

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.

### Усилительный каскад на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером.

**Цель работы** – исследовать схему усилительного каскада, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЕ), с обратной связью по переменной составляющей тока. Произвести предварительный расчёт элементов схемы, проанализировать их влияние на работу каскада.

Рекомендуемое время проведения ЛР: 2 уч. часа;

#### 5.1 Краткие теоретические сведения.

Транзистор, являясь полупроводниковым прибором, изменяет свои параметры при изменении рабочей температуры. Так, при повышении температуры, усилительные свойства транзистора ухудшаются. Обусловлено это рядом причин: при повышении температуры значительно увеличивается такой параметр транзистора, как обратный ток коллектора. Увеличение обратного тока коллектора приводит к значительному увеличению коллекторного тока и к смещению рабочей точки в сторону увеличения тока. При некоторой температуре коллекторный ток транзистора возрастает до такой величины, при которой транзистор перестает реагировать на слабый входной (базовый) ток, и каскад теряет свойства усиления. Для того, чтобы расширить диапазон рабочих температур, необходимо применять дополнительные меры по температурной стабилизации рабочей точки транзистора.

Исследуемая в данном разделе схема каскада усиления (рис.5.1), позволяет сохранять усилительные свойства в очень широком интервале рабочих температур. Кроме того, применение данной схемы стабилизации дает возможность замены транзисторов без последующей настройки.

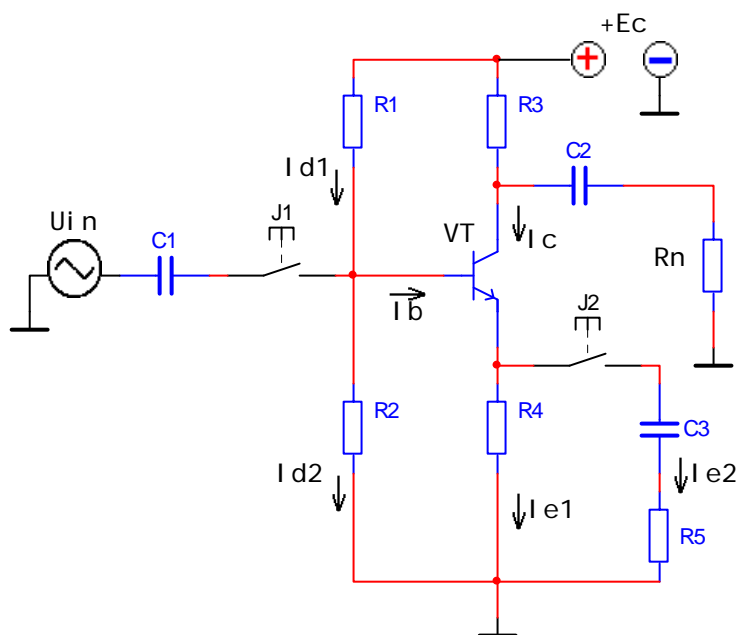


Рис.5.1 Каскад усиления по схеме GE и OOC по току

Важными показателями каскада являются его коэффициенты усиления по току  $K_i$ , напряжению  $K_u$ , мощности  $K_p$ , а также входное ( $R_i$ ), и выходное ( $R_o$ ) сопротивление.

Особенности данного каскада усиления:

- Схема осуществляет поворот по фазе на  $180^\circ$  выходного напряжения относительно входного;
- коэффициент усиления каскада по напряжению ( $K_u$ ) тем больше, чем выше коэффициент  $\beta$  транзистора, а также, сопротивление выходной цепи каскада ( $R_o$ ), по сравнению с сопротивлением входной цепи ( $R_i$ ).

### 5.1.1 Назначение элементов схемы.

- $E_c$  - источник питания самого каскада усиления и элементов схемы (включен в цепь коллектора). Является исходным параметром, для предварительного расчёта схемы.
- Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  являются разделительными элементами межкаскадных связей.  $C1$  - препятствует (проникновению постоянной составляющей) или связи по постоянному току источника входного сигнала и усилителя. Также, обеспечивает независимость от внутреннего сопротивления источника входного сигнала и напряжения на базе ( $U_{bo}$ ) в режиме покоя.  $C2$  - служит для разделения по постоянному току коллекторной цепи и нагрузки, т.е., пропускает в цепь нагрузки только переменную составляющую напряжения. Дополнительные функции  $C1$ ,  $C2$  - могут использоваться для коррекции частотных характеристик усилителя.
- Резисторы  $R1$  и  $R2$  образуют базовый делитель напряжения, определяющий положение рабочей точки схемы усилителя в режиме покоя (при отсутствии сигнала), и обеспечивают исходное напряжение на базе -  $U_{bo}$ . Поскольку биполярный транзистор управляется током, то ток покоя управляемого элемента (в данном случае ток -  $I_{co}$ ) создаётся заданием соответствующей величины тока базы покоя -  $I_{bo}$ .
- Резистор  $R3$ , в цепи коллектора. Является нагрузкой транзистора VT и преобразует изменение тока коллектора в выходное напряжение, отводимое через разделительный конденсатор  $C2$  к нагрузке.
- $R_n$  – нагрузка усилительного каскада, с которой снимается усиленный сигнал.
- Резистор  $R4$  (в цепи эмиттера) является элементом отрицательной обратной связи, и предназначен для стабилизации режима покоя каскада при изменении температуры. При отключенном конденсаторе  $C3$ , через резистор  $R4$ , будет проходить не только постоянная, но и переменная составляющая сигнала.
- Конденсатор  $C3$ , (в цепи эмиттера), шунтирует резистор  $R4$ , исключая прохождение переменной составляющей сигнала через  $R4$ , тем самым, уменьшая проявление отрицательной обратной связи (ООС по  $\sim I$ ) в каскаде. Ёмкость этого конденсатора выбирают такой, чтобы на частоте сигнала, его сопротивление было много меньше сопротивления резистора  $R4$

$$X_c = \frac{1}{\omega C_e} \ll R_e \quad (5.1)$$

За счёт этого значительно увеличивается коэффициент усиления по переменной составляющей.

С3 может использоваться для частотной коррекции. Для усилителя звуковых частот, ёмкость конденсатора может составлять 5...50 мкF, для диапазона радиочастот - 0,01...0,1 мкF.

### 5.1.2 Принцип работы каскада с температурной стабилизацией

Постоянный ток делителя напряжения (R1, R2) протекает по цепи: плюс источника питания (+Ес), резисторы R1, R2, минус источника питания.

Постоянный ток базы транзистора VT1 протекает по цепи: плюс источника питания, резистор R1, переход база-эмиттер транзистора VT1, резистор R4, минус источника питания.

Постоянный ток коллектора транзистора VT1 протекает по цепи: плюс источника питания, резистор R3, выводы коллектор-эмиттер транзистора, резистор R4, минус источника питания.

При наличии постоянных составляющих токов и напряжений в схеме, подача на вход каскада переменного напряжения приводит к появлению переменной составляющей тока базы транзистора, а следовательно, переменной составляющей тока в выходной цепи каскада (в коллекторе транзистора). При этом, падение напряжения на резисторе R3 создаст переменную составляющую напряжения на коллекторе, которая, через конденсатор C2, передаётся на выход каскада — в цепь нагрузки.

Биполярный транзистор в составе усилителя работает в режиме, когда переход база-эмиттер смещен в прямом направлении, а переход база-коллектор - в обратном. Поэтому постоянное напряжение на резисторе R2 будет равно сумме напряжения на переходе база-эмиттер транзистора VT1 и напряжения на резисторе R4:

$$U_{R2} = U_{be} + U_{R4}. \quad (5.2)$$

Отсюда следует, что постоянное напряжение на переходе база-эмиттер будет равно:

$$U_{be} = U_{R2} - U_{R4}. \quad (5.3)$$

Пусть температура окружающей среды увеличивается. В результате этого увеличиваются постоянные токи базы, коллектора и эмиттера, т.е. изменяется рабочая точка транзистора. Ток делителя напряжения на резисторах R1, R2 выбирают значительно больше тока базы транзистора. Поэтому, напряжение на резисторе R2, при изменении температуры остаётся практически неизменным (сопротивление резистора от температуры не зависит), а напряжение на резисторе R4 с увеличением температуры увеличивается за счет увеличения тока эмиттера при неизменном сопротивлении резистора в цепи эмиттера. В результате этого напряжение база-эмиттер уменьшится, что приведет к уменьшению тока базы, а, следовательно, и значения тока коллектора. Таким образом, рабочая точка транзистора будет стремиться к исходному состоянию.

Наличие резистора в цепи эмиттера приводит к появлению отрицательной обратной связи как по постоянной, так и по переменной составляющей тока. Для устранения отрицательной обратной связи по переменному току, параллельно резистору Re (R4) подключают конденсатор. Ёмкость конденсатора Се (С3) выбирают так, чтобы его сопротивление переменному току на самой низкой частоте усиливаемого сигнала было значительно (примерно в десять раз) меньше сопротивления резистора в цепи эмиттера.

## 5.2 Пример расчёта усилительного каскада по схеме GE

### Исходные данные:

Напряжение источника питания  $E_c = 12 \text{ V}$ ;

Ток покоя коллатора (при отсутствии входного сигнала)  $I_{co} = 2 \text{ mA}$ ;

Для транзистора BC847B коэффициент усиления по току ( $h_{21}$ )  $\beta = 110 \dots 450$

Выбираем  $\beta_{\min} = 110$ ;

Входное сопротивление каскада состоит из параллельно соединённых сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и сопротивления  $r_{be}$  [1].

$r_{be}$  - *дифференциальное входное сопротивление транзистора*, используется для описания входной цепи транзистора как нагрузки, соединённой с входным источником напряжения.

Определяется по входной характеристике транзистора  $I_b = f(U_{be})$   $r_{be} = \frac{\Delta U_{be}}{\Delta I_b} \mid U_{ce} = \text{const}$  (5.4)

$$\text{или согласно выражению } r_{be} = \frac{\beta}{S} = \frac{\beta U_t}{I_c} \quad (5.5)$$

где  $U_t$  – термический потенциал,  $U_t = kT/e_0 = 25,5 \text{ [mV]}$  при комнатной температуре;

$S = I_c / U_t$  – *крутизна*, параметр транзистора, характеризующий изменение тока коллектора ( $I_c$ ), в зависимости от напряжения  $U_{be}$ .

$$r_{be} = (110 * 0,026 \text{ V}) / 0,002 = 2600 = 1,43 \text{ [kOm]}$$

$r_{ce}$  - *дифференциальное выходное сопротивление транзистора*

$$r_{ce} = \frac{U_Y}{I_{co}} \quad (5.6)$$

где  $U_Y$  – коэффициент пропорциональности (напряжение Эрли).  $U_Y = 80 \dots 200$  для NPN-транзисторов;

$$r_{ce} = 100 / 0,002 = 50 \text{ [kOm]}$$

далее необходимо установить потенциал на коллекторе ( $U_{co}$ ) при отсутствии сигнала. Стабильность рабочей точки тем лучше, чем больше падение постоянного напряжения на  $R_e$ , так как в этом случае изменение  $U_{be}$  остается меньше  $U_e$  и, следовательно, влияние коллекторного тока будет незначительным. Если выбрать  $U_e = 2 \text{ V}$ , то коллекторный ток изменится только на  $(2 \text{ mV/K}) / 2 \text{ V} = 0,1\% / \text{K}$  [1].

Предположим, что наибольший сигнал на выходе должен составлять  $\Delta U_{C_{\max}} = \pm 2 \text{ V}$  относительно потенциала, при отсутствии сигнала.

$$\text{Потенциал на коллекторе (при отсутствии сигнала)} \quad U_{co} = U_e + U_{ce(\text{sat})} + |\Delta U_{C_{\max}}| \quad (5.7)$$

$$U_{co} = 2 + 1 + 2 = 5 \text{ [V]}$$

Обычно, рекомендуемое значение  $U_{co}$  составляет половину значения напряжения источника питания:

$$U_{co} = E_c / 2 \quad (5.8)$$

$$U_{c0} = E_c / 2 = 12/2 = 6 \text{ [V]}$$

- рассчитаем сопротивление в цепи коллектора:  $R_c = (E_c - U_{c0})/I_{c0}$  (5.9)  
 $R_c = R_3 = (12 - 6) / 0,002 = 3000 \text{ [Om]};$

- рассчитаем эмиттерное сопротивление:  $R_e = U_e/I_{c0}$  (5.10)  
 $R_e = R_4 = (U_b - U_{be}) / I_{c0} = (2,6 - 0,7) / 2 \cdot 10^{-3} = 950 \text{ [Om]};$

- Установим базовый потенциал ( $U_{b0}$ ) при отсутствии сигнала таким образом, чтобы падение напряжения на эмиттерном сопротивлении ( $R_e$ ) составляло  $\sim 2 \text{ В}$ .

$$U_{b0} = U_e + U_{be} \quad (5.11) \quad \text{аналогично (5.2)}$$

$$U_{b0} = 2 + 0,7 = 2,7 \text{ [V]}$$

- Определим базовый ток покоя  $I_{b0}$  (при отсутствии сигнала).

$$I_{b0} = I_c / \beta \quad (5.12)$$

$$I_{b0} = 0,002 / 110 = 18 \text{ [mkA]}$$

Он не должен существенно влиять на базовый потенциал [1]. Поэтому через делитель напряжения  $R_1 R_2$ , должен протекать шунтирующий ток делителя ( $I_{d1}$ ), составляющий:

$$I_{d1} \Rightarrow (10 * I_{b0}) \quad (5.13)$$

$$\text{Выбираем } I_{d1} = 18 \text{ mkA} * 10 = 180 \text{ [mkA]}$$

- Расчитаем резисторы базового делителя  $R_1$  и  $R_2$ :

$$R_1 = (E_c - U_{b0}) / I_{d1} = (12 - 2,7) / 180 \cdot 10^{-6} \approx 51 \text{ kOm}$$

$$R_2 = U_{b0} / (I_{d1} - I_{b0}) = 2,7 / (180 \cdot 10^{-6} - 18 \cdot 10^{-6}) \approx 16 \text{ kOm}$$

Входное сопротивление каскада по переменному току:  $R_i = r_{be} \parallel R_1 \parallel R_2$ ;

Выходное сопротивление каскада по переменному току:  $R_o = r_{ce} \parallel R_c$ ;

Для ориентировочного расчёта коэффициента усиления каскада по напряжению ( $K_u$ ) на переменном токе используют выражение:  $K_u = \frac{R_c}{U_t / I_{e0}}$  (5.14)

$$I_{e0} = I_{c0} + I_{b0} \quad (5.15)$$

$$I_{e0} = 2,0 \text{ mA} + 18 \text{ mkA} = 2,018 \text{ [mA]}$$

$$K_u = 3000 / (0,026 / 2,018 \cdot 10^{-3}) = 233;$$

В данном случае, ключ J2 - замкнут, и конденсатор C3 шунтирует эмиттерный резистор R4 (при этом, ООС по переменной составляющей тока – отсутствует). При таком значении коэффициента могут возникать искажения сигнала, поэтому необходимо вводить в цепь эмиттера элементы коррекции коэффициента усиления (см.рис.5.2).

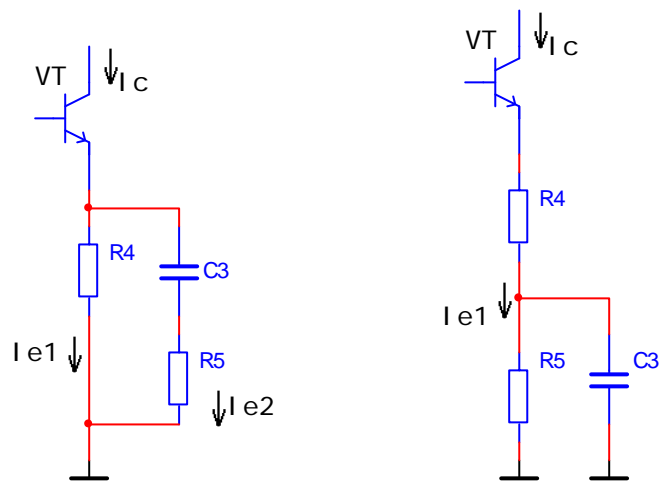


Рис. 5.2. Варианты включения RC - цепочек в эмиттерную цепь транзистора в каскаде GE

### 5.3 Практическое исследование усилительного каскада по схеме GE

- Произвести расчёт элементов схемы усилительного каскада, согласно заданного варианта (табл.5.1);
- собрать схему (рис 5.1);
- заполнить таблицы 5.2, 5.3, согласно заданного варианта;
- привести принципиальную схему каскада с расчётными элементами;

Табл.5.1

Вариант	Тип транзистора VT	$U_{im}$ , (mV)	$E_c$ , (V)	$I_{c0}$ , (mA)	$K_u$ ,
1	2N2222	40	5	0,5	30
2	BD537	30	6	1,0	40
3	BF570	25	7	2,0	50
4	BC337	20	8	3,0	60
5	2N4400	15	9	0,5	70
6	BD243B	10	10	1,0	80
7	BF820	10	11	2,0	90
8	BC847	5	12	3,0	100

Табл.5.2

Тип транзистора VT	$h_{21min}$	$h_{21max}$	$I_{d1}$ , (mA)	$I_{b0}$ , (mA)	$U_{b0}$ , (V)	$I_{c0}$ , (mA)	$U_{c0}$ , (mA)

Табл.5.3

Цепь эмиттера	$U_{i_m}$ , (mV)	$U_{out_m}$ , (mV)	$K_u$
R4			
R4    C3			
R4    R5+C3			