

## Лабораторная работа # 2 (19)

### Исследование характеристик биполярного транзистора и усилителя на биполярном транзисторе.

Цель работы: Исследование вольтамперных характеристик биполярного транзистора и усилителя на его основе.

#### Теоретическое введение.

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих между собой p-n перехода. В зависимости от последовательности чередования областей с различными типами проводимости различают n-p-n транзисторы и p-n-p транзисторы. Транзистор называется биполярным потому, что физические процессы в нем связаны с движением носителей обоих знаков (свободных дырок и электронов). Трехслойная структура n-p-n транзистора показана на рис.2.1а. На рис.2.1б показано условное обозначение n-p-n транзистора, на рис.2.1в — условное изображение p-n-p — транзистора.

Средний слой биполярного транзистора называют базой **Б**, один крайний слой называют коллектором **К**, другой крайний слой называют эмиттером **Э**. В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора различают следующие режимы его работы: линейный (усилительный), насыщения, отсечки, инверсный. В линейном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный — в обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в обратном направлении. В инверсном режиме коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный в обратном.

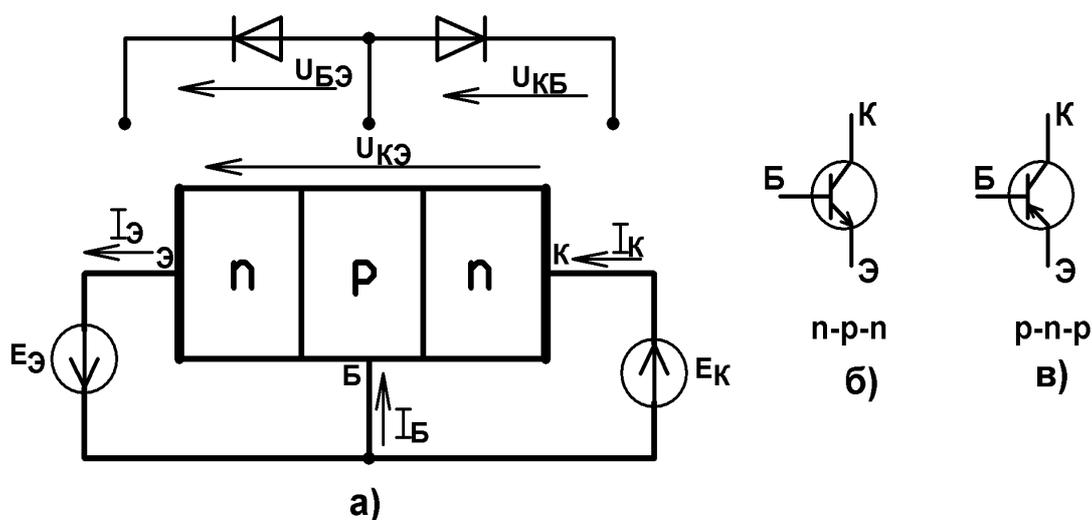


Рис.2.1 Структура n-p-n транзистора (а) и условные обозначения n-p-n транзистора (б) и p-n-p — транзистора.

Биполярные транзисторы применяются в схемах усилителей, генераторов и преобразователей электрических сигналов, изготавливаются из кремния, германия или арсенида галлия и делятся на низкочастотные (до 3 МГц), среднечастотные (до 30 МГц), высокочастотные (до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (более 300 МГц). По мощности транзисторы бывают маломощные (до 300 мВт), средней мощности (до 1,5 Вт) и большой мощности (более 1,5 Вт).

Работа транзистора основана на управлении токами электродов в зависимости от приложенных к его переходам напряжений. В линейном режиме приложенное к базе напряжение  $U_{\text{БЭ}}$  (для n-p-n транзистора  $U_{\text{БЭ}} > 0$ ) открывает переход база-эмиттер. Свободные электроны инжектируются из эмиттера в базу, образуя ток эмиттера  $I_{\text{Э}}$  в цепи эмиттера. Большая часть электронов инжектированных из эмиттера в базу, втягивается сильным электрическим полем p-n перехода между базой и коллектором, образуя ток коллектора  $I_{\text{К}}$  в цепи коллектора. Незначительная часть свободных электронов, инжектированных из эмиттера в базу, образует ток  $I_{\text{Б}}$ .

В схеме рис.2.1а база является общим электродом входной и выходной цепи. Такая схема

включения биполярного транзистора называется *схемой с общей базой (ОБ)*. Для усиления сигналов применяют также схемы включения биполярных транзисторов с *общим коллектором (ОК)* и *общим эмиттером (ОЭ)*.

Схема с общим эмиттером наиболее распространена, исследуется в лабораторной работе и показана на рис.2.2. В этой схеме дополнительное сопротивление  $R_D=100$  Ом служит для защиты транзистора от пробоя перехода база-эмиттер,  $R_9=1$  кОм,  $R_{10}=100$  Ом,  $U_{БПЭ}$  - напряжение между гнездом базы на панели стенда и гнездом эмиттера,  $U_{БЭ}$  - напряжение база-эмиттер. Причем  $U_{БЭ} = U_{БПЭ} - I_B \cdot R_D$ .

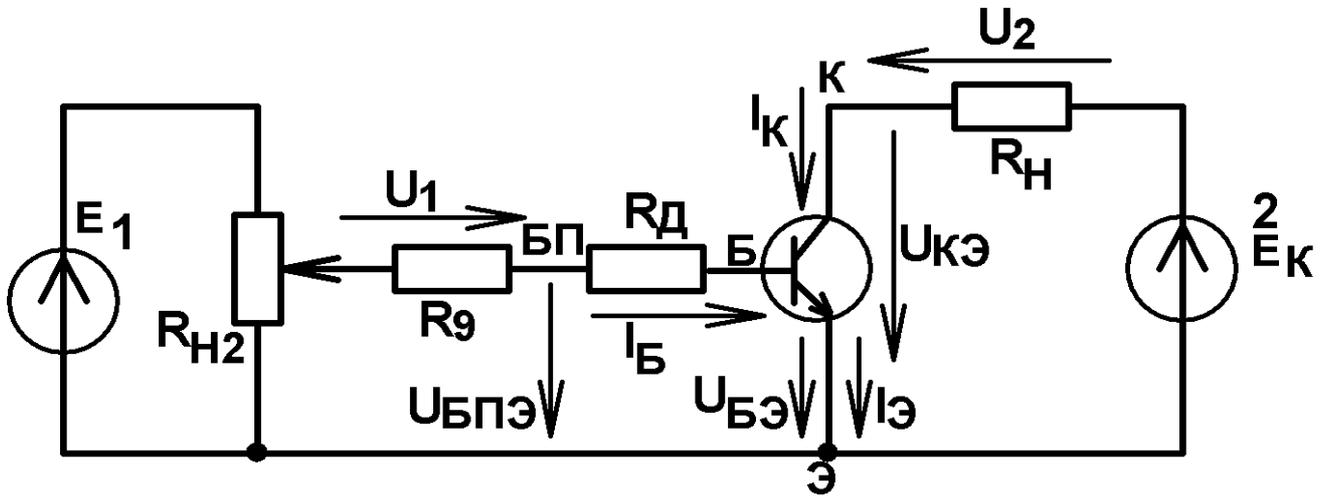


Рис.2.2 Схема включения транзистора с общим эмиттером.

В схеме ОЭ ток коллектора, ток базы и ток эмиттера связаны соотношениями:

$I_E = I_C + I_B$ ,  $I_C = \beta \cdot I_B$ , где  $\beta$  — статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером.

Работу транзистора, включенного по схеме с ОЭ, определяют по статическим входным (рис. 2.3а) и выходным (рис.2.3б) вольтамперным характеристикам. Входная ВАХ является зависимостью тока базы от напряжения база-эмиттер при фиксированном напряжении коллектор-эмиттер. Выходные ВАХ являются зависимостями тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при различных значениях тока базы. Вольтамперные характеристики биполярного транзистора показывают, что в линейной области ток коллектора почти не зависит от напряжения коллектор-эмиттер и приращение тока пропорционально изменению тока базы. Ток базы и напряжение база-эмиттер почти не зависят от напряжения коллектор-эмиттер (на рис.2.3.а все входные ВАХ заменены одной). При напряжении отсечки  $U_{БЭ0}$  ток базы считают равным нулю.

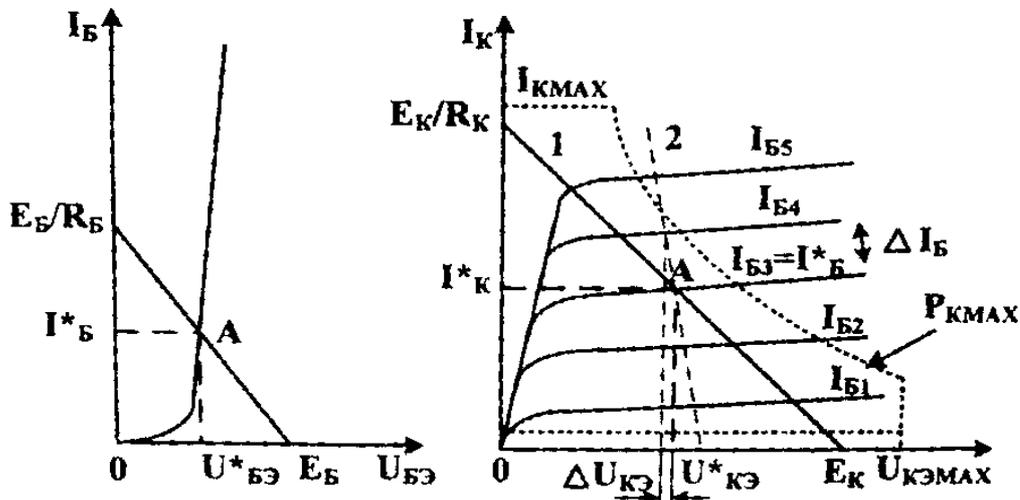


Рис.2.3 Входная (а) и выходные (б) характеристики биполярного транзистора

В линейном режиме усиления малого сигнала биполярный транзистор описывают системой уравнений четырехполюсника в Н-параметрах:

$$\begin{aligned} u_{БЭ} &= h_{11} \cdot i_{Б} + h_{12} \cdot u_{КЭ} \\ i_{К} &= h_{21} \cdot i_{Б} + h_{22} \cdot u_{КЭ} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \text{где } h_{11} &= \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta i_{Б}} \Big|_{u_{КЭ} = const}, \quad h_{12} = \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta u_{КЭ}} \Big|_{i_{Б} = const} \\ h_{21} &= \frac{\Delta i_{К}}{\Delta i_{Б}} \Big|_{u_{КЭ} = const}, \quad h_{22} = \frac{\Delta i_{К}}{\Delta u_{КЭ}} \Big|_{i_{Б} = const} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Н- параметры биполярного транзистора, которые можно рассчитать по вольтамперным характеристикам и определить экспериментально. Их типовые значения находятся в пределах:

$$\begin{aligned} h_{11} &= 10^3 - 10^4 \text{ Ом} & h_{12} &= 2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3} \\ h_{21} &= 20 - 200 & h_{22} &= 10^{-5} - 10^{-6} \text{ См} \end{aligned}$$

Пренебрегая малым значением параметра  $h_{12}$ , получим схему замещения биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ, в режиме малого сигнала (рис.2.4). В этой схеме

$h_{11} = R_{ВХ}, \frac{1}{h_{22}} = R_{ВЫХ}$  - входное и выходное сопротивления;  $h_{21} \cdot i_{Б}$  - источник тока, управляемый током базы  $i_{Б}$ . Таким образом, биполярный транзистор представляет собой источник тока, управляемый током.

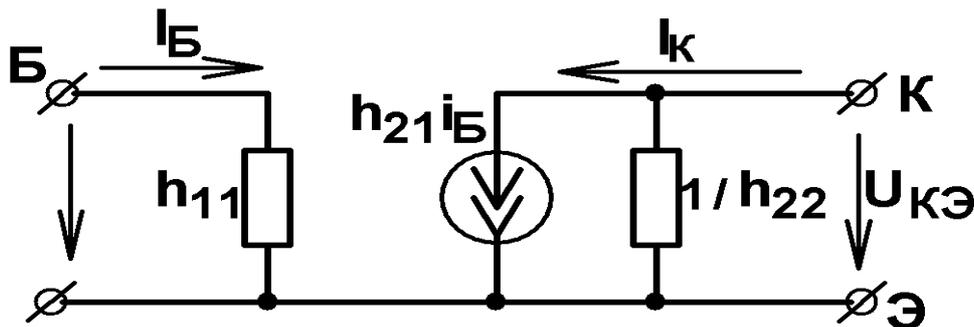


Рис.2.4 Схема замещения биполярного транзистора на постоянном токе и низких частотах

Эта схема замещения используется на постоянном токе и низких частотах, когда инерционность транзистора можно не учитывать. В более общем случае h- параметры транзистора являются комплексными величинами, в схему замещения добавляются емкости между базой и коллектором  $C_K$  и базой и эмиттером  $C_Э$ .

Для работы в линейном режиме на выходных характеристиках транзистора (рис.2.3.б) в режиме покоя выбирают рабочую точку А в центре линии нагрузки коллектора 1. В рабочей точке по выходным характеристикам находят ток коллектора  $I^*К$  и ток базы  $I^*Б$ . Область рабочих режимов транзистора на рис.2.3.б отмечена пунктирными линиями и ограничивается максимально допустимыми значениями тока коллектора  $I_{КМАХ}$ , напряжения  $U_{КМАХ}$ , мощности рассеяния  $P_{КМАХ} \approx U_{КЭ}I_{КЭ}$  и нелинейными искажениями при малых значениях тока коллектора.

Для стабилизации рабочей точки в линейных усилительных каскадах обычно применяют схему с общим эмиттером и отрицательной обратной связью. Такая схема исследуется в лабораторной работе и показана на рис.2.5. В МЭЛ-2  $R_7 = 510 \text{ Ом}$ ,  $R_{14} = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_{11} = 2,2 \text{ кОм}$ ,  $R_A = R_D = 2,2 \text{ кОм}$ ,  $C_A = C_B = C_C = 2,2 \text{ мкФ}$ .

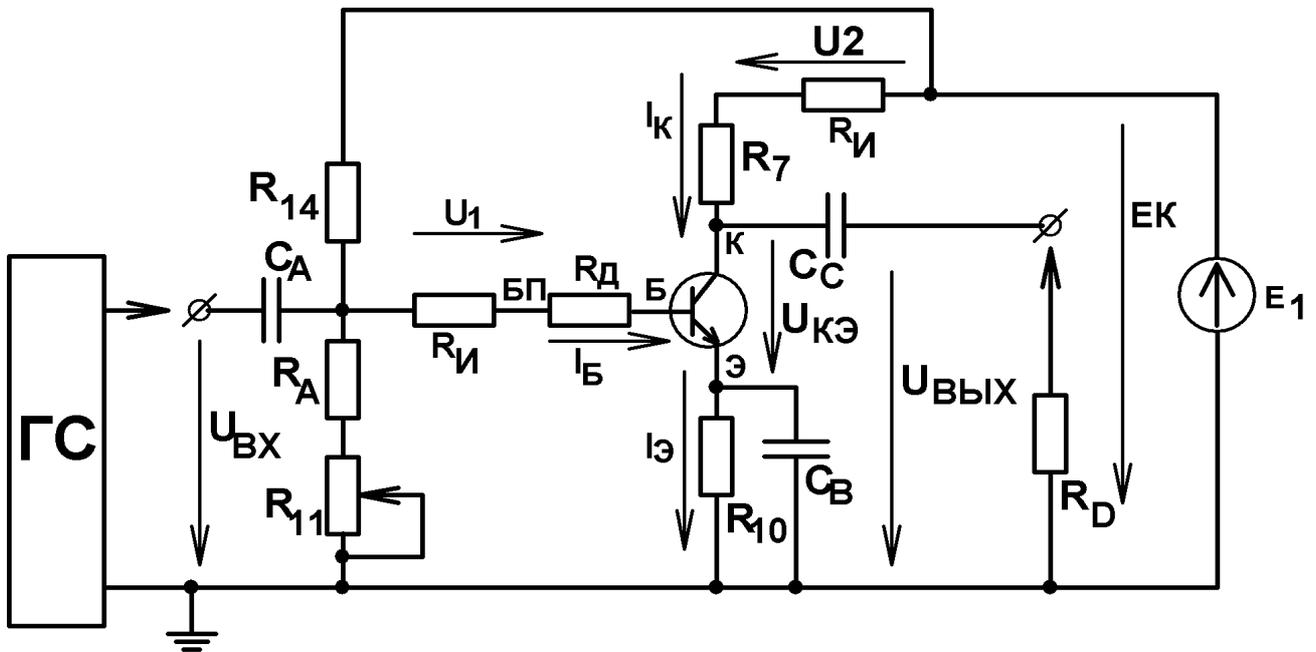


Рис.2.5 Схема усилительного транзисторного каскада с общим эмиттером

Если напряжение входного сигнала  $U_{ВХ}$  от генератора сигналов невелико, то работу усилительного транзисторного каскада можно представить в виде наложения режима покоя с постоянным источником ЭДС  $E_K$  и с постоянными составляющими тока базы  $I_B^*$ , тока коллектора  $I_K^*$  и тока эмиттера  $I_Э^*$ , соответствующими точке А на рабочей характеристике, и режима малого сигнала с переменными составляющими  $i_B, i_K, u_{ВХ}, u_{ВЫХ}$ .

В режиме покоя рабочая точка находится на пересечении нагрузочной прямой  $I_K = \frac{E - U_{КЭ}}{R_K + R_Э}$  (2.3)

Сопротивление  $R_Э = R_В$  создает отрицательную обратную связь и стабилизирует режим покоя. Схема замещения режима малого сигнала на низких частотах показана на рис.2.6.

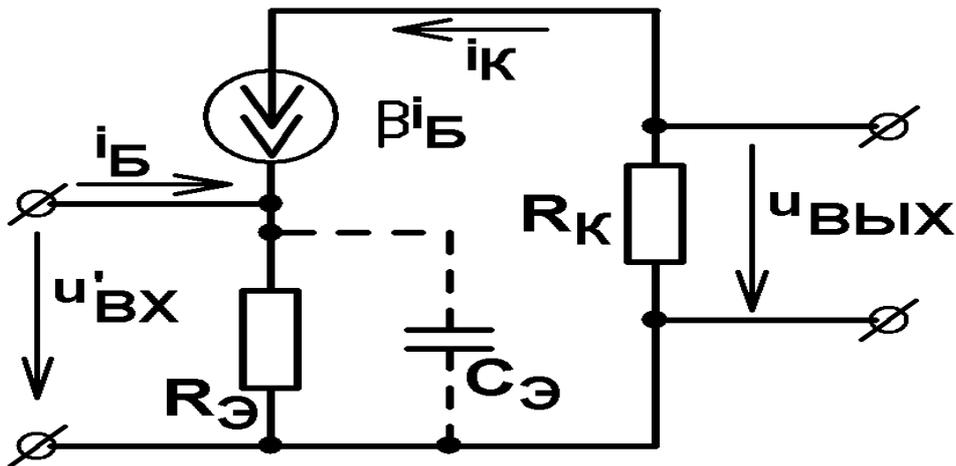


Рис.2.6. Схема замещения усилительного транзисторного каскада для малого переменного сигнала

В схеме замещения рис. 2.6 сопротивления  $R_{14}$  и  $R_{11} + R_A$  схемы рис.2.5 не учитываются,  $R_K$  соответствует  $R_7$ . Емкости для переменного сигнала сначала считаются короткозамкнутыми, сопротивления  $R_{и}$  не учитываются. В МЭЛ-2  $R_7 = 510 \text{ Ом}$ ,  $R_{14} = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_{11} = 2,2 \text{ кОм}$ ,  $R_A = R_D = 2,2 \text{ кОм}$ .

Для схемы замещения без учета емкостей коэффициент усиления по напряжению в режиме холостого хода:

$$K'_{U_x} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R_K}{R_Э + r_Э} \quad (2.4),$$

где  $r_{э} = \frac{25 мВ}{I_{э}}$  - дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер,  $I_{э}$  — постоянный ток эмиттера.

Отрицательное значение комплексного коэффициента усиления напряжения отражает изменение фаз выходного напряжения на  $180^\circ$  относительно входного напряжения.

Если в схеме учесть  $C_{э}$ , то коэффициент усиления в режиме холостого хода станет равным:

$$K_{U_x} = -\frac{R_K}{R_{э} + r_{э}} \sqrt{1 + (\omega C_{э} R_{э})^2} \quad (2.5).$$

Входное сопротивление по переменному току определяется как параллельное соединение входного сопротивления транзистора  $r_{бэ} = h_{11} = \beta r_{э}$  и сопротивления  $R_B$ , которое служит для установки рабочей точки каскада.

В схеме (рис.2.5):

$$R_B = \frac{R_{14}(R_A + R_{11})}{R_{14} + R_A + R_{11}}, R_{BX} = \frac{(r_{бэ} + R_D)R_B}{r_{бэ} + R_D + R_B} \quad (2.6)$$

Входная разделительная емкость  $C_A$  образует с входным сопротивлением  $R_{BX}$  делитель напряжения и коэффициент передачи входной цепи составит

$$K_{ВЦ} = \frac{R_{BX} \cdot \omega C_A}{\sqrt{1 + (R_{BX} \cdot \omega C_A)^2}} \quad (2.7)$$

С учетом (2.5) и (2.7) коэффициент усиления транзисторного каскада с общим эмиттером на низких частотах можно рассчитать по формуле

$$K_{U_{xHЧ}} = K_{U_x} \cdot K_{ВЦ} \quad (2.8)$$

С учетом сопротивления нагрузки  $R_H = R_D$  для малого переменного сигнала на высокой частоте соответствует нагрузочная прямая 2, показанная на рис.2.3 пунктирной линией и определяемая уравнением:

$$u_{кэ} = -\frac{R_K R_H}{R_H + R_K} i_K \quad (2.9)$$

Ток в цепи нагрузки равен:

$$i_H = -\frac{R_K}{R_H + R_K} i_K \quad (9.10)$$

## Лабораторное задание

### А. Исследование входной характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером и определение статического коэффициента передачи тока

1. Установить  $E_1=2В$ ,  $R_{H2}$  в крайнее левое положение,  $E_2=10В$ . Собрать схему, показанную на рис.2.2.

2. Увеличивая значение  $R_{H2}$  и при необходимости  $E_1$ , измерять и устанавливать заданные в таблице 2.1 значения напряжения  $U_1$  и соответствующие им напряжения  $U_{БЭ}$  и  $U_2$ . Результаты измерений записать в таблицу 2.1

Таблица 2.1

| $U_1, В$ | $U_{БЭ}, В$ | $I_B, мА$ | $U_{БЭ}, В$ | $U_2, В$ | $I_K, мА$ | $\beta$ |
|----------|-------------|-----------|-------------|----------|-----------|---------|
| 0        |             |           |             |          |           |         |
| 0,25     |             |           |             |          |           |         |
| 0,5      |             |           |             |          |           |         |
| 1        |             |           |             |          |           |         |
| 2        |             |           |             |          |           |         |
| 3        |             |           |             |          |           |         |
| 4        |             |           |             |          |           |         |
| 5        |             |           |             |          |           |         |

3. По данным измерений рассчитать и внести в таблицу значения  $I_B = \frac{U_1}{R_9}$ ,  $U_{БЭ} = U_{БПЭ} - I_B \cdot R_D$ ,  $I_K = \frac{U_2}{R_{II}}$ ,  $\beta = \frac{I_K}{I_B}$ .

4. Построить график входной характеристики биполярного транзистора.

### Б. Исследование выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

5. В схеме измерений рис.2.2 установить ток базы  $I_B = \frac{U_1}{R_9} = 0.25 мА$ . Изменяя  $E_2$ , провести измерения зависимости тока коллектора  $I_K$  от напряжения коллектор-эмиттер  $U_{КЭ}$ . Результаты записать в таблицу 2.2.

6. Выполнить измерения для других значений тока базы, указанных в таблице 2.2.

7. По данным таблицы 2.2 построить семейство выходных характеристик биполярного транзистора.

Таблица 2.2

|           |      | $U_{КЭ}, В$ | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
|-----------|------|-------------|---|---|---|---|---|----|
| $I_B, мА$ | 0,25 | $I_K, мА$   |   |   |   |   |   |    |
|           | 0,5  | $I_K, мА$   |   |   |   |   |   |    |
|           | 0,75 | $I_K, мА$   |   |   |   |   |   |    |
|           | 1    | $I_K, мА$   |   |   |   |   |   |    |
|           | 1,25 | $I_K, мА$   |   |   |   |   |   |    |
|           | 1,5  | $I_K, мА$   |   |   |   |   |   |    |
|           | 2,0  | $I_K, мА$   |   |   |   |   |   |    |

### В. Выбор рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером.

8. Для схемы транзисторного усилителя (рис.2.5) построить на семействе выходных характеристик линию нагрузки по постоянному току по формуле (2.3). Напряжение питания  $E=10\text{В}$ . Выбрать на линии нагрузки рабочую точку **А**, в которой  $U_{КЭ}=E_K/2$ . Определить для точки **А** постоянный ток базы  $I_B^*$  и постоянный ток коллектора  $I_K^*$ .

9. Собрать схему транзисторного усилителя с общим эмиттером (рис.2.5). Переменный входной сигнал не подключать.

10. Регулируя  $R_{11}$  и измеряя ток базы, установить  $I_B=I_B^*$ . Измерить и записать значения постоянной составляющей тока коллектора  $I_K$  и напряжения  $U_{КЭ}$ . Сравнить полученные значения с рассчитанными в точке **А**.

11. Выполнить повторную регулировку  $R_{11}$  и установить напряжение  $U_{КЭ}=5\text{В}$

### Г. Исследование работы транзисторного усилителя с общим эмиттером в режиме малого сигнала.

12. Установить в функциональном генераторе частоту синусоидального сигнала 2 кГц, амплитуду входного сигнала  $u_{ВХ}=200\text{ мВ}$  установить по осциллографу. Подключить входной сигнал к транзисторному усилителю.

13. Осциллографом наблюдать сигнал на выходе усилителя в режиме холостого хода без подключенной нагрузки. Если выходной сигнал не имеет существенных отличий от синусоидальной формы, измерить осциллографом амплитуду выходного сигнала. Если форма выходного сигнала существенно искажена, уменьшить амплитуду входного сигнала до 100 мВ. Записать измеренное значение  $u_{ВЫХ}$ . Рассчитать коэффициент усиления по напряжению  $K_{U_x} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$ .

14. Снять амплитудно-частотную характеристику транзисторного усилителя в режиме малого сигнала, изменяя частоту входного сигнала в диапазоне от 200 Гц до 20 кГц. Результаты записать в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

| $U_{ВХ}=\text{мВ}$ |     |   |   |    |    |    |
|--------------------|-----|---|---|----|----|----|
| $F, \text{кГц}$    | 0,2 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| $U_{ВЫХ}$          |     |   |   |    |    |    |
| $K_U(f)$           |     |   |   |    |    |    |

15. Подключить к транзисторному усилителю нагрузку  $R_D$ . Повторить измерения по п.14.

### Д. Исследование искажений выходного сигнала

16. Установить частоту входного сигнала 20 кГц, напряжение. Наблюдая форму выходного сигнала, увеличить амплитуду входного сигнала до появления заметных искажений выходного сигнала. Зарисовать осциллограмму выходного сигнала и записать значение напряжения входного сигнала  $u_{ВХ \text{ МАХ}}$ .

17. Установить частоту и амплитуду входного сигнала по п.п.12. Изменяя сопротивление  $R_{11}$ , наблюдать появление искажений формы выходного сигнала. Зарисовать осциллограмму выходного сигнала. Отключить выходной сигнал и измерить ток базы, ток коллектора и напряжение  $u_{КЭ}$ .

### Домашнее задание

1. По данным таблиц 2.1 и 2.2 построить графики входной характеристики, семейство выходных характеристик биполярного транзистора и зависимость статического коэффициента передачи тока  $\beta$  от тока базы.

2. Построить для схемы транзисторного усилителя (рис.2.5) линии нагрузки по постоянному току и по переменному сигналу на высокой частоте.

3. Для рабочей точки **А** по графикам входной и выходной характеристик найти по формулам

(2.2) параметры  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ . Нарисовать схему замещения транзистора по постоянному току с h-параметрами (рис.2.4).

4. По формулам (2.4), (2.5), (2.8) рассчитать коэффициенты усиления транзисторного каскада на частотах 200 Гц, 5 кГц и 20 кГц. Сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными из таблицы 2.3.

5. По графикам входной характеристики и выходных характеристик проиллюстрировать причины возникновения нелинейных искажений выходного сигнала, которые наблюдались в п.16 и 17. Отметить на нагрузочной прямой по постоянному току положение рабочей точки, соответствующей п.17.

## Практическая часть

|       |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| U, В  | 1,25 | 2    | 4    | 6    | 8    | 10   |
| I, mA | 2,3  | 2,3  | 2,3  | 2,4  | 2,4  | 2,5  |
|       | 3,5  | 3,6  | 3,6  | 3,7  | 3,7  | 3,7  |
|       | 4,5  | 5,1  | 5,2  | 5,3  | 5,3  | 5,3  |
|       | 7,2  | 7,4  | 7,6  | 7,7  | 7,7  | 7,7  |
|       | 9,6  | 10,1 | 11,9 | 12,2 | 12,3 | 12,3 |
|       | 10,8 | 13,7 | 13,9 | 14,0 | 14,1 | 14,1 |
|       | 12,7 | 14,2 | 15,6 | 15,7 | 15,8 | 15,8 |

| U <sub>1</sub> , В | U <sub>БЭ</sub> , В | I <sub>Б</sub> , mA | U <sub>БЭ</sub> , В | U <sub>2</sub> , В | I <sub>к</sub> , mA |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 0                  | 0                   | 0                   | 0                   | 0                  | 0                   |
| 0,25               | 0,76                | 0,25                | 0,735               | 0,34               | 19                  |
| 0,5                | 0,84                | 0,5                 | 0,756               | 0,36               | 36                  |
| 1                  | 0,86                | 1                   | 0,774               | 0,65               | 65                  |

