

3. Дифференциальный усилитель

Под дифференциальным усилителем понимают схему, основу которой образуют два более или менее одинаковых транзистора, соединенных между собой эмиттерами (рис. 3.1). Название *дифференциальный* происходит от английского слова *difference* (*разностный* усилитель): имеется в виду, что при наличии двух входных сигналов $u_{б1} \equiv u_{вх1}$ и $u_{б2} \equiv u_{вх2}$ выходной сигнал ($u_{к1} \equiv u_{вых1}$, $u_{к2} \equiv u_{вых2}$ или $u_{вых1} - u_{вых2}$) пропорционален их разности. (Здесь и далее $u_{б1}$ и $u_{б2}$ – переменные составляющие напряжений на базах

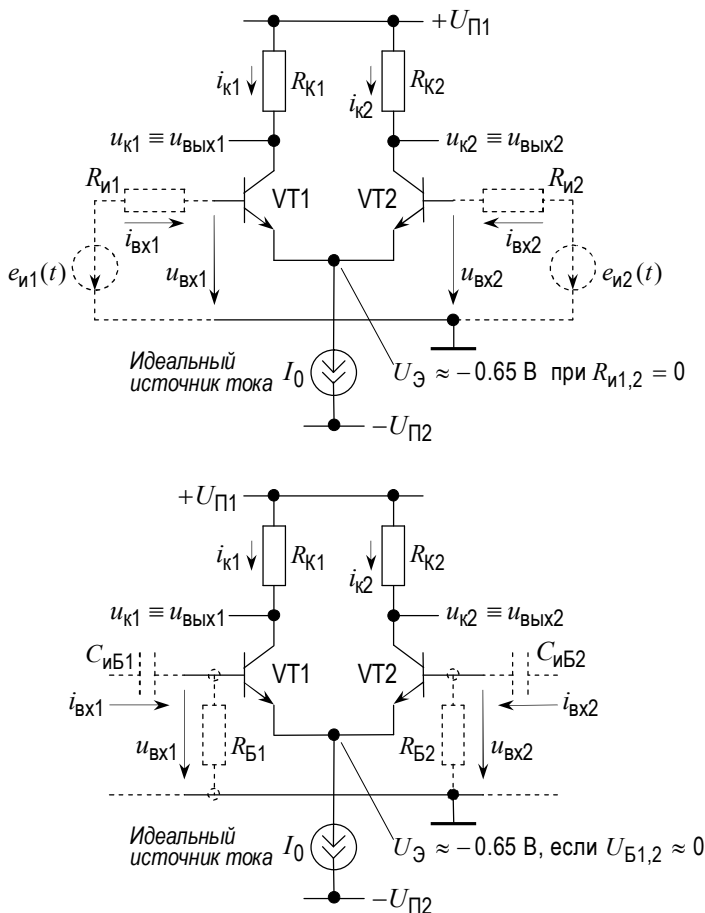


Рис. 3.1

транзисторов VT1 и VT2 относительно земли, а $u_{к1}$ и $u_{к2}$ – переменные составляющие напряжений на коллекторах транзисторов относительно земли.)

Во входных цепях дифференциального усилителя должно быть предусмотрено наличие пути для протекания постоянной составляющей базовых токов транзисторов, например, как показано пунктиром в схемах на рис. 3.1.

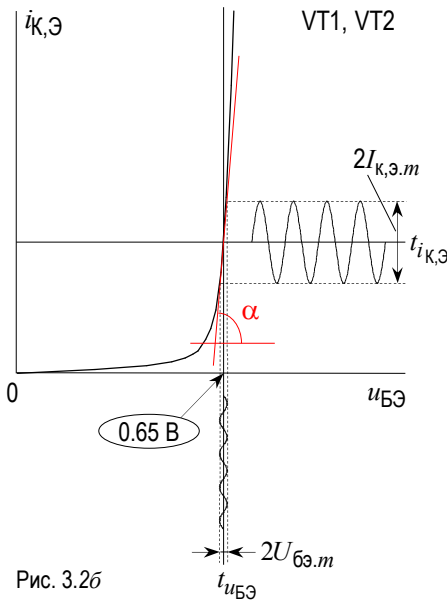
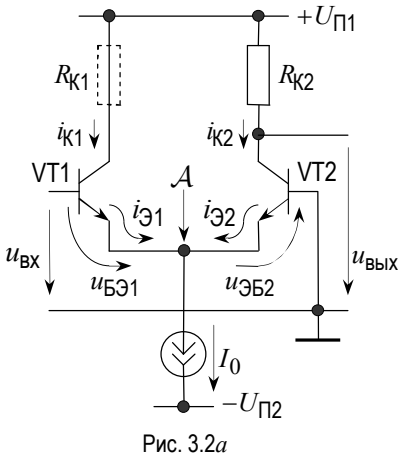
3.1. Дифференциальный усилитель с одним входом

Основные свойства дифференциального усилителя нагляднее всего продемонстрировать на примере с одним входом между базой транзистора VT1 и землей при заземленной базе транзистора VT2 (рис. 3.2а).

Рассмотрим вначале режим транзисторов по постоянному току. Пусть $u_{вх} = 0$, транзисторы одинаковы и выполнено условие, что падением напряжения на внутреннем сопротивлении источника сигнала $u_{вх}$ от протекания по нему постоянной составляющей базового тока транзистора VT1 можно пренебречь. Тогда, вследствие равенства нулю напряжения на базах обоих транзисторов относительно земли, постоянное напряжение U_A в точке А должно быть приблизительно равно -0.65 В, напряжения база–эмиттер $U_{БЭ1}$ и $U_{БЭ2}$ у обоих транзисторов одинаковы, и поэтому ток I_0 делится поровну между эмиттерами транзисторов. Таким образом, в исходном состоянии в каждом из транзисторов VT1 и VT2 течет эмиттерный и примерно равный ему коллекторный ток величиной $I_0/2$ при $U_{БЭ1} = U_{БЭ2} \approx 0.65$ В.

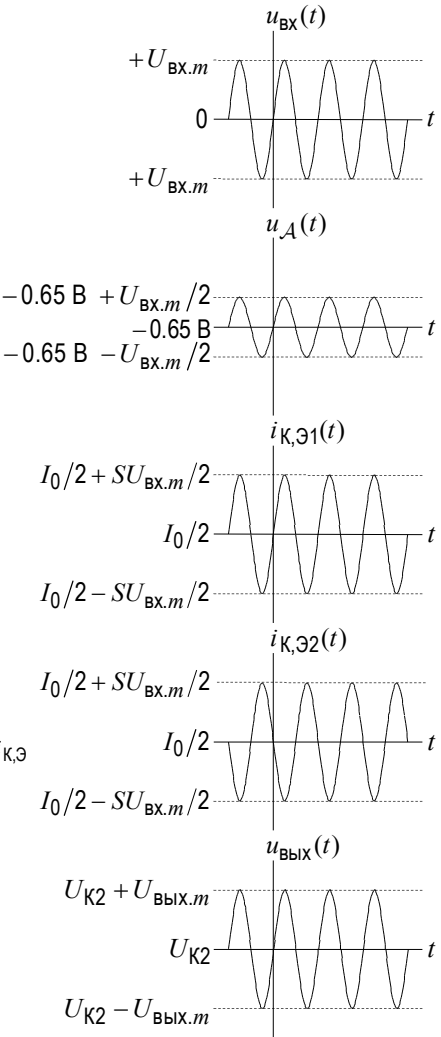
Предположим теперь, что на вход между базой транзистора VT1 и землей подан переменный сигнал $u_{вх}(t)$ с настолько малой амплитудой $U_{вх.м}$, что можно воспользоваться линеаризацией характеристики $i_{к,э}(u_{БЭ})$ в окрестности рабочей точки (рис. 3.2б). Тогда переменное напряжение в точке А должно в точности равняться половине $u_{вх}(t)$, чтобы в любой момент времени увеличение или уменьшение тока $i_{э1}$ компенсировалось точно таким же по величине изменением $i_{э2}$ в противоположном направлении. В противном случае сумма токов $i_{э1}$ и $i_{э2}$ не может оставаться постоянной и равной I_0 .

Из этого следует, что при синусоидальном воздействии переменные составляющие напряжений $u_{бэ1}(t)$ и $u_{бэ2}(t)$ равны и переменные эмиттерный и коллекторный токи в транзисторе VT2 противоположны по фазе переменным эмиттерному и коллекторному токам в транзисторе VT1 (рис. 3.2в), а напряжение на выходе $u_{вых}(t)$ совпадает по фазе (в области средних частот) с входным напряжением и его амплитуда равна $U_{вых.м} = S \cdot R_{к2} \cdot U_{вх.м}/2$.



$$\text{Для } i_{\kappa}: \operatorname{tg} \alpha = S = \left. \frac{di_{\kappa}}{du_{\text{БЭ}}} \right|_{(0.65 \text{ В}, I_0/2)}$$

$$\approx \frac{1}{r_3} = \frac{I_0/2}{U_T}; \quad U_T = \frac{kT}{qe}$$



$$U_{\kappa 2} = U_{\text{П1}} - (I_0/2) \cdot R_{\kappa 2}$$

$$U_{\text{ВЫХ.м}} = S \cdot R_{\kappa 2} \cdot U_{\text{ВХ.м}}/2$$

Рис. 3.2в

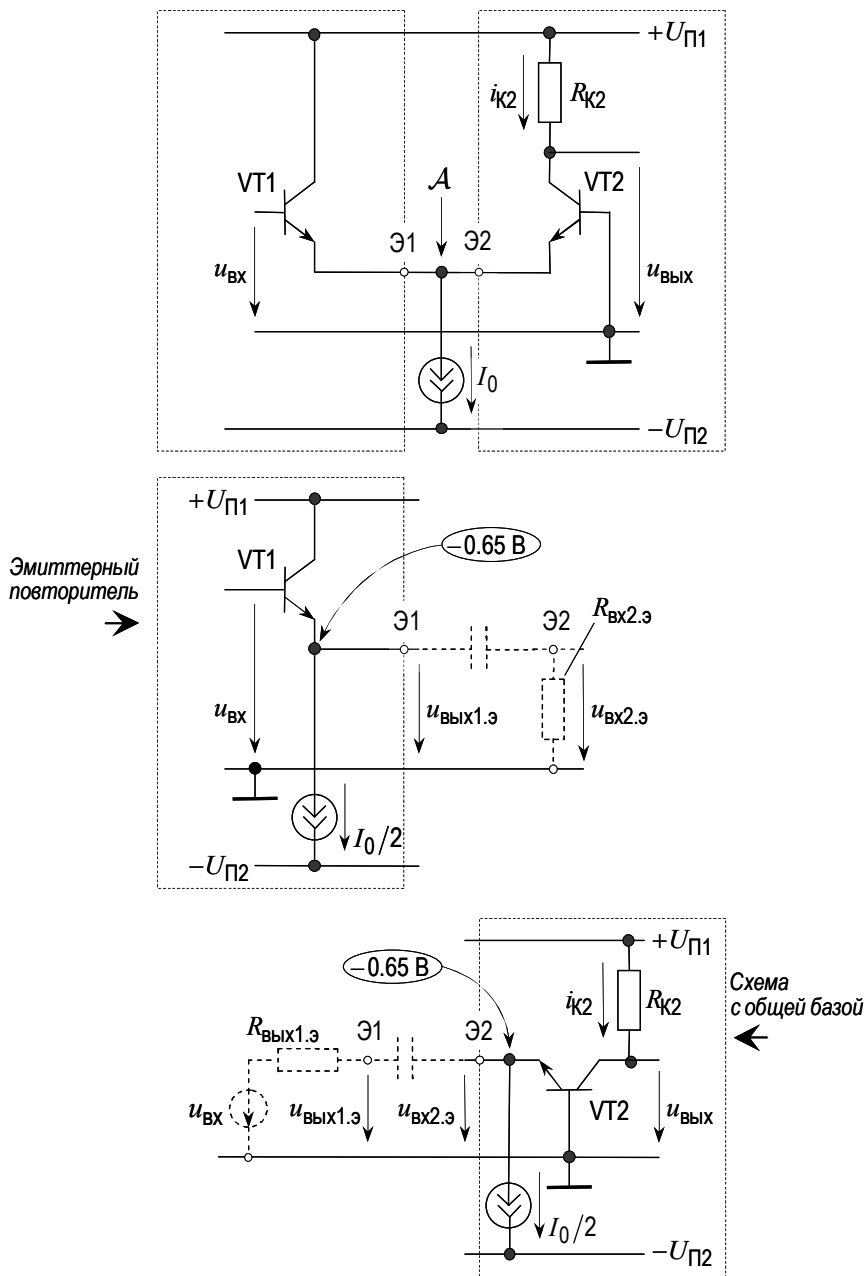


Рис. 3.3

3.2. Дифференциальный усилитель как последовательно включенные эмиттерный повторитель и схема с общей базой

Иногда бывает удобно представить схему дифференциального усилителя с одним входом в виде последовательного включения двух каскадов – эмиттерного повторителя и схемы с общей базой (рис. 3.3).

С точки зрения прохождения сигнала через эмиттерный повторитель нагрузкой последнего служит входное сопротивление схемы с общей базой $R_{\text{Вх}2.э}$, равное

$$h_{16}^{(2)} = \frac{h_{11э}^{(2)}}{h_{21э}^{(2)} + 1} = r_{э2} = \frac{U_T}{I_0/2}.$$

По теореме об эквивалентном генераторе на входе схемы с общей базой включен источник сигнала с ЭДС, равной $u_{\text{Вх}}$, и внутренним сопротивлением $R_{\text{Вых}1.э}$, равным выходному сопротивлению эмиттерного повторителя:

$$R_{\text{Вых}1.э} = \frac{h_{11э}^{(1)}}{h_{21э}^{(1)} + 1} = r_{э1} = \frac{U_T}{I_0/2}.$$

Таким образом, можно считать, что для эмиттерной цепи дифференциального усилителя справедлива эквивалентная схема, приведенная на рис. 3.4, где $u_{\text{Вх}}(t)$ – напряжение между базой транзистора VT1 и землей, а ток $i_э(t)$ равен переменной составляющей $i_{э1}(t)$ эмиттерного тока транзистора VT1 и переменной составляющей $-i_{э2}(t)$ эмиттерного тока транзистора VT2 (со знаком ‘минус’).

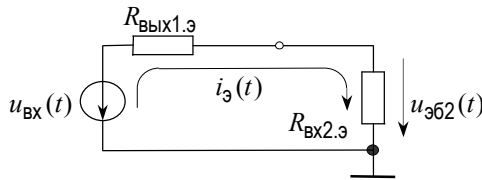


Рис. 3.4

Поскольку $R_{\text{Вых}1.э} = R_{\text{Вх}2.э}$, $u_{\text{Д}}(t) = u_{э62}(t) = u_{\text{Вх}}(t)/2$ и, следовательно, для $u_{\text{Вых}}(t)$ в схемах на рис. 3.2а и 3.3 выполняется соотношение

$$u_{\text{Вых}}(t) = -i_{к2}(t) \cdot R_{к2} = -S u_{э62}(t) \cdot R_{к2} = -S [-u_{э62}(t)] \cdot R_{к2} = S R_{к2} u_{\text{Вх}}(t)/2.$$

3.3. Коэффициенты усиления

Найденный нами коэффициент пропорциональности между переменными напряжениями на базе транзистора VT1 и на коллекторе транзистора VT2 в терминах двух входов и двух выходов, указанных на рис. 3.1, можно называть «коэффициентом усиления от входа 1 к выходу 2», введя соответствующее обозначение:

$$K_{12}(def) = \left. \frac{u_{\text{Вых}2}}{u_{\text{Вх}1}} \right|_{u_{\text{Вх}2}=0} = \frac{1}{2} SR_{K2}. \quad (3.1)$$

В тех же условиях при наличии резистора R_{K1} в коллекторной цепи транзистора VT1 (см. рис. 3.2а) переменный ток $i_{K1}(t) \approx i_{Э1}(t)$ приведет к возникновению напряжения $u_{\text{Вх}1}(t)$, равного $-i_{K1}(t) \cdot R_{K1}$. Полагая по-прежнему, что транзисторы одинаковы и для каждого из транзисторов справедлива линеаризация зависимости $i_{K,Э}(u_{БЭ})$ в окрестности рабочей точки, получим «коэффициент усиления от входа 1 к выходу 1»:

$$K_{11}(def) = \left. \frac{u_{\text{Вых}1}}{u_{\text{Вх}1}} \right|_{u_{\text{Вх}2}=0} = -\frac{1}{2} SR_{K1}. \quad (3.2)$$

Рассмотрение переменных токов и напряжений в дифференциальном усилителе, подобное тому, какое выполнено в 3.1 и 3.2, легко перенести на случай, когда подаваемый извне сигнал действует только на базе транзистора VT2 при заземленной базе транзистора VT1, и тогда для «коэффициентов усиления от входа 2 к выходам 1 и 2» будут справедливы соотношения, аналогичные (3.1) и (3.2):

$$K_{21}(def) = \left. \frac{u_{\text{Вых}1}}{u_{\text{Вх}2}} \right|_{u_{\text{Вх}1}=0} = \frac{1}{2} SR_{K1}, \quad (3.3)$$

$$K_{22}(def) = \left. \frac{u_{\text{Вых}2}}{u_{\text{Вх}2}} \right|_{u_{\text{Вх}1}=0} = -\frac{1}{2} SR_{K2}. \quad (3.4)$$

Тот факт, что коэффициенты усиления K_{12} и K_{21} положительны, означает, что при прохождении сигнала от базы какого-либо транзистора к коллектору другого транзистора фаза сигнала остается той же самой (в области средних частот), а знак «минус» у коэффициентов K_{11} и K_{22} указывает на то, что фаза сигнала на коллекторе того же транзистора отличается от фазы сигнала на базе этого транзистора на π (при заземленной базе другого транзистора).

Коль скоро дифференциальный усилитель при малых по величине переменных токах и напряжениях ведет себя как линейное устройство, к нему

применим *принцип суперпозиции*, согласно которому «отклик на сумму воздействий равен сумме откликов на каждое из воздействий порознь». Поэтому при одновременном наличии входных сигналов $u_{вх1}(t)$ и $u_{вх2}(t)$ на базах транзисторов VT1 и VT2 на коллекторе каждого из транзисторов возникает переменное напряжение, представляющее собой сумму результатов прохождения к этому коллектору каждого из входных сигналов:

$$u_{вых1} = K_{11} \cdot u_{вх1} + K_{21} \cdot u_{вх2} = \frac{1}{2} SR_{K1} \cdot (-u_{вх1} + u_{вх2}),$$

$$u_{вых2} = K_{12} \cdot u_{вх1} + K_{22} \cdot u_{вх2} = \frac{1}{2} SR_{K2} \cdot (u_{вх1} - u_{вх2}).$$

Пусть $R_{K1} = R_{K2} = R_K$ и по определению

$$K_{\text{дифф.1}}(\text{def}) = u_{вых1} / (u_{вх1} - u_{вх2}) \text{ и } K_{\text{дифф.2}}(\text{def}) = u_{вых2} / (u_{вх1} - u_{вх2})$$

– коэффициенты усиления по отношению к разностному (дифференциальному) сигналу $u_{вх1} - u_{вх2}$ для выходов 1 и 2 соответственно. Тогда

$$u_{вых1} = K_{\text{дифф.1}} \cdot (u_{вх1} - u_{вх2}) \text{ и } u_{вых2} = K_{\text{дифф.2}} \cdot (u_{вх1} - u_{вх2}) \text{ с}$$

$$K_{\text{дифф.1}} = -\frac{1}{2} SR_K \text{ и } K_{\text{дифф.2}} = \frac{1}{2} SR_K.$$

На практике довольно часто вслед за дифференциальным усилителем бывает включена схема, реагирующая на разность напряжений на коллекторах транзисторов VT1 и VT2. В таком случае характеристикой дифференциального усилителя по отношению к разностному сигналу $u_{вх1} - u_{вх2}$ служит коэффициент усиления $K_{\text{дифф}}(\text{def}) = (u_{вых1} - u_{вых2}) / (u_{вх1} - u_{вх2})$, вдвое больший по модулю по сравнению с $K_{\text{дифф.1}}$ и $K_{\text{дифф.2}}$ (при выполнении оговоренных условий).

3.4. Входные сопротивления

Входное сопротивление схемы, приведенной на рис. 3.5, – это отношение переменного напряжения $u_{вх1}$ на входе 1 к переменной составляющей $i_{б1}$ базового тока транзистора VT1:

$$R_{вх1}(\text{def}) = \frac{u_{вх1}}{i_{б1}} = \frac{u_{вх1}}{u_{бэ1} / h_{113}^{(1)}} = \frac{u_{вх1}}{u_{вх1} / 2} \cdot h_{113}^{(1)} = 2 \cdot h_{113}^{(1)},$$

где $h_{113}^{(1)} = (h_{213}^{(1)} + 1) \cdot r_{э1}$, $r_{э1} = U_T / (I_0 / 2)$.

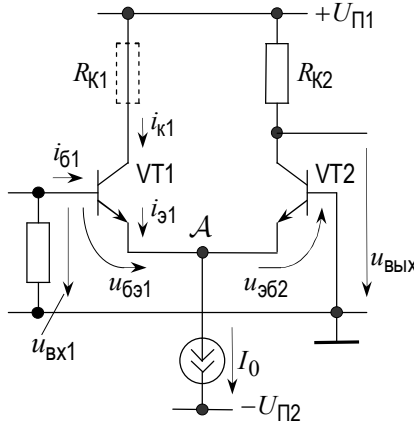


Рис. 3.5

Тот же самый результат можно получить, воспользовавшись формулой (1.2) для входного сопротивления эмиттерного повторителя на транзисторе VT1 (см. п. 3.2, рис. 3.3) в предположении, как и ранее, что транзисторы VT1 и VT2 одинаковы и поставлены в один и тот же режим по постоянному току, вследствие чего $h_{213}^{(2)} = h_{213}^{(1)}$ и $h_{113}^{(2)} = h_{113}^{(1)}$:

$$R_{вх1} = h_{113}^{(1)} + \left(h_{213}^{(1)} + 1 \right) \cdot R_{вх2.э} = h_{113}^{(1)} + \left(h_{213}^{(1)} + 1 \right) \cdot \frac{h_{113}^{(2)}}{h_{213}^{(2)} + 1} = 2 \cdot h_{113}^{(1)}.$$

Точно так же при подаче сигнала $u_{вх2}$ на вход 2 и заземленной базе транзистора VT1 входное сопротивление со стороны базы транзистора VT2 равно

$$R_{вх2}(def) = \frac{u_{вх2}}{i_{б2}} = 2 \cdot h_{113}^{(2)},$$

где $h_{113}^{(2)} = \left(h_{213}^{(2)} + 1 \right) \cdot r_{э2}$, $r_{э2} = U_T / (I_0 / 2)$.

3.5. Источники стабильного тока в эмиттерной цепи

На рис. 3.6а и 3.6б представлены дифференциальные усилители с двумя самыми простыми вариантами схем источников суммарного эмиттерного тока I_0 . О том, в какой степени реальная схема, включенная между точкой \mathcal{A} и шиной питания $-U_{П2}$, является по своим свойствам приближением к идеальному источнику тока, можно судить, сравнивая переменную составляющую тока, возникающего в этой схеме с переменной составляющей тока в эмиттерах транзисторов VT1 и VT2.

В исходном состоянии при нулевом напряжении на базах транзисторов VT1 и VT2 в точке \mathcal{A} устанавливается постоянное напряжение $U_{\mathcal{A}} = -U_{БЭ}$, обеспечивающее протекание постоянных токов $I_0/2$ в каждом из транзисторов VT1 и VT2 в предположении их идентичности ($U_{БЭ} \sim 0.65 \text{ В}$). Если на базах этих транзисторов имеются переменные напряжения $u_{ВХ1}(t)$ и $u_{ВХ2}(t)$, то возникает переменная составляющая $u_{\mathcal{A}}(t)$ напряжения в точке \mathcal{A} относительно земли. Поэтому суммарный ток эмиттеров транзисторов VT1 и VT2, строго говоря, не остается постоянным.

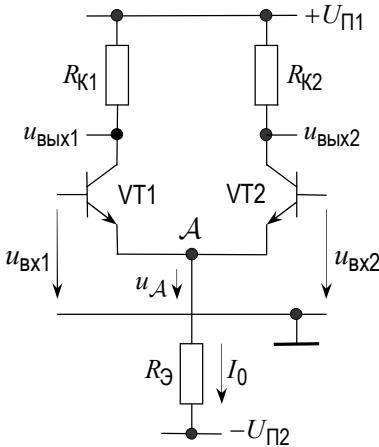


Рис. 3.6а

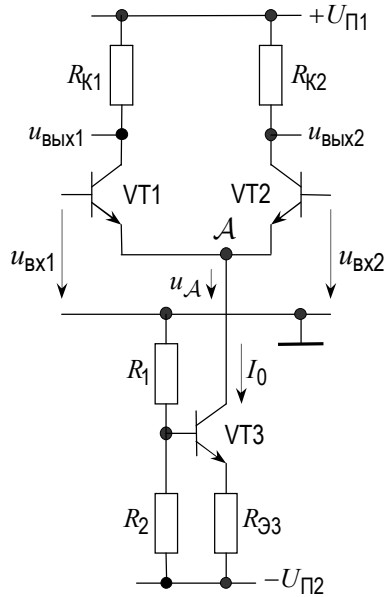


Рис. 3.6б

В схеме на рис. 3.6а при подаче сигнала $u_{\text{вх1}}(t)$ на базу транзистора VT1 и при заземленной базе транзистора VT2 переменная составляющая напряжения в точке А равна $u_{\text{А}}(t) \approx u_{\text{вх1}}(t)/2$; следовательно, по резистору $R_{\text{Э}}$ течет переменный ток $i_{R_{\text{Э}}}(t)$, равный $u_{\text{А}}(t)/R_{\text{Э}}$. В то же время в эмиттере транзистора VT1 возникает переменная составляющая тока

$$i_{\text{Э1}}(t) \approx S \cdot u_{\text{БЭ1}}(t), \text{ где } u_{\text{БЭ1}}(t) \approx u_{\text{вх1}}(t)/2.$$

Можно сказать, что резистор $R_{\text{Э}}$ удовлетворительно играет роль источника постоянного тока $I_0 = (U_{\text{П2}} - |U_{\text{А}}|)/R_{\text{Э}}$, примерно равного $U_{\text{П2}}/R_{\text{Э}}$ при условии, что $U_{\text{П2}} \gg |U_{\text{А}}|$, если ток $i_{\text{Э1}}(t)$ много больше тока $i_{R_{\text{Э}}}(t)$. Таким образом, можно пренебречь током $i_{R_{\text{Э}}}(t)$, если справедливо соотношение

$$S \cdot \frac{u_{\text{вх1}}(t)}{2} \gg \frac{u_{\text{вх1}}(t)/2}{R_{\text{Э}}}$$

или, с учетом того, что $S \approx 1/r_{\text{Э}} = (I_0/2)/U_T$ и $R_{\text{Э}} \approx U_{\text{П2}}/I_0$, достаточно, чтобы выполнялось неравенство

$$U_{\text{П2}} \gg 2U_T.$$

При $U_{\text{П2}} = 10 \text{ В}$ и $U_T \approx 0.025 \text{ В}$ при комнатной температуре величина $2U_T$ составляет 0.5 % от $U_{\text{П2}}$. Именно с такой погрешностью в этой схеме выполняется приближенное равенство токов $i_{\text{Э1}}(t)$ и $|i_{\text{Э2}}(t)|$ и пропорциональность выходных сигналов $u_{\text{вх1}}$, $u_{\text{вх2}}$ и $u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}$ разности входных сигналов $u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}$.

Источник тока I_0 на транзисторе VT3 с делителем в цепи базы и резистором в цепи эмиттера в схеме на рис. 3.6б дает лучшие результаты за счет слабой зависимости коллекторного тока транзистора VT3 от напряжения на его коллекторе.

При достаточно малых R_1 и R_2 ток I_0 в схеме на рис. 3.6б равен

$$\frac{h_{21\text{Э}}^{(3)}}{h_{21\text{Э}}^{(3)} + 1} \cdot \frac{U_{\text{П2}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{\text{БЭ3}}}{R_{\text{Э3}}},$$

где $U_{\text{БЭ3}} \approx 0.65 \text{ В}$ [при выполнении условия, что $U_{\text{П2}}/(R_1 + R_2) \gg I_0/h_{21\text{Э}}^{(3)}$].

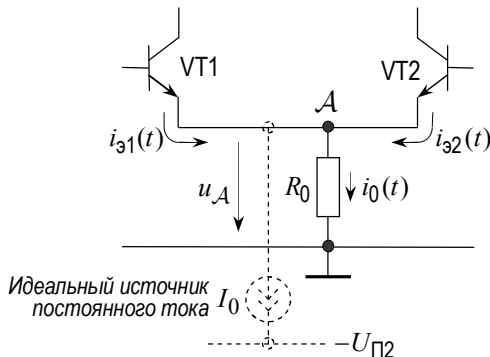


Рис. 3.7

На рис. 3.7 приведена эквивалентная схема для переменных составляющих токов и напряжений в эмиттерной цепи дифференциального усилителя, где реальный источника тока I_0 представлен идеальным источником постоянного тока I_0 (показан пунктиром) и резистором R_0 , сопротивление которого по определению равно отношению переменной составляющей $u_A(t)$ напряжения в точке А относительно земли к переменной составляющей $i_0(t)$ суммарного тока эмиттеров транзисторов VT1 и VT2, равной $i_{э1}(t) + i_{э2}(t)$, где $i_{э2}(t) \approx -i_{э1}(t)$, $|i_{э2}(t)| < i_{э1}(t)$. Чем больше R_0 , тем ближе реальная схема, – в частности, схема на транзисторе VT3 на рис. 3.6б, – к идеальному источнику постоянного тока.

У схемы с резистором $R_Э$ на рис. 3.6а $R_0 = R_Э$.

3.6. Входное сопротивление и коэффициент передачи для синфазного сигнала

Когда у входных сигналов $u_{вх1}(t)$ и $u_{вх2}(t)$ имеется не равная нулю общая составляющая $(u_{вх1}(t) + u_{вх2}(t))/2$, называемая *синфазным сигналом*, она вносит свою долю в выходные сигналы $u_{вых1}(t)$ и $u_{вых2}(t)$, делая их не строго пропорциональными разности входных сигналов $u_{вх1}(t) - u_{вх2}(t)$.

Для количественной оценки действия синфазного сигнала мысленно, путем моделирования или на реальной схеме проводят эксперимент, в котором

тестовый синфазный сигнал $u_{\text{вх.сф}}$ подается на соединенные вместе базы транзисторов VT1 и VT2, как показано на рис. 3.8.

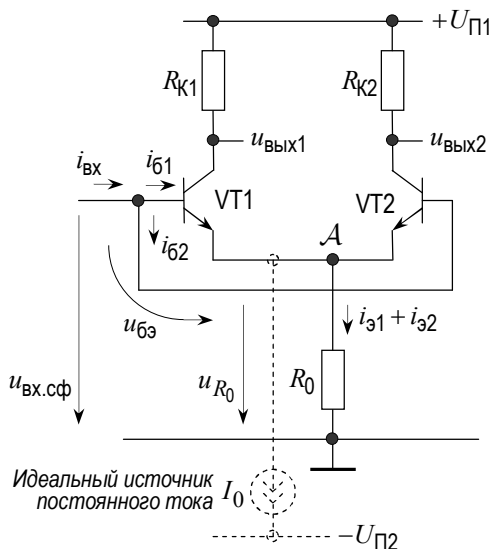


Рис. 3.8

Одной из характеристик, относящихся к синфазному сигналу, является входное сопротивление для синфазного сигнала $R_{\text{вх.сф}}$, равное по определению отношению напряжения $u_{\text{вх.сф}}$ к входному току $i_{\text{вх}}$.

О результате прохождения синфазного сигнала судят по переменным напряжениям $u_{\text{вых1}}$ и $u_{\text{вых2}}$, возникающим в таком эксперименте на коллекторах транзисторов. Отношение $u_{\text{вых1}}$ к $u_{\text{вх.сф}}$ называют коэффициентом передачи синфазного сигнала $K_{\text{сф.1}}$ для выхода 1, а отношение $u_{\text{вых2}}$ к $u_{\text{вх.сф}}$ — коэффициентом передачи синфазного сигнала $K_{\text{сф.2}}$ для выхода 2.

В простейшем случае, когда транзисторы VT1 и VT2 обладают точно одинаковыми характеристиками и находятся в одинаковом исходном состоянии с точки зрения их режима по постоянному току, входное сопротивление для синфазного сигнала оказывается равным

$$R_{\text{вх.сф}} = \frac{u_{\text{вх.сф}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{u_{63} + (i_{31} + i_{32}) \cdot R_0}{i_{61} + i_{62}} = \frac{u_{63} + 2 \cdot (h_{213} + 1) \cdot \frac{u_{63}}{h_{113}} \cdot R_0}{2 \cdot \frac{u_{63}}{h_{113}}} =$$

$$= \frac{h_{113}}{2} + (h_{213} + 1) \cdot R_0.$$

$R_{\text{вх.сф}} \approx (h_{213} + 1) \cdot R_0$, если $h_{113}/2 \ll (h_{213} + 1)R_0$. Как правило, $R_{\text{вх.сф}}$ много больше $R_{\text{вх}1,2}$.

Тот же результат можно было получить и иначе, воспользовавшись формулой (1.2) для входного сопротивления эмиттерного повторителя. Однако необходимо подчеркнуть, что приведенное выражение для $R_{\text{вх.сф}}$, так же как (1.2) для входного сопротивления эмиттерного повторителя, справедливо только при условии, что можно не принимать во внимание внутритранзисторные связи коллектор–база и коллектор–эмиттер, как об этом говорится во Введении. При увеличении сопротивления R_3 в эмиттерном повторителе и сопротивления R_0 в дифференциальном усилителе влияние внутритранзисторных связей все в большей степени сказывается на сопротивлениях $R_{\text{вх}}$ эмиттерного повторителя и $R_{\text{вх.сф}}$, приводя к значительно меньшим значениям, чем $h_{213}R_3$ и $h_{213}R_0$ соответственно.

Коэффициент передачи $K_{\text{сф.1}}$, очевидно, равен

$$K_{\text{сф.1}} = \frac{u_{\text{вых1}}}{u_{\text{вх.сф}}} = \frac{-i_{k1} \cdot R_{k1}}{i_{\text{вх}} \cdot R_{\text{вх.сф}}} = \frac{-h_{213} \cdot i_{61} \cdot R_{k1}}{2i_{61} \cdot [h_{113}/2 + (h_{213} + 1)R_0]} \approx -\frac{R_{k1}}{2R_0}.$$

Аналогичное соотношение справедливо и для коэффициента $K_{\text{сф.2}}$.

Обычно $K_{\text{сф.1}}$ и $K_{\text{сф.2}}$ по величине на один–два порядка меньше коэффициентов усиления $K_{\text{дифф.1}}$ и $K_{\text{дифф.2}}$ разностного (дифференциального) сигнала.

3.7. Токовое зеркало в качестве источника тока

Токовым зеркалом называют пару транзисторов VT3 и VT4 на рис. 3.9, включенных таким образом, чтобы коллекторный ток *ведомого* (выходного) транзистора VT4 был *зеркальным отображением* коллекторного тока другого транзистора в этой паре. Равенство коллекторных токов транзисторов VT3 и VT4 следует из того, что их напряжения база–эмиттер $U_{\text{БЭ3}}$ и $U_{\text{БЭ4}}$ тожде-

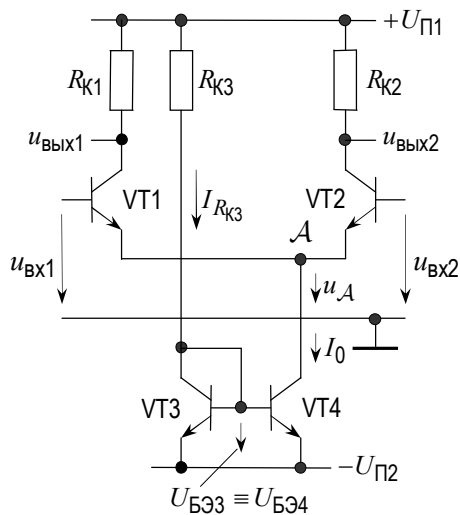


Рис. 3.9

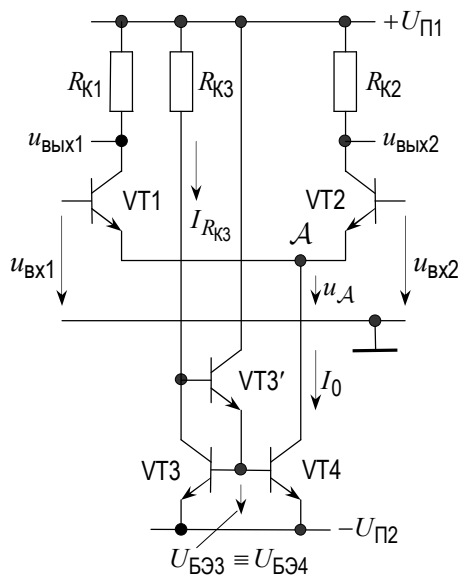


Рис. 3.10

ственно равны, а сами транзисторы специально подобраны (или изготовлены в одном технологическом процессе) так, чтобы быть одинаковыми.

Постоянный коллекторный ток I_{K3} транзистора VT3 приблизительно равен току, текущему по резистору R_{K3} :

$$I_{R_{K3}} = (U_{П1} + U_{П2} - U_{БЭ3}) / R_{K3} .$$

Из равенства коллекторных токов транзисторов VT3 и VT4 следует, что коллекторный ток транзистора VT4, в данном случае обозначенный как I_0 , должен практически не зависеть от переменного напряжения u_A на его коллекторе. Значит, токовое зеркало в эмиттерной цепи транзисторов VT1 и VT2, образующих дифференциальный усилитель, может служить хорошим источником суммарного эмиттерного тока этих транзисторов с исключительной малой переменной составляющей.

Ток $I_{R_{K3}}$ больше тока I_{K3} на сумму базовых токов транзисторов VT3 и VT4. Чтобы приблизить значение тока I_0 к величине тока $I_{R_{K3}}$, текущего по резистору R_{K3} , включают вспомогательный транзистор VT3' , как показано на рис. 3.10, в результате чего различие между $I_{R_{K3}}$ и I_{K3} уменьшается в $h_{213}^{(3')} + 1$ раз, где $h_{213}^{(3')}$ – отношение коллекторного тока транзистора VT3' к току его базы.

3.8. Токовое зеркало в качестве нагрузки

Рассматривается случай, когда в коллекторах транзисторов VT1 и VT2, образующих собственно дифференциальный усилитель, вместо резисторов R_{K1} и R_{K2} включено токовое зеркало на транзисторах VT5 и VT6 типа $p-n-p$ (рис. 3.11); *ведомым* в этой паре транзисторов является транзистор VT6.

Достоинство этой схемы заключается в высоком выходном сопротивлении вследствие того, что транзисторы VT2 и VT6 обращены к выходу в точке \mathcal{B} своими коллекторами. Другими словами, в данном случае дифференциальный усилитель ведет себя по отношению к следующей за ним нагрузке как источник тока $i_{\text{вых}}$, и поэтому сигнал в нагрузке с большим сопротивлением может быть большим по величине. Входная цепь части схемы, следующей за дифференциальным усилителем, здесь изображена условно в виде делителя напряжения из резисторов R' и R'' , который, с одной стороны, задаст исходное значение постоянного напряжения в точке \mathcal{B} :

$$U_{\mathcal{B}} = + \frac{R''}{R' + R''} \cdot U_{П1} ,$$

а с другой – служит нагрузкой с сопротивлением $R' || R''$ для переменного тока $i_{\text{ВЫХ}}$.

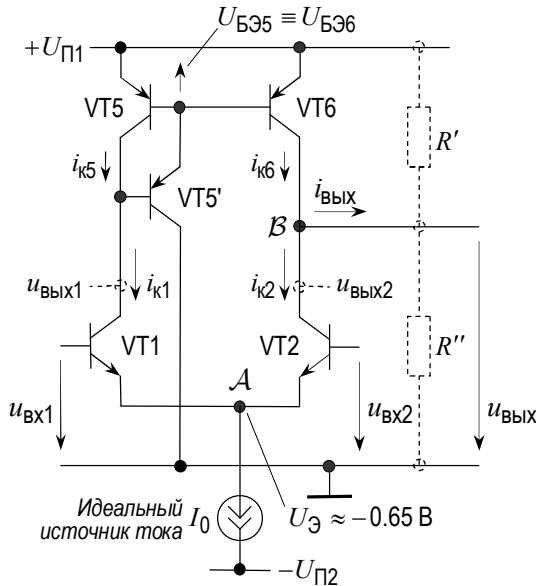


Рис. 3.11

Если справедливо предположение об одинаковости свойств транзисторов VT1 и VT2, то согласно сказанному в 3.1 и 3.3 при наличии на входах дифференциального усилителя сигналов $u_{\text{ВХ1}}$ и $u_{\text{ВХ2}}$, достаточно малых по величине, чтобы можно было характеристики $i_{\text{к}1,2}(u_{\text{БЭ1,2}})$ считать линейными в окрестности рабочей точки, переменные составляющие $i_{\text{к1}}$ и $i_{\text{к2}}$ коллекторных токов транзисторов VT1 и VT2 равны:

$$i_{\text{к1}} = \frac{1}{2} S (u_{\text{ВХ1}} - u_{\text{ВХ2}}) \text{ и } i_{\text{к2}} = -\frac{1}{2} S (u_{\text{ВХ1}} - u_{\text{ВХ2}}),$$

где S – крутизна транзисторов VT1 и VT2 ($di_{\text{к}1,2}/du_{\text{БЭ1,2}}$ в рабочей точке), равная в данном случае $(I_0/2)/U_T$ [см. (0.3)].

Коллекторные токи транзисторов VT1 и VT5 – это практически одно и то же (током базы вспомогательного транзистора VT5' пренебрегаем), то есть можно считать, что $i_{\text{к5}} \equiv i_{\text{к1}}$. Но по правилам, относящимся к токовому зеркалу на транзисторах VT5 и VT6, переменная составляющая коллекторного то-

ка транзистора VT6 должна быть зеркальным отражением коллекторного тока транзистора VT5, откуда следует, что $i_{к6} = i_{к1}$. Поэтому в результате имеем

$$i_{\text{вых}} = i_{к6} - i_{к2} = i_{к1} - i_{к2} = \frac{1}{2} S(u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}) - \left[-\frac{1}{2} S(u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}) \right] = S(u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}})$$

и

$$u_{\text{вых}} = i_{\text{вых}} \cdot (R' \parallel R'') = S \cdot (R' \parallel R'') \cdot (u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}) = K_{\text{дифф}} \cdot (u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}),$$

где $K_{\text{дифф}} = S(R' \parallel R'')$ – коэффициент усиления этой схемы по отношению к разностному (дифференциальному) сигналу $u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}$.

3.9. Числовой пример и другие дополнительные сведения

1. Числовой пример.

Пусть в схеме на рис. 3.12 сопротивления резисторов, емкости конденсаторов и напряжения питания такие, как указано на рисунке. Кроме того, предположим, что транзисторы одинаковы, постоянные составляющие эмиттерных и коллекторных токов $I_{э1} \approx I_{к1}$ и $I_{э2} \approx I_{к2}$ равны 0.5 мА при $U_{Бэ1,2} = 0.62$ В и $h_{21э} = 100$ у обоих транзисторов. Тогда режим по постоянному току (при $u_{\text{вх1}} = 0$) характеризуется следующими значениями постоянных токов и напряжений:

$$I_0 = 1 \text{ мА}, U_{э} = -0.9 \text{ В}, I_{э1} = I_{э2} = 0.5 \text{ мА}, I_{Б1} = I_{Б2} = 5 \text{ мкА},$$

$$U_{Б1} = U_{Б2} = -0.28 \text{ В}, U_{Бэ1} = U_{Бэ2} = 0.62 \text{ В}, U_{к1} = U_{к2} = 5.45 \text{ В}.$$

В данном режиме параметры, характеризующие свойства транзисторов по отношению к малым переменным составляющим, при комнатной температуре приблизительно таковы:

$$r_{э1,2} = U_T / (I_0 / 2), S_{1,2} \approx 1/r_{э1,2} = 20 \text{ мА/В}, h_{11э}^{(1,2)} = \left(h_{21э}^{(1,2)} + 1 \right) \cdot r_{э1,2} \approx 5 \text{ кОм}$$

в предположении, что для каждого из транзисторов $h_{21э} = h_{21э}$.

В этих условиях (см. п. 3.4) $R_{\text{вх1}} = 2h_{11э} = 10 \text{ кОм}$, а с учетом сопротивления резистора $R_{Б1}$ отношение переменного напряжения $u_{Б1}(t)$ на базе транзистора VT1 к входному току $i_{\text{вх}}(t)$ равно $R'_{\text{вх1}} = R_{Б1} \parallel R_{\text{вх1}} \approx 8.5 \text{ кОм}$. На частоте $f = 10 \text{ кГц}$ сопротивлением переменному току конденсатора $C_{иБ1}$ указанной емкости по сравнению с $R'_{\text{вх1}}$ можно пренебречь, и поэтому напряжение $u_{Б1}(t)$ не отличается от $u_{\text{вх}}(t)$.

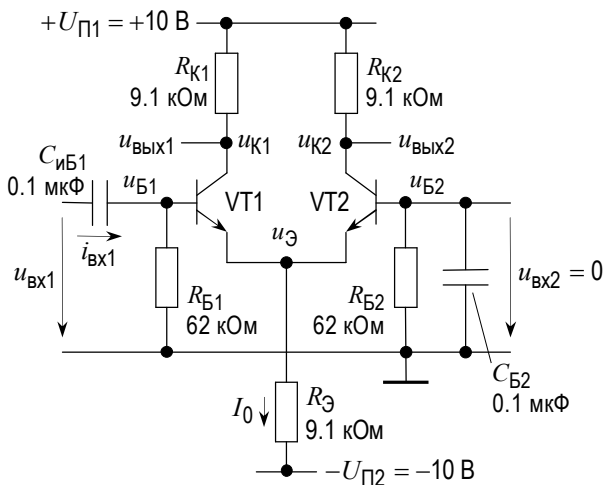


Рис. 3.12

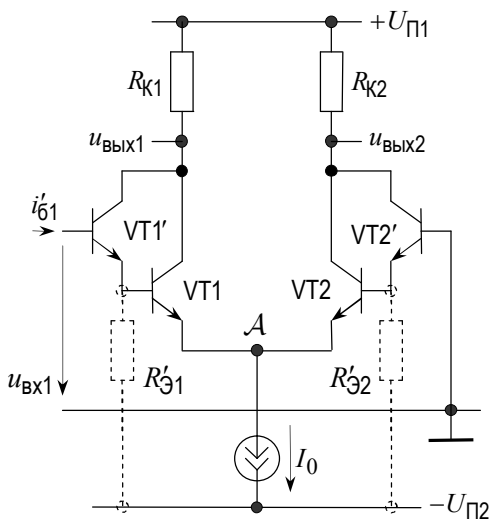


Рис. 3.13

При амплитуде входного напряжения $U_{\text{Вх1},m} = 20 \text{ мВ}$ полное напряжение $u_{\text{Э}}$ в точке соединения эмиттеров будет меняться в пределах $U_{\text{Э}} \pm U_{\text{Вх1},m}/2$, то есть в интервале значений $-0.89 \dots -0.91 \text{ В}$; следовательно, коллекторные токи транзисторов будут меняться в окрестности их исходных значений в

пределах $\pm SU_{\text{вх}1.m}/2 = \pm 0.2 \text{ мА}$. Поэтому амплитуды переменных напряжений $U_{\text{вых}1.m}$ и $U_{\text{вых}2.m}$ на выходах 1 и 2 будут равны $SR_{\text{к}} U_{\text{вх}1.m}/2 = 0.2 \text{ мА} \cdot 9.1 \text{ кОм} \approx 1.8 \text{ В}$. Таким образом, одинаковые по величине и различающиеся по знаку коэффициенты усиления K_{11} и K_{12} согласно (3.1) и (3.2) равны -90 и $+90$ соответственно.

II. Дифференциальный усилитель является одной из самых важных составных частей операционного усилителя.

III. Часто с целью увеличения входного сопротивления со стороны входов 1 и 2 используют схему Дарлингтона (рис. 3.13; см. п. 1.7 и 3.4). Входное сопротивление со стороны каждого из входов при заземленном по переменному току другом входе и при условии одинаковости пар транзисторов VT1', VT1 и VT2', VT2 равно $2 \cdot [h'_{113} + (h'_{213} + 1)h_{113}]$, где h'_{113} и h'_{213} – соответствующие параметры транзисторов VT1' и VT2', а h_{113} – отношение u_{63} к i_6 у каждого из транзисторов VT1 и VT2.

Задание 3

1. Для схемы на рис. 3.14а выберите $R_{Э}$ из интервала 4.7...18 кОм и возьмите $R_{К1} = R_{К2} = R_{Э}$. Соберите эту схему на транзисторах КТ315 (без резистора R^* , изображенного пунктиром) и подайте напряжения питания $U_{П1}$ и $U_{П2}$, равные +10 В и –10 В соответственно.

Два важных предупреждения

А) В отличие от того, как обычно поступают на практике, специально подбирая для дифференциального усилителя как можно более близкие по своим свойствам транзисторы, в этой лабораторной работе предлагается изучить свойства данной схемы с транзисторами, которые могут заметно различаться по своим характеристикам. Это потребует более аккуратного проведения измерений, в результате чего студенту предстоит глубже проникнуться логикой рассуждений, посредством которых были сделаны те или иные выводы, относящиеся к изучаемым здесь вопросам.

Б) Когда имеющийся в лаборатории компьютерный генератор сигналов непосредственно подключается к базе одного из транзисторов в качестве источника ЭДС, на базе возникает небольшое по величине постоянное напряжение. Чтобы компенсировать его, *перед началом каждой серии измерений* нужно подобрать необходимое постоянное напряжение смещения $U_{СМ}$, добиваясь того, чтобы напряжение на базе было равно нулю. Достигается это – при нулевом значении амплитуды переменного сигнала – изменением так называемого «Уровня», имеющегося в окне управления генератором.

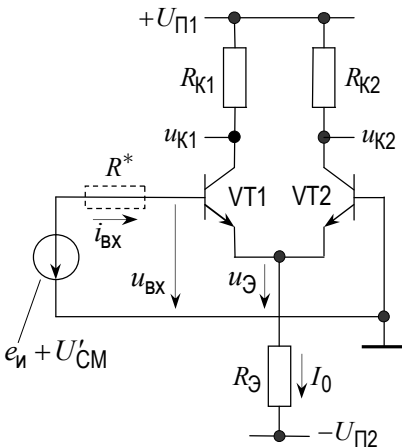


Рис. 3.14а

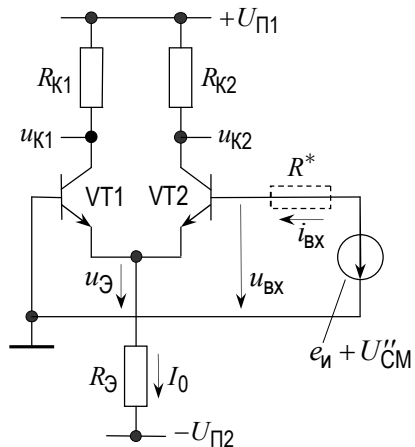


Рис. 3.14б

2. Подключите вход цифрового вольтметра постоянного напряжения к базе транзистора VT1 и подайте от лабораторного генератора (*при равной нулю амплитуде $\mathcal{E}_{и.м}$ синусоидального сигнала*) такое напряжение смещения $U'_{СМ}|_{R^*=0}$, при котором постоянное напряжение $U_{Б1}$ на базе этого транзистора равно нулю.

Измерьте постоянные напряжения $U_{К1}$ и $U_{К2}$ на коллекторах транзисторов VT1 и VT2 и постоянное напряжение $U_{Э}$ в точке соединения эмиттеров.

Путем расчета найдите токи

$$I_0 = (U_{П2} - U_{Э})/R_{Э}, \quad I_{К1} = (U_{П1} - U_{К1})/R_{К1} \quad \text{и} \quad I_{К2} = (U_{П1} - U_{К2})/R_{К2}.$$

Считая $I_{Э1} \approx I_{К1}$ и $I_{Э2} \approx I_{К2}$, вычислите дифференциальные сопротивления $r_{Э1} = U_T/I_{Э1}$ и $r_{Э2} = U_T/I_{Э2}$ эмиттерных переходов транзисторов VT1 и VT2. Определите ожидаемые значения крутизны каждого из транзисторов VT1 и VT2: $S_1 \approx 1/r_{Э1}$ и $S_2 \approx 1/r_{Э2}$.

3. Эксперименты, связанные с прохождением синусоидального сигнала, выполняйте на частоте $f = 10$ кГц.

Задайте амплитуду синусоидального сигнала в источнике $\mathcal{E}_{и.м}$ такой, при которой амплитуды переменных напряжений $U_{К1.м} \equiv U_{Вых1.м}$ и $U_{К2.м} \equiv U_{Вых2.м}$ на коллекторах транзисторов VT1 и VT2 приблизительно равны половине постоянных напряжений $U_{К1}$ и $U_{К2}$ на коллекторах. Измерьте амплитуды переменных напряжений $U'_{Б1.м}|_{R^*=0}$ и $U'_{Э.м}$ на базе транзистора VT1 и в точке соединения эмиттеров, а также выходных напряжений $U'_{К1.м}$ и $U'_{К2.м}$.

(Замечание: $U'_{Б1.м}|_{R^*=0}$ может отличаться от значения $\mathcal{E}_{и.м}$, указанного в окне управления генератором, из-за погрешностей в плате сопряжения компьютерного генератора с макетной платой студента и вследствие конечности выходного сопротивления источника сигнала.)

Определите коэффициенты усиления:

$$K_{11} = \frac{U'_{К1.м}}{U'_{Б1.м}|_{R^*=0}} \quad \text{и} \quad K_{12} = \frac{U'_{К2.м}}{U'_{Б1.м}|_{R^*=0}}.$$

Найдите амплитуды переменных составляющих коллекторных токов, равные $I'_{К1.м} = U'_{К1.м}/R_{К1}$ и $I'_{К2.м} = U'_{К2.м}/R_{К2}$, и значения крутизны тран-

зисторов VT1 и VT2: $S'_1 = I'_{k1.m} / (U'_{b1.m}|_{R^*=0} - U'_{э.m})$ и $S'_2 = I'_{k2.m} / U'_{э.m}$. Сравните значения крутизны S'_1 и S'_2 , следующие из эксперимента, с ожидаемыми значениями S_1 и S_2 .

Убедитесь в том, что разность переменных составляющих коллекторных (эмиттерных) токов $I'_{k1.m} - I'_{k2.m}$ равна переменной составляющей тока, текущего по резистору $R_э$: $I'_{R_э.m} = U'_{э.m} / R_э$.

4. Включите между источником сигнала и базой транзистора VT1 резистор R^* , изображенный на рис. 3.14а пунктиром. Сопротивление этого резистора следует выбрать приблизительно равным ожидаемому значению входного сопротивления дифференциального усилителя со стороны входа 1 $R_{вх1} = (h_{213}^{(1)} + 1) \cdot (r_{э1} + r_{э2})$ в предположении, что коэффициент $h_{213}^{(1)}$ у транзистора VT1 равен 100.

Подключите вход цифрового вольтметра постоянного напряжения к базе транзистора VT1 и подайте от лабораторного генератора (*при равной нулю амплитуде $\mathcal{E}_{и.m}$ синусоидального сигнала*) такое напряжение смещения $U'_{см}|_{R^* \neq 0}$, при котором постоянное напряжение $U_{б1}$ на базе этого транзистора равно нулю.

Задайте амплитуду синусоидального сигнала в источнике $\mathcal{E}_{и.m}$ примерно вдвое больше, чем это было сделано в п. 3 настоящего задания.

Измерьте амплитуды сигнала $\mathcal{E}'_{и.m}$ и $U'_{b1.m}|_{R^* \neq 0}$ слева и справа от резистора R^* . Вычислите амплитуду входного тока (переменной составляющей базового тока транзистора VT1) $I'_{вх.m} = (\mathcal{E}'_{и.m} - U'_{b1.m}|_{R^* \neq 0}) / R^*$ и найдите действительное значение входного сопротивления дифференциального усилителя со стороны входа 1: $R'_{вх1} = \frac{U'_{b1.m}|_{R^* \neq 0}}{I'_{вх.m}}$.

(Замечание: $\mathcal{E}'_{и.m}$ может отличаться от значения $\mathcal{E}_{и.m}$, указанного в окне управления генератором из-за погрешностей в плате сопряжения компьютерного генератора с макетной платой студента и вследствие конечности выходного сопротивления источника сигнала.)

Определите фактическое значение коэффициента $h_{213}^{(1)}$ транзистора VT1: $h_{213}^{(1)} = R'_{вх1} / (r'_{э1} + r'_{э2}) - 1$, где $r'_{э1} = 1/S'_1$ и $r'_{э2} = 1/S'_2$, а S'_1 и S'_2 – найденные экспериментально ранее (в п. 3 настоящего задания) значения крутизны транзисторов VT1 и VT2.

5. Перейдите к схеме на рис. 3.14б. Выполните действия, предусмотренные в п. 2 этого задания после того, как будет выставлено необходимое напряжение смещения $U_{\text{СМ}}''|_{R^*=0}$ в источнике сигнала. Убедитесь в том, что постоянные напряжения и токи в этой схеме такие же по величине, какими они были в схеме на рис. 3.14а.

Повторите со схемой на рис. 3.14б измерения, аналогичные измерениям, выполненным в п. 3 этого задания для схемы на рис. 3.14а. Рекомендуется в рабочих записях, относящихся к новой схеме, измеренные напряжения и результаты расчетов, выполненные на их основе, пометить двумя штрихами. Результатом выполнения со схемой на рис. 3.14б действий, аналогичных указанным в п. 4 задания, должно быть экспериментальное определение входного сопротивления $R_{\text{вх}2}$ дифференциального усилителя со стороны входа 2 и коэффициента $h_{21\beta}^{(2)}$ для транзистора VT2.

6. В этом упражнении предстоит измерить входное сопротивление и коэффициенты передачи дифференциального усилителя для синфазного сигнала.

В предыдущей схеме (рис 3.14а,б) соедините базы транзисторов, как показано на рис. 3.15, и включите резистор R^{**} между источником сигнала и входом схемы (точкой, в которой соединены базы транзисторов). Сопротивление резистора R^{**} возьмите равным 68...130 кОм. Подайте от генератора синусоидальный сигнал с амплитудой $\mathcal{E}_{и.м}$ из интервала 1...4 В.

Измерьте напряжения $\mathcal{E}'_{и.м}$ и $U_{\text{вх.м}}$ слева и справа от резистора R^{**} и переменные напряжения $U_{\text{к}1.м}$ и $U_{\text{к}2.м}$ на коллекторах транзисторов.

Найдите входное сопротивление для синфазного сигнала

$$R_{\text{вх.сф}} = \left[U_{\text{вх.м}} / (\mathcal{E}'_{и.м} - U_{\text{вх.м}}) \right] \cdot R^{**}$$

и коэффициенты передачи $K_{\text{сф.1}} = U_{\text{к}1.м} / U_{\text{вх.м}}$ и $K_{\text{сф.2}} = U_{\text{к}2.м} / U_{\text{вх.м}}$. (При измерении $K_{\text{сф.1}}$ и $K_{\text{сф.2}}$ имеет смысл подавать сигнал $\mathcal{E}_{и}$ непосредственно в точку соединения баз транзисторов, удаляя резистор R^{**} или замыкая его накоротко.)

7. (Факультативно.) Видоизмените схему, предназначенную для измерения характеристик дифференциального усилителя по отношению к синфазному сигналу (рис. 3.15), дополнив ее генератором стабильного тока на транзисторе VT3 (рис. 3.16). Сопротивления резисторов R_1 и R_2 в базе транзистора VT3 возьмите одинаковыми и равными нескольким килоомам, а со-

противление резистора R_3 необходимо подобрать таким, чтобы постоянный ток I_0 в эмиттерной цепи дифференциального усилителя имел то же значение, что и во всех предыдущих экспериментах в этом задании.

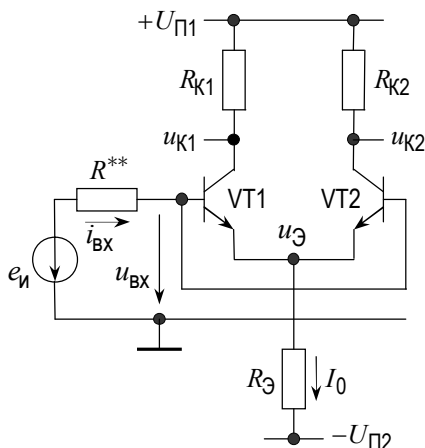


Рис. 3.15

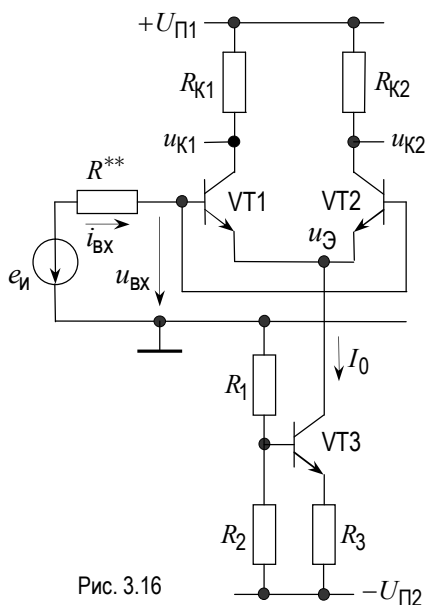


Рис. 3.16

Измерьте входное сопротивление $R_{вх.сф} = [U_{вх.м} / (\mathcal{E}'_{и.м} - U_{вх.м})] \cdot R^{**}$ для синфазного сигнала схемы с генератором стабильного тока на транзисторе VT3 и коэффициенты передачи $K_{сф.1} = U_{к1.м} / U_{вх.м}$ и $K_{сф.2} = U_{к2.м} / U_{вх.м}$. Сравнивая полученные здесь значения $K_{сф.1}$ и $K_{сф.2}$ со значениями этих коэффициентов из предыдущего пункта задания (для схемы с $R_Э$ в цепи эмиттеров), найдите оценку эквивалентного сопротивления R_0 по переменному току со стороны коллектора транзистора VT3.

Рассчитайте величину переменной составляющей коллекторного тока транзистора VT3, равную $U_{э.м} / R_0$, и сравните ее с разностью переменных составляющих эмиттерных токов транзисторов VT1 и VT2 в одной из схем с резистором $R_Э$ в цепи эмиттера (рис. 3.14а и 3.14б), которая была найдена ранее (например, при выполнении п. 3 настоящего задания: $I'_{к1.м} - I'_{к2.м} \approx U'_{э.м} / R_Э$).