28

Определите коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление эмиттерного повторителя на транзисторе КТ324А ( $I_{ko} = 5\text{мА}$ ). Сопротивление в цепи эмиттера 1 кОм. Нагрузкой служит входное сопротивление реостатного каскада на таком же транзисторе, работающем в том же режиме, сопротивление делителя в цепи базы реостатного каскада  $R_{\delta 1} = 3,9\text{ кОм}$ ,  $R_{\delta 2} = 5,6\text{ кОм}$ . Внутреннее сопротивление источника сигнала 500 Ом.

### Задача 7.29

Определите время нарастания входной и выходной цепей эмиттерного повторителя на транзисторе КТ324А ( $I_{ko} = 5\text{мА}$ ). Сопротивление в цепи эмиттера 1 кОм. Нагрузкой служит входное сопротивление реостатного каскада на таком же транзисторе, работающем в том же режиме, сопротивления делителя в цепи базы реостатного каскада  $R_{\delta 1} = 3,9\text{ кОм}$ ,

$R_{\delta 2} = 5,6 \text{ кОм}$ , коэффициент усиления реостатного каскада 30. Внутреннее сопротивление источника сигнала 500 Ом.

### Задача 7.30

Определите входное сопротивление переменному току изображенного на рис. 7.6 повторителя при крутизне транзистора 5 мА/В.  $R_1 = 20 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 510 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1 \text{ кОм}$ .

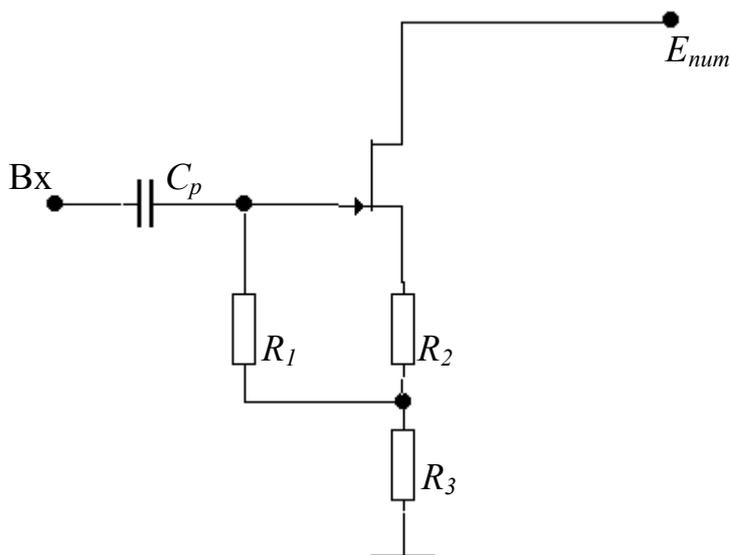


Рис. 7.6

### Задача 7.31

Амплитудная характеристика четырехполюсника приведена на рис. 7.7. Постройте амплитудную характеристику этого же четырехполюсника,

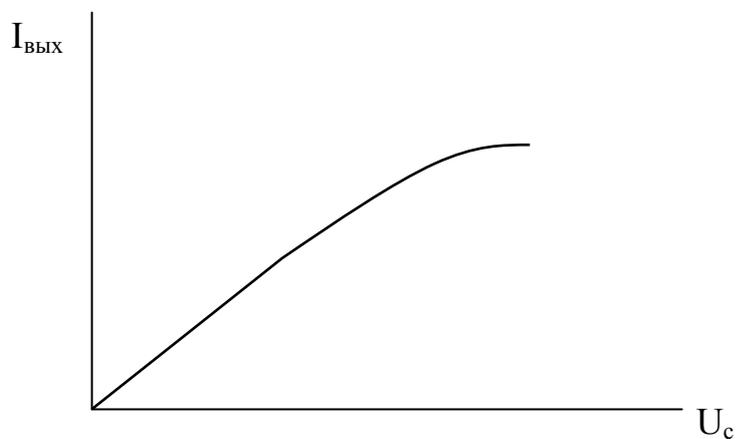


Рис. 7.7

охваченного последовательной отрицательной ОС с коэффициентом передачи четырехполосника обратной связи  $\beta = 0,05$  (при выполнении расчетов выберите сами масштаб по обеим осям).

Определите максимальное входное напряжение при сжатии коэффициента усиления на 1 дБ при наличии обратной связи и без нее. Предварительно оцените зависимость коэффициента усиления от амплитуды входного сигнала.

### Задача 7.32

Выберите сопротивление обратной связи  $R_{oc}$  в схеме на рис. 7.8 таким образом, чтобы общий коэффициент усиления не превышал 100.

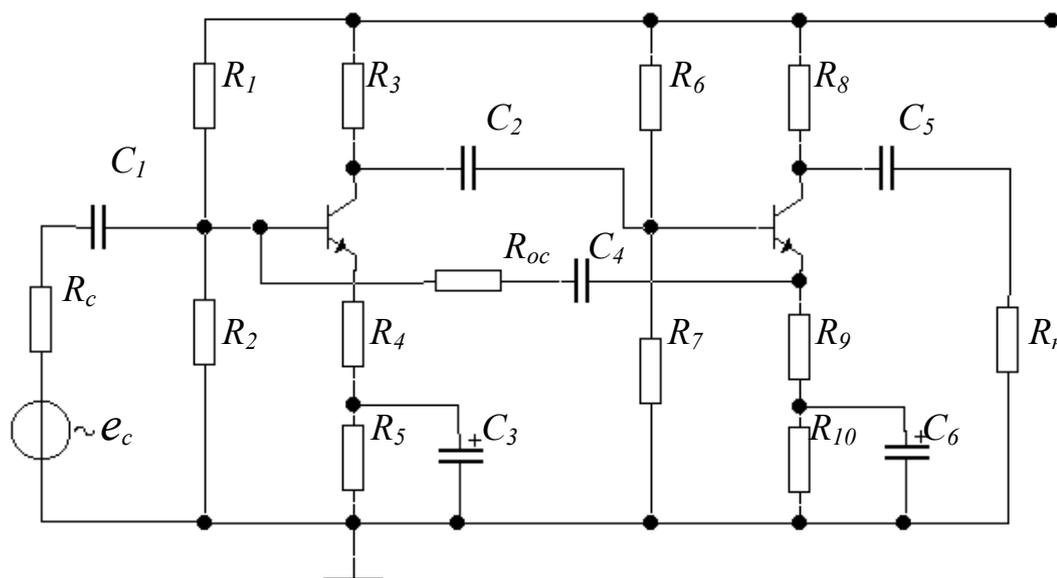


Рис.7.8

$$R_c = 200 \text{ Ом}, R_1 = 27 \text{ кОм}, R_2 = 13 \text{ кОм}, R_3 = R_8 = 1 \text{ кОм}, \\ R_4 = R_9 = 20 \text{ Ом}, R_5 = 1 \text{ кОм}, R_6 = 27 \text{ кОм}, R_7 = 13 \text{ кОм}, R_{10} = 1 \text{ кОм}, \\ R_n = 2 \text{ кОм}, C_1 = C_2 = C_4 = C_5 = 10 \text{ мкФ}, C_3 = C_6 = 100 \text{ мкФ}, \\ g_1 = g_2 = g = 1 \text{ мСм}, H_{21} = 100$$

### Задача 7.33

Выберите сопротивление обратной связи  $R_{oc}$  в схеме на рис. 7.8 таким образом, чтобы входное сопротивление усилителя на средних частотах было равно 50 Ом. Определите, каким при этом будет коэффициент усиления усилителя и его сквозной коэффициент усиления.

### Задача 7.34

Сравните входные сопротивления каскадов на рис. 7.8 при подключенном и отключенном источнике сигнала, если  $R_{oc} = 1$  кОм.

### Задача 7.35

Определите и сравните спады плоской вершины прямоугольного импульса длительностью 50 мкс., создаваемые разделительными конденсаторами в схеме на рис. 7.8, если  $R_{oc} = 1$  кОм.

### Задача 7.36

Определите искажения, создаваемые конденсаторами  $C_5$  и  $C_6$  в схеме на рис. 7.8, если длительность прямоугольного импульса 50 мкс и  $R_{oc} = 1$  кОм.

### Задача 7.37

Выберите сопротивление обратной связи  $R_{oc}$  в схеме на рис. 7.9 таким образом, чтобы общий коэффициент усиления не превышал 100.

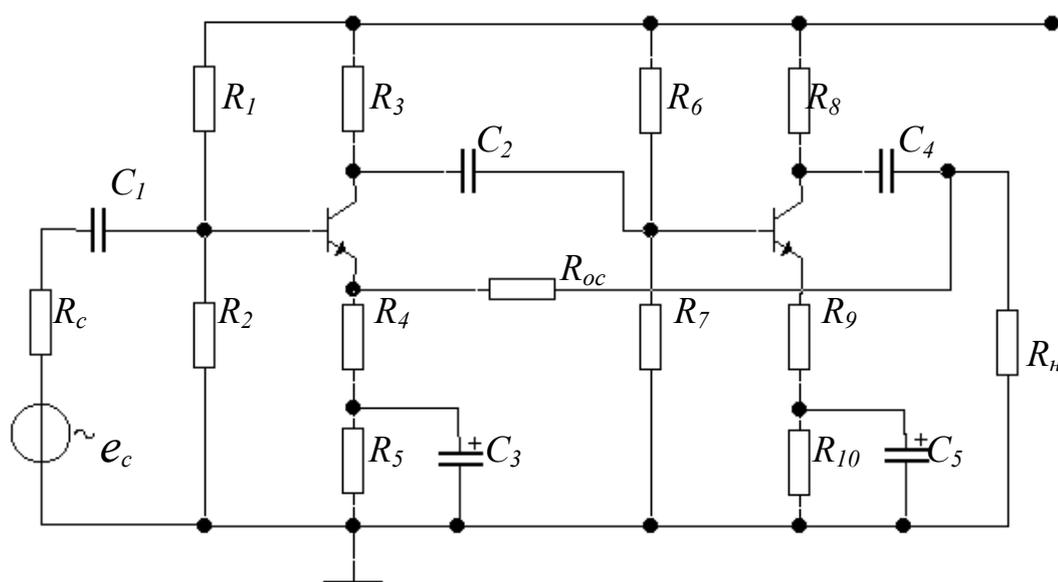


Рис. 7.9

$R_c = 200$  Ом,  $R_1 = 27$  кОм,  $R_2 = 13$  кОм,  $R_3 = 1$  кОм,  $R_4 = 20$  Ом,  
 $R_5 = 1$  кОм,  $R_6 = 27$  кОм,  $R_7 = 13$  кОм,  $R_8 = 1$  кОм,  $R_9 = 20$  Ом,  $R_{10} = 1$  кОм,  
 $R_n = 2$  кОм,  $C_1 = C_2 = C_4 = 10$  мкФ,  $C_3 = C_5 = 100$  мкФ,  $g_1 = g_2 = g = 1$  мСм,  
 $H_{21} = 100$

### Задача 7.38

Выберите сопротивление обратной связи  $R_{oc}$  в схеме на рис. 7.9 таким образом, чтобы входное сопротивление транзистора первого каскада было в два раза больше, чем второго. Определите, каким при этом будет коэффициент усиления усилителя и его сквозной коэффициент усиления.

### Задача 7.39

Определите и сравните спады плоской вершины прямоугольного импульса длительностью 50 мкс., создаваемые разделительными конденсаторами в схеме на рис. 7.9, если  $R_{oc} = 1$  кОм.

### Задача 7.40

Определите искажения, создаваемые конденсаторами  $C_5$  и  $C_6$  в схеме на рис. 7.9, если длительность прямоугольного импульса 50 мкс и  $R_{oc} = 1$  кОм.

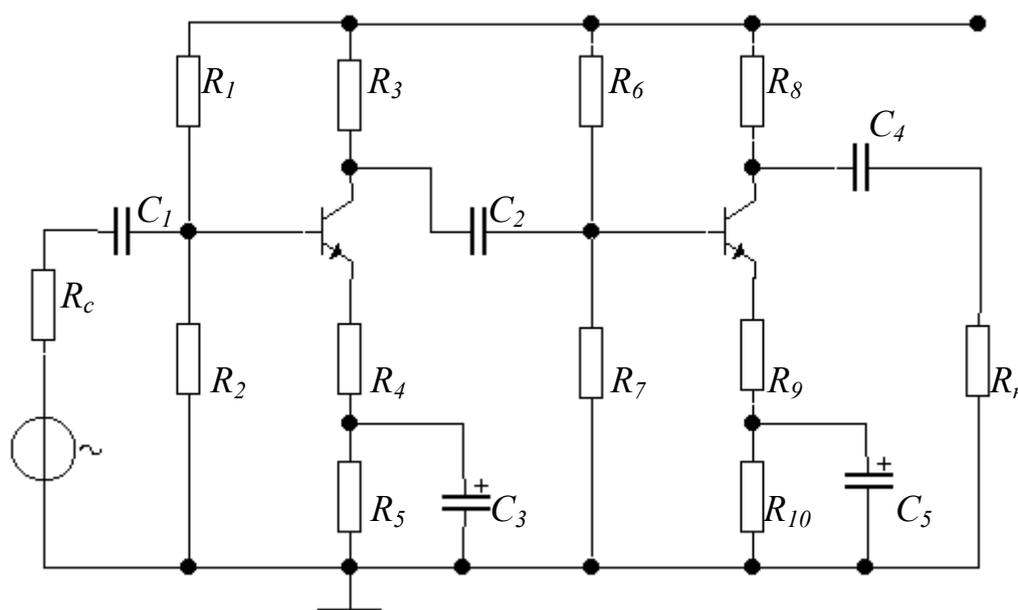


Рис. 7.10

$R_c = 200$  Ом,  $R_1 = R_6 = 27$  кОм,  $R_2 = R_7 = 13$  кОм,  $R_3 = R_5 = R_8 = R_{10} = 1$  кОм,  $R_9 = 20$  Ом,  $R_H = 2$  кОм,  $C_1 = C_2 = C_4 = 10$  мкФ,  $C_3 = C_5 = 100$  мкФ,  $g_1 = g_2 = g = 1$  мСм,  $H_{21} = 100$

### Задача 7.41

В схеме на рис. 7.10 обеспечьте входное сопротивление не менее 3 ком двумя способами:

а) используя местную обратную связь;

б) используя общую обратную связь.

Сравните коэффициенты усиления в обоих случаях – в каком из них необходимое входное сопротивление достигнуто при большем усилении?

#### Задача 7.42

В схеме на рис. 7.10 обеспечьте коэффициент усиления, равный 200, двумя способами:

а) используя местную обратную связь в первом каскаде;

б) используя общую обратную связь при  $R_4 = R_9 = 20 \text{ Ом}$ .

Сравните сквозные коэффициенты усиления в обоих случаях – в каком случае сквозной коэффициент усиления больше и почему?

Глава восьмая  
Исправление ошибок в схемах

Задачи к главе 8

В схемах на рис. 8.1-8.24 найдите допущенные ошибки (ошибки включения и ошибки в номиналах элементов), объясните, к каким нарушениям нормальной работы могут привести эти ошибки, укажите пути их исправления.

В следующих ниже схемах приняты обозначения:

- если рядом со значением сопротивления или емкости отсутствует буква, это означает омы (для сопротивлений) и пикофарады (для емкостей);
- буква «к» возле сопротивления обозначает килоомы;
- буква «М» возле сопротивления обозначает мегаомы;
- буква «н» для емкости обозначает нанофарады;
- запятая при описании емкости обозначает микрофарады;
- входная проводимость биполярных транзисторов порядка (0,5-1) мСм;
- коэффициент передачи тока базы порядка 100.

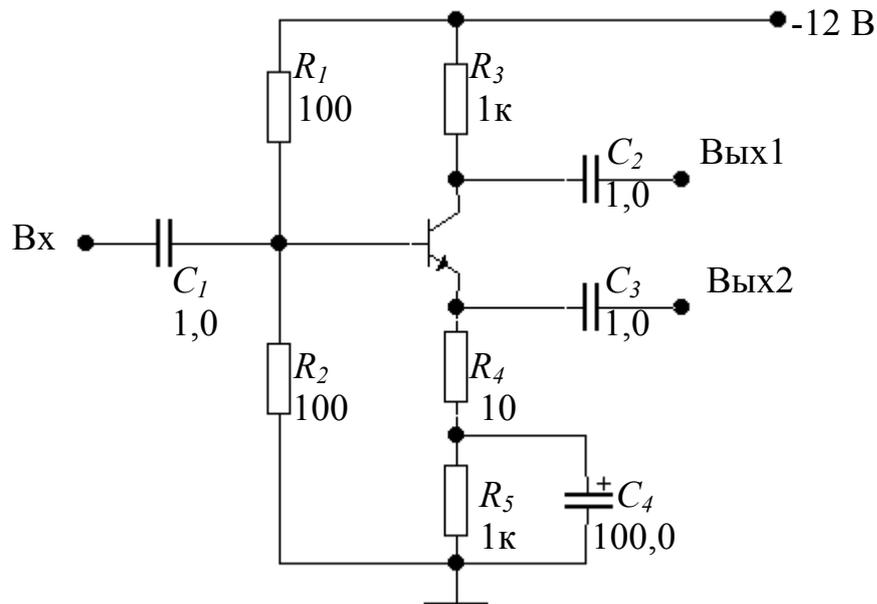


Рис.8.1

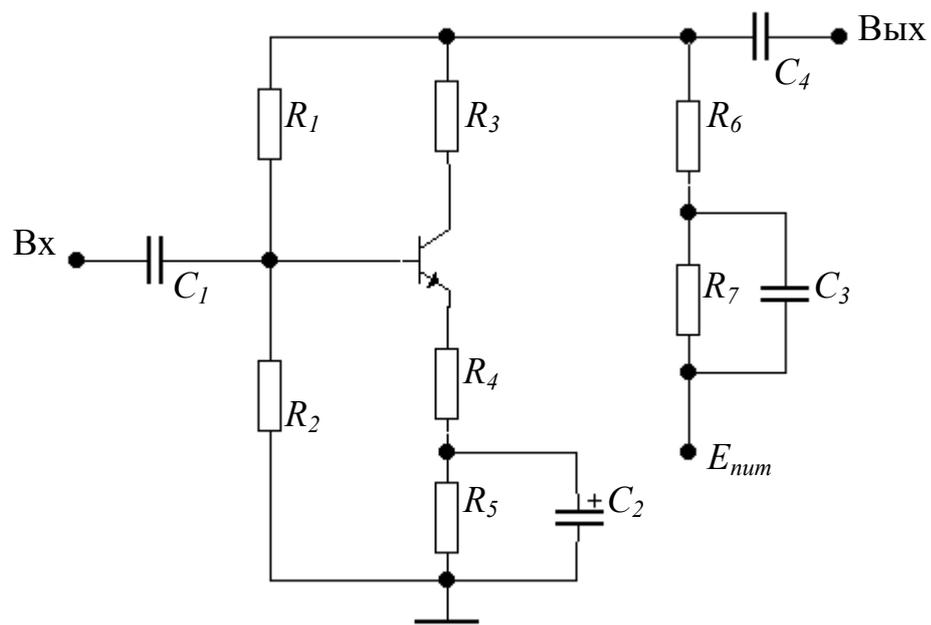


Рис. 8.2

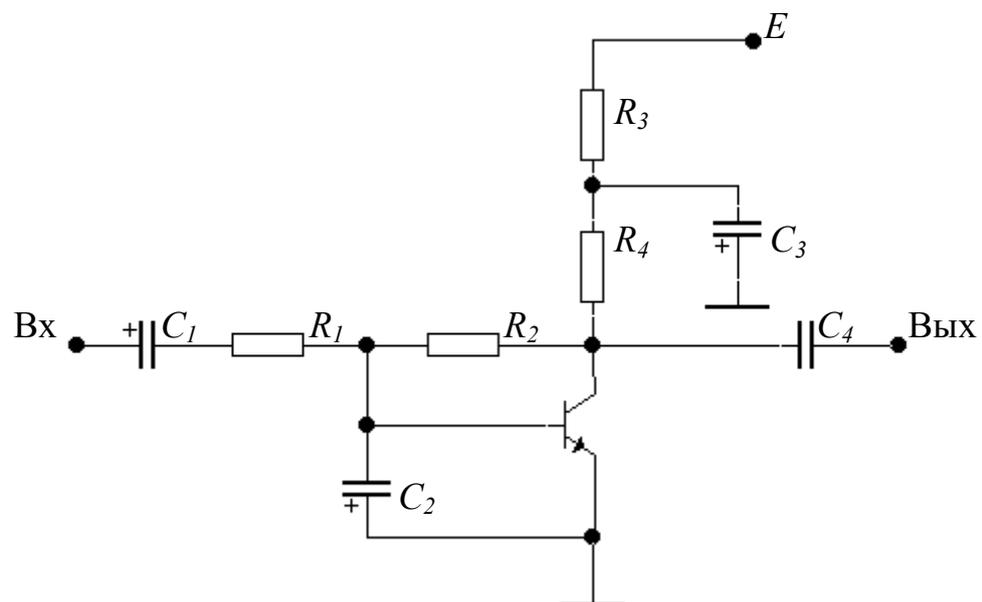


Рис. 8.3

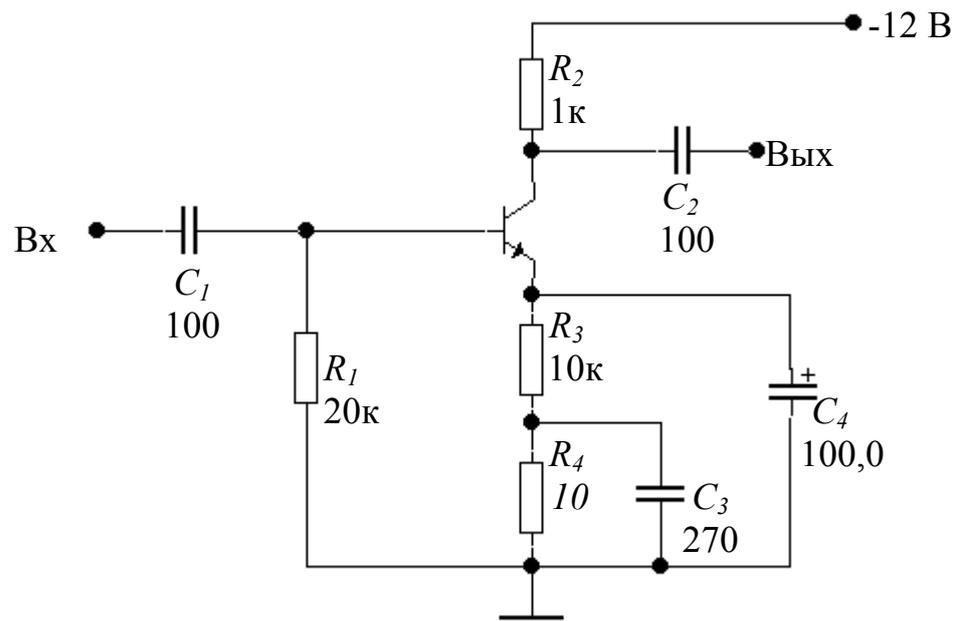


Рис. 8.4

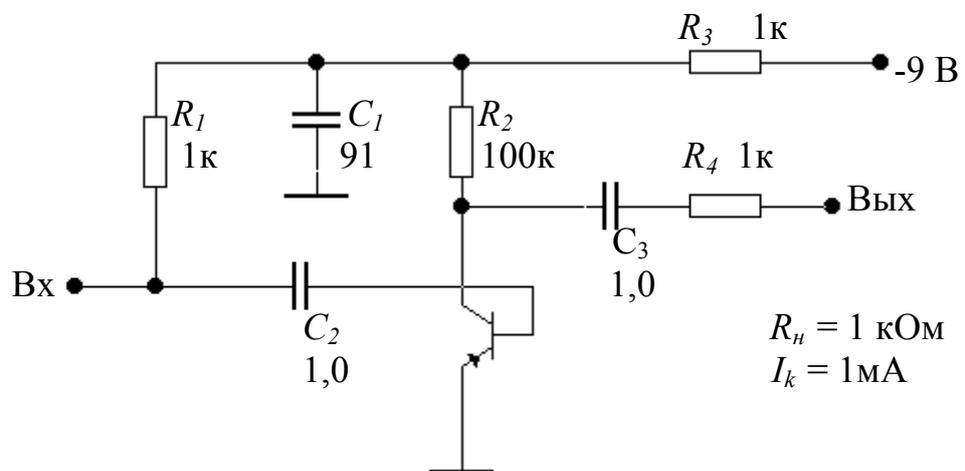


Рис. 8.5

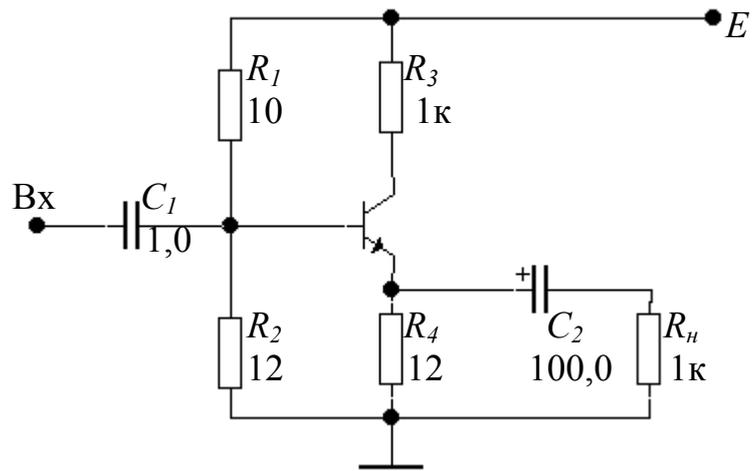


Рис. 8.6

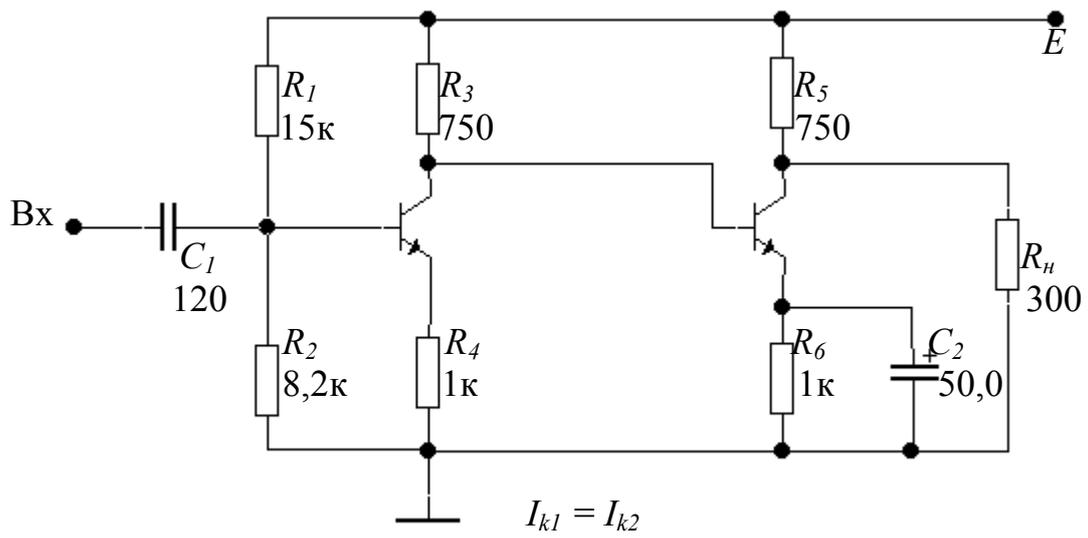


Рис. 8.7

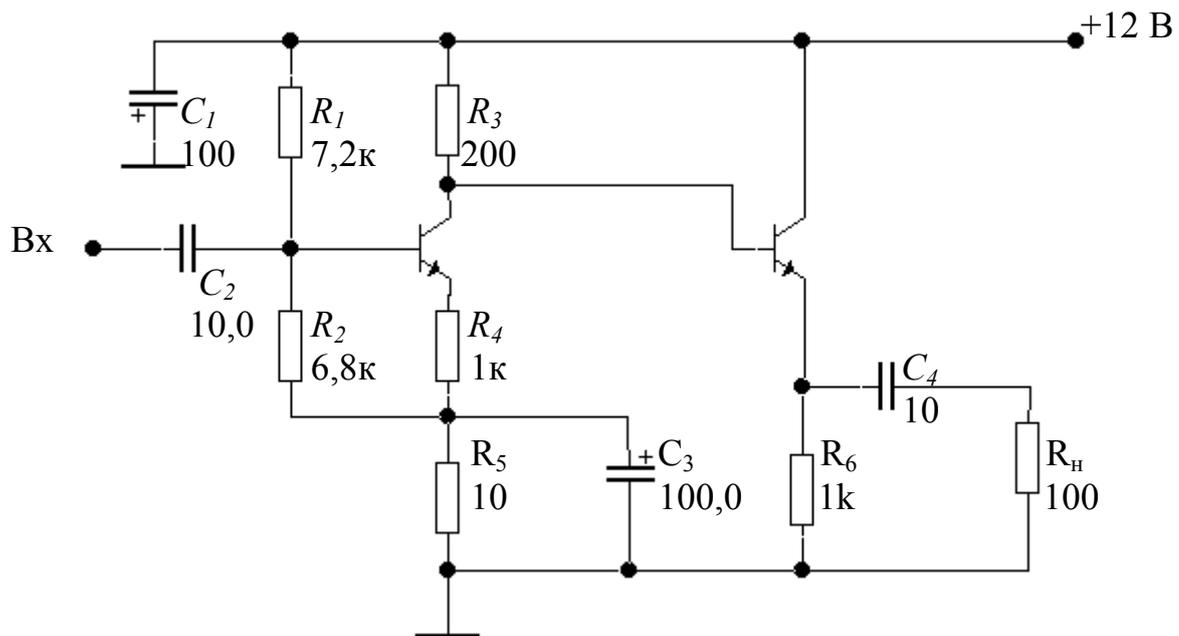


Рис. 8.8

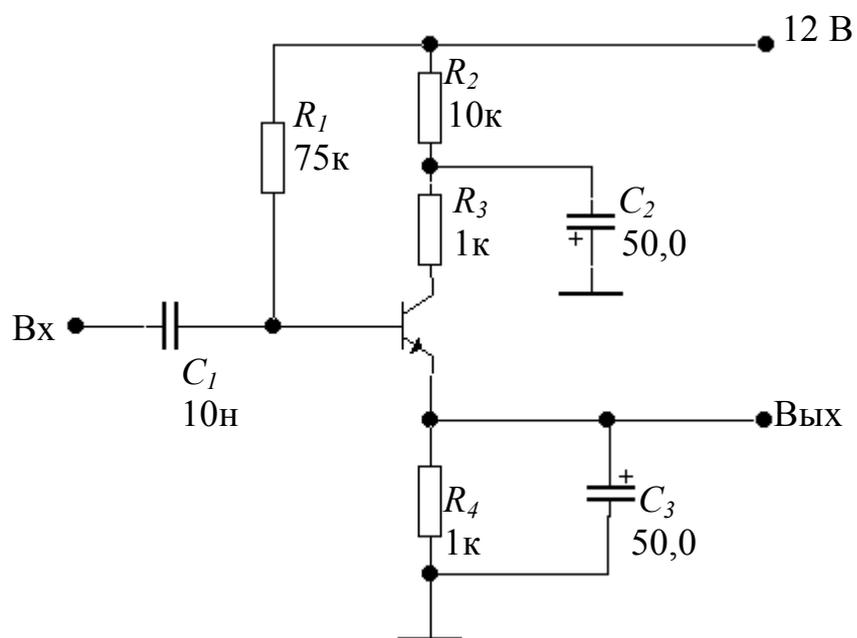


Рис. 8.9

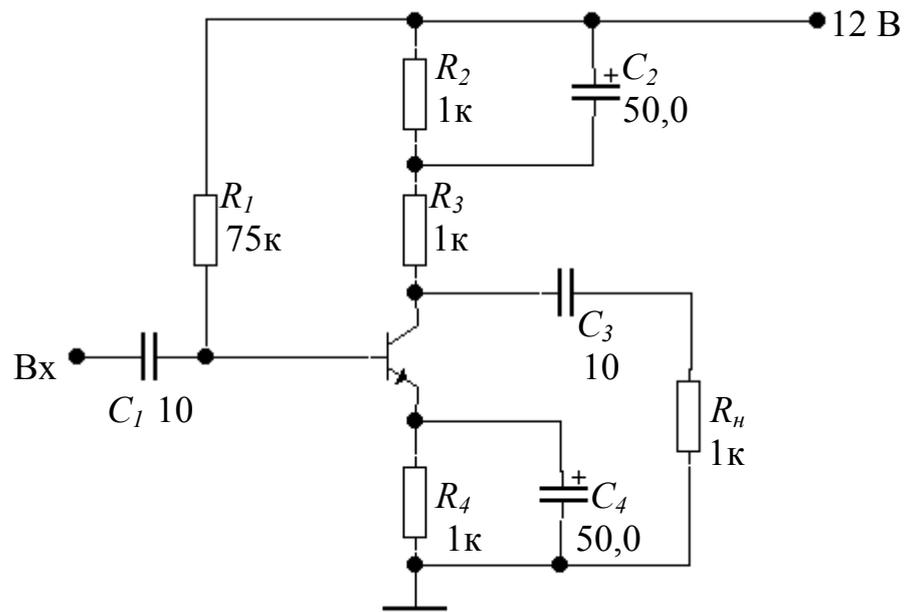


Рис. 8.10

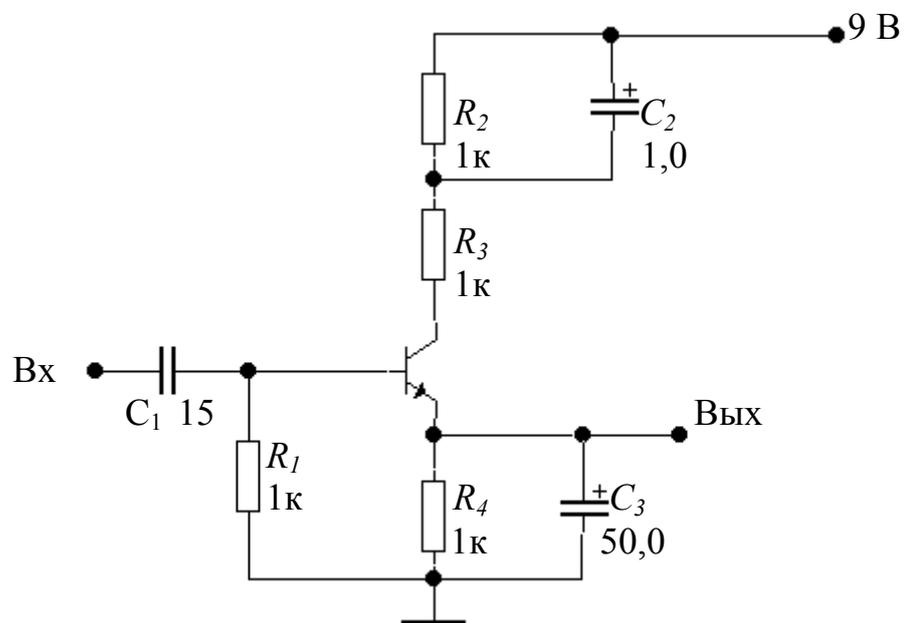


Рис. 8.11

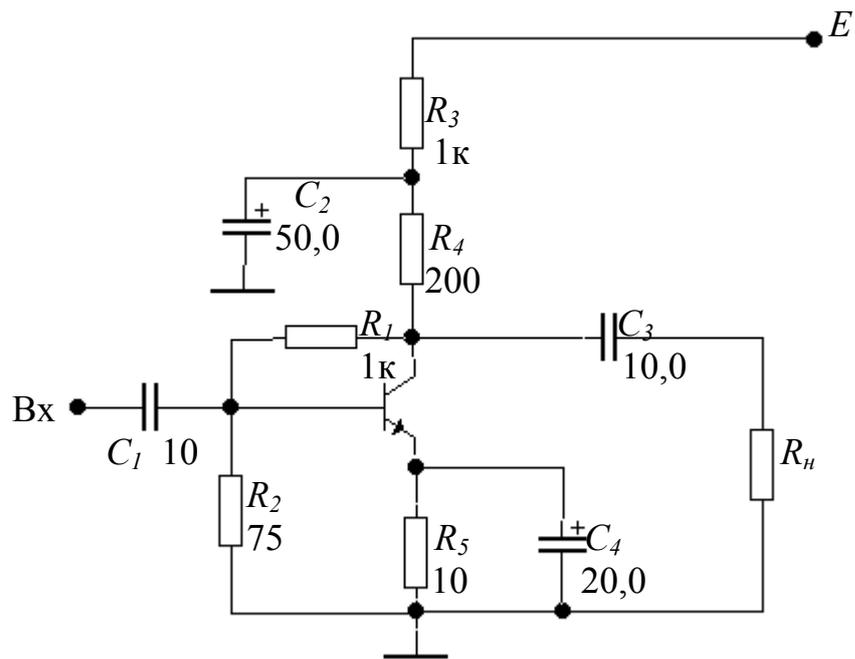


Рис. 8.12

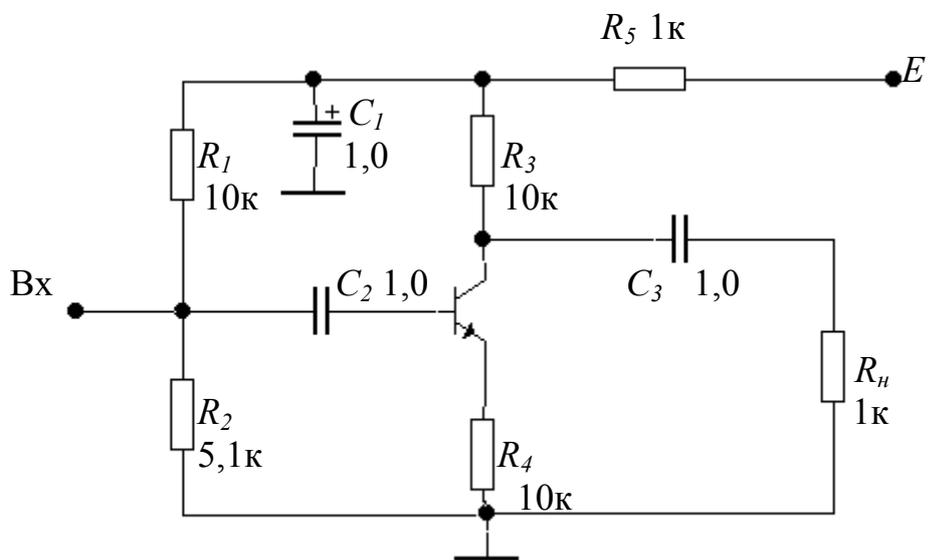


Рис. 8.13

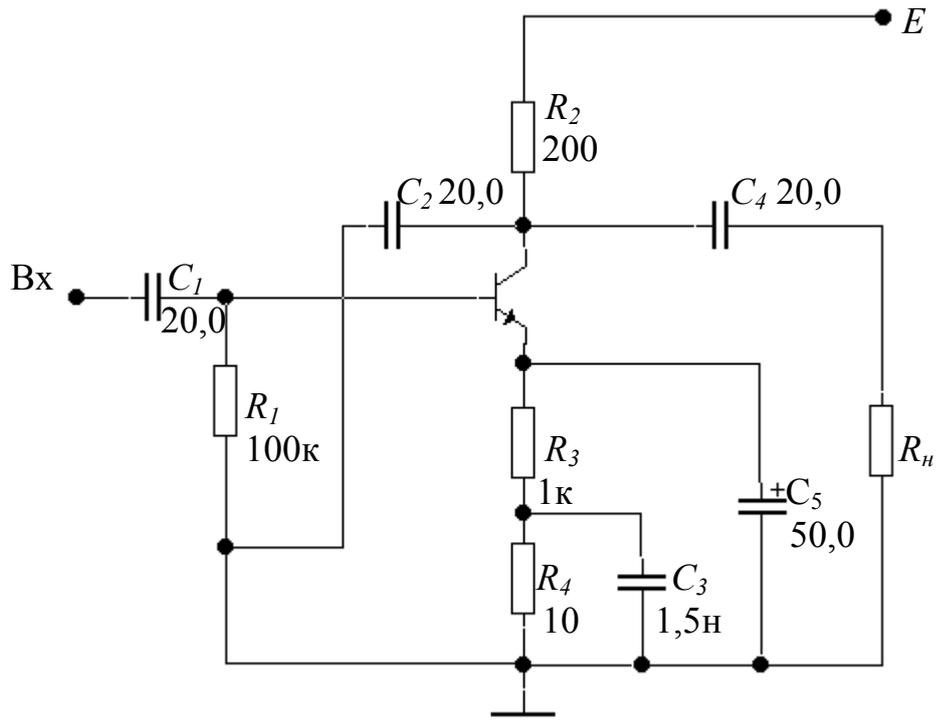


Рис. 8.14

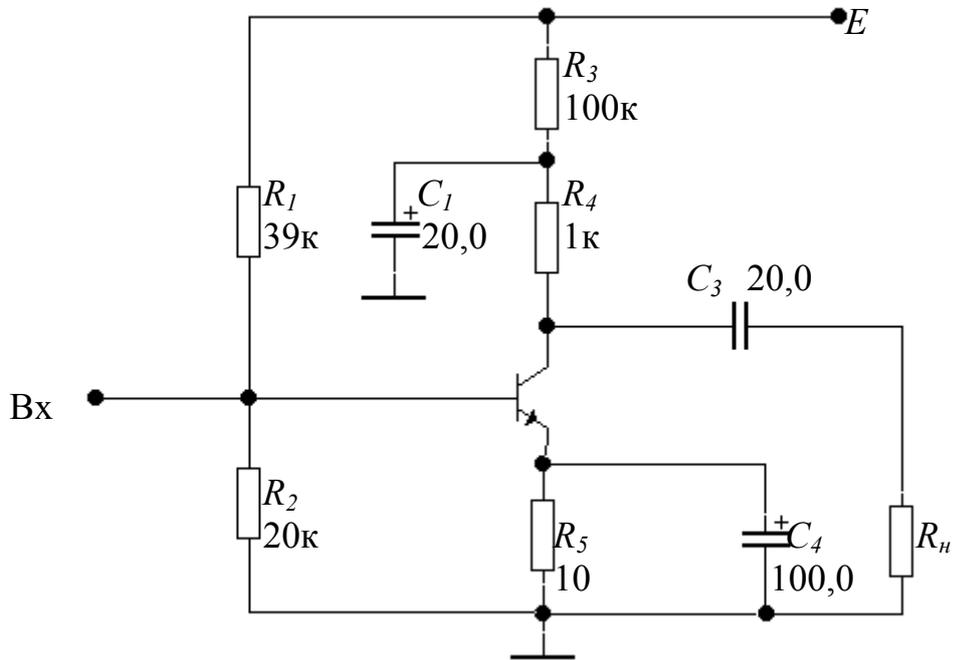


Рис. 8.15

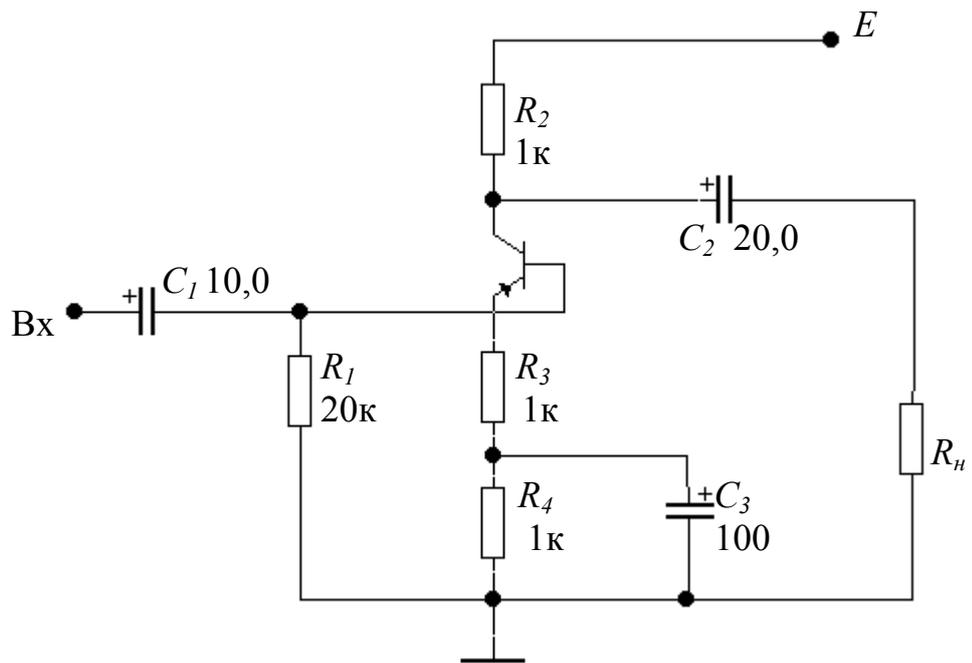


Рис. 8.16

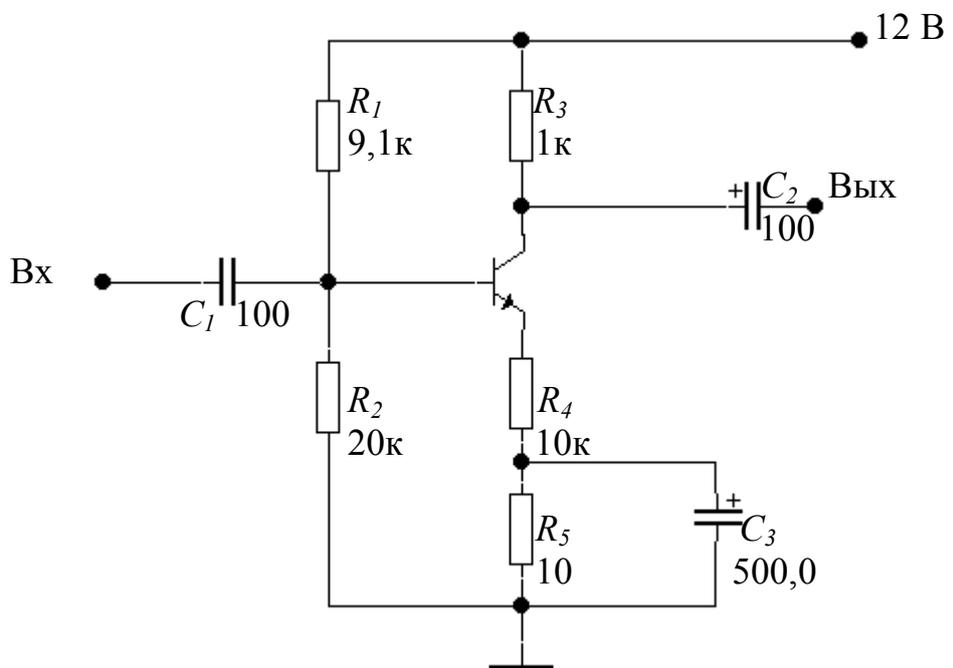


Рис. 8.17

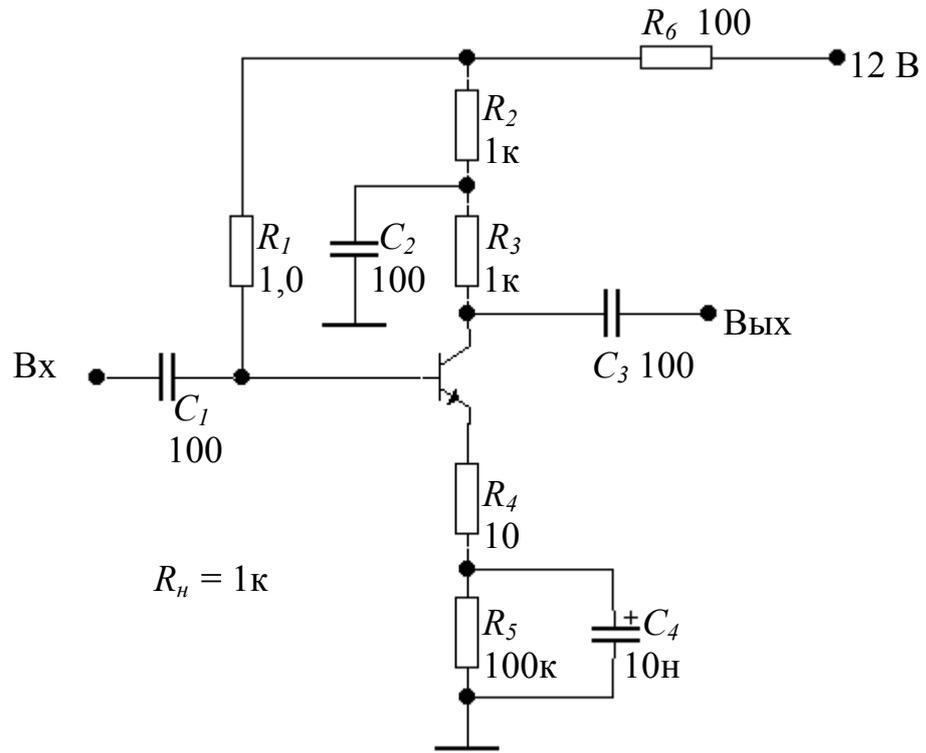


Рис. 8.18

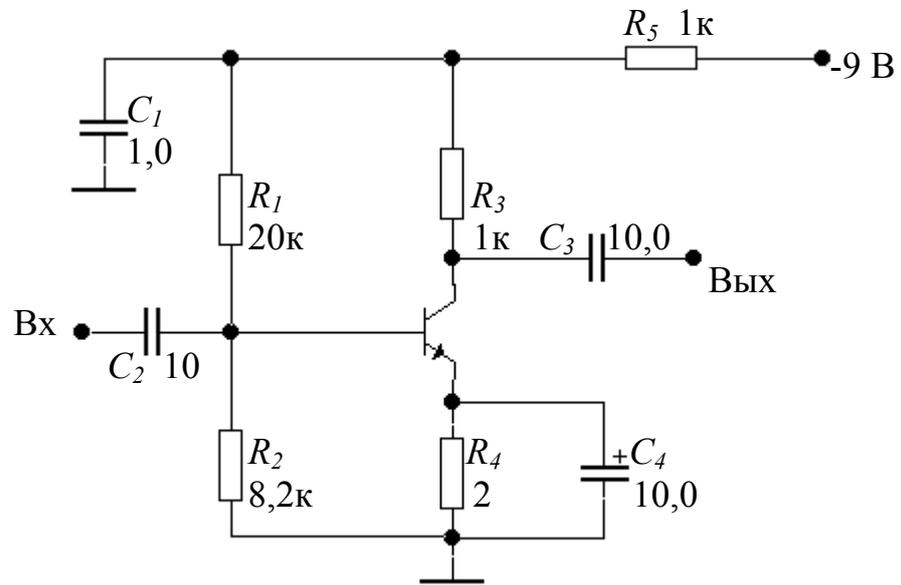


Рис. 8.19

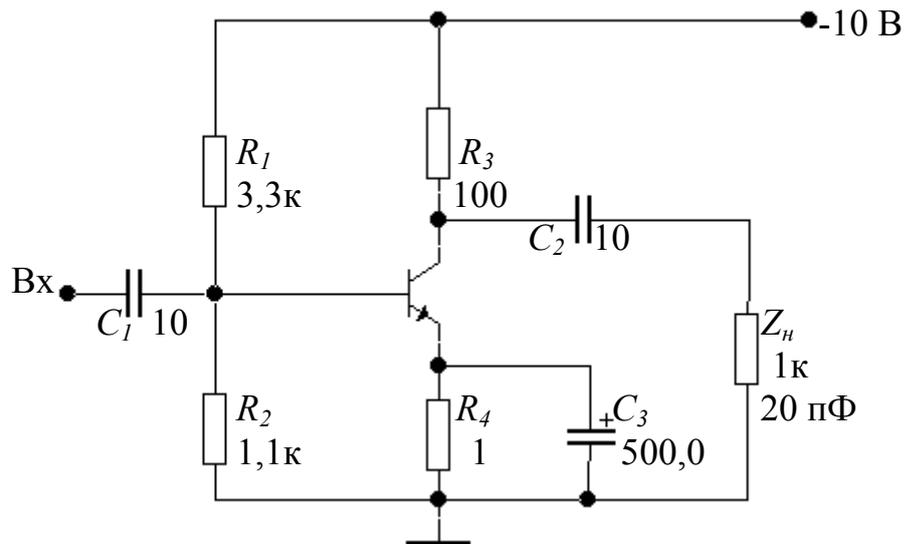


Рис. 8.20

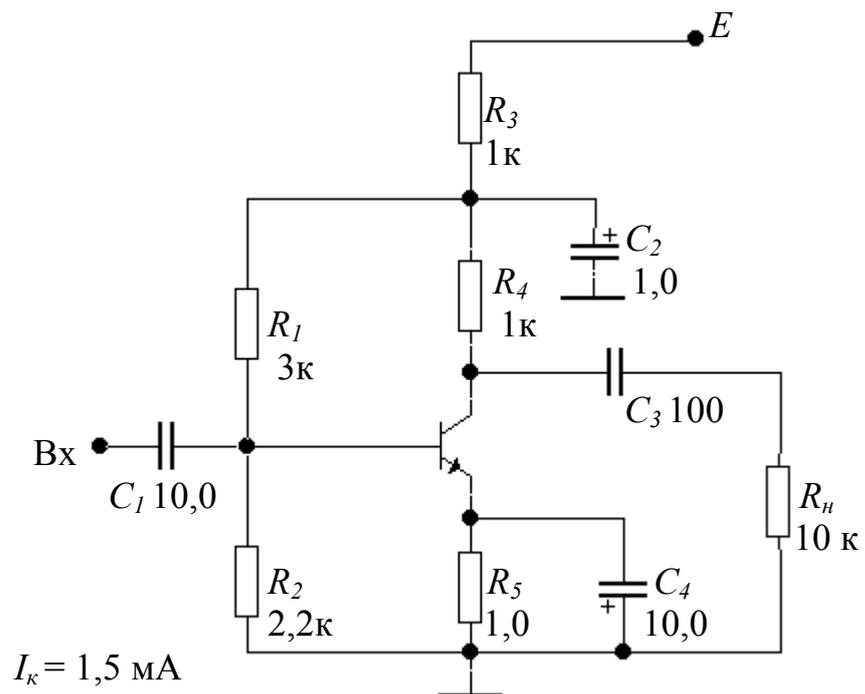


Рис. 8.21

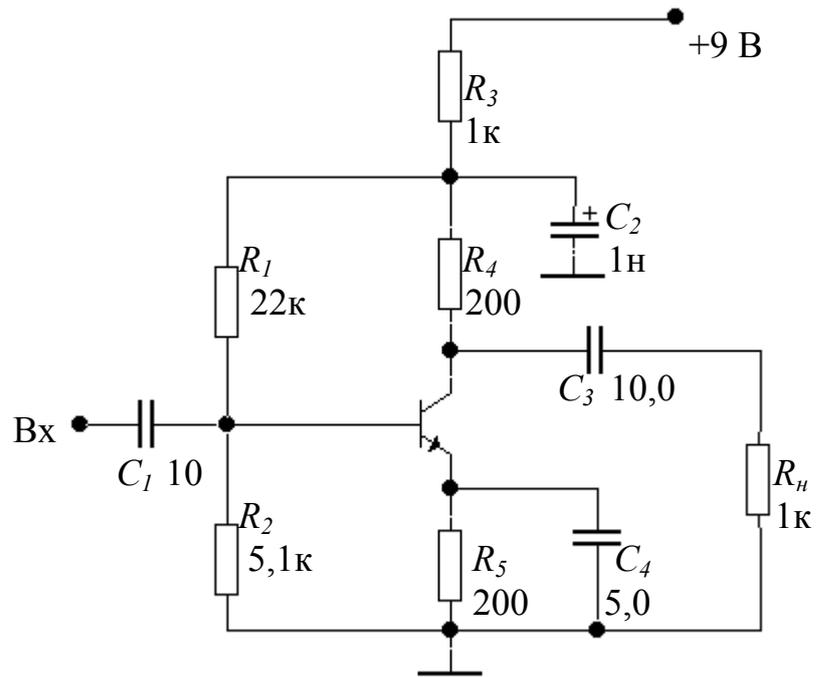


Рис. 8.22

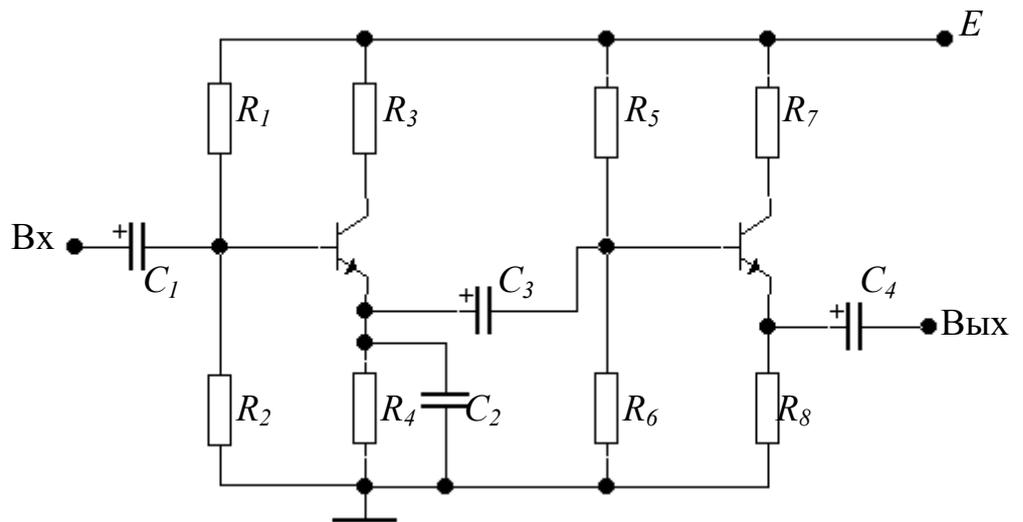


Рис. 8.23

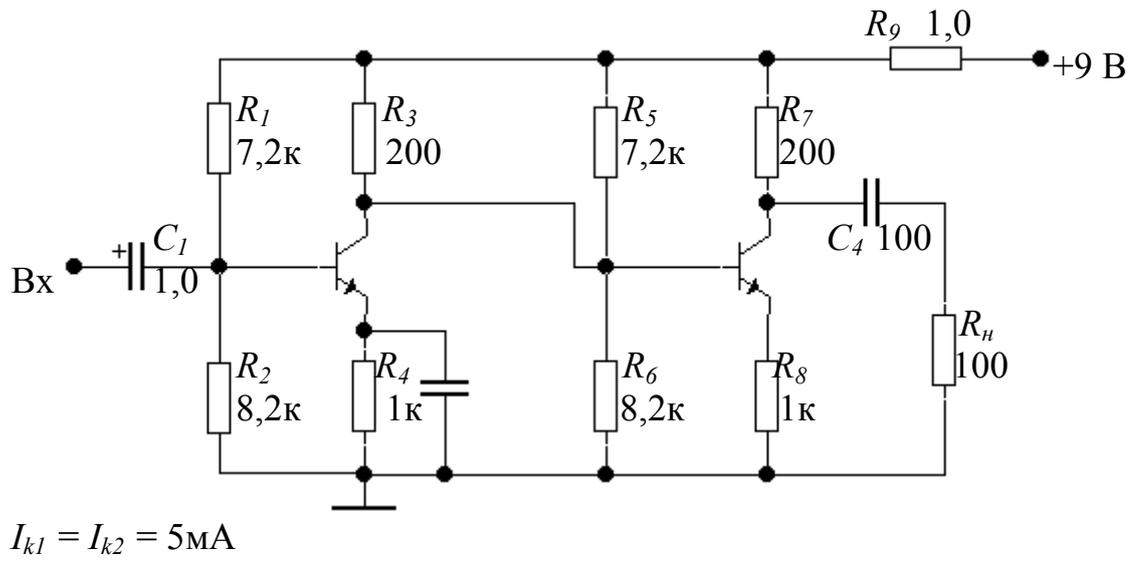


Рис.8.24

## Приложение 1. Параметры и характеристики транзисторов

### Транзисторы КП103Е, КП103Ж, КП103И [7]

*Общие сведения.* Кремниевые диффузионно-планарные с *p-n* переходом и *p*-каналом транзисторы предназначены для работы во входных каскадах усилителей низкой частоты, усилителей постоянного тока и ключевых схемах.

Корпус металлический, с гибкими выводами.

#### Электрические параметры. Классификационные параметры

$I_{с\text{ нач}}, S, U_{зи\text{ отс}}$

Наименование	Обозначение	Значение	Режим измерения	
			$U_{си}, В$	$U_{зи}, В$
Ток утечки затвора, нА при $T_c = 85^\circ$ при $T_c = -55^\circ$	$I_{з\text{ ут}}$	20		
		$2 \cdot 10^3$	0	10
		20	0	10
Крутизна, мА/В КП103Е КП103Ж КП103И КП103К КП103Л КП103М  при $T_c = 85^\circ$ КП103Е КП103Ж КП103И КП103К КП103Л КП103М	$S$			
		0,4-2,4	10	0
		0,5-2,8	10	0
		0,8-2,6	10	0
		1,0-3,0	10	0
		1,8-3,8	10	0
		1,3-4,4	10	0
		0,24-2,4	10	0
		0,3-2,8	10	0
		0,46-2,6	10	0
		0,6-3,0	10	0
		0,75-4,4	10	0
		1,0-3,8	10	0

Напряжение отсечки, В	$U_{зи\ отс}$	0,4-1,5	10	0
КП103Е		0,5-2,2	10	0
КП103Ж		0,8-3,0	10	0
КП103И		1,4-4,0	10	0
КП103К		2,0-6,0	10	0
КП103Л		2,8-7,0	10	0
КП103М				
Входная емкость, пФ	$C_{зи}$	20	10	0
Проходная емкость, пФ	$C_{зс}$	8	10	0
Коэффициент шума, дБ	$K_{ш}$	0,5-3,0	5	0

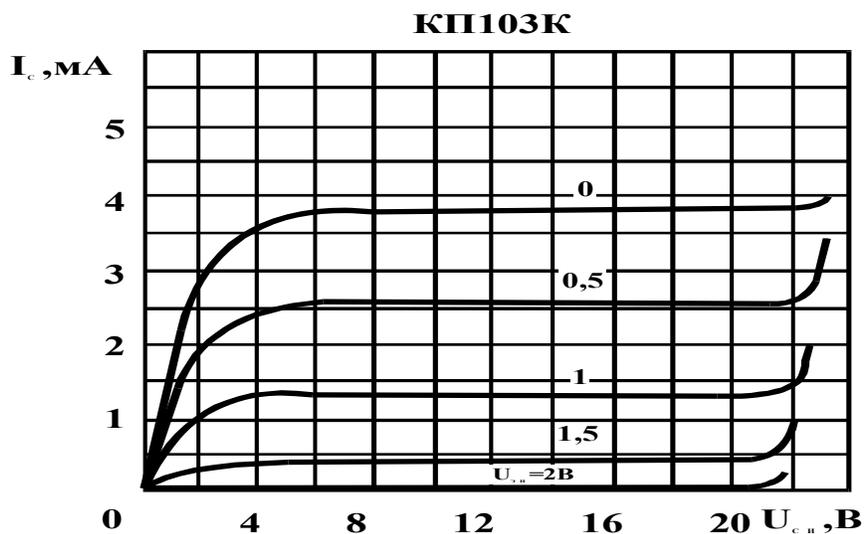
*Максимально допустимые параметры.* Гарантируются при температуре окружающей среды  $T_c = -55...+85^\circ$ .

Постоянная рассеиваемая транзистором мощность $P_{max}$ , мВт			
КП103Е	7	КП103К	38
КП103Ж	12	КП103Л	66
КП103И	21	КП103М	120

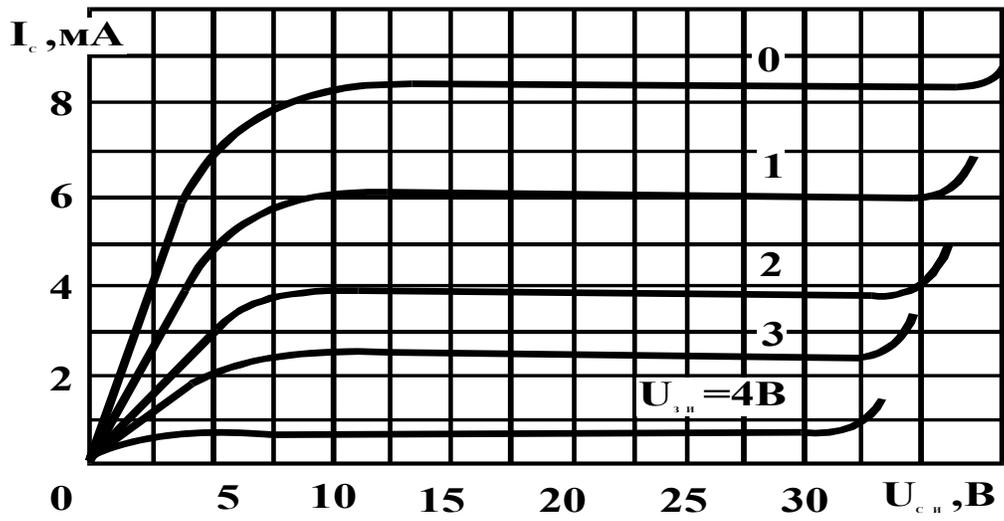
Постоянное напряжение сток-исток  $U_{си\ max} = 10$  В.

Постоянное суммарное напряжение сток-затвор  $U_{сз\ max} = (15-17)$  В.

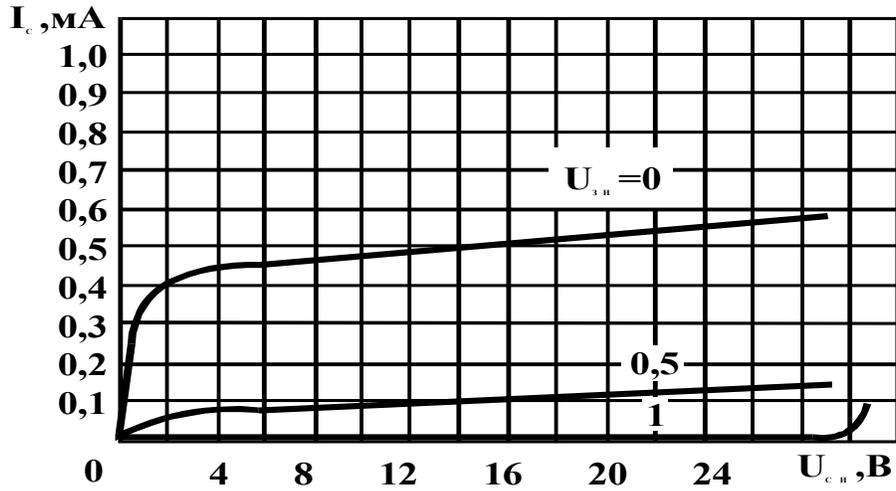
Допустимая температура среды  $T_c = -55...+85^\circ$ .



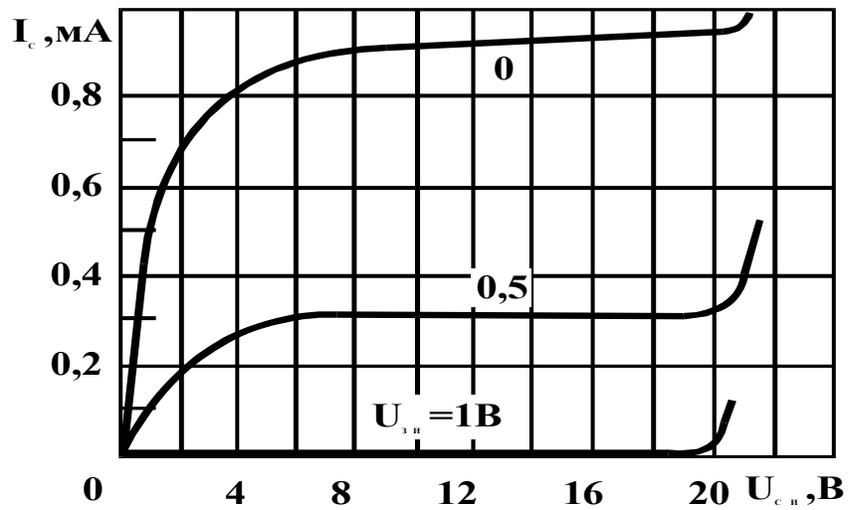
### КП103М

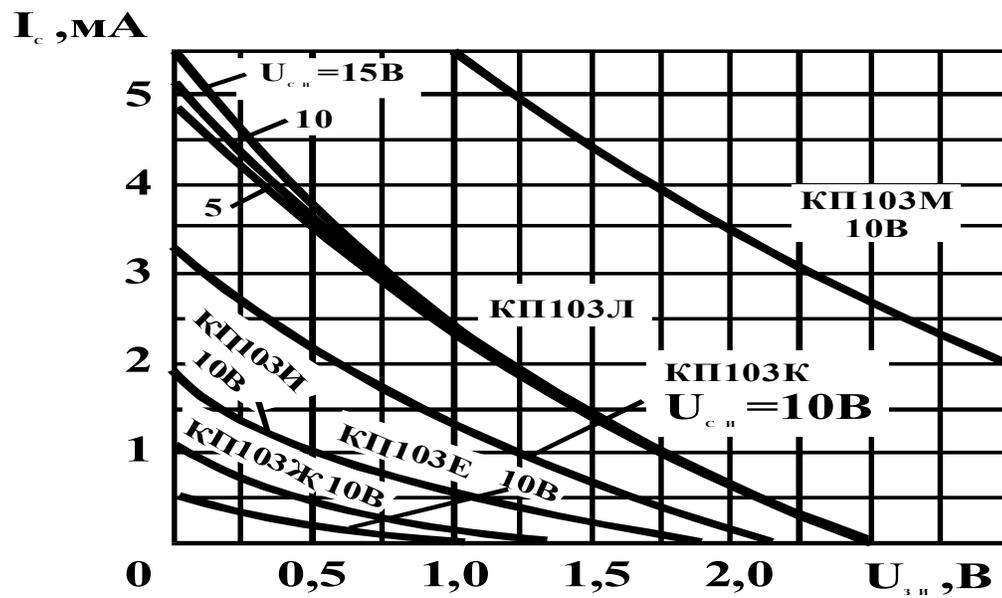
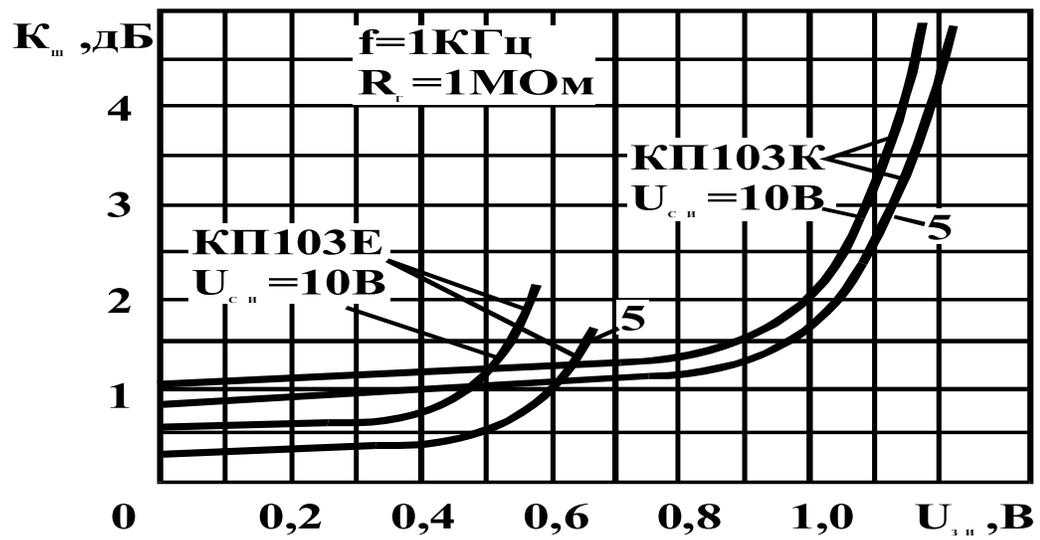


### КП103Е



### КП103Ж





### **Транзисторы КП301Б, КП301В, КП013Г [7]**

*Общие сведения.* Кремниевые планарные полевые МОП-транзисторы с индуцированным *p*-каналом предназначены для работы в приемной, усилительной и другой аппаратуре.

Корпус металлический, с гибкими выводами.

#### *Электрические параметры. Классификационные параметры*

Наименование	Обозначение	Значение	Режим измерения	
			$U_{си}, В$	$I_c, мА$
Ток утечки затвора, нА	$I_{зут}$	0,3	30	
Крутизна, мА/В	$S$			
КП301Б		1,0-2,6	15	5
КП301В		2,0-3,0	15	5
КП301Г		0,5-1,6	15	5
<i>при <math>T_c = 70^\circ</math></i>				
КП301Е		0,6	15	5
КП301Ж		1,2	15	5
КП301И		0,3	15	5
Активная составляющая выходной проводимости, маСм	$g_{22и}$			
КП301Е		20-150	15	5
КП301Ж		150-250	15	5
КП301И		20-100	15	5
Входная емкость пФ	$C_{11и}$	3,5	15	5
Проходная емкость, пФ	$C_{12и}$	1	15	5
Выходная емкость пФ	$C_{22и}$	3,5	15	5
Коэффициент шума, дБ	$K_{ш}$	2,2-9,5	15	5

Пороговое напряжение  $U_{зи пор} = (2,7-5,4)$  В при  $U_{си} = 15$  В и  $I_c = 0,5$  мА

Максимально допустимые параметры. Гарантируются при температуре окружающей среды  $T_c = -45...+70^\circ$

Постоянное напряжение сток-исток  $U_{cu_{max}}$ , В 20

Постоянное напряжение затвор-исток  $U_{zu_{max}}$ , В 30

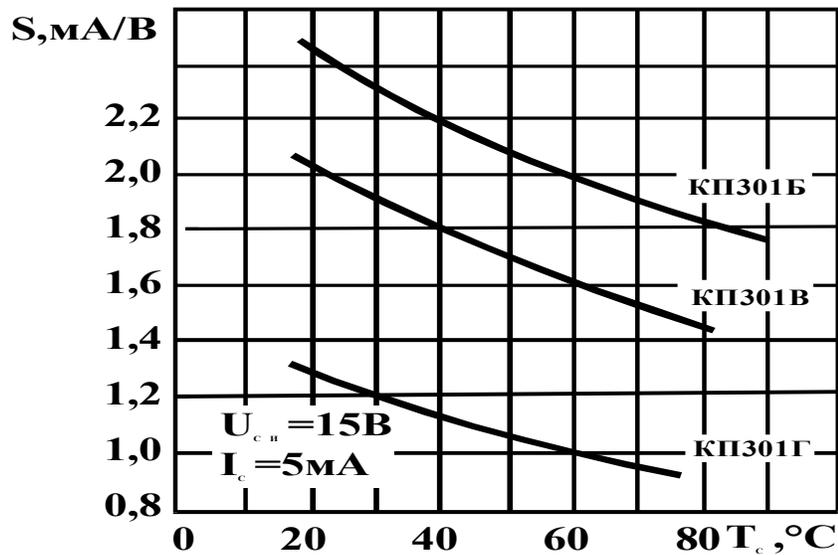
Постоянная рассеиваемая мощность транзистора в интервале температур  $-45...+25^\circ$   $P_{max}$ , мВт 200

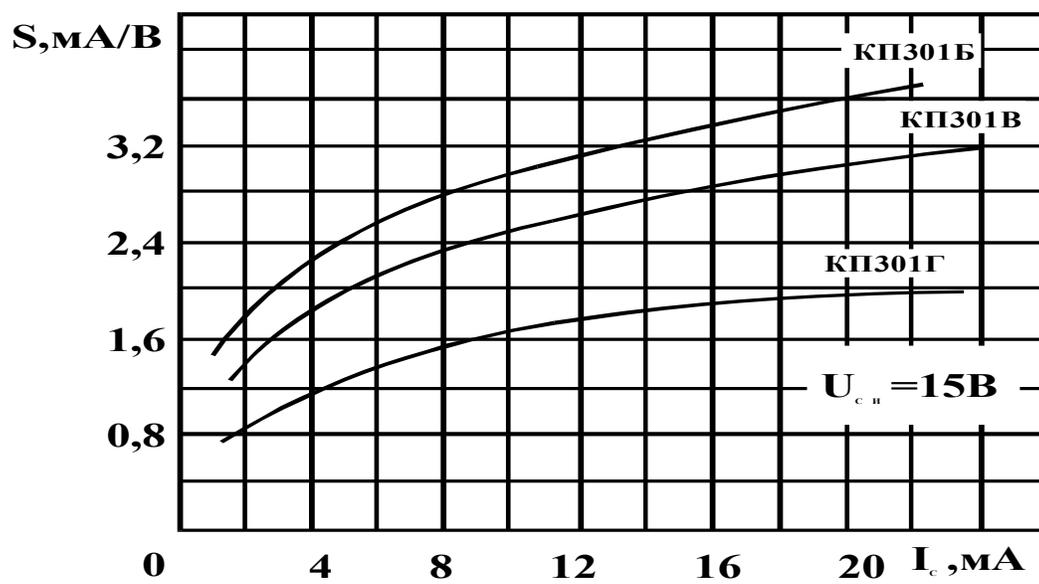
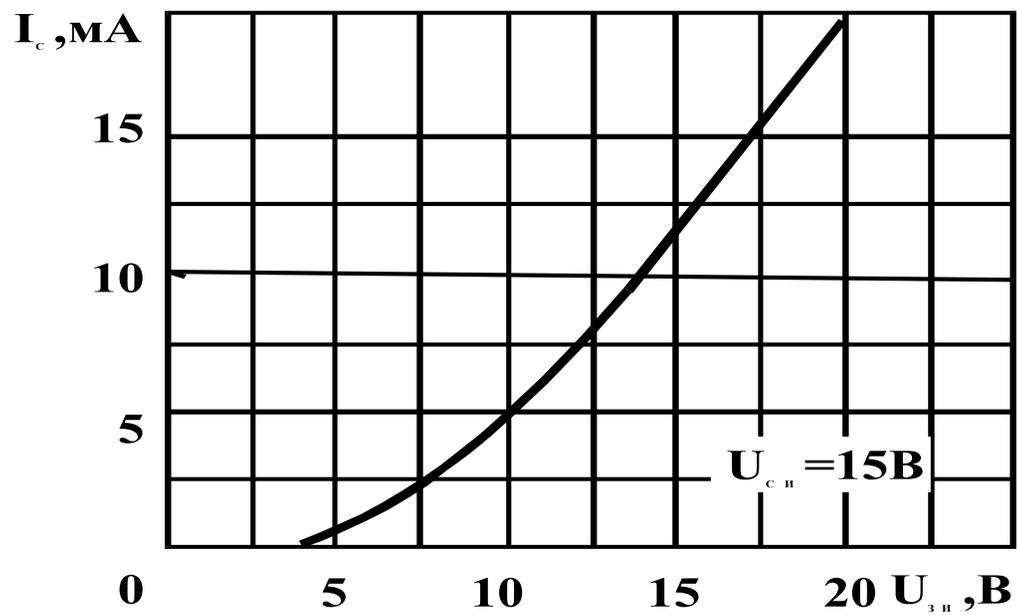
при  $T_c > +25^\circ$   $P_{max}$ , мВт =  $200 - 1,5(T_c - 25^\circ) / R_{m\ n-c}$

Тепловое сопротивление переход-среда  $R_{m\ n-c}$ ,  $^\circ\text{C}/\text{мВт}$  1

Рабочая частота  $f$ , МГц 100

Допустимая температура среды  $T_c$ ,  $^\circ\text{C}$   $-45...+70^\circ$





### Транзисторы КТ312А, КТ312Б, КТ312В [7]

*Общие сведения.* Кремниевые эпитаксиально-планарные *n-p-n* транзисторы предназначены для усиления и генерирования колебаний звуковой частоты, для работы в быстродействующих импульсных схемах.

Корпус металлический, герметичный со стеклянными изоляторами и гибкими выводами.

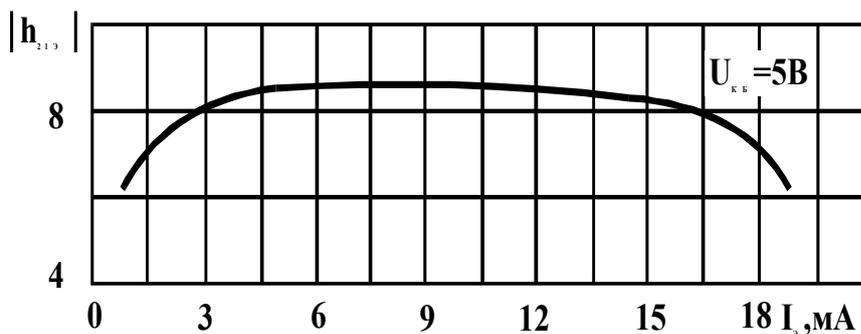
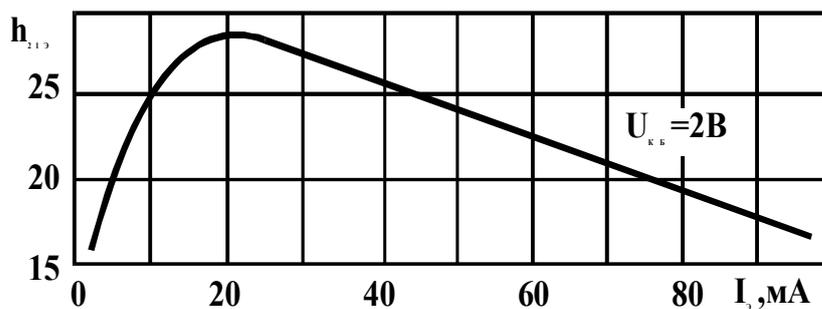
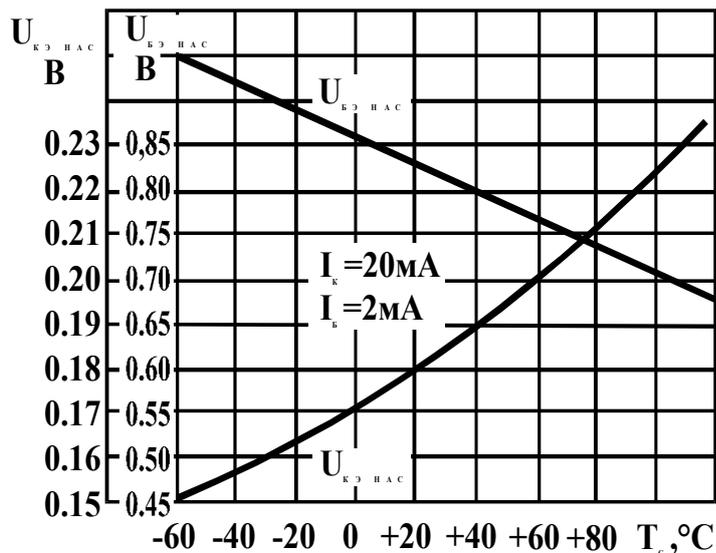
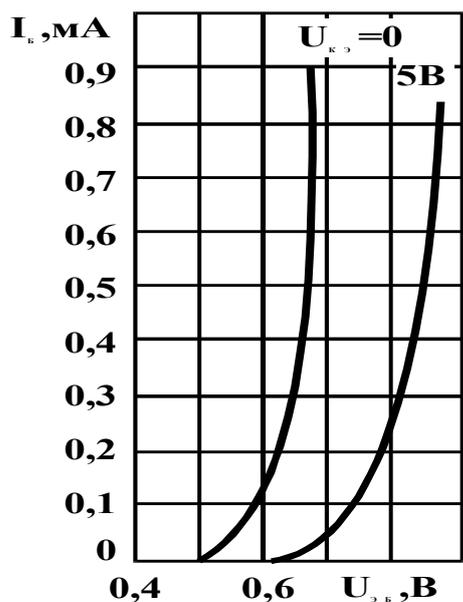
#### Электрические параметры. Классификационные параметры

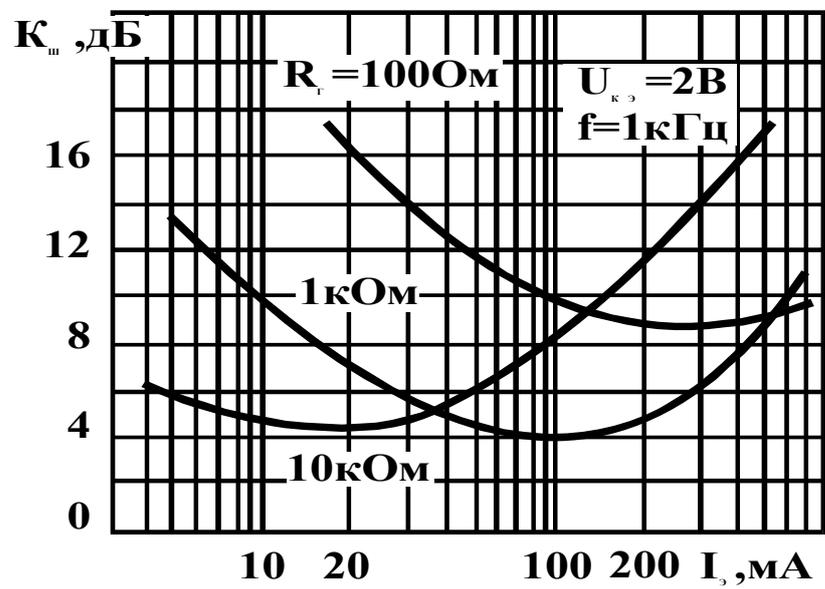
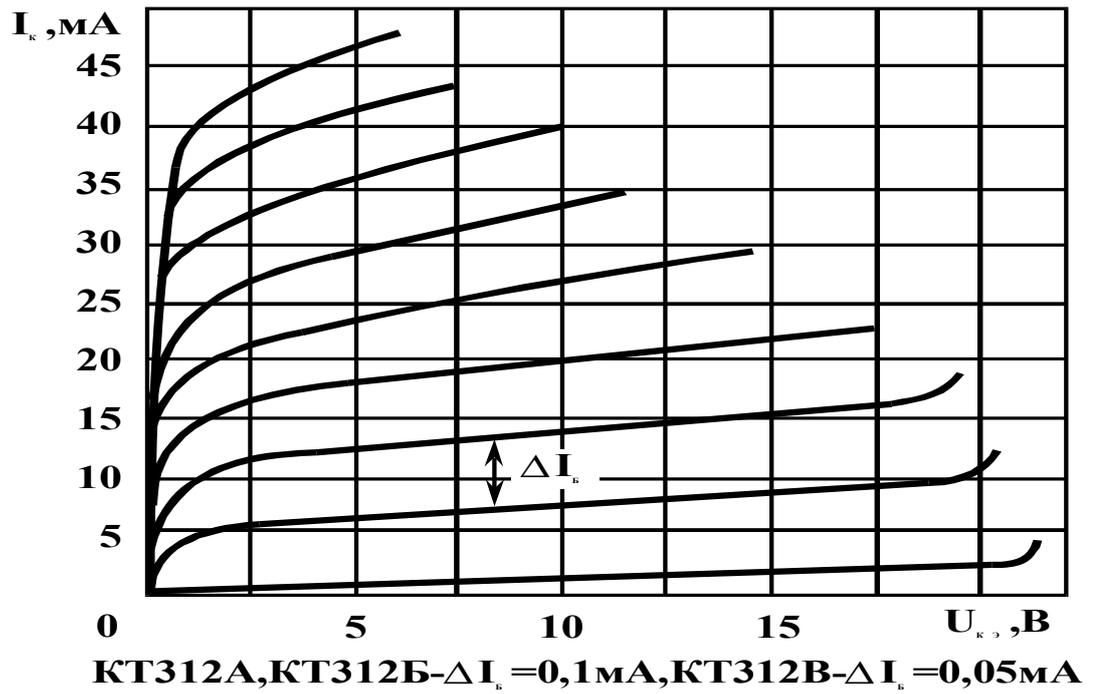
$U_{КЭ\text{нас}}$ ,  $U_{БЭ\text{нас}}$ ,  $h_{21э}$ , модуль  $h_{21э}$

Наименование	Обозначение	Значение			Режим измерения		
		Мин.	Типов.	Макс.	$U_{к,В}$	$I_{к,мА}$	$f,МГц$
Обратный ток коллектора, мкА КТ312А,КТ312Б, КТ312В  <i>при <math>T = 85^{\circ}C</math></i> КТ312А,КТ312Б, КТ312В  <i>при <math>T = -40^{\circ}C</math></i> КТ312А,КТ312Б, КТ312В	$I_{КБ0}$						
		0,2	10	20			
		0,2	10	35			
		5		30	20		
		5		30	35		
		0,01	10	20			
		0,01	10	35			
Модуль коэффициента передачи тока базы КТ312А,КТ312Б, КТ312В	модуль $h_{21э}$						
		4	8	10	5	20	
		6	9	10	5	20	
Статический коэффициент передачи тока базы в схеме с ОЭ КТ312А КТ312Б КТ312В	$h_{21э}$						
		10	30	100	2	20	
		25	30	100	2	20	
		50		280	2	20	
Емкость коллекторного перехода, пФ	$C_K$		3,5	5	10	2	
Постоянная времени цепи обратной связи, нс	$\tau_K$			500	10	5	2

*Максимально допустимые параметры.* Гарантируются при температуре окружающей среды  $T_c = -40...+85^{\circ}$

Постоянное напряжение коллектор-база $U_{KBmax}$ , В	
КТ312А, КТ312Б	20
КТ312В	35
Постоянная рассеиваемая мощность транзистора при температуре не более $+25^{\circ}$ $P_{max}$ , мВт	225
при $T_c > +25^{\circ}$ $P_{max}$ , мВт = $200 - 1,5(T_c - 25^{\circ}) / R_{m\ n-c}$	
Тепловое сопротивление переход-среда $R_{m\ n-c}$ , $^{\circ}\text{C}/\text{мВт}$	0,4
Допустимая температура среды $T_c$ , $^{\circ}\text{C}$	-60...+120 $^{\circ}\text{C}$





**Транзисторы КТ324А, КТ324Б, КТ324В  
КТ324Г, КТ324Д, КТ324Е [7]**

*Общие сведения.* Кремниевые планарно-эпитаксиальные *n-p-n* транзисторы предназначены для использования в быстродействующих переключающих микросхемах, микромодулях, узлах и блоках.  
Бескорпусное оформление.

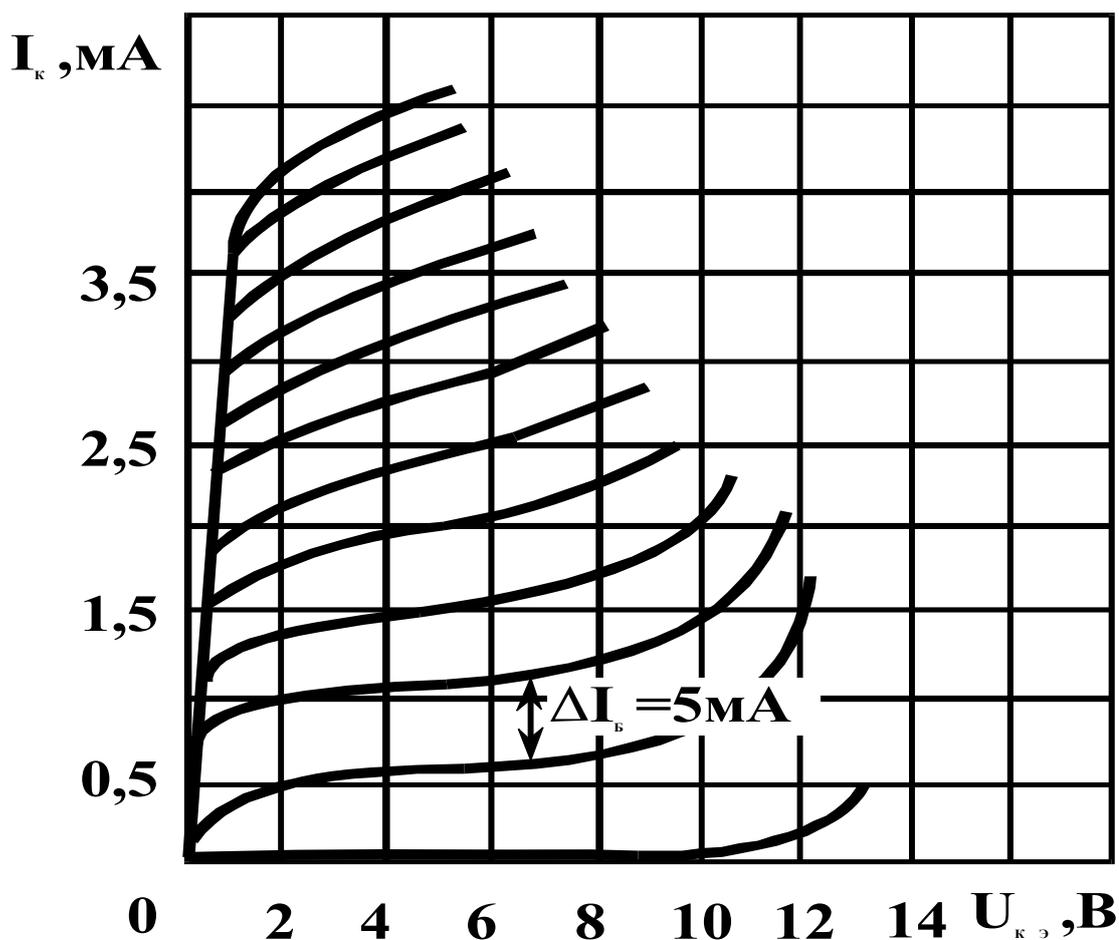
*Электрические параметры. Классификационные параметры*

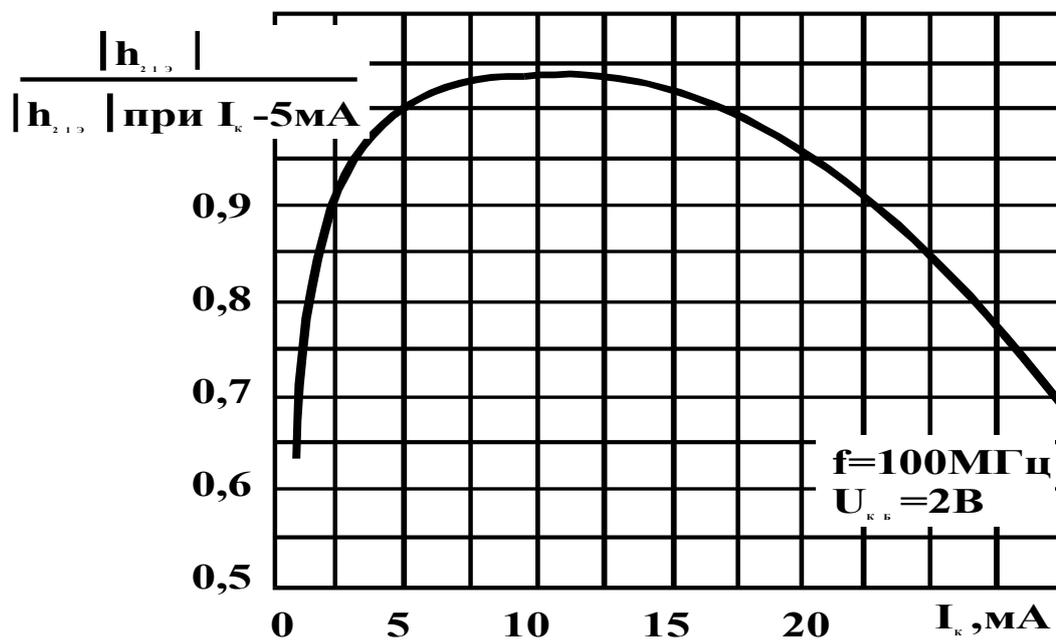
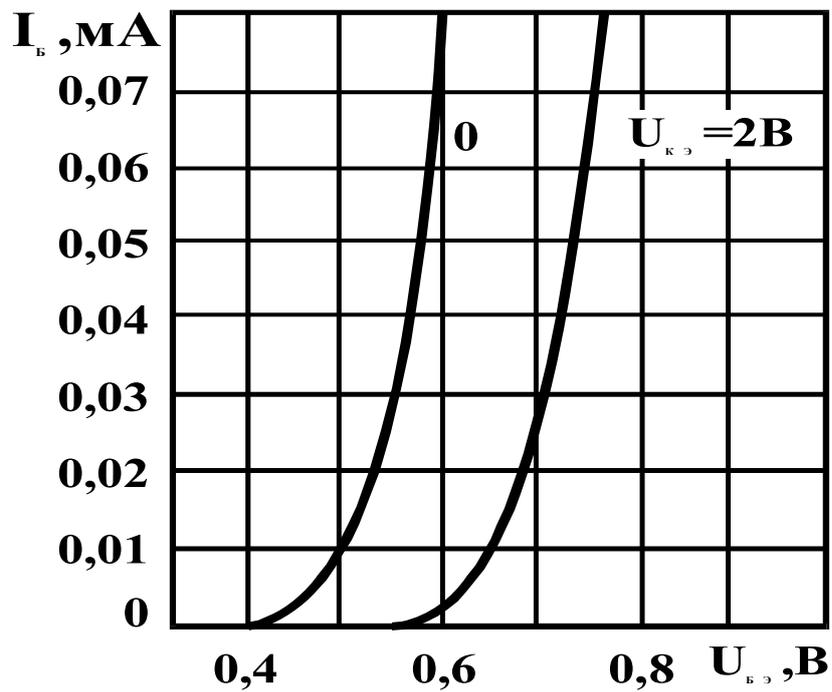
*$h_{21э}$ , модуль  $h_{21э}$ ,  $t_{рас}$*

Наименование	Обозначение	Значение		Режим измерения		
		Мин.	Макс.	$U_k, В$	$I_k, мА$	$f, МГц$
Обратный ток коллектора, мкА при $T=85^{\circ}C$	$I_{К60}$		0,5 10	10 10		
Модуль коэффициента передачи тока базы КТ324А-КТ312В КТ324Г-КТ324Е	Модуль $h_{21э}$	8 6		2 2	5 5	100 100
Статический коэффициент передачи тока базы в схеме с ОЭ КТ324А КТ324Б, КТ324Г КТ312В КТ312Д КТ312Е при $T=85^{\circ}C$ КТ324А КТ324Б, КТ324Г КТ312В КТ312Д КТ312Е при $T=-60^{\circ}C$ КТ324А, КТ312Д КТ324Б, КТ324Г КТ312В КТ312Е	$h_{21э}$	20 40 80 20 60 20 40 80 20 60 8 16 32 24	60 120 250 80 250 120 240 500 160 500	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	
Емкость коллекторного перехода, пФ	$C_K$		2,5	5		10
Постоянная времени цепи обратной связи, нс	$\tau_K$		180	2	5	10

Максимально допустимые параметры. Гарантируются при температуре окружающей среды  $T_c = -60...+85^\circ$

Постоянное напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭmax}$ , В ( $R_B < 3$ кОм)	10
Постоянное напряжение коллектор-база $U_{КБmax}$ , В	10
Постоянная рассеиваемая мощность транзистора $P_{max}$ , мВт при температуре $T_c = -60^\circ\text{C}..+50^\circ\text{C}$	15
при температуре $T_c = +85^\circ\text{C}$	5
Допустимая температура перехода $T_c$ , $^\circ\text{C}$	+100 $^\circ\text{C}$
Допустимая температура среды $T_c$ , $^\circ\text{C}$	-60...+120 $^\circ\text{C}$





## Приложение 2. Шкала номинальных параметров радиодеталей

Таблица П2.1  
Шкала номинальных значений сопротивления резисторов  
(ГОСТ 10318-62)

Допуск	Омы, килоомы, мегаомы
+/- 5%	1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1
+/- 10%	1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2
+/- 20%	1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8

Таблица П2.2  
Шкала номинальных значений емкости конденсаторов  
(единицы, десятки, сотни и тысячи пикофард)

Допуск, %, +/-								
5%	10%	20%	5%	10%	20%	5%	10%	20%
1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	4,7	4,7	4,7
1,1	-	-	2,4	-	-	5,1	-	-
1,2	1,2	-	2,7	2,7	-	5,6	5,6	-
1,3	-	-	3,0	-	-	6,2	-	-
1,5	1,5	1,5	3,3	3,3	3,3	6,8	6,8	6,8
1,6	-	-	3,6	-	-	7,5	-	-
1,8	1,8	-	3,9	3,9	-	8,2	8,2	-
2,0	-	-	4,2	-	-	9,1	-	-

Таблица П2.3  
Шкала номинальных значений емкости конденсаторов  
(микрофарады)

Допуск, %, +/-								
5%	10%	20%	5%	10%	20%	5%	10%	20%
0,010	0,010	0,010	0,068	0,068	0,068	2,2	2,2	2,2
0,012	0,012	-	0,082	0,082	-	3,3	3,3	3,3
0,015	0,015	0,015	0,10	0,10	0,10	4,7	4,7	4,7
0,018	0,018	-	0,15	0,15	0,15	6,8	6,8	6,8
0,022	0,022	0,022	0,22	0,22	0,22	10	10	10
0,027	0,027	-	0,33	0,33	0,33	15	15	15
0,033	0,033	0,033	0,47	0,47	0,47	22	22	22
0,039	0,039	-	0,68	0,68	0,68	33	33	33
0,047	0,047	0,047	1,0	1,0	1,0	47	47	47
0,056	0,056	-	1,5	1,5	1,5	68	68	68

Электролитические конденсаторы выпускаются с номиналами 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 микрофарад.