

### Лабораторная работа №3. Маломощные транзисторные усилители

Цель работы – освоение способа установки рабочей точки транзисторного усилителя, оценка термостабильности рабочей точки, измерение входного и выходного сопротивления и коэффициента усиления по напряжению двух распространенных схем усилительных каскадов на транзисторах в режиме усиления малых сигналов.

#### 3.1. Краткое описание лабораторной работы

В лабораторной работе исследуются две схемы усилителей на биполярном п-р-п транзисторе, рассчитываются основные параметры.

#### 3.2. Основные теоретические сведения

Два исследуемых усилителя выполнены по схеме с общим эмиттером. Оба усилителя работают в режиме класса А.

Состояние усилителя при отсутствии входного сигнала называется состоянием покоя или исходной рабочей точкой (ИРТ). Напряжение на выходе усилителя в состоянии ИРТ называется напряжением покоя или напряжением смещения рабочей точки. Если на вход усилителя подать переменный входной сигнал, то максимальная амплитуда и отсутствие искажений у выходного сигнала могут быть достигнуты, если напряжение покоя будет равно примерно половине напряжения питания.

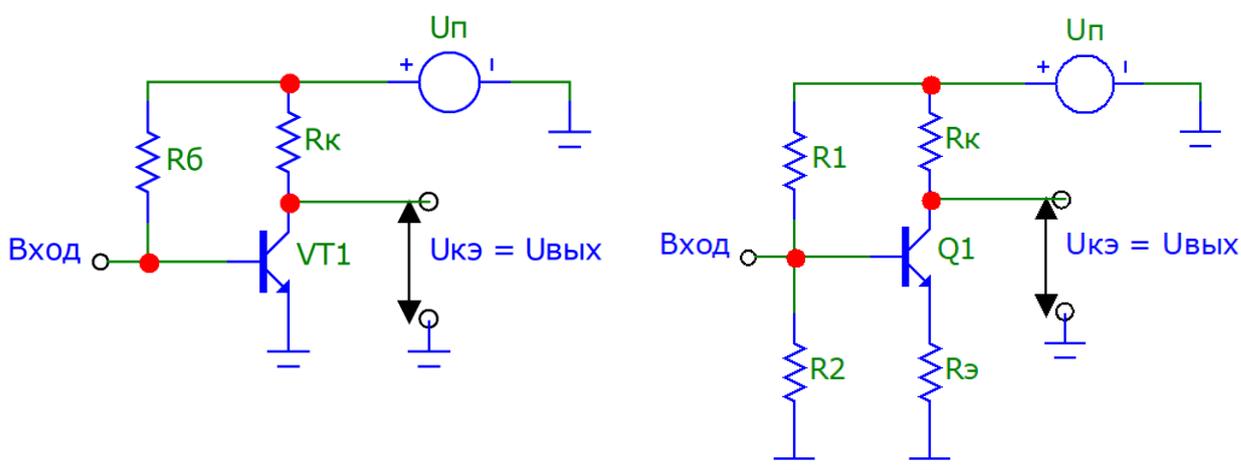


Рис. 3.1 – Схемы усилителей на биполярных транзисторах: а – с балластным резистором в цепи базы; б – с делителем в цепи базы и эмиттерным резистором.

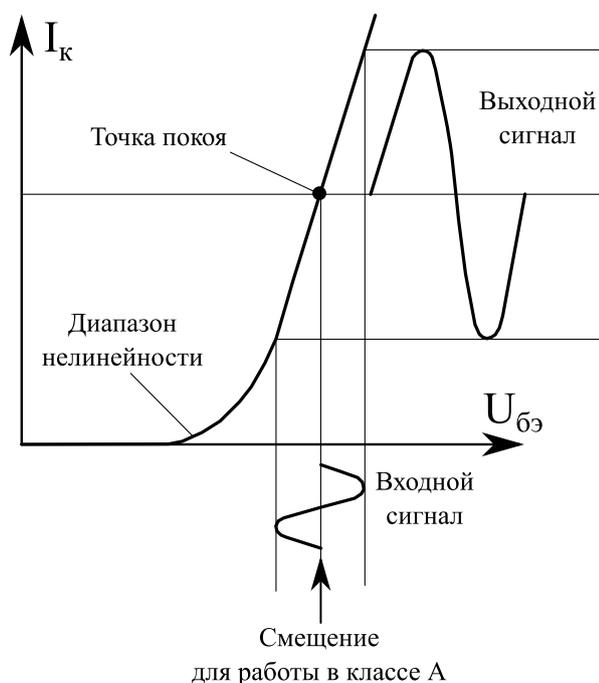


Рис. 3.2 – Исходная рабочая точка транзисторного усилителя класса А.

Реальный биполярный транзистор может работать в активном режиме при напряжении  $U_{кэ}$  более 1 В. Таким образом максимальная амплитуда неискаженного сигнала обеспечивается на выходе усилителя, если в точке покоя  $U_{кэ}$  будет составлять немногим более  $U_{п}/2$ . Примем для определенности  $U_{кэ}$  в ИРТ равным +7В при  $U_{п} = 12$  В.

Выходной ток транзисторного усилителя зависит от мощности, которую следует отдавать в нагрузку. Пусть в проводимых исследованиях ток коллектора  $I_{к}$  при  $U_{вх}=0$  будет невелик, например  $I_{к} = 5$  мА.

В схеме (Рис. 3.1, а) исходная рабочая точка транзистора задается током базы  $I_{б}$  с помощью балластного резистора, включенного между базой и плюсом источника питания. Из заданного значения напряжения смещения рабочей точки  $U_{кэ}$  и тока коллектора  $I_{к}$  однозначно вытекает необходимое значение сопротивления  $R_{к}$ , а также необходимый ток базы  $I_{б}$ :

$$R_{к} = (U_{п} - U_{кэ}) / I_{к}; \quad I_{б} = \beta \cdot I_{к}. \quad (3.1)$$

где  $\beta$  – коэффициент усиления транзистора по постоянному току.

Тогда необходимое сопротивление резистора в цепи базы имеет вид:

$$R_{б} = \frac{U_{п} - U_{бэ}}{I_{б}} \approx \frac{U_{п}}{I_{б}} \quad (3.2)$$

Схема с балластным резистором обладает низкой температурной стабильностью, так как коэффициент усиления схемы по напряжению (то есть коэффициент усиления полезного сигнала) прямо зависит от  $\beta$ , который, в свою очередь зависит от температуры. Кроме того, поскольку коэффициент усиления транзистора по постоянному току – параметр, сильно

отличающийся у разных экземпляров транзисторов, то невозможно построить усилитель по схеме с балластным резистором в цепи базы с жестко заданными характеристиками.

Лучшую температурную стабильность, а также возможность задания коэффициента усиления по напряжению имеет схема, изображенная на рис. 3.1, б. Если ток базы транзистора много меньше, чем сквозной ток, протекающий через делитель R1, R2, то потенциал базы в данной схеме зависит только от номиналов резисторов R1 и R2:

$$U_B = \frac{U_n \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.3)$$

Потенциал эмиттера открытого кремниевого транзистора приблизительно на 0,6 В ниже, чем  $U_B$ , т.е.  $U_E = U_B - 0,6$ . Так как ток базы в сотни раз меньше тока коллектора, то без значительного ущерба для точности расчета ток коллектора может быть принят равным току эмиттера, т.е.  $I_K \approx I_E = U_E / R_E$ .

Коэффициент усиления схемы по напряжению

$$k_u = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = -R_K / R_E. \quad (3.4)$$

Таким образом, задав значения коэффициента усиления и  $R_K$ , можно задать и  $R_E$ . Зная необходимое значение тока усилителя, можно также рассчитать  $U_B$ , а далее с помощью (3.3) – необходимый коэффициент деления делителя R1, R2. Последнее, что необходимо рассчитать, это числовые значения сопротивлений делителя R1, R2. Для этого по заданному значению  $I_K$  рассчитывается ток базы по формулам (3.1), а затем – необходимый ток делителя, который должен быть значительно больше тока базы.

Результирующее входное сопротивление усилителя в целом рассчитывается как параллельное соединение сопротивлений R1 и R2. Выходное сопротивление усилителя, как и в схеме с заземленным эмиттером, близко к  $R_K$ .

Задание на проведение исследований.

1. Соберите схему усилителя с общим эмиттером и балластным резистором в цепи базы (рис. 3.2, а). Приняв ток коллектора  $I_K = 5$  мА,  $U_{\text{пит}} = 12$  В, рабочую точку  $U_{KЭ} = 7$  В, согласно закону Ома получаем значение сопротивления резистора  $R_K$ :

$$R_K = (U_n - U_{KЭ}) / I_K = (12 - 7) / 0,005 = 1 \text{ кОм}.$$

Величину сопротивления резистора в цепи базы  $R_B$  можно оценить, зная падение напряжения на базно-эмиттерном переходе ( $U_{БЭ} \approx 0,6 В$ ) и предполагая, что коэффициент усиления транзистора по постоянному току  $\beta = 100$  (более точное значение параметра  $\beta$  можно найти в параметрах модели транзистора, например, для BC546 параметр  $\beta = 269$ ):

$$R_B = (U_n - U_{бэ}) / I_б = (U_n - U_{бэ}) / (I_k / \beta) = \\ = (12 - 0,6) / (0,005 / 269) \approx 613 \text{ кОм}$$

Точное значение сопротивления балластного резистора необходимо подобрать в ходе лабораторной работы, так как величина коэффициента  $\beta$  у каждого экземпляра транзистора может быть разной. Стоит отметить, что при подключении резистора  $R_B$  с нулевым сопротивлением базно-эмиттерный переход оказывается подключенным напрямую к источнику питания, что ведет к выходу транзистора из строя.

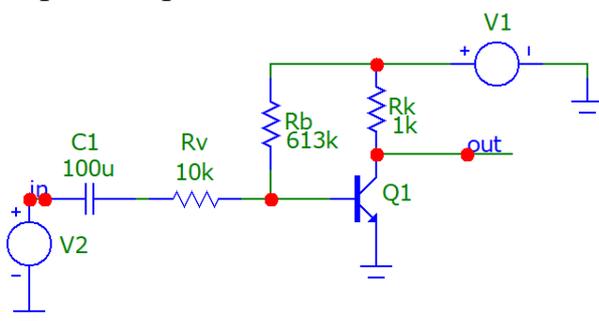


Рис. 3.3. Схема для моделирования усилителя с балластным резистором в цепи базы.

2. Настройте усилитель в положение точки покоя (на выходе должно быть напряжение  $U_{кэ} = 7 В$ )
3. Измените температуру окружающей среды при моделировании (увеличьте до  $50^{\circ}C$ ). Оцените, насколько изменилось напряжение  $U_{кэ}$  и ток коллектора  $I_k$ .
4. Вычислите значение коэффициента передачи по току  $\beta$  используемого транзистора.
5. Подайте на вход схемы синусоидальный сигнал амплитудой в  $100 мВ$  и частотой в несколько килогерц. Выведите на график входной и выходной сигналы, рассчитайте коэффициент усиления схемы по напряжению:  $k_u = U_{вых} / U_{вх}$ .
6. Подсоедините к выходу схемы резистор нагрузки с известным сопротивлением  $R_n = 1кОм$  и определите значение напряжения на выходе при подключенной нагрузке  $U^{н.вых}$ . Рассчитайте значение выходного сопротивления усилителя:

$$R_{вых} = R_H \cdot \left( \frac{U_{вых}}{U^H_{вых}} - 1 \right)$$

7. Определите падение переменного напряжения на резисторе  $R_B$  (как разность амплитуд на входе и выходе). Определите или вычислите амплитуду входного тока, зная сопротивление  $R_B$ . Рассчитайте входное сопротивление схемы  $R_{вх} = U_{вх} / I_{вх}$ .

Таблица 3.1 – Измеряемые параметры

Эксперимент	Измеряемый параметр	Результат измерения
Зависимость напряжения рабочей точки от температуры	$U_{PT}$ ( $t = 27^\circ\text{C}$ )	
	$U_{PT}$ ( $t = 40^\circ\text{C}$ )	
Исходная рабочая точка	Падение напряжения на $R_K$ (ток коллектора $I_K$ )	
	Падение напряжения на постоянном резисторе в цепи базы (ток базы $I_B$ )	
	Коэффициент $\beta$	
Режим усиления входного сигнала	Амплитуда входного сигнала $U_{вх}$	
	Амплитуда выходного сигнала $U_{вых}$	
	Коэффициент усиления схемы $k_u$	
Измерение входного сопротивления	Падение напряжения на входном резисторе $U_{R_B}$	
	Ток входного сигнала $I_{вх}$	
	Входное сопротивление схемы $R_{вх}$	
Измерение выходного сопротивления	Амплитуда напряжения на выходе без нагрузки $U_{вых}$	
	Амплитуда напряжения на выходе с нагрузкой $U^H_{вых}$	
	Выходное сопротивление схемы $R_{вых}$	

8. Соберите схему усилителя с делителем в цепи базы и эмиттерным резистором.

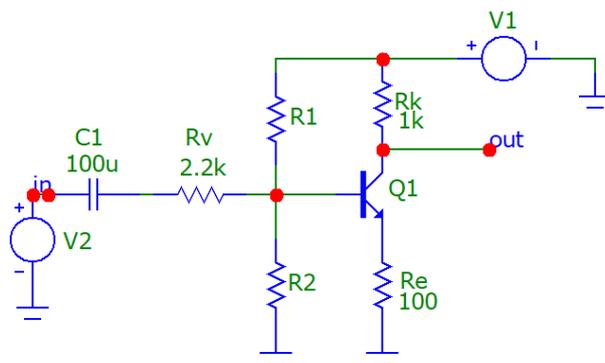


Рис. 3.4. Схема для моделирования усилителя с делителем в цепи базы и эмиттерным резистором.

Коэффициент усиления схемы  $k_u$  по напряжению примем равным 10, значение  $R_k = 1 \text{ кОм}$ , тогда:

$$R_{\text{э}} = R_k / k_u = 1000 / 10 = 100 \text{ Ом}.$$

Задав необходимое значение тока усилителя  $I_k$  (пусть ток, как и в предыдущей схеме будет равен 5 мА), можно также рассчитать напряжение на выходе делителя в цепи базы:

$$U_B = U_{\text{э}} + 0,6 \text{ В} = I_k \cdot R_{\text{э}} + 0,6 = 0,005 \cdot 100 + 0,6 = 1,1 \text{ В}$$

Зная  $U_B$  можно определить необходимый коэффициент деления делителя  $R_1 R_2$ , то есть соотношение  $R_2 / (R_2 + R_1)$ . Для того чтобы подобрать значения сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , нужно задать ток через делитель  $I_{R_1 R_2}$ . Как правило, этот ток задают в несколько десятков раз большим тока базы. Пусть  $I_{R_1 R_2} = 20 \cdot I_B = 20 \cdot I_k / \beta$ . При этом коэффициент усиления по току  $\beta$  уже известен из первого эксперимента. Тогда (если  $\beta = 269$ ) получаем:

$$(R_1 + R_2) = U_{\text{пит}} / I_{R_1 R_2} = (U_{\text{пит}} \cdot \beta) / (20 \cdot I_k) = (12 \cdot 269) / (20 \cdot 0,005) \approx 32 \text{ кОм}$$

9. Настройте собранную схему усилителя в режим ИРТ.

10. Прделайте действия, описанные в п. 3 и в пп. 5-8 для собранной схемы. Результаты измерений для первой и второй схем занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.2 – Наименования используемых в лабораторной работе транзисторов в соответствии с вариантом

№ бригады	Транзистор
1	BC546
2	BC547
3	2N3904
4	BF959
5	BC308A
6	BC238A
7	BC184
8	BC183A
9	BC108A
10	BC107A
11	BC550
12	2N4124