

Дата проведения занятия: 26 октября 2020 г.

Номер пары: 45.

Группа: 21А

Тема занятия: ПЗ № 10. Расчет усилителя

**Фотографии решения задачи практической работы скинуть в «В контакте» личным сообщением Орлову А.А.**

Для получения оценки 3 или 4, достаточно выполнить задание 1.

Для получения оценки 5, нужно выполнить задания 1 и 2.

Срок сдачи: 29.10.2020 для задания 1;

02.11.2020 для заданий 1 и 2.

Все вопросы, которые возникнут в процессе работы, можете задавать в социальной сети «В контакте» Орлову А.А. (<https://vk.com/id421045327>) личным сообщением.

### Задание 1.

1. Ознакомьтесь с методическими указаниями и примером решения задачи по расчету усилителя.

2. Начертите схему усилителя, в соответствии с требованиями ГОСТ.

3. Следуя методическим указаниям, примеру решения задачи, произведите расчет элементов усилителя по индивидуальному заданию в соответствии со своим вариантом.

### Методические указания

В задаче «Расчет усилителя» заданны: тип транзистора; схема усилителя

см. рис. 1; рабочая точка транзистора в состоянии покоя; сопротивление нагрузки усилителя  $R_H$ ; сопротивление резистора в цепи коллектора  $R_K$ ; наименьшая граничная частота усиления  $f_H$ ; падение напряжения  $U_Э$  на резисторе  $R_Э$  которое выбирают в соответствии с требованиями температурной стабильности усилителя.

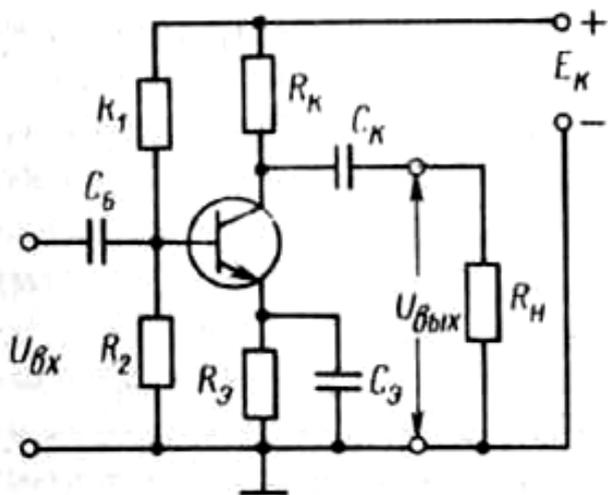


Рис 1. Усилительный каскад с общим эмиттером

Рассчитывают:

1) параметры элементов схемы, напряжения на этих элементах и протекающие через них токи,

2) коэффициент усиления по напряжению в области средних частот  $K_0$ .

**Некоторые из величин являются общими для всех вариантов,** поэтому они не указаны в таблице. Это коллекторный ток транзистора  $I_K = 1$  mA и напряжение между коллектором и эмиттером транзистора  $U_{KЭ} = 5$  В в состоянии покоя. Кроме того, сопротивление нагрузки усилителя  $R_H$  берут равным рассчитанному предварительно входному сопротивлению усилителя

$R_{BX}$ , т.е. считают, что данный усилитель имеет в качестве нагрузки такой же каскад усиления.

Нужно иметь в виду, что действительные  $h$ -параметры транзисторов имеют сильный разброс и зависят от положения рабочей точки. В таблице 1 для упрощения дается некоторое среднее значение параметров для данного типа транзистора. Следует иметь в виду, что большинство из приводимых формул также являются приближенными.

### Порядок расчета

1. Определяют падение напряжения на коллекторном резисторе в состоянии покоя:

$$U_K = I_K \cdot R_K$$

2. Рассчитывают ток базы транзистора в состоянии покоя:  $I_B = \frac{I_K}{h_{21Э}}$

3. Ток делителя, протекающий по резисторам  $R_1$ ,  $R_2$ , берут в 5 раз больше тока базы:  $I_D = 5 \cdot I_B$

4. Рассчитывают напряжение питания схемы как сумму трех напряжений:  $E_K = U_{КЭ} + U_K + U_Э$

5. Определяют падение напряжения на резисторе  $R_2$  делителя как сумму двух напряжений:  $U_2 = U_Э + U_{БЭ}$

Значение  $U_Э$  задано в таблице, напряжение  $U_{БЭ}$  считают равным для всех вариантов 0,2 В (на практике для германиевых транзисторов оно обычно колеблется в пределах 0,2 - 0,3 В).

6. Определяют падение напряжения на резисторе  $R_1$  как разность напряжений питания  $E_K$  и падения напряжения на резисторе  $R_2$ :  $U_1 = E_K - U_2$

7. Рассчитывают сопротивление резистора  $R_2$  по закону Ома:  $R_2 = \frac{U_2}{I_D}$

8. При расчете сопротивления резистора  $R_1$  нужно учитывать, что через него протекает сумма токов  $I_D$  и  $I_B$ :  $R_1 = \frac{U_1}{(I_D + I_B)}$

9. Находят входное сопротивление усилителя  $R_{BX}$  как эквивалентное сопротивление трех включенных параллельно резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ , и  $h_{11Э}$ , приближенно его можно принять равным  $h_{11Э}$ .

10. Сопротивление нагрузки усилителя  $R_H$  берут такого же значения, что и  $R_{BX}$ :

$$R_H = R_{BX}$$

11. Рассчитывают сопротивление резистора  $R_Э$  по закону Ома:

$$R_Э = \frac{U_Э}{(I_K + I_B)}$$

12. Оценивают емкость шунтирующего конденсатора  $C_Э$  в эмиттерной цепи по приближенной формуле:  $C_Э = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot r_Э}$ , где  $r_Э = \frac{2 \cdot h_{12Э}}{h_{22Э}}$ .

13. Оценивают емкость разделительного конденсатора на входе схемы по

приближенной формуле:  $C_B = \frac{1}{f_H \cdot R_{ВХ}}$ .

14. Емкость разделительного конденсатора на выходе схемы

рассчитывают по аналогичной формуле, но вместо  $R_{ВХ}$  берут  $R_H$ :  $C_K = \frac{1}{f_H \cdot R_H}$ .

15. Определяют коэффициент усиления по напряжению в области средних частот:  $K_0 = \frac{h_{21Э} \cdot R_{KH}}{h_{11Э}}$ ,  $R_{KH}$  - сопротивление, эквивалентное

параллельно включенным резисторам  $R_K$ ,  $R_H$ , и  $R_{ВЫХ}$ ;  $R_{ВЫХ} = \frac{1}{h_{22Э}}$  - выходное сопротивление транзистора.

### Пример расчета

Исходные данные для расчета:

Тип транзистора	$h_{11Э}$ , Ом	$h_{12Э}$	$h_{21Э}$	$h_{22Э}$ , Ом <sup>-1</sup>	$R_K$ , кОм	$U_Э$ , В	$f_H$ , Гц
ГТ108А	540	$9 \cdot 10^{-3}$	35	$120 \cdot 10^{-6}$	4,7	1,9	70

Решение.

1. Определяют падение напряжения на коллекторном резисторе в состоянии покоя:

$$U_K = I_K \cdot R_K = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 2,4 \cdot 10^3 = 2,4 \text{ В}$$

1. Рассчитывают ток базы транзистора в состоянии покоя:

$$I_B = \frac{I_K}{h_{21Э}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{35} = 28,5 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

2. Ток делителя, протекающий по резисторам  $R_1$ ,  $R_2$ , берут в 5 раз больше тока базы:

$$I_D = 5 \cdot I_B = 5 \cdot 28,5 \cdot 10^{-6} = 142,8 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

3. Рассчитывают напряжение питания схемы как сумму трех напряжений:

$$E_K = U_{КЭ} + U_K + U_Э = 5 + 2,4 + 1,9 = 9,3 \text{ В}$$

4. Определяют падение напряжения на резисторе  $R_2$  делителя как сумму двух напряжений:

$$U_2 = U_Э + U_{БЭ} = 1,9 + 0,2 = 2,1 \text{ В}$$

Значение  $U_Э$  задано в таблице, напряжение  $U_{БЭ}$  считают равным для всех вариантов 0,2 В (на практике для германиевых транзисторов оно обычно колеблется в пределах 0,2 - 0,3 В).

5. Определяют падение напряжения на резисторе  $R_1$  как разность напряжений питания  $E_K$  и падения напряжения на резисторе  $R_2$ :

$$U_1 = E_K - U_2 = 9,3 - 2,1 = 7,2 \text{ В}$$

6. Рассчитывают сопротивление резистора  $R_2$  по закону Ома:

$$R_2 = \frac{U_2}{I_D} = \frac{2,1}{142 \cdot 10^{-6}} = 14705 \text{ Ом}$$

7. При расчете сопротивления резистора  $R_I$  нужно учитывать, что через него протекает сумма токов  $I_D$  и  $I_B$ :

$$R_1 = \frac{U_1}{(I_D + I_B)} = \frac{7,2}{(142,8 + 28,5) \cdot 10^{-6}} = 42301 \text{ Ом}$$

8. Находят входное сопротивление усилителя  $R_{вх}$  как эквивалентное сопротивление трех включенных параллельно резисторов  $R_I$ ,  $R_2$ , и  $h_{11Э}$ , приближенно его можно принять равным  $h_{11Э}$ :

$$R_{вх} \approx h_{11Э} = 540 \text{ Ом}$$

12. Сопротивление нагрузки усилителя берут такого же значения:

$$R_H = R_{вх} = 540 \text{ Ом}$$

13. Рассчитывают сопротивление резистора  $R_Э$  по закону Ома:

$$R_Э = \frac{U_Э}{(I_K + I_B)} = \frac{1,9}{(1 \cdot 10^{-3} + 28,5 \cdot 10^{-6})} = 1847 \text{ Ом}$$

12. Оценивают емкость шунтирующего конденсатора  $C_Э$  в эмиттерной цепи, предварительно определив  $r_Э$ :

$$r_Э = \frac{2 \cdot h_{12Э}}{h_{22Э}} = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{120 \cdot 10^{-6}} = 150 \text{ Ом}$$

$$C_Э = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot r_Э} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 70 \cdot 150} = 15,15 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

16. Оценивают емкость разделительного конденсатора на входе схемы по приближенной формуле:

$$C_B = \frac{1}{f_H \cdot R_{вх}} = \frac{1}{70 \cdot 540} = 26,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

17. Емкость разделительного конденсатора на выходе схемы рассчитывают по аналогичной формуле, но вместо  $R_{вх}$  берут  $R_H$ , т.к. в нашем случае  $R_H = R_{вх} = 540 \text{ Ом}$ ,

$$C_K = C_B = 26,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

18. Определяют коэффициент усиления по напряжению в области средних частот:

$$K_0 = \frac{h_{21Э} \cdot R_{КН}}{h_{11Э}},$$

где,  $R_{КН}$  - сопротивление, эквивалентное параллельно включенным

резисторам  $R_K$ ,  $R_H$ , и  $R_{вых}$ ;  $R_{вых} = \frac{1}{h_{22Э}}$  - выходное сопротивление

транзистора.

## Индивидуальные задания.

### Замечание.

Коллекторный ток транзистора  $I_k = 1 \text{ mA}$  и напряжение между коллектором и эмиттером транзистора  $U_{кэ} = 5 \text{ В}$  в состоянии покоя, являются общими (одинаковыми) для всех вариантов, поэтому они не указаны в таблице.

Таблица исходных данных для задачи практической работы по вариантам.

Вар-т	Тип транзистора	$h_{11Э}, \text{ Ом}$	$h_{12Э}$	$h_{21Э}$	$h_{22Э}, \text{ Ом}^{-1}$	$R_{к}, \text{ кОм}$	$U_{Э}, \text{ В}$	$f_{н}, \text{ Гц}$	$P_{к\text{max}}, \text{ Вт}$
1	МП39	850	$7 \cdot 10^{-3}$	28	$55 \cdot 10^{-6}$	2,4	2,5	50	0,15
2	МП40	900	$8 \cdot 10^{-3}$	30	$60 \cdot 10^{-6}$	3,1	2,2	30	0,15
3	МП41	950	$7,5 \cdot 10^{-3}$	45	$50 \cdot 10^{-6}$	3,6	2,8	25	0,15
4	ГТ108А	540	$9 \cdot 10^{-3}$	35	$120 \cdot 10^{-6}$	1,8	1,1	65	0,075
5	МП 14	930	$7 \cdot 10^{-3}$	30	$100 \cdot 10^{-6}$	4,8	2,3	15	0,15
6	МП15	1300	$8 \cdot 10^{-3}$	45	$150 \cdot 10^{-6}$	1,5	0,8	70	0,15
7	МП39Б	1100	$6 \cdot 10^{-3}$	40	$45 \cdot 10^{-6}$	3,3	1,8	40	0,15
8	МП41А	750	$5 \cdot 10^{-3}$	75	$75 \cdot 10^{-6}$	4,5	3,1	10	0,15
9	ГТ309Б	4500	$9 \cdot 10^{-3}$	120	$250 \cdot 10^{-6}$	1,8	1,3	20	0,05
10	ГТ322Б	2500	$4 \cdot 10^{-3}$	85	$85 \cdot 10^{-6}$	3,2	2,0	35	0,2
11	МП40	900	$8 \cdot 10^{-3}$	30	$60 \cdot 10^{-6}$	4,3	1,5	80	0,15
12	МП14	930	$7 \cdot 10^{-3}$	30	$100 \cdot 10^{-6}$	4,8	1,6	90	0,15
13	МП40А	1100	$7 \cdot 10^{-3}$	30	$56 \cdot 10^{-6}$	5,1	2,0	85	0,15
14	ГТ108А	540	$9 \cdot 10^{-3}$	35	$120 \cdot 10^{-6}$	6,3	2,5	95	0,075
15	МП39	850	$7 \cdot 10^{-3}$	28	$55 \cdot 10^{-6}$	4,5	1,7	85	0,15
16	ГТ309Б	4500	$9 \cdot 10^{-3}$	120	$120 \cdot 10^{-6}$	5,2	2,6	75	0,05
17	МП15	1300	$8 \cdot 10^{-3}$	45	$150 \cdot 10^{-6}$	4,5	1,7	60	0,15
18	МП39Б	1100	$6 \cdot 10^{-3}$	40	$46 \cdot 10^{-6}$	6,8	2,3	90	0,15
19	ГТ322Б	2500	$4 \cdot 10^{-3}$	85	$85 \cdot 10^{-6}$	7,0	2,5	70	0,2
20	МП41А	750	$5 \cdot 10^{-3}$	75	$75 \cdot 10^{-6}$	6,2	1,8	50	0,15
21	МП40	900	$8 \cdot 10^{-3}$	30	$60 \cdot 10^{-6}$	3,6	1,7	50	0,15
22	МП14	930	$7 \cdot 10^{-3}$	30	$100 \cdot 10^{-6}$	4,2	1,9	70	0,15
23	МП39Б	1100	$6 \cdot 10^{-3}$	40	$45 \cdot 10^{-6}$	5,1	2,1	50	0,15
24	МП15	1300	$8 \cdot 10^{-3}$	45	$150 \cdot 10^{-6}$	3,3	1,4	40	0,15
25	МП41А	750	$5 \cdot 10^{-3}$	75	$75 \cdot 10^{-6}$	5,1	1,6	80	0,15

## Задание 2.

1. Ознакомьтесь с примером 2 решения задачи по расчету усилителя.
2. Начертите схему усилителя.
3. Произведите расчет усилительного каскада на транзисторе, который исследовался при выполнении л/р № 3 Биполярный транзистор.
4. Определите: величины токов и напряжений, параметры элементов схемы. В соответствии с рассчитанными значениями выберите величины сопротивлений резисторов из числовых рядов (см. приложение).

### Указания по выполнению работы.

Расчет усилительного каскада произвести аналогично приведенному ниже примеру.

Для расчета использовать справочные данные и вольтамперные характеристики транзистора, снятые при выполнении лабораторной работы.

Величину напряжения источника питания  $E$  выбрать в диапазоне от 6 до 8 В. Точку В выбирать с учетом положения кривых вольтамперной характеристики.

### Пример 2.

Рассчитать однокаскадный транзисторный усилитель (рис. 1.), который в частотном диапазоне от 40 Гц до 10 кГц должен обеспечить на нагрузке 300 Ом амплитуду выходного напряжения не менее  $U_{\text{выхmax}} = 2 \text{ В}$

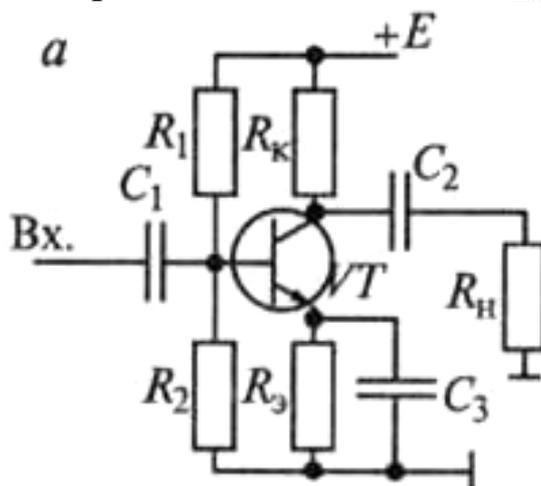


Рис.1. Схема усилителя.

*Решение.*

Выберем величину напряжения источника питания из условия:

$$E = (2,5 \div 3) \cdot U_{\text{выхmax}} = 5 \text{ В}$$

Требуемым частотному диапазону и амплитуде выходного напряжения отвечает кремниевый транзистор КТ315А с параметрами:

$$U_{KЭ \text{ max}} = 20 \text{ В}; I_{K \text{ max}} = 50 \text{ mA}; P = 0,15 \text{ Вт}; \beta = h_{21Э} = 160$$

Для выбора рабочей точки транзистора по постоянному току воспользуемся выходными вольтамперными характеристиками транзистора (рис. 2).

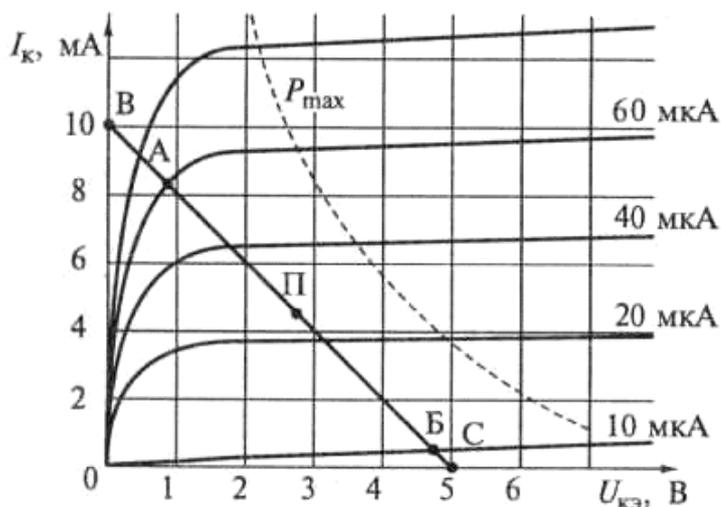


Рис. 2. Выходная характеристика транзистора.

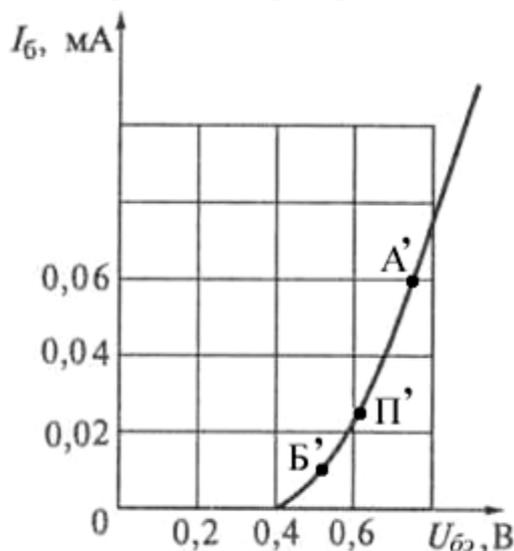


Рис. 3. Входная характеристика транзистора.

Проведем нагрузочную прямую  $BC$ . Положение этой прямой определит величину сопротивления резистора  $R_k$ . В точке  $B$  величина тока коллектора:

$I_k = 10 \text{ mA} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ A}$ , подставив полученные значения в формулу получим:

$$R_k = \frac{E}{I_{k \max}} = \frac{5}{10 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ Ом}.$$

Величину сопротивления резистора  $R_k$  используя таблицу 1 приложения принимаем равным:  $R_k = 510 \text{ Ом}$ .

На этой прямой выделяем линейный участок  $AB$ . Точка  $A$  имеет координаты  $8 \text{ mA}$ ;  $1 \text{ В}$ , а точка  $B$  — координаты  $0,05 \text{ mA}$ ;  $4,8 \text{ В}$ . Для определения координат середины участка (точка  $\Pi$ ), определим среднее значение по току и по напряжению:

$$I_{k\Pi} = \frac{(8 + 0,05)}{2} = 4,02 \text{ mA}$$

$$U_{кэ\Pi} = \frac{(1 + 4,8)}{2} = 2,9 \text{ В}$$

Практическая целесообразность рекомендует установить постоянное напряжение на сопротивлении  $R_3$  - ( $U_{R_3}$ ) равным  $1 \text{ В}$ . В этом случае при:

$I_3 = I_{k\Pi} = 4 \text{ mA}$ , величину сопротивления  $R_3$  можно определить по закону Ома:

$$R_3 = \frac{U_{R_3}}{I_3} = \frac{1}{4 \cdot 10^{-3}} = 250 \text{ Ом}$$

Величину сопротивления резистора  $R_3$  используя таблицу 1 приложения принимаем равным:  $R_3 = 240 \text{ Ом}$ .

Входное сопротивление каскада на постоянном токе:

$$R_{BX} = \beta \cdot R_3 = 160 \cdot 240 = 38400 \text{ Ом} = 38,4 \text{ кОм}$$

Ток базы определяем по выходной вольтамперной характеристике транзистора (рис. 2), для точки П получаем  $I_{БП} = 25 \text{ мкА}$  (точка П находится между кривыми соответствующим токам базы 20 и 40 мкА ближе к кривой соответствующей току 20 мкА, если бы точка П находилась между кривыми по середине, ей соответствовал бы ток базы 30 мкА).

Для расчета делителя на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  воспользуемся практическим условием по стабильности рабочей точки. Ток делителя должен быть в 2 — 3 раза больше базового тока. Принимая это условие, следует положить, что через резистор  $R_2$  должен протекать ток:

$$I_{R_2} = 3 \cdot I_{БП} = 3 \cdot 25 = 75 \text{ мкА}$$

Этот ток определяется напряжением на базе:

$$U_{БЭП} = U_{R_2} + 0,7 = 1 + 0,7 = 1,7 \text{ В}$$

Сопротивление резистора  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{U_{БЭП}}{I_{R_2}} = \frac{1,7}{75 \cdot 10^{-6}} = 22666 \text{ Ом} = 22,7 \text{ кОм}$$

величину сопротивления резистора  $R_2$  используя таблицу 1 приложения принимаем равным:  $R_2 = 24 \text{ кОм}$ .

Сопротивление резистора  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{E - U_{БЭП}}{I_{R_2} + I_{БП}} = \frac{5 - 1,7}{(75 + 25) \cdot 10^{-6}} = 33 \text{ кОм},$$

величину сопротивления резистора  $R_1$  используя таблицу 1 приложения принимаем равным:  $R_1 = 33 \text{ кОм}$ .

По входной и выходной вольтамперным характеристикам (рис. 2 и 3) можно определить амплитуды напряжений и токов на входе и выходе транзистора. На выходной характеристике (рис. 2.) при изменении тока базы ( $I_B$ ) в диапазоне от 10 до 25 мкА (точки Б и П на выходной характеристике), напряжение между коллектором и эмиттером транзистора ( $U_{кэ}$ ) изменяется в диапазоне от 4,75 до 2,75 В, ток коллектора ( $I_k$ ) изменяется в диапазоне от 0,5 до 4,5 мА, отсюда амплитудные значения:

$$I_{бм} = 25 - 10 = 15 \text{ мкА}$$

$$U_{кэм} = 4,75 - 2,75 = 2 \text{ В}$$

$$I_{км} = 4,5 - 0,5 = 4 \text{ мА}$$

На входной характеристике (рис.3) при изменении тока базы ( $I_B$ ) в диапазоне от 10 до 25 мкА (точки Б' и П' на входной характеристике), напряжение между базой и эмиттером транзистора ( $U_{бэ}$ ) изменяется в диапазоне от 0,52 до 0,62 В, отсюда амплитудное значение:

$$U_{бэм} = 0,62 - 0,52 = 0,1 \text{ В}$$

Зная величины амплитуд токов и напряжений можно определить коэффициенты усиления:

$$K_I = \frac{I_{км}}{I_{бт}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-6}} = 266$$

$$K_U = \frac{U_{км}}{U_{бт}} = \frac{2}{0,1} = 20$$

## Приложение.

### Номинальные величины сопротивлений.

Номинальные величины сопротивлений резисторов соответствуют одному из шести рядов: E6, E12, E24, E48, E96, E192.

Значение сопротивления резистора находят умножением или делением на  $10^n$  (где  $n$  – целое положительное число или нуль) чисел номинальных величин, входящих в состав ряда. Количество чисел входящих в десятичный интервал ряда определяется цифрой или числом стоящим после буквы E.

Таблица 1. Номинальные сопротивления по рядам.

Ряд	Числовые коэффициенты																							
E6	1				1,5				2,2				3,3				4,7				6,8			
E12	1		1,2		1,5		1,8		2,2		2,7		3,3		3,9		4,7		5,6		6,8		8,2	
E24	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,7	3	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

#### Замечание.

Для постоянных резисторов величины сопротивлений резисторов выбираются из рядов: E6, E12, E24, E48, E96, E192.

Для переменных резисторов величины сопротивлений резисторов выбираются из ряда: E6.

#### Например.

При числовом коэффициенте 1,8 величина сопротивления постоянного резистора может быть:

1,8 Ом; 18 Ом; 180 Ом; 1,8 кОм; 18 кОм; 180 кОм; 1,8 МОм и т.д.