

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
КАФЕДРА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Исследование и расчет однокаскадных усилителей на биполярном транзисторе

Методические указания
к выполнению лабораторной работы

Севастополь
2007

УДК 621.396.6

Исследование и расчет схем усилителей на биполярных транзисторах

: Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине "Аналоговая схемотехника" для студентов дневной и заочной форм обучения специальности " " / .Тестоедов, Васин – Севастополь: СевНТУ, 2007.–12с.

Ц е л ь у к а з а н и й : Обеспечить студентам возможность самостоятельной подготовки к выполнению и защите лабораторной работы.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры электронной техники , протокол № от 2007 г.

Рецензент:

Севастопольского национального технического университета.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с методикой расчета и обеспечения оптимальных режимов работы схем усилителей на биполярных транзисторах. Экспериментально исследовать работу схем усилителей с заданной величиной коэффициента усиления.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При проектировании транзисторных усилителей напряжения с заданным коэффициентом усиления необходимо принимать во внимание то, что у транзисторов одного типа коэффициенты усиления могут отличаться в два и более раз. Кроме того, значения параметров транзистора зависят от температуры. Рабочую точку по постоянному току необходимо выбирать в середине динамического диапазона, чтобы при изменении параметров транзистора усиленный сигнал не попадал в область насыщения или отсечки, что приводит к нелинейным искажениям. В этой связи, необходимо использовать такие схемотехнические решения, которые обеспечивают стабильность коэффициента усиления каскада и положения рабочей точки как при изменении коэффициента усиления транзистора, так и при изменении температуры в заданном диапазоне.

Рассмотрим каскад с общим эмиттером, показанный на рис. 1.

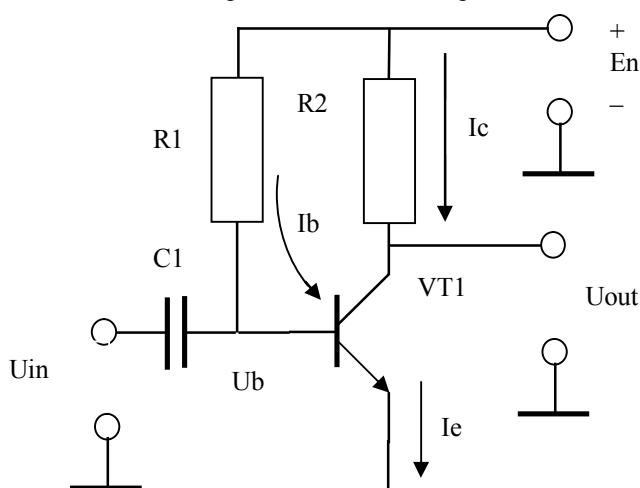


Рисунок 1. Схема усилителя на биполярном транзисторе, включенным с общим эмиттером.

В этой схеме положение рабочей точки на выходной вольт-амперной характеристике определяется сопротивлением резисторов R1 и R2, а также коэффициентом усиления транзистора в схеме с общим эмиттером B. Резистор R1 определяет величину базового тока Ib, а R2 величину тока коллектора Ic.

В эмиттере протекает сумма базового и коллекторного тока

$$I_e = I_b + I_c \quad (1)$$

Ток коллектора определяется током базы и коэффициентом усиления транзистора B

$$I_c = B * I_b \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в (1) получим зависимость тока эмиттера от тока базы

$$I_e = (B + 1) * I_b \quad (3)$$

Если $B \gg 1$, что как правило справедливо, получим

$$I_c \approx I_e = I_{ce} \quad (4)$$

то есть с некоторым допущением можно считать, что через коллектор и эмиттер протекает один и тот же ток.

Для максимального динамического диапазона, напряжение на выходе усилителя в статическом режиме (при отсутствии входного переменного сигнала) должно быть равно половине напряжения источника питания

$$U_{out} = E_n * K_E = E_n - I_c * R_2 = E_n - I_b * B * R_2 \quad (5)$$

где $KE = U_{out} / E_n$ – коэффициент, определяющий положение рабочей точки относительно напряжения питания (если рабочая точка соответствует половине напряжения питания $KE = 0.5$).

Ток базы по постоянному сигналу задается резистором R_1 и равен

$$I_b = \frac{E_n - U_{be}}{R_1} \quad (6)$$

$$U_{out} = E_n - B * \frac{R_2}{R_1} * (E_n - U_{be}) \quad (7)$$

где, U_{be} – напряжение на переходе база – эмиттер.

Напряжение U_{be} для кремниевых транзисторов равно 0.6 ... 0.7 В и, если $E_n \gg U_{be}$

$$U_{out} = E_n * \left(1 - B * \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (8)$$

Из выражения (7) и (8) видно, что положение рабочей точки определяется соотношением резисторов R_1 и R_2 , коэффициентом усиления транзистора и напряжением питания. Поскольку у транзисторов даже одного типа коэффициент усиления отличается более, чем в два раза, положение рабочей точки также будет изменяться. Если расчет производился при $B = 100$, $E_n = 10V$ и $U_{out} = 5V$, то в случае $B = 50$ рабочая точка сместится и будет соответствовать $U_{out} = 7.5V$, что приведет к сужению динамического диапазона. Поэтому для данной схемы требуется индивидуальная подстройка путем изменения номинала резистора R_1 .

Положение рабочей точки относительно напряжения питания определяется коэффициентом KE

$$KE = 1 - B * \frac{R_2}{R_1} * \left(1 - \frac{U_{be}}{E_n} \right) \quad (9)$$

Поскольку $E_n \gg U_{be}$

$$KE \approx 1 - B * \frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

При изменении температуры сопротивление резисторов R_1 и R_2 изменяется с одним и тем же коэффициентом (температурным коэффициентом сопротивления), следовательно, их отношение остается постоянным. Таким образом, для данной схемы температурная стабильность положения рабочей точки определяется только изменением B с температурой.

Стабильность положения рабочей точки является очень важным параметром рассматриваемого каскада, поскольку при изменении рабочей точки изменяется коэффициент передачи каскада по напряжению на переменном сигнале K_u .

$$K_u = \frac{dU_{out}}{dU_b} = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_b} \quad (11)$$

Подставив U_{out} из выражения (5) получим

$$K_u = \frac{d(E_n - I_b * B * R_2)}{dU_b} = - \frac{dI_b}{dU_b} * B * R_2 \quad (12)$$

Минус в выражении (12) означает сдвиг фазы напряжения на выходе на 180° относительно входного сигнала (при увеличении напряжения на входе напряжение на выходе уменьшается). Ток базы связан со входным напряжением следующим соотношением

$$I_b = I_0 * \left(\exp\left(\frac{U_b}{\phi_T}\right) - 1 \right) \quad (13)$$

где, I_0 – обратный ток перехода база – эмиттер,

$$\varphi_T = \frac{K * T}{e} - \text{тепловой потенциал равный при температуре } + 27^\circ\text{C}.$$

Продифференцировав выражение (13) по U_b получим

$$\frac{dI_b}{dU_b} = \frac{I_b}{\varphi_T} \quad (14)$$

где, I_b – ток базы в статическом режиме, определяемый выражением (6).

Обратная величина выражения (14) является дифференциальным входным сопротивлением каскада R_d в рабочей точке входной характеристики (при статическом токе базы равным I_b).

$$R_d = \frac{\varphi_T}{I_b} \quad (15)$$

Формула (14) получена в предположении, что весь входной ток является током базы. Это допущение вполне приемлемо, так как $R_d \ll R_1$.

Подставив (14) в (12) получим

$$K_u = -\frac{I_b}{\varphi_T} * B * R_2 = -\frac{I_c}{\varphi_T} * R_2 \quad (16)$$

Если одним из исходных параметров для расчета является положение рабочей точки на выходной характеристике U_{out} , то, используя соотношение (5) получим

$$K_u = -\frac{(E_n - U_{out}) * R_2}{\varphi_T * R_2} = -\frac{E_n - U_{out}}{\varphi_T} \quad (17)$$

На рис. 2 показана рассчитанная по формуле (17) зависимость коэффициента усиления по напряжению K_u каскада с общим эмиттером от значения напряжения в рабочей точке выходной характеристики. Напряжение питания $E_n = 10\text{В}$. Видно, что при изменении положения рабочей точки от 5В до 6В коэффициент передачи изменяется от 190 до 150. При изменении коэффициента усиления транзистора от 100 до 50 K_u изменится от 190 до 95 за счет изменения положения рабочей точки (8). Это является существенным недостатком схемы с общим эмиттером.

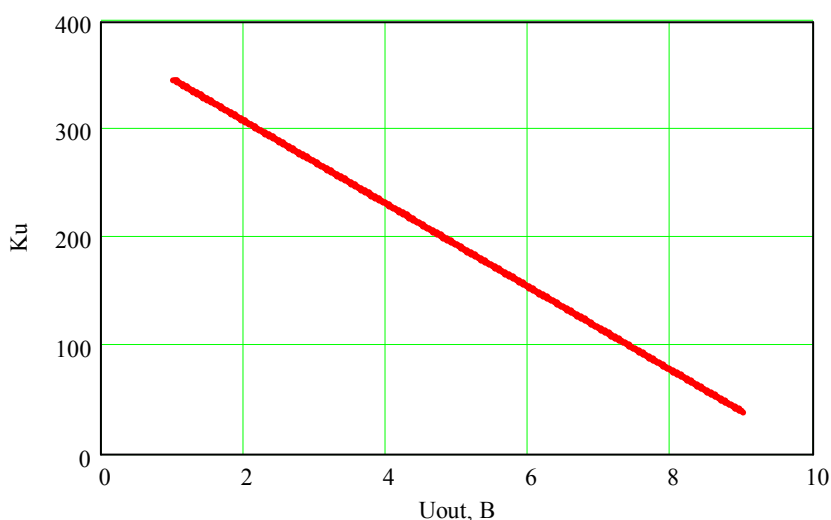


Рисунок 2. Зависимость коэффициента усиления по напряжению каскада с общим эмиттером K_u от значения напряжения в рабочей точке выходной характеристики. Напряжение питания $E_n = 10\text{В}$.

Еще одним недостатком данной схемы является низкое входное сопротивление по переменному сигналу, что вызывает необходимость уменьшать выходное сопротивление источника сигнала (оно должно быть в 10...20 раз меньше входного сопротивления усилителя). Из выражения (15) и рис. 3 видно, что получить значения входного

дифференциального сопротивления больше 1кОм можно только при токах базы $I_b < 50 \text{ мкА}$. А в этом случае и выходное сопротивление каскада будет достаточно большим, что ухудшит его нагрузочную способность.

Низкое входное дифференциальное сопротивление вызывает необходимость использования конденсатора C_1 большой емкости. Конденсатор C_1 не пропускает постоянную составляющую от источника сигнала в базу транзистора. В тоже время наличие C_1 не должно изменять (уменьшать) амплитуду входного сигнала. Следовательно, сопротивление конденсатора на самой низкой частоте источника сигнала должно быть меньше (по крайней мере в 10...20 раз) входного дифференциального сопротивления усилителя.

$$X_{C1} = \frac{1}{2 * \pi * F_L * C1} \leq \frac{R_d}{20} = \frac{\varphi_T}{20 * I_b}$$

$$C1 \geq \frac{20}{2 * \pi * F_L * R_d} = \frac{20 * I_b}{2 * \pi * F_L * \varphi_T} \quad (18)$$

Если нижняя граница частотного диапазона $F_L = 100 \text{ Гц}$, а ток базы $I_b = 0.05 \text{ мА}$, емкость конденсатора C_1 должна быть больше 60 мкФ.

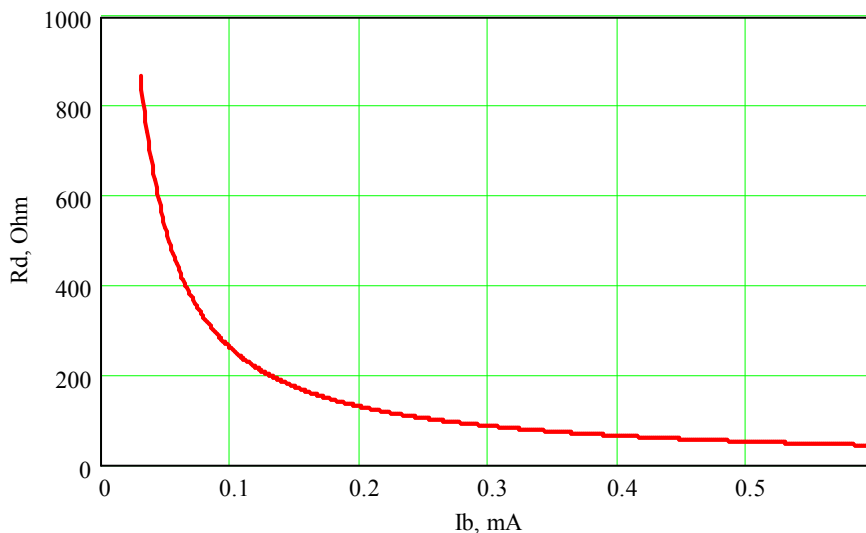


Рисунок 3. Зависимость дифференциального входного сопротивления усилителя с общим эмиттером от тока базы.

Зависимость входного сопротивления от базового тока вносит ограничение на динамический диапазон усилителя, так как при увеличении амплитуды входного сигнала появляются нелинейные искажения. Эта зависимость обусловлена нелинейностью входной вольт – амперной характеристики эмиттерного перехода транзистора. Из выражения (13) видно, что базовый ток I_b связан со входным напряжением U_b экспоненциальной зависимостью, которая может быть аппроксимирована как линейная только в узком диапазоне (только при малых изменениях входного напряжения). На рис. 4 показан фрагмент входной вольт – амперной характеристики. Входное напряжение изменяется на $\pm 10 \text{ мВ}$ относительно точки статического режима. Видно, что при изменении входного напряжения на величину, не превышающую $\pm 1 \text{ мВ}$, изменение тока относительно тока в рабочей точке (0.05 мА), как в сторону увеличения, так и сторону уменьшения примерно одинаковы. Однако при увеличении амплитуды входного напряжения входной ток изменяется не пропорционально. Так при увеличении входного напряжения на $+10 \text{ мВ}$ входной ток составляет 0.073 мА , то есть возрос на 0.023 мА . При уменьшении входного напряжения на такую же величину, входной ток равен 0.033 мА , то есть уменьшился на 0.017 мА . Таким образом, положительная полуволна входного напряжения будет усилена каскадом больше, чем отрицательная, что и приводит к появлению нелинейных искажений. На рис. 5 приведена зависимость асимметрии амплитуд полуволн базового тока в процентах от амплитуды входного сигнала. Видно, что даже при малом сигнале $\pm 1 \text{ мВ}$, асимметрия амплитуд полуволн базового тока составляет 5%, что не позволяет получить высококачественное усиление при использовании такого каскада. Дальнейшее уменьшение амплитуды входного сигнала ограничивается собственными шумами, уровень которых для биполярных транзисторов составляет 1...3 мкВ, приведенных ко входу. Эти шумы усиливаются каскадом вместе с полезным сигналом.

Кардинальным способом уменьшения нелинейных искажений является использования в качестве источника сигнала генератора тока. Другим, достаточно широко используемым методом, является включением в эмиттерную цепь резистора, увеличивающего входное сопротивление и линеаризующего входную характеристику.

Расчет схемы по постоянному току производится исходя из необходимого тока I_c , напряжения питания E_n , коэффициента усиления каскада по напряжению K_u и коэффициента усиления транзистора B . Динамический диапазон данной схемы чаще всего определяется проявлением нелинейности во входной цепи и гораздо реже ограничивается выходной цепью. Поэтому рабочую точку на выходной характеристики выбирают исходя из необходимого коэффициента усиления каскада по напряжению K_u . Выражение для напряжения на выходе усилителя U_{out} получается из соотношения (17)

$$U_{out} = E_n - K_u * \varphi_T$$

Номиналы резисторов R_1 и R_2 определяются выражениями

$$R_1 = \frac{E_n - U_{be}}{I_b} = \frac{(E_n - U_{be}) * B}{I_c} \approx \frac{E_n * B}{I_c} \quad (19)$$

$$R_2 = \frac{E_n - U_{out}}{I_c} \quad (20)$$

Из выражений (19) и (20) можно получить соотношение сопротивлений резисторов R_1 и R_2

$$R_1 = \frac{R_2 * B}{1 - K_E}$$

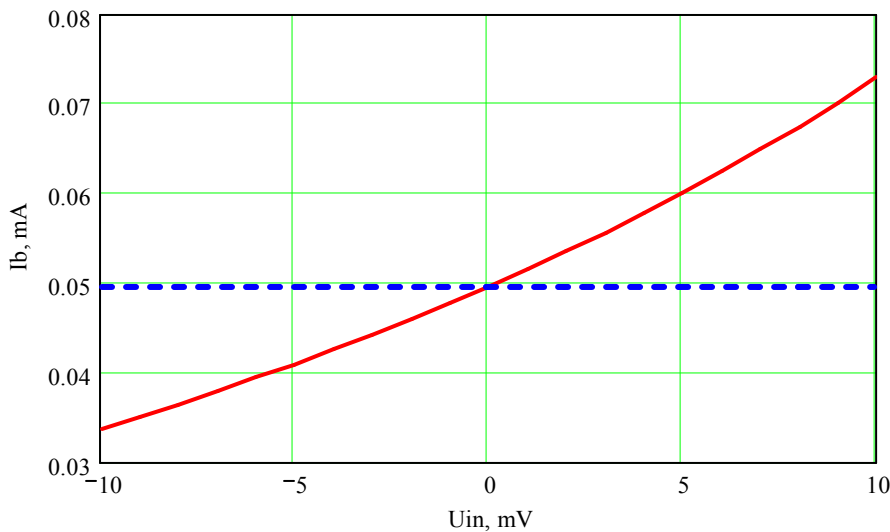


Рисунок 4. Зависимость тока базы I_b от напряжения входного сигнала U_{in} , поданного относительно рабочей точки, соответствующей статическому току 0.05 mA (пунктирная линия).

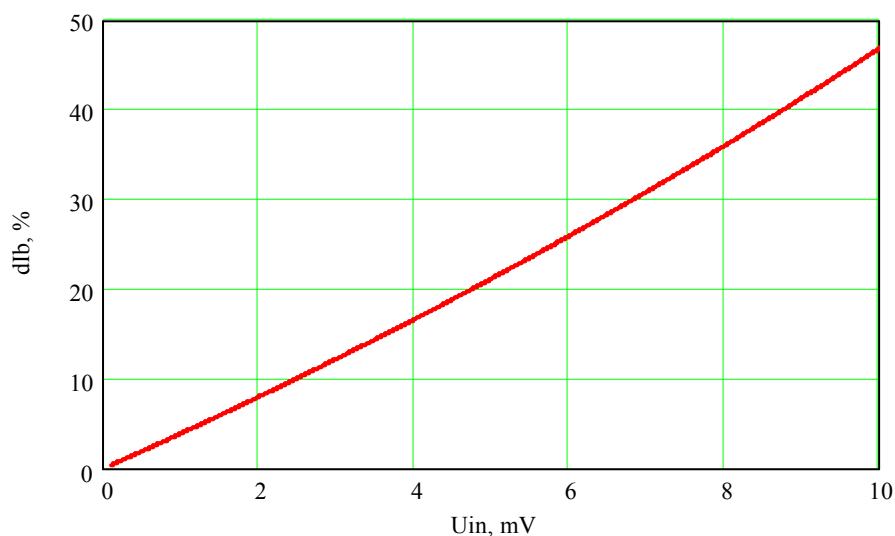


Рисунок 5. Зависимость асимметрии амплитуд полувольт базового тока в dIb процентах от амплитуды входного сигнала U_{in} .

На рис. 6 приведена схема усилительного каскада с отрицательной обратной связью в эмиттере. Рассмотрим вначале статический режим работы усилителя. В этом случае резистор R_4 и конденсатор C_1 можно исключить из рассмотрения. Статический базовый ток I_b задается резистором R_1 . Этот ток вызывает прохождение тока из коллектора в эмиттер I_{ce} . Связь между этими токами описываются соотношениями (1) -(4). Резистор R_3 является резистором отрицательной обратной связи, стабилизирующим ток базы. При возрастании базового тока возрастает и ток эмиттера, вследствие чего повышается напряжение на резисторе R_3 , а значит и на базе транзистора. Ток через резистор R_1 уменьшается и уменьшается ток эмиттера. Однако, наличие резистора R_3 сужает динамический диапазон усилителя, поскольку напряжение на эмиттере транзистора равно падению напряжения на этом резисторе. Схему необходимо рассчитывать так, чтобы потенциал на резисторе R_3 был сравним (или несколько больше) с напряжением на переходе база – эмиттер. В этом случае достигается достаточная стабилизация рабочей точки и несущественно уменьшается динамический диапазон.

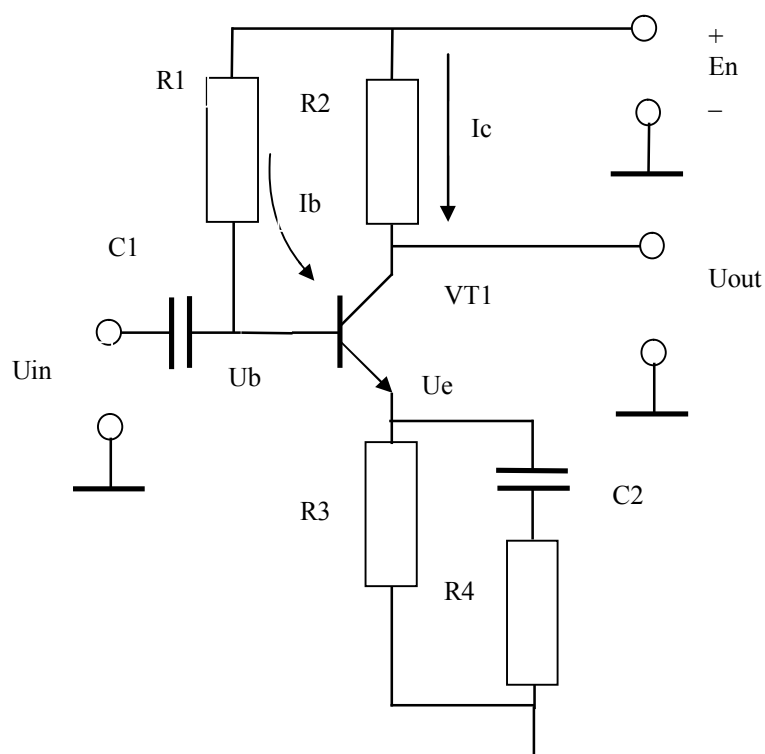


Рисунок 6. Схема усилителя на биполярном транзисторе с отрицательной обратной связью в эмиттере.

Расчет схемы по постоянному току производится исходя из необходимого тока I_c , напряжения питания E_n , коэффициента усиления транзистора B , напряжения на переходе база – эмиттер ($U_{be} \approx 0.7$ В) и напряжении на резисторе отрицательной обратной связи R_3 (например, $U_e = 1$ В).

Напряжение на выходе усилителя U_{out} выбирают равным середине динамического диапазона

$$U_{out} = E_n - \frac{E_n - U_e}{2} \quad (21)$$

Номиналы резисторов R_1 , R_2 , R_3 определяются выражениями

$$R_1 = \frac{E_n - U_e - U_{be}}{I_b} \quad (22)$$

$$R_2 = \frac{E_n - U_{out}}{I_c} \quad (23)$$

$$R_3 = \frac{U_e}{I_c + I_b} \quad (24)$$

Ток базы I_b рассчитывается по формуле (2).

Оценим стабильность рабочей точки у этой схемы. Для этого получим выражение, связывающее значение напряжения в рабочей точке выходной характеристики (и коэффициента KE) с параметрами схемы.

$$U_{out} = E_n - I_b * B * R_2 \quad (25)$$

Ток базы выразим из соотношения

$$E_n = U_{R_1} + U_{be} + U_{R_3} = I_b * R_1 + U_{be} + I_b * (B + 1) * R_3$$

$$I_b = \frac{E_n - U_{be}}{R_1 + (B + 1) * R_3} \quad (26)$$

Подставив (26) в (25) и считая, что $B \gg 1$ и $E_n \gg U_{be}$ получим

$$U_{out} = E_n * \left(1 - \frac{R_2}{\frac{R_1}{B} + R_3} \right) \quad (27)$$

$$KE = \frac{U_{out}}{E_n} = 1 - \frac{R_2}{\frac{R_1}{B} + R_3} \quad (28)$$

Из полученных выражений видно, что стабильность рабочей точки определяется стабильностью коэффициента усиления транзистора B и соотношениями резисторов R_1/R_2 и R_3/R_2 . Причем, влияние B на положение рабочей точки весьма существенно (рис. 7). При напряжении питания $E_n = 10$ В изменение B от 100 до 50 приводит к изменению U_{out} от 4.2 В до 6.8 В, что сужает динамический диапазон усилителя.

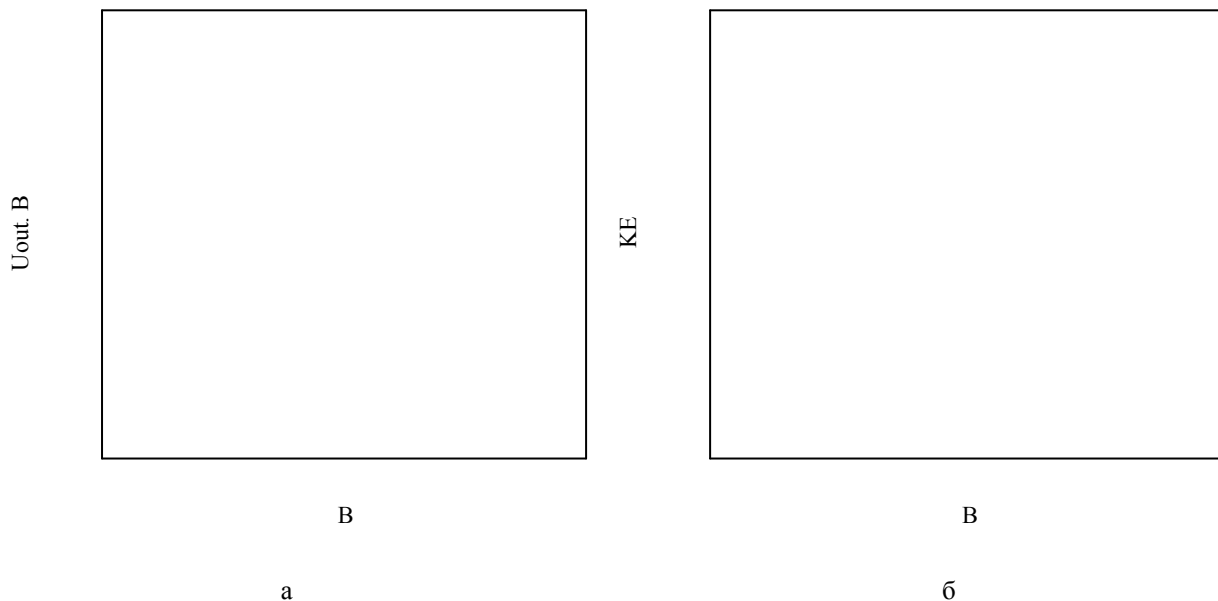


Рисунок 7. Зависимость напряжения на выходе U_{out} (а) и относительного коэффициента положения рабочей точки KE (б) от значения коэффициента усиления транзистора B . Напряжение питания $E_n = 10$ В.

Оценим влияние параметров схемы на коэффициент усиления каскада по напряжению K_u . Запишем выражение для U_{out}

$$K_u = \frac{dU_{out}}{dU_b} = \frac{d(E_n - I_b * B * R_2)}{dU_b} = - \frac{d(I_b * B * R_2)}{dU_b} \quad (29)$$

Ток базы определим из входной цепи

$$U_b = U_{be} + U_{R_3} = U_{be} + I_b * (B + 1) * R_3 \quad (30)$$

$$I_b = \frac{U_b - U_{be}}{(B + 1) * R_3} \quad (31)$$

Подставив (31) в (29), считая, что $B \gg 1$ получим

$$K_u = - \frac{R_2}{R_3} + \frac{dU_{be}}{dU_b} \quad (32)$$

Минус в выражении (32) означает инверсию фазы напряжения на выходе относительно входного сигнала. Чтобы выяснить влияние второго слагаемого в (32), получим выражение для дифференциального входного сопротивления каскада, воспользовавшись соотношениями (14) и (30).

$$R_d = \frac{dU_b}{dI_b} = \frac{dU_{be}}{dI_b} + \frac{d(I_b * (B + 1) * R_3)}{dI_b} = \frac{\varphi_T}{I_b} + (B + 1) * R_3 \quad (33)$$

Входное дифференциальное сопротивление каскада определяется суммой дифференциального сопротивления перехода эмиттер – база и сопротивлением резистора обратной связи R_3 умноженного на $B + 1$. Из рис.3 видно, что дифференциальное сопротивление перехода при токах базы больших 100 мкА не превышает 250 Ом. В то же время, если $B > 50$, а $R_3 > 100$ Ом, то общее входное сопротивление определяется влиянием R_3 . Как правило $\frac{\varphi_T}{I_b} \ll (B + 1) * R_3$, поэтому

$$R_d \approx (B + 1) * R_3 \quad (34)$$

Соотношение (33) получено без учета тока, отводимого через резистор R1. Такое допущение вполне оправдано, поскольку обычно сопротивление этого резистора гораздо больше входного дифференциального сопротивления усилителя.

Сопоставив соотношения (15) и (33) отметим, что входное сопротивление усилительного каскада с отрицательной обратной связью в эмиттере на $(B+1) \cdot R3$ больше входного сопротивления каскада с общим эмиттером.

Сравним два слагаемых в выражении (32) для K_u . Чтобы каскад усиливал напряжение, R2 должно быть больше R3, а значит их отношение всегда больше единицы. Напряжение U_b перераспределяется между эмиттерным переходом и резистором R3 пропорционально их дифференциальным сопротивлениям. А как было показано выше, основной вклад в общее входное сопротивление вносит резистор R3. Следовательно, $dU_b/dU_b \ll 1$. Тогда,

$$K_u = -\frac{R2}{R3} \quad (35)$$

То есть коэффициент усиления по напряжению данного каскада определяется соотношением сопротивлений резисторов в коллекторе и эмиттере и практически не зависит от выбора рабочей точки на выходной характеристике. Выбор этой точки или ее смещение при разбросе B у различных транзисторов влияют только на динамический диапазон усилителя.

Отметим также высокую температурную стабильность K_u , поскольку при изменении температуры сопротивления резисторов R2 и R3 изменяются пропорционально.

Поскольку входное сопротивление каскада определяется в основном резистором R3 и коэффициентом B (33), линейность зависимости входного сопротивления от уровня входного напряжения у этого усилителя гораздо выше, чем у каскада с общим эмиттером. На рис.8 приведены входные характеристики усилителя с отрицательной обратной связью в эмиттере (рис.6) при различных значениях эмиттерного резистора R3. Характеристика при R = 0 соответствует схеме с общим эмиттером (рис. 1). Видно, что при токах базы больших 10мкА схема с обратной связью в эмиттере имеет существенно лучшую линейность входной характеристики, чем схема с общим эмиттером (при R3 = 0). На рис. 9 приведена зависимость тока базы Ib от напряжения входного сигнала Ub, поданного относительно рабочей точки, соответствующей статическому току 0.05 mA (пунктирная линия) для усилителя с обратной связью в эмиттере (рис. 6) с R3 = 200 Ом и B = 100. Сопоставив эту зависимость с аналогичной зависимостью для усилителя с общим эмиттером (рис.4) можно сделать вывод о существенном уменьшении нелинейных искажений при одном и том же диапазоне базового тока у схемы с обратной связью в эмиттере. На рис.10 приведена зависимость асимметрии амплитуд полуволн базового тока в dIb процентах от амплитуды входного сигнала Uin для усилителя с обратной связью в эмиттере с R3 = 200 Ом и B = 100. Даже при амплитудах входного напряжения 300 мВ, асимметрия амплитуд полуволн базового тока составляет менее 1 %. Отметим, что для аналогичного диапазона базового тока у схемы с общим эмиттером асимметрия составляет 46 %.

Таким образом, наличие отрицательной обратной связи уменьшает нелинейные искажения усилителя.

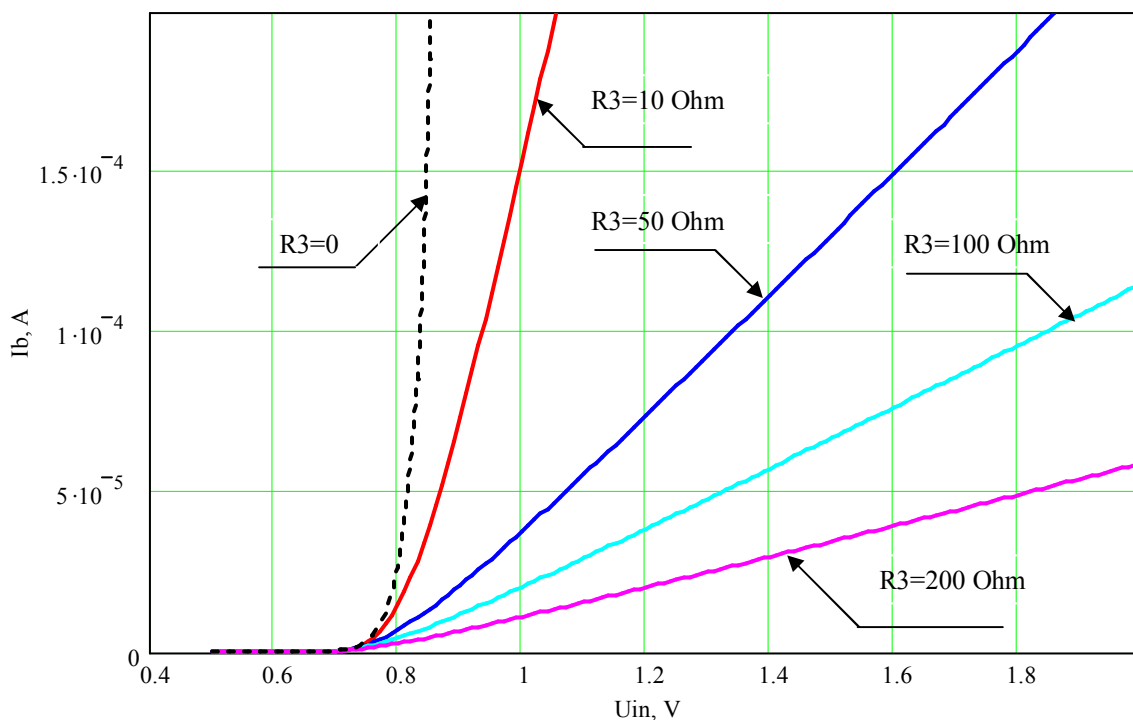


Рисунок 8. Входные вольт – амперные характеристики усилителя с отрицательной обратной связью в эмиттере (рис.6) при различных значениях эмиттерного резистора R3.

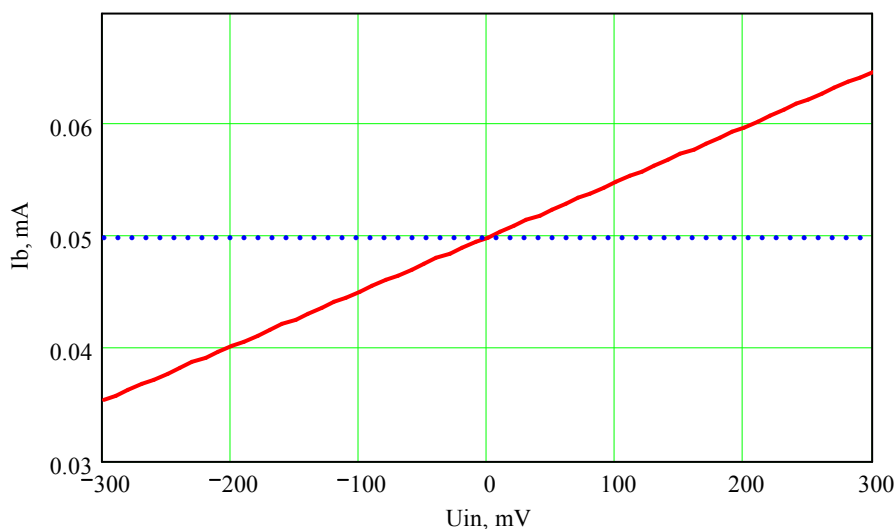


Рисунок 9. Зависимость тока базы I_b от напряжения входного сигнала U_{in} , поданного относительно рабочей точки, соответствующей статическому току 0.05 mA (пунктирная линия). Усилитель с обратной связью в эмиттере (рис. 6) с $R_3 = 200 \text{ Ом}$ и $B = 100$.

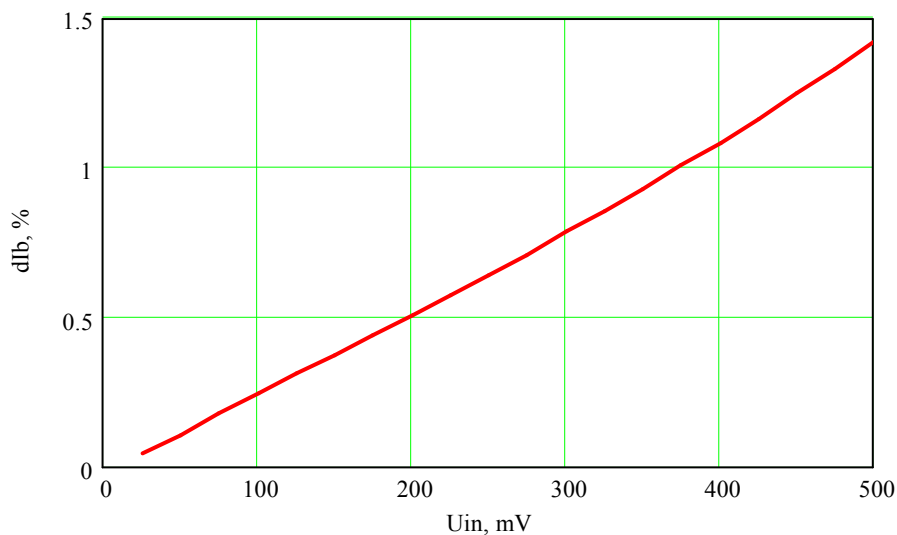


Рисунок 10. Зависимость асимметрии амплитуд полуволн базового тока в dB процентах от амплитуды входного сигнала U_{in} . Усилитель с обратной связью в эмиттере (рис. 6).

Для эффективной стабилизации положения рабочей точки необходима достаточно глубокая отрицательная обратная связь. В этом случае коэффициент усиления каскада (35) должен быть в 10 ... 50 раз меньше коэффициента усиления транзистора B . При $B = 100$, коэффициент усиления каскада получается 10 ... 2, что часто бывает недостаточно для усиления переменного сигнала. Чтобы увеличить коэффициент усиления по постоянному току и при этом не ухудшить стабилизацию рабочей точки, параллельно резистору R_3 , через конденсатор C_1 , ставят резистор R_4 , выполняющий роль резистора обратной связи по переменному току. В этом случае коэффициент усиления для переменного сигнала определяется выражением

$$K_u \approx -\frac{R_2}{R_3 \parallel R_4} = -\frac{R_2 * (R_3 + R_4)}{R_3 * R_4} \quad (36)$$

В выражении (36) не учитывается сопротивление конденсатора C1, поскольку его номинал выбирается так, чтобы во всем диапазоне частот его сопротивление было гораздо меньше сопротивления резистора R4. Если коэффициент усиления по переменному сигналу в 10 раз больше коэффициента усиления по постоянному напряжению, то $R_4 \ll R_3$ и выражение (36) приобретает вид

$$K_u \approx -\frac{R_2}{R_4} \quad (37)$$

Однако следует не упускать из виду, что с увеличением коэффициента усиления по переменному сигналу уменьшается входное дифференциальное сопротивление, так как оно будет определяться не столько резистором R3, а преимущественно R4

$$R_d = \frac{\varphi_T}{I_b} + (B+1) * R_3 \parallel R_4 \quad (38)$$

Кроме того, с уменьшением R4 будут увеличиваться нелинейные искажения (рис. 8).

Недостатком схемы, приведенной на рис.6, является достаточно сильная зависимость положения рабочей точки от коэффициента усиления транзистора B. Рассмотрим схему, приведенную на рис.6. В этой схеме потенциал базы по постоянному току фиксируется базовым делителем R1, R3.

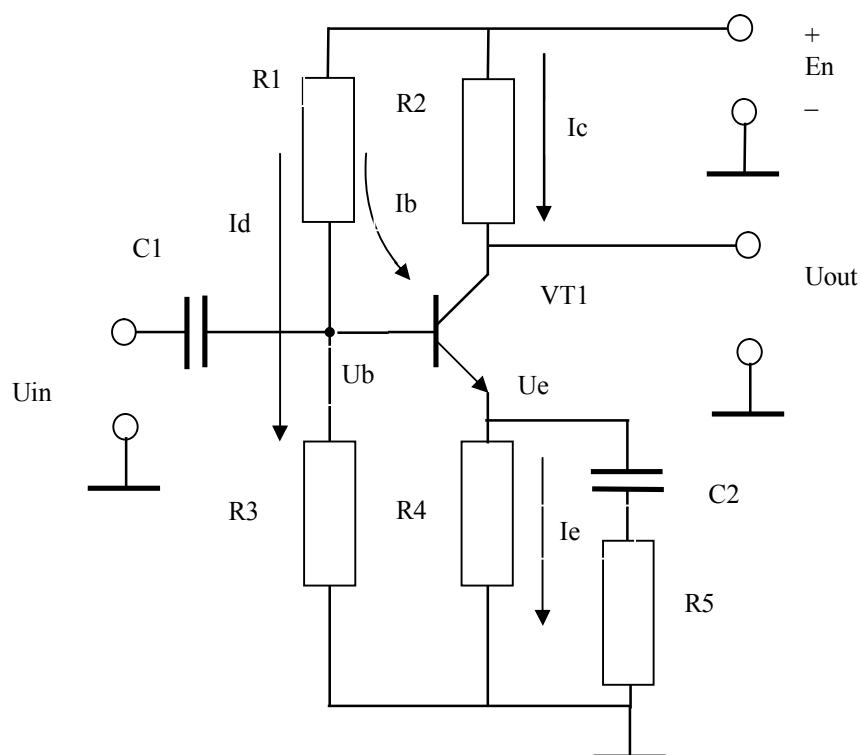


Рисунок 11. Схема усилителя на биполярном транзисторе с отрицательной обратной связью в эмиттере и делителем напряжения в базе.

Оценим стабильность рабочей точки для этой схемы. Для этого получим выражение, связывающее значение напряжения в рабочей точке выходной характеристики с параметрами схемы.

$$U_{out} = E_n - I_b * B * R_2 \quad (39)$$

Ток базы выразим из потенциала на резисторе R4

$$U_{R4} = I_e * R4 = I_b * (B + 1) * R4 \quad (40)$$

$$I_b = \frac{U_{R4}}{(B + 1) * R4} \quad (41)$$

Подставив (41) в (39) получим

$$U_{out} = E_n - \frac{U_{R4}}{(B + 1) * R4} * B * R2 \approx E_n - \frac{U_{R4}}{R4} * R2 = E_n - (U_b - U_{be}) * \frac{R2}{R4} \quad (42)$$

Напряжение U_b в статическом режиме определяется делителем напряжения R1, R3 и базовым током I_b

$$U_b = I_d * R3$$

$$E_n = U_{R1} + U_b = (I_d + I_b) * R1 + I_d * R3$$

$$I_d = \frac{E_n - I_b * R1}{R1 + R3}$$

$$U_b = (E_n - I_b * R1) * \frac{R3}{R1 + R3} \quad (43)$$

Подставив (43) в (41) получим

$$U_{out} = E_n - \left((E_n - I_b * R1) * \frac{R3}{R1 + R3} - U_{be} \right) * \frac{R2}{R4} \quad (44)$$

Если ток делителя I_d гораздо больше тока базы I_b , выражение для U_{out} принимает вид

$$U_{out} = E_n - \left(E_n * \frac{R3}{R1 + R3} - U_{be} \right) * \frac{R2}{R4} \quad (45)$$

Как видно из выражения (45) положение рабочей точки определяется соотношениями резисторов, напряжением питания, падением напряжения на переходе база – эмиттер и не зависит от коэффициента усиления транзистора (при $B \gg 1$). Отсутствие зависимости U_{out} от B объясняется наличием обратной связи. При уменьшении коэффициента усиления транзистора уменьшается ток, протекающий через резистор R4 и, следовательно, уменьшается потенциал эмиттера. Поскольку потенциал базы зафиксирован делителем напряжения R1, R3, увеличивается напряжение, приложенное к переходу база – эмиттер и ток базы I_b . Это приводит к возрастанию тока через эмиттер и коллектор, тем самым, стабилизируя положение рабочей точки. Однако, при малых коэффициентах усиления транзистора B или при малых токах делителя I_d , ток базы I_b может быть сопоставим с током делителя I_d , и напряжение U_{out} необходимо определять из выражения (44), в котором присутствует ток базы, определяемый коэффициентом B .

Рассматриваемый каскад обладает достаточно хорошей термостабильностью положения рабочей точки выходной характеристики. При изменении температуры сопротивления резисторов изменяются с одним и тем же коэффициентом, а U_{out} определяется соотношениями сопротивлений резисторов (см. (44) и (45)). Поэтому изменение U_{out} с температурой происходит только за счет температурного изменения напряжения база – эмиттер транзистора $U_{be}(T)$, которое для кремниевых транзисторов составляет 0.26 мВ/град. Если температурный диапазон работы устройства составляет +60°C ... -20°C, то есть 80 градусов, то изменение U_{be} составит 20.8 мВ во всем температурном диапазоне. Чем больше напряжение на базе транзистора U_b , тем меньшее влияние оказывает изменение U_{be} на U_{out} (см. (42)). Однако, увеличение U_b , а значит и напряжения на резисторе R4 приводит к сужению динамического диапазона. Обычно, достаточно, чтобы U_{R4} составляло порядка одного вольта.

Коэффициент передачи по переменной составляющей для этого каскада определяется так же, как и для каскада с отрицательной связью в эмиттере (рис. 6). Однако динамическое входное сопротивление у этого каскада меньше, поскольку оно определяется как сопротивление параллельно включенных резисторов R1, R3 и R4 параллельно R5.

$$R_d = R_1 || R_3 || \left(\frac{\varphi_T}{I_b} + (B+1) * R_4 || R_5 \right) \quad (46)$$

Именно снижением входного сопротивления определяется минимальное сопротивление базового делителя R_1 , R_3 . Для того чтобы повысить входное сопротивление каскада и обеспечить достаточную стабилизацию U_{out} коэффициент минимальное значение B должно быть как можно больше. В этом случае увеличиваются сопротивления резисторов R_1 , R_3 , а, следовательно, возрастает входное сопротивление.

Расчет каскада по постоянному току можно проводить следующим образом. Напряжение на выходе усилителя U_{out} выбирают равным середине динамического диапазона

$$U_{out} = E_n - \frac{E_n - U_e}{2} \quad (47)$$

Номинал резистора R_2 определяется выражением

$$R_2 = \frac{E_n - U_{out}}{I_c} \quad (48)$$

Выбрав падение напряжения на резисторе обратной связи R_4 (например, $U_{R4} = 1B$) рассчитывают R_4

$$R_4 = \frac{U_{R4}}{I_b + (B+1)} \quad (49)$$

Ток базового делителя должен быть не менее, чем в 20 раз больше базового тока

$$I_b = \frac{I_c}{B}$$

$$I_d = 20 * I_b \quad (50)$$

Тогда,

$$R_3 = \frac{U_{R4} + U_{be}}{I_d} = \frac{U_b}{I_d} \quad (51)$$

Через резистор R_1 протекают ток делителя I_d и ток базы I_b , следовательно

$$R_1 = \frac{E_n - U_b}{I_d + I_b} \quad (52)$$

Расчет резистора R_5 и конденсатора C_1 проводится так же, как для предыдущего каскада.

2. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

В лабораторной работе используются промышленные источники постоянного тока, генераторы переменного сигнала и осциллограф инструкцию по их эксплуатации необходимо тщательно изучить. Кроме того, студентам предоставляются монтажные платы, соединительные провода, полная номенклатура резисторов и конденсаторов и операционный усилитель.

Получив задание, студент должен рассчитать схему заданной конфигурации и проверить правильность расчета, смоделировав схему на компьютере. Для моделирования схемы можно использовать программные пакеты WORKBENCH или PROTEUS.



При расчете схемы необходимо, исходя из заданных параметров и используя соответствующие соотношения, приведенные выше, определить номиналы резисторов и конденсатора.

Убедившись в правильности расчетов и выборе номиналов элементов, на монтажной плате собирается схема, к которой с соединительными проводами подключаются источник питания генератор и осциллограф. Перед включением схемы необходимо убедиться в наличии заземления у приборов. Также нужно тщательно проверить правильность подсоединения приборов к схеме, обратив особое внимание на подключение земли схемы и приборов.

Настройку схемы необходимо производить вначале для статического режима, а затем при переменном входном сигнале.

Установив необходимые значения напряжений источника питания подать переменный сигнал и отснять зависимость коэффициента передачи усилителя по напряжению от амплитуды входного сигнала. Определить динамический диапазон усилителя. Рассчитать динамическое входное сопротивление каскада.

3.ЗАДАНИЯ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

Номер варианта	Напряжение питания, В	Коэффициент передачи по напряжению	Ток коллектора, мА	Частотный диапазон, Гц
1	$E_n = 10$	10	5	100 – 20 000
2	$E_n = 10$	15	10	400 – 100 000
3	$E_n = 10$	20	5	200 – 50 000
4	$E_n = 10$	10	15	1000 – 100 000
5	$E_n = 10$	15	2	500 – 200 000
6	$E_n = 10$	20	5	200 – 50 000
7	$E_n = 10$	25	10	400 – 20 000
8	$E_n = 10$	10	15	400 – 50 000
9	$E_n = 10$	15	20	200 – 100 000
10	$E_n = 10$	20	5	1 000 – 100 000
11	$E_n = 10$	25	20	2000 – 100 000
12	$E_n = 10$	10	15	500 – 50 000

4.ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист с указанием названия работы, группы и фамилий исполнителей;
- раздел «Постановка задач исследования», в котором кратко формулируются расчетные и экспериментальные задачи;
- раздел «Предварительные расчеты», в котором приводятся принципиальная схема усилителя, описание ее работы, условия расчета, исходные данные и результаты расчета;
- раздел «Результаты эксперимента», в котором описываются условия каждого эксперимента, приводятся результаты непосредственных измерений ;
- раздел «Выводы», в котором оценивается степень согласия расчетных и экспериментальных результатов по каждому пункту задания.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Для чего используется отрицательная обратная связь в усилительных каскадах?

2. Чем определяется стабильность положения рабочей точки выходной характеристики усилителя?
3. Чем ограничивается динамический диапазон усилителя?
4. Чем определяется входное сопротивление усилителя?
5. Оцените достоинства и недостатки схем, приведенных в Приложении А.
6. Рассчитайте номиналы элементов схем, приведенных в Приложении А.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Малахов В.П. Схемотехника аналоговых устройств: Учебник для втузов – Одесса.: АстоПринт, 2000. – 212с.
2. Гальперин М.В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. – М.: Энергоиздат, 1987. – 320с.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т2– М.: Мир, 1993. – 371с.

Приложение А. Схемы однокаскадных усилителей.

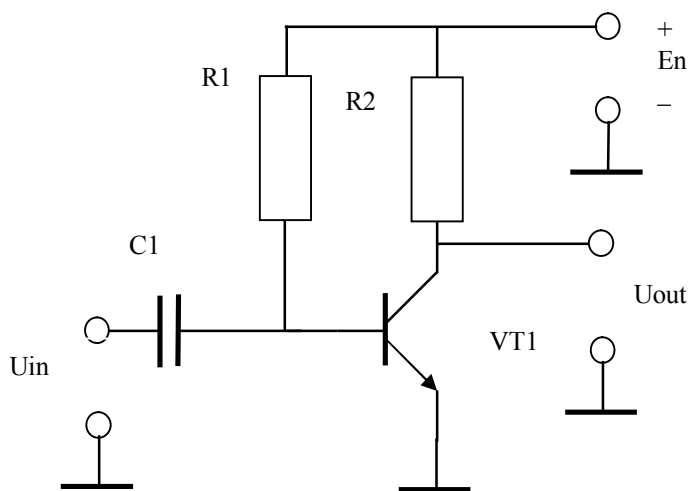


Рис. 1П. Схема 1.

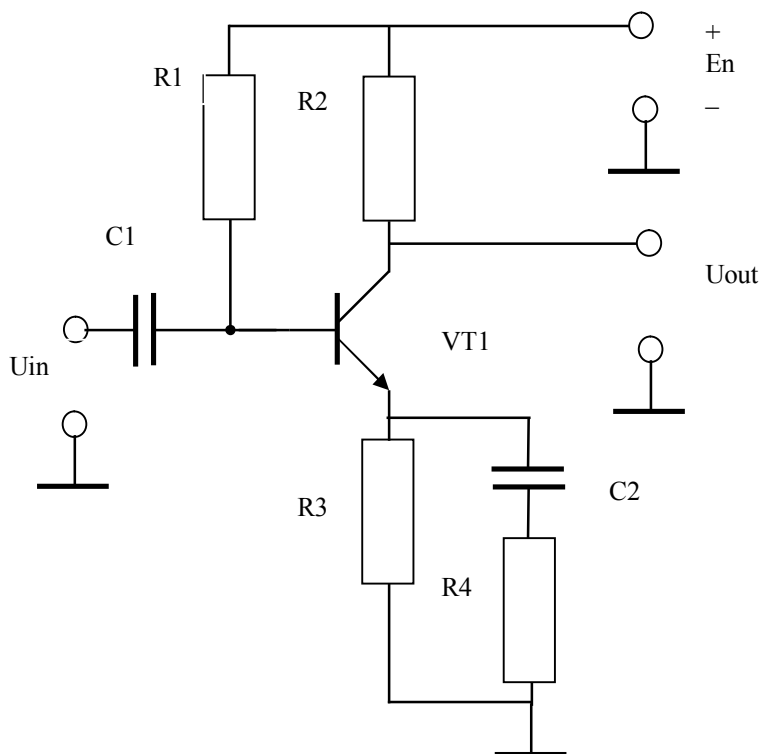


Рис. 2П. Схема 2.

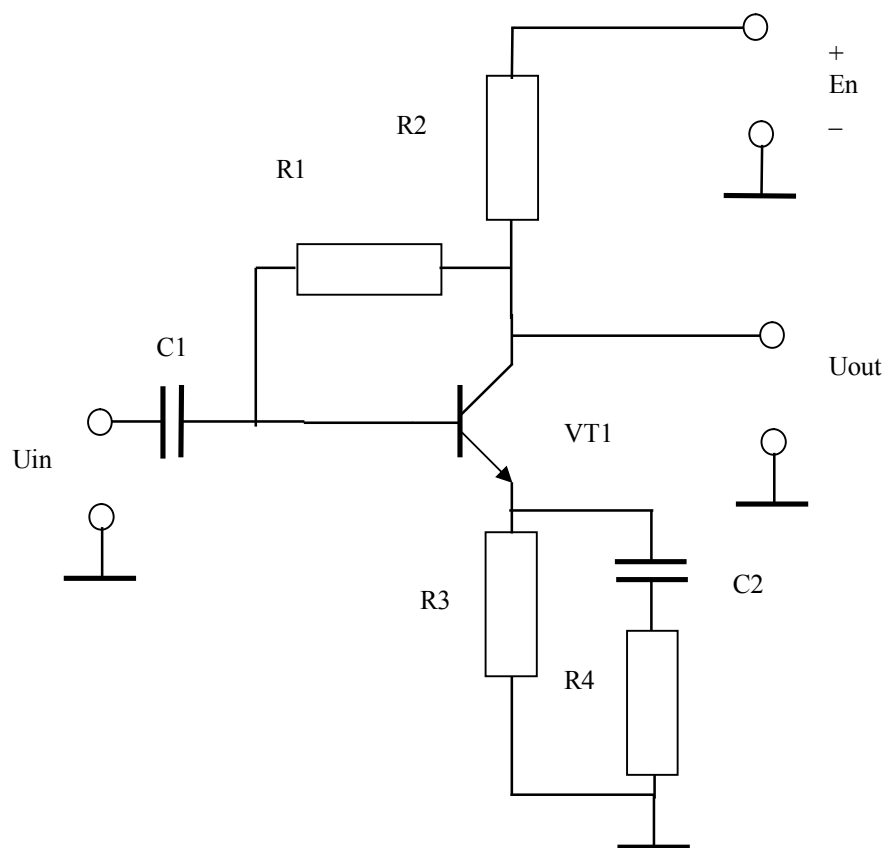


Рис. 3П. Схема 3.

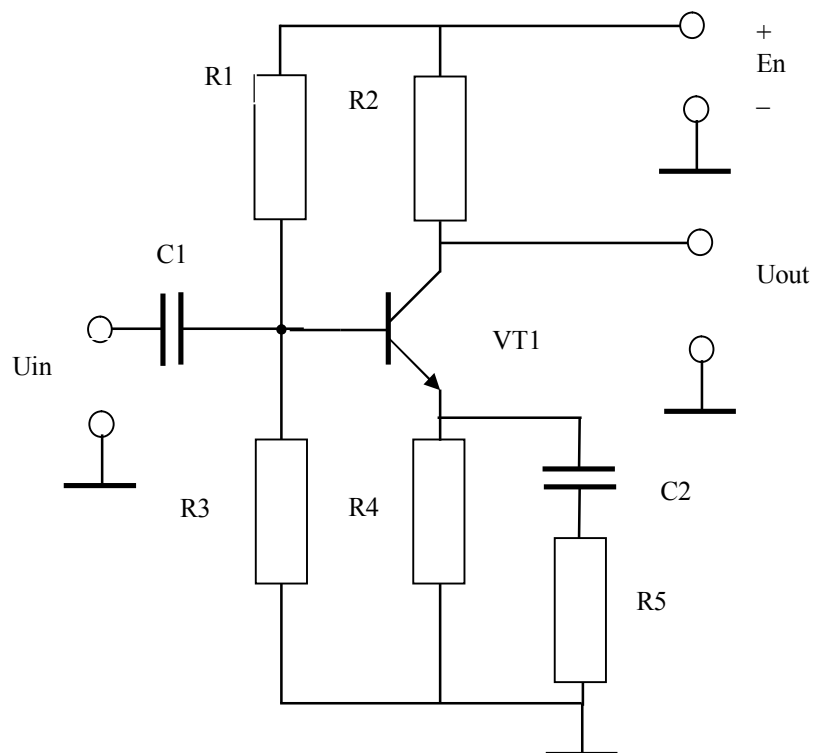


Рис. 4П. Схема 4.

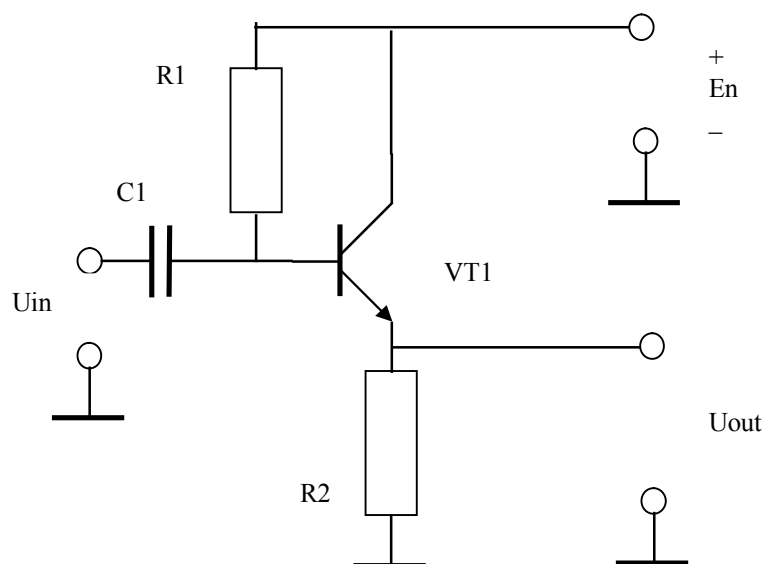


Рис. 5П. Схема 5.