

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ

«РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА С ОЭ»

ЗАДАЧА РАБОТЫ.

Рассчитать h – параметры биполярного транзистора, его входное и выходное сопротивления, коэффициент передачи по току, пользуясь входными и выходными характеристиками транзистора. Тип транзистора задается преподавателем. Схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ).

Провести графоаналитический расчет усилительного каскада на заданном типе транзистора, включенного по схеме с ОЭ, с одним источником питания E_K и с температурной стабилизацией рабочего режима.

Определить параметры элементов схемы усилительного каскада:

коэффициенты усиления по току (K_i), напряжению (K_u), мощности (K_p); токи и напряжения в режиме покоя $I_{б0}$, $I_{к0}$, $U_{бэ0}$, $U_{кэ0}$; амплитудные значения входных и выходных переменных токов и напряжений в линейном режиме работы усилителя; полезную выходную мощность каскада и его КПД; верхнюю и нижнюю граничные частоты полосы пропускания.

Ниже приводится рекомендуемая последовательность расчета усилителя на базе транзистора p-n-p типа проводимости (рис. 1). Расчет усилителя с n-p-n типа транзистором аналогичен (в этом случае следует правильно выбрать полярность источника питания E_K).

1. Расчет параметров транзистора.

1.1. Изобразить семейство статических входных и выходных характеристик заданного транзистора, соответствующих схеме с ОЭ.

1.2. Определить h – параметры транзистора, соответствующие схеме с ОЭ, пользуясь входными и выходными характеристиками транзистора:

по входным характеристикам определить

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{кк} = \text{const}}, \quad h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б} = \text{const}};$$

по выходным характеристикам определить

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{кк} = \text{const}}, \quad h_{22} = \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б} = \text{const}}.$$

1.3. Найти входное и выходное сопротивление транзистора:

$$R_{вхТ} = h_{11}, \quad R_{выхТ} = \frac{1}{h_{22}}$$

1.4. Определить коэффициент передачи по току транзистора β :

$$\beta = h_{21}.$$

2. Расчет усилительного каскада по постоянному току графоаналитическим методом.

- 2.1. Изобразить семейство выходных и входных (при $U_{кз} = 5В$) характеристики заданного транзистора как показано на рис. 2.
- 2.2. На выходных характеристиках нанести кривую допустимой мощности $P_{k\max}$, рассеиваемой на коллекторе, $P_{k\max} = U_{кз}I_k = \text{const}$.
- 2.3. Выбрать значение напряжения источника питания E_k в пределах $(0.7 - 0.9) U_{k\max}$. (Следует учитывать, что $E_k \approx 3U_{m\text{ вых}}$ и $E_k \approx U_{кз0} + I_{к0}(R_k + R_3)$). Эту величину в дальнейшем, после выбора R_k , R_3 , и $U_{m\text{ вых}}$ следует скорректировать.
- 2.4. Из условия передачи максимальной мощности от источника энергии к потребителю (согласованный режим) выбрать $R_k \approx R_{\text{вых. т.}}$ однако на выход усилителя обычно включается нагрузка $R_n \leq R_k$ поэтому рекомендуется выбирать $R_k = (0.3 - 1)R_{\text{вых. т.}}$ так чтобы его величина лежала в диапазоне $R_k = (0.5 - 10) \text{ кОм}$.
- 2.5. Построить нагрузочную линию усилительного каскада, согласно уравнению

$$U_{кз} = E_k - I_k R_k$$

Для этого использовать две точки (“d” и “c”) на выходных характеристиках транзистора (рис. 2):

$$U_{кз} = 0, I_k = \frac{E_k}{R_k} \text{ (т.ч. “d”); } I_k = 0, U_{кз} = E_k \text{ (т.ч. “c”).}$$

При этом линия нагрузки должна проходить левее и ниже допустимых значений $U_{k\max}$,

$I_{k\max}$, и $P_{k\max}$ и обеспечить достаточно протяженный линейный участок переходной характеристики (см. рис. 2)

- 2.6. По точкам пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками построить переходную характеристику транзистора $I_k = f(I_б)$ (см. рис. 2)
- 2.7. На переходной характеристике транзистора (с учетом входной характеристики) выбрать линейный участок “а - в”, в диапазоне которого усилитель усиливает без искажения. На середине участка “а - в” нанести рабочую точку “А”, соответствующую режиму работы транзистора по постоянному току.
- 2.8. По координатам рабочей точки “А” определить токи и напряжения транзистора в режиме покоя (по постоянному току): $I_{б0}$, $I_{к0}$, $U_{бз0}$, $U_{кз0}$.

3.0. Расчет усилительного каскада по переменному току.

- 3.1. Определить пределы изменения амплитуд входного тока и напряжения, выходного тока и напряжения в линейном режиме работы усилителя. Найти: $I_{бм}$, $I_{км}$, $U_{бэм}$, $U_{кэм}$ (см. рис. 2)
- 3.2. Рядом с графиками входных и выходных характеристик транзистора показать характер изменения токов и напряжений во времени в виде кривых:

$$\begin{aligned} i_б &= I_{б0} + I_{бм} \sin \omega t; \\ i_к &= I_{к0} + I_{км} \sin \omega t; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{бз} &= U_{бз0} + U_{бэм} \sin \omega t; \\ u_{кз} &= U_{кз0} + U_{кэм} \sin \omega t; \end{aligned}$$

соответствующих рабочим участкам этих характеристик.

4.0. Расчет параметров элементов усилителя ОЭ.

4.1. Рассчитать элементы цепи термостабилизации R_3 и C_3 .

4.1.1. Увеличение R_3 повышает глубину отрицательной обратной связи во входной цепи усилителя (улучшает термостабилизацию), с другой стороны, при этом падает КПД усилителя из-за дополнительных потерь мощности на этом сопротивлении. Обычно выбирают величину падения напряжения на R_3 порядка $(0,1 - 0,3)E_k$, что равносильно выбору $R_3 \approx (0,05 - 0,15)R_k$ в согласованном режиме работы транзистора. Используя последнее соотношение выбираем величину R_3 .

4.1.2. Для коллекторно – эмиттерной цепи усилительного каскада в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать уравнение электрического состояния по постоянному току

$$E_k = U_{кэ} + (R_k + R_3)I_{кэ}.$$

Используя это уравнение скорректировать выбранные по п.п. 2.3 и 2.4 значение E_k или величину R_k .

4.13. Определить емкость в цепи эмиттера C_3 из условия $R_3 = (5 - 10)X_3$, где X_3 – емкостное сопротивление элемента C_3 . При этом

$$C_3 = \frac{10^7}{(1 - 2)2\pi f_n R_3} \text{ мкФ, выбрав } f_n = 50 - 100 \text{ Гц.}$$

4.2. Для исключения шунтирующего действия делителя R_1, R_2 на входную цепь транзистора задается сопротивление R_6 .

$$R_6 = R_1 \parallel R_2 = (2 - 5)R_{эТ}$$

и ток делителя $I_d = (2 - 5)I_{б0}$, что повышает температурную стабильность $U_{б0}$. Исходя из этого определить сопротивления R_1, R_2, R_6 :

$$R_2 = \frac{U_{б0}}{I_d} = \frac{R_3 I_{кэ} + U_{бэ0}}{I_d} \quad ; \quad R_1 = \frac{E_k - U_{б0}}{I_d + I_{б0}} \quad ; \quad R_6 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

4.3. Определить емкость разделительного конденсатора из условия $R_{вх} = (5 - 10)X_p$, где X_p – емкостное сопротивление разделительного конденсатора, $R_{вх}$ – входное сопротивление каскада. При этом

$$C_p \approx \frac{10^7}{(1 - 2)2\pi f_n R_{вх}} \text{ мкФ, а } R_{вх} = R_6 \parallel R_{эТ}$$

5. Определить параметры усилительного каскада.

5.1. Коэффициент усиления каскада по току K_i

$$K_i = i_{вых} / i_{вх} \approx \beta$$

5.2. Входное сопротивление каскада $R_{вх}$

$$R_{вх} = R_6 \parallel R_{эТ}, \text{ если } R_6 \gg R_{эТ}, \text{ то } R_{вх} \approx R_{эТ}$$

5.3. Выходное сопротивление каскада $R_{вых}$

$$R_{вых} = \frac{R_k}{1 + h_{22} R_k} \approx R_k$$

5.4. Коэффициент усиления по напряжению K_n

$$K_u = - \frac{U_{m_{\text{вых}}}}{U_{m_{\text{вх}}}} = - \frac{\beta R_{\kappa}}{R_{\text{вх}}}$$

5.5. Коэффициент усиления по мощности K_p

$$K_p = K_i K_u$$

5.6. Полезную выходную мощность каскада

$$P_{\text{вых}} = 0,5 U_{m_{\text{вы}}}^2 / R_{\kappa}$$

5.7. Полную мощность, расходуемую источником питания

$$P_{\text{ист}} = I_{\kappa_0} E_{\kappa} + I_{\text{д}}^2 (R_1 + R_2) + I_{\text{до}}^2 R_1$$

5.8. КПД каскада

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{ист}}} 100\%$$

5.9. Верхняя и нижняя граничные частоты определяются из соотношения для коэффициента частотных искажений:

на нижней частоте
$$M_n = \frac{K_o}{K_n} = \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega_n \tau_n)^2}};$$

и верхней частоте
$$M_v = \frac{K_o}{K_n} = \sqrt{1 + (\omega_v \tau_v)^2}.$$

Обычно выбирается $M_n = M_v = \sqrt{2}$, тогда $\frac{1}{\omega_n \tau_n} = 1$ и $\omega_v \tau_v = 1$,

где $\tau_n \approx C_p (R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}})$ $\tau_v \approx C_{\kappa} \frac{R_{\text{вх}} R_{\text{вых}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}}$

C_{κ} – емкость коллекторного перехода.

6. Заключение.

6.1. Объяснить назначение всех элементов схемы усилительного каскада. Параметры элементов схемы выбираются на основании всего комплекса расчетов. По данным расчета выбрать стандартные резисторы и конденсаторы по справочнику. [1]

6.2. По результатам анализа усилительного каскада дать рекомендации по применению выбранного типа транзистора, оценив его коэффициенты усиления, частотные свойства, выходные напряжения и мощность в линейном режиме и КПД.

Литература.

1. Электротехнический справочник. Т.1,2. 7 – е изд. –М.: Энергоиздат, 1985, 1986
2. Транзисторы для аппаратуры широкого применения. Справочник под ред. Б.Л. Переломана. –М.: Радио и связь, 1981
3. Основы промышленной электроники под ред. В.Г. Герасимова. –М.: Высшая школа, 1978, 1986
4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. –М.: Высшая школа, 1982
5. Электротехника и электроника/кн. 3 .Электрические изменения и основы электроники// Под. ред. В.Г. Герасимова. –М.: Энергоатомиздат, 1998

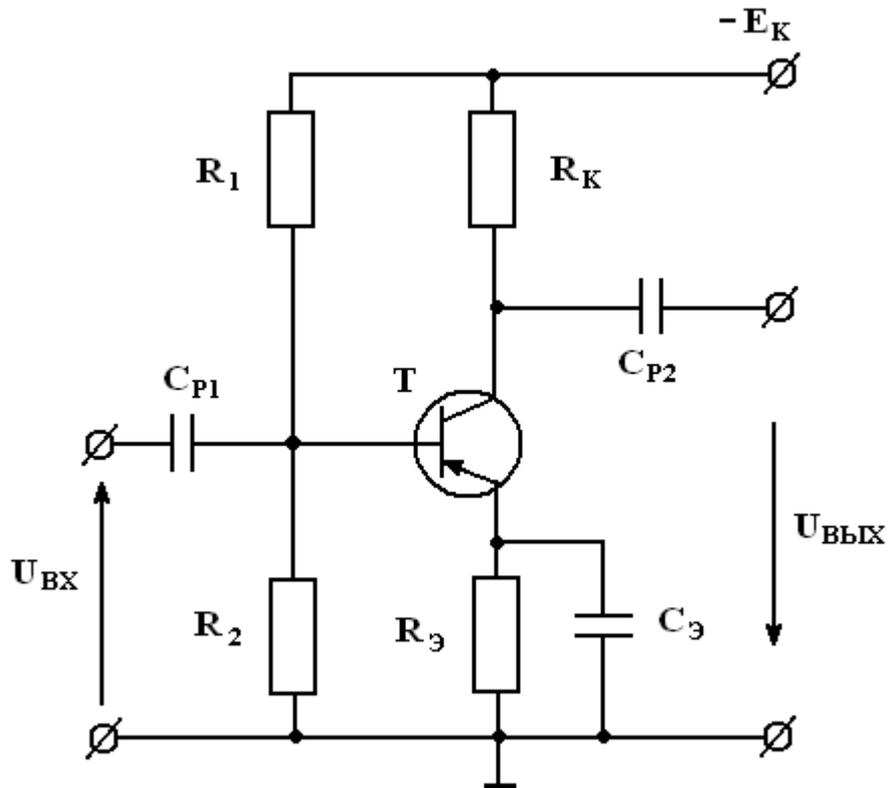


Рис. 1 Усилитель с общим эмиттером.

7.0 Методические указания.

7.1. По п. «Задача работы».

Различают по конструктивному выполнению биполярные транзисторы р-п-р и п-р-п типов. Включение их в электрическую цепь представлены на рис. 3 а,б (обратить внимание на полярность источника питания!).

Для определения проводимости Вашего транзистора и правильности включения его в электрическую цепь следует по справочникам [1,2] определить тип транзистора.

7.2. По п. 1.2.

Определяем h параметры транзистора методом треугольников как показано на рис. 4. Точки для треугольника выбирают на линейных участках вольт-

амперных характеристик рис. 4. (Например: т.ч. 1,2,3 - для параметров h_{11} и h_{12} ; и т.ч. 4,5,6,7 - для параметров h_{21} и h_{22} .)

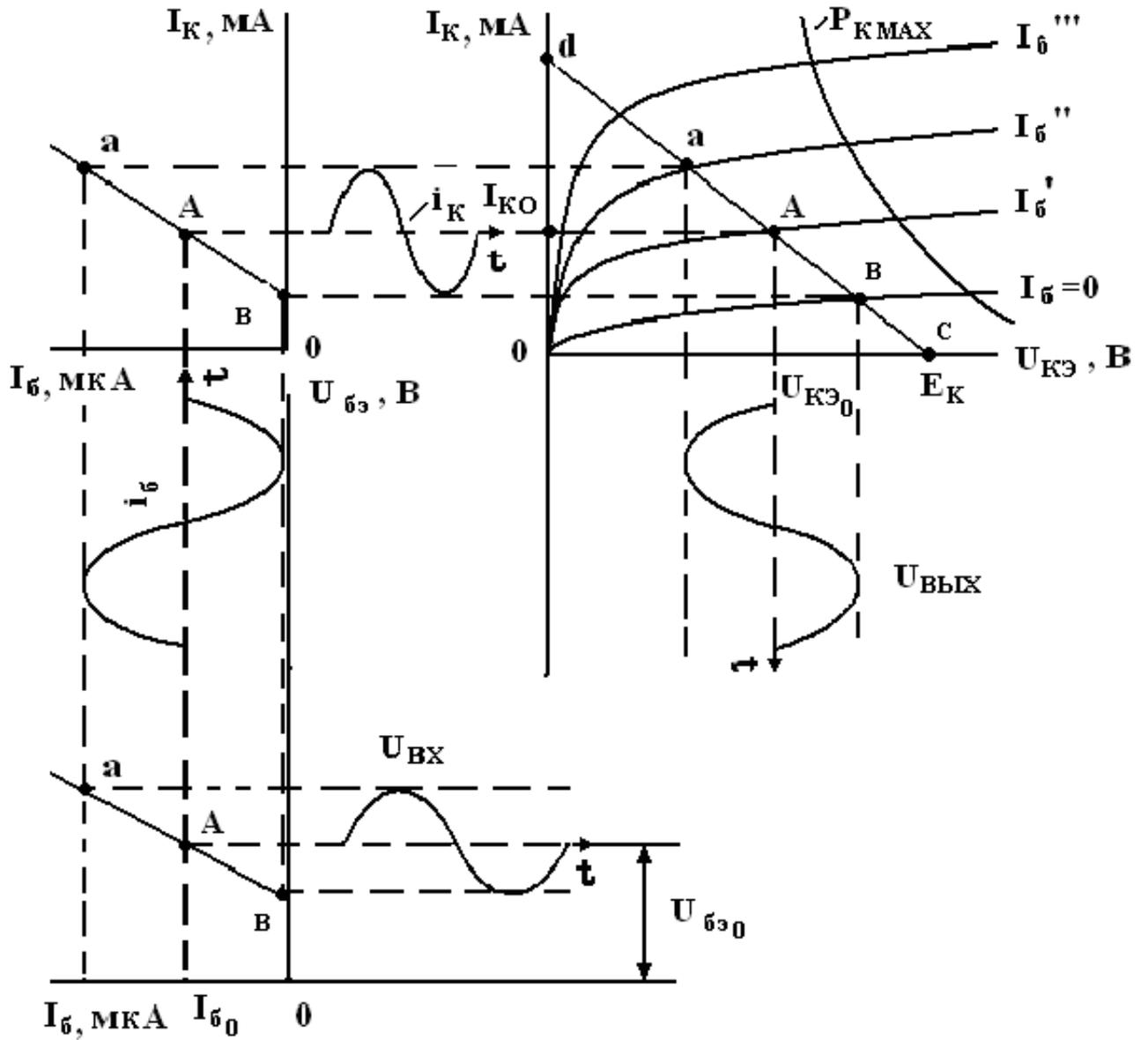
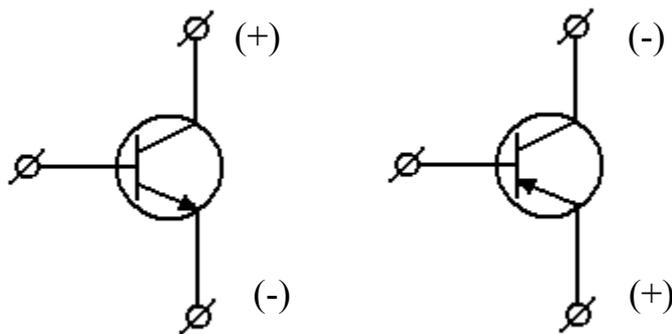


Рис. 2. Выбор рабочей точки.



«а» - n-p-n

«б» - p-n-p

Рис. 3. Типы транзисторов.

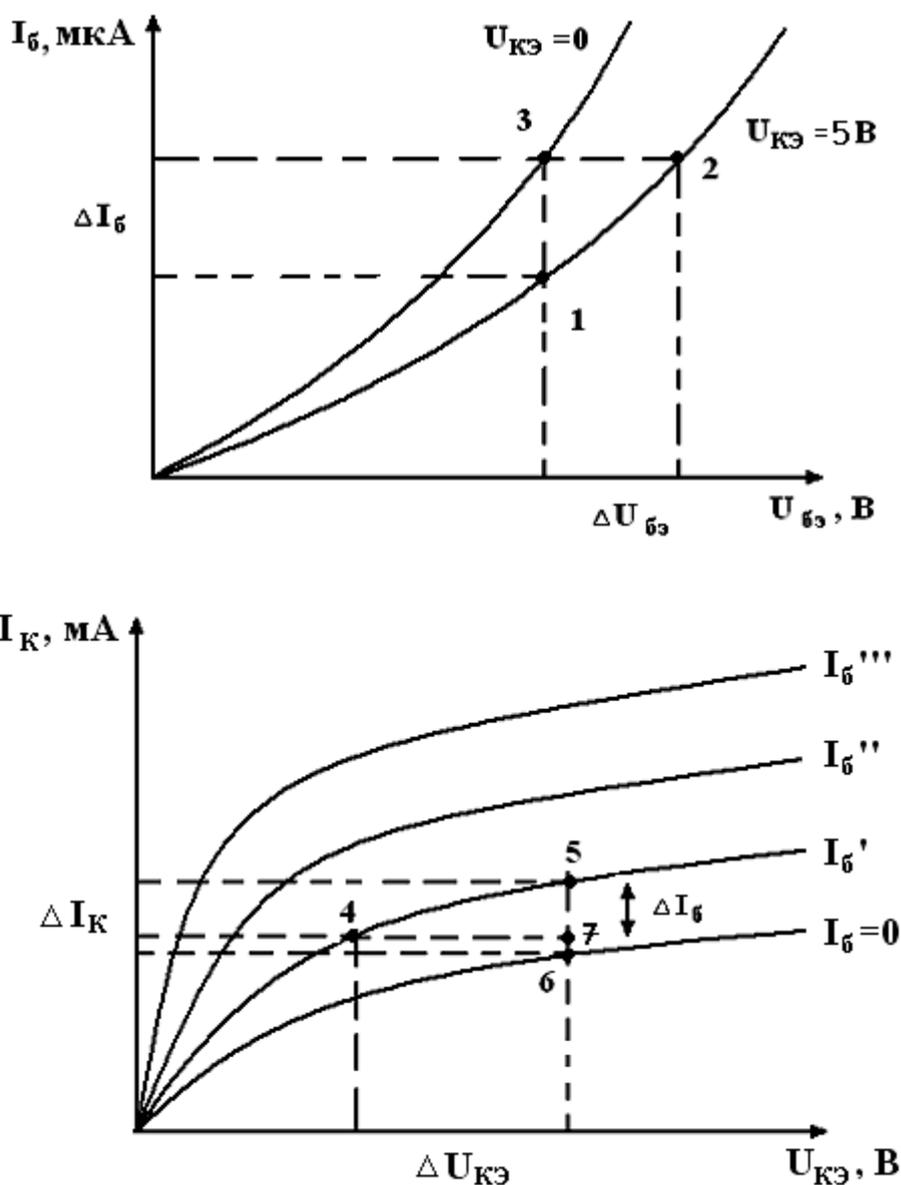


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики транзисторов.

$$h_{11} = \frac{\Delta_{32} U_{\text{бэ}}}{\Delta_{13} I_{\text{б}}} / U_{\text{кэ}} = \text{const},$$

$$h_{12} = \frac{\Delta_{32} U_{\text{бэ}}}{\Delta_{32} U_{\text{кэ}}} / I_{\text{б}} = \text{const};$$

$$h_{21} = \frac{\Delta_{56} I_{\text{к}}}{\Delta_{56} I_{\text{б}}} / U_{\text{кэ}} = \text{const},$$

$$h_{22} = \frac{\Delta_{57} I_{\text{к}}}{\Delta_{74} U_{\text{кэ}}} / I_{\text{б}} = \text{const}.$$

Пределы изменения h параметров для современных биполярных транзисторов малой и средней мощности:

$h_{11} = R_{\text{б}} \approx n$ (10 ÷ 100) Ом – входное сопротивление транзистора, где $n \approx (1 \div 10)$;

$h_{21} = \beta$ - коэффициент усиления по току; $h_{21} = (20 \div 1000)$;

$K_U = \frac{1}{h_{12}}$ - коэффициент усиления по напряжению ($K_U \leq 200$); $R_{\text{вых}} = \frac{1}{h_{22}} \approx n(1 \div 10)$

– выходное сопротивление транзистора,

где $n \approx (1 \div 10)$.

7.3. По п.2.2.

Кривую допустимой мощности вы также можете нанести по справочным данным транзистора [1,2].

7.4. По п. 2.6.

Переходные характеристики транзистора $I_k = f(I_0)$ (см. рис. 2) строят по пересечению линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора. Для Вашего транзистора этих пересечений будет более 3-х.

7.5. По 5.4.

Коэффициент усиления усилительного каскада с ОЭ обычно лежит в пределах до 100, но не может превышать $K_U \leq 200$.

7.6. По 5.8.

Усилительный каскад с ОЭ работает в линейном режиме и КПД не может превышать $\eta \leq 50\%$.

8.0. Пример выполнения задания по п.6.

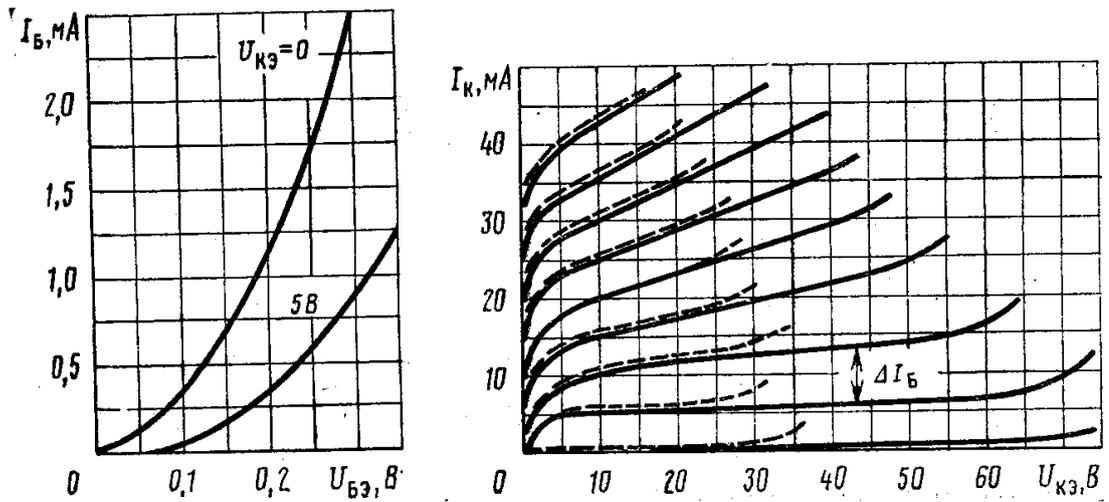
1) Назначение элементов схемы:

- транзистор Т – усилительный элемент;
 - резисторы R_1, R_2 представляют собой делитель напряжения, устанавливающий потенциал базы (по постоянному току) необходимый для работы каскада в линейном режиме;
 - резистор R_3 – цепь термостабилизации каскада, за счет падения напряжения на этом резисторе, превышающем напряжение на базовом переходе транзистора, уменьшает влияние изменения напряжения $U_{\text{бэ}0}$ при изменении температуры;
 - R_k – сопротивление нагрузки по постоянному току, служит для получения нужного потенциала на коллекторе и позволяет получить амплитуду выходного напряжения необходимой величины;
 - C_{p1}, C_{p2} – разделительные конденсаторы, служат для разделения (защиты) транзисторов по постоянному току;
 - C_3 – служит для уменьшения нижней границы частоты усилителя и увеличения коэффициента усиления по переменному току на низких частотах;
- Выбираемые номинальные значения всех элементов по справочникам, при этом берем ближайшие номинальные значения для резисторов и конденсаторов;
- 2) Данный тип транзистора можно применять в каскадах предварительного усиления сигналов низкой и высокой частот, т.к. верхняя граница частоты превышает _____ МГц, а нижняя граничная частота лежит в звуковом диапазоне. Выходная мощность каскада составляет _____ мВт.

ВАРИАНТЫ

1. МП21Г	16.КТ201Г
2. МП21Д	17.КТ208А
3. МП39	18.КТ209Б
4. МП40	19.ГТ310А
5. МП41А	20.ГТ310Б
6. МП42А	21.П416
7. МП42Б	22.П416А
8. ГТ108Б	23.П416Б
9. ГТ108Г	24.КТ3107А
10.МП114	25.КТ3107Б
11.МП116	26.КТ3107К
12.КТ104А	27.КТ313А
13.КТ104Б	28.КТ313Б
14.КТ104В	29.КТ345А
15.КТ201Б	30.КТ345Б

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ МП21Д, МП21Г



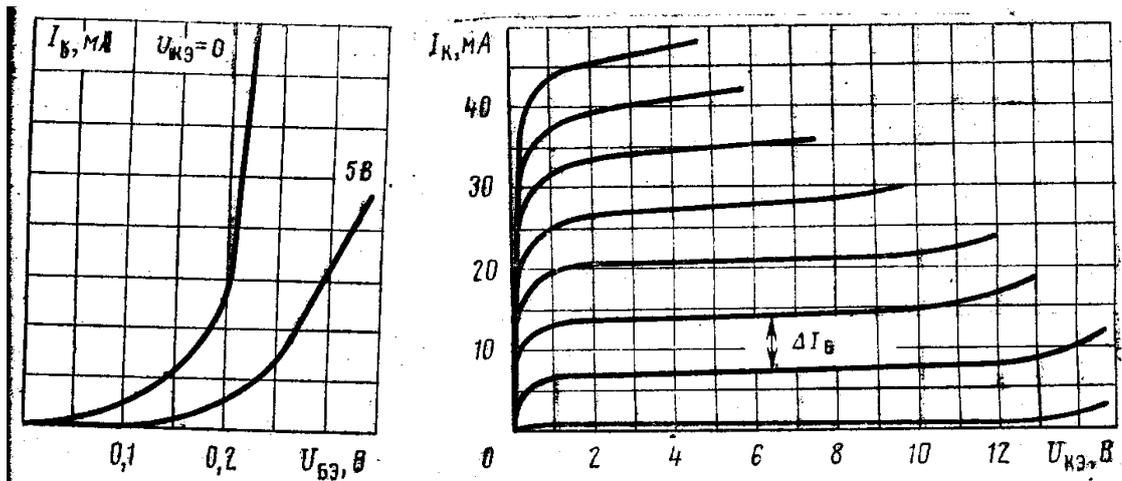
МП21Д – $\Delta I_{\sigma} = 40$ мкА МП21Г – $\Delta I_{\sigma} = 100$ мкА

$U_{KЭ\max} = 35$ В

$I_{K\max} = 50$ мА

$P_{K\max} = 150$ мВт $C_K = 30$ пФ

МП39, МП40, МП41А



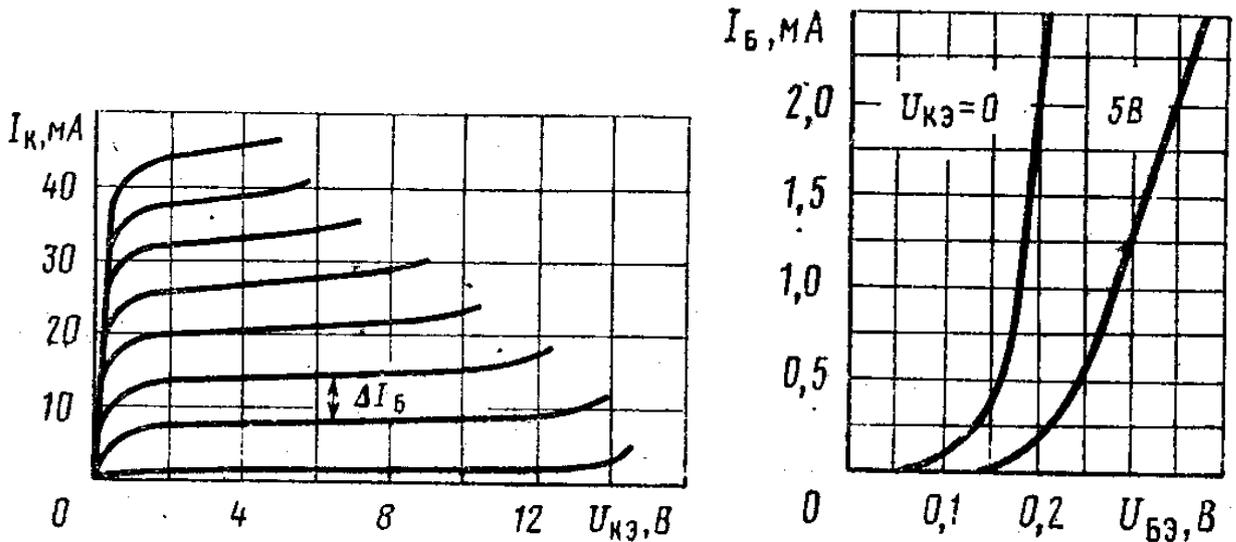
МП39 – $\Delta I_{\sigma} = 400$ мкА МП40 – $\Delta I_{\sigma} = 200$ мкА МП41А – $\Delta I_{\sigma} = 100$ мкА

$U_{KЭ\max} = 15$ В

$I_{K\max} = 20$ мА

$P_{K\max} = 150$ мВт $C_K = 50$ пФ

МП42А, МП42Б



МП42А – $\Delta I_o = 100$ мкА МП42Б – $\Delta I_o = 150$ мкА

$U_{KЭ \max} = 15$ В

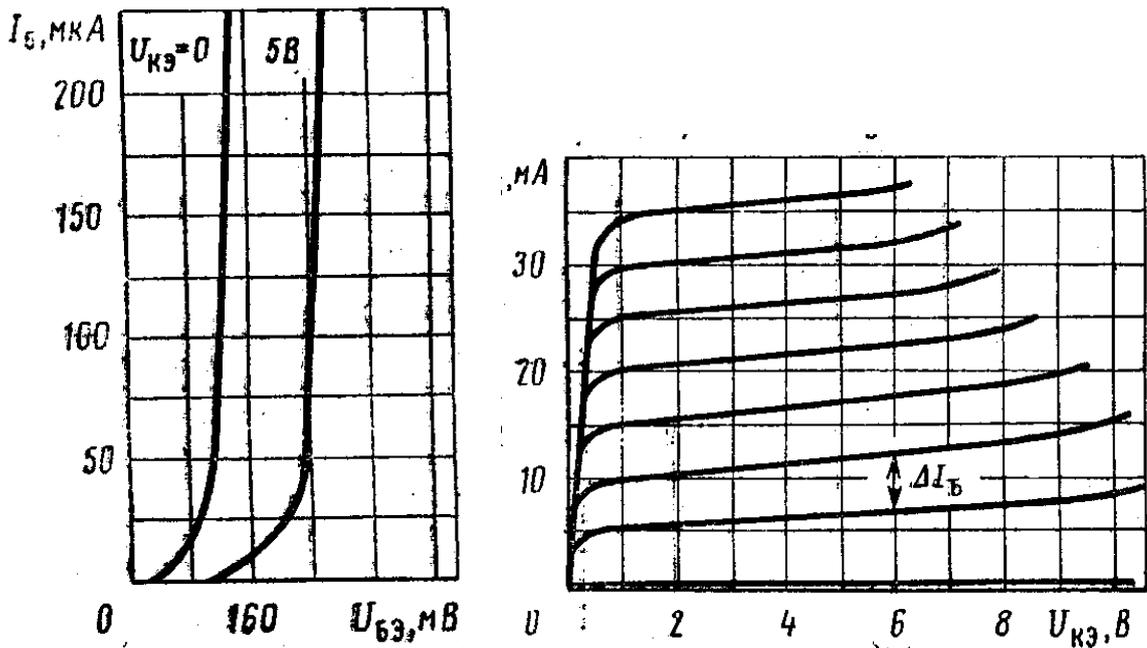
$I_{K \max} = 150$ мА

$P_{K \max} = 200$ мВт

$C_K = 50$ пФ

$f_{гр} = 1$ МГц

ГТ108Б, ГТ108Г



ГТ108Б – $\Delta I_o = 100$ мкА ГТ108Г – $\Delta I_o = 50$ мкА

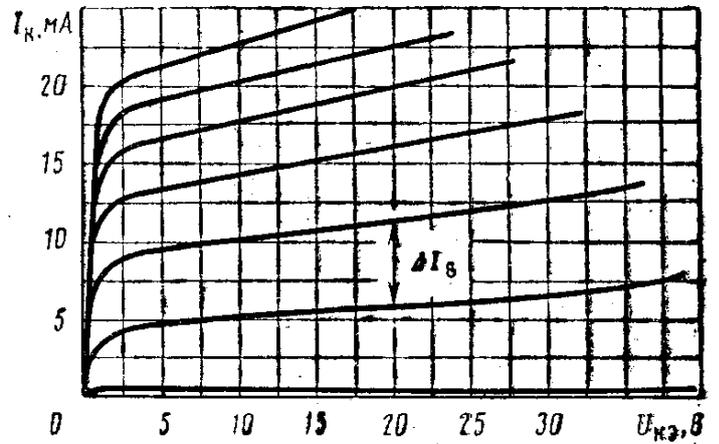
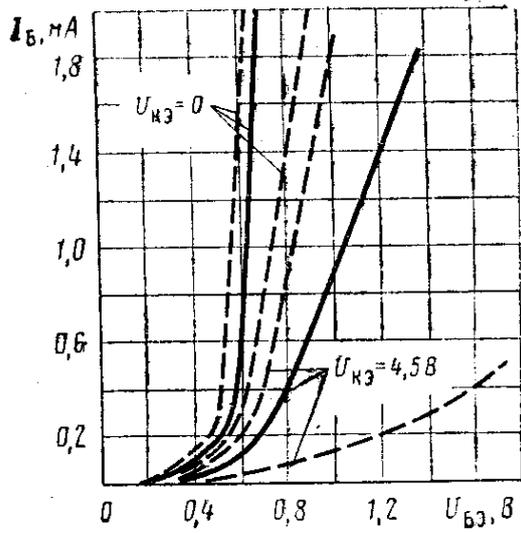
$U_{KЭ \max} = 6$ В

$I_{K \max} = 50$ мА

$P_{K \max} = 75$ мВт

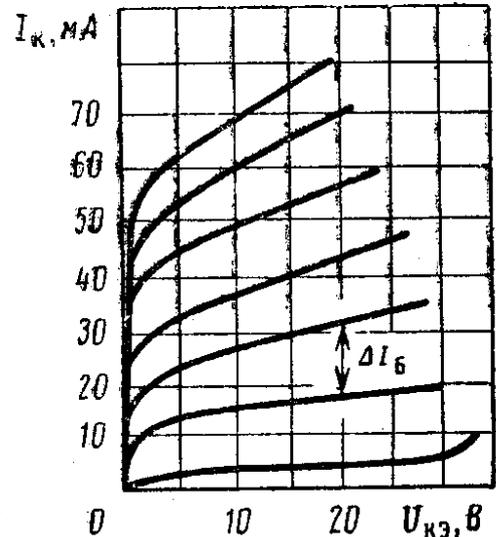
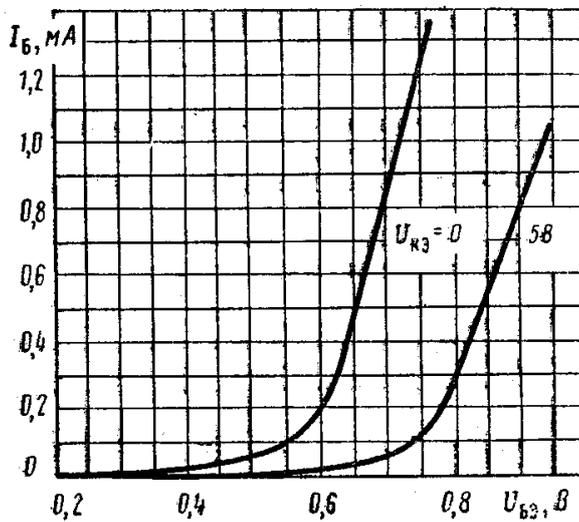
$C_K = 50$ пФ

МП114, МП115, МП116



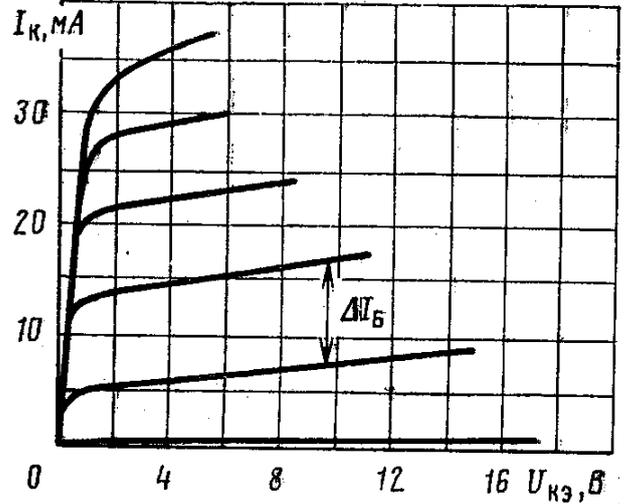
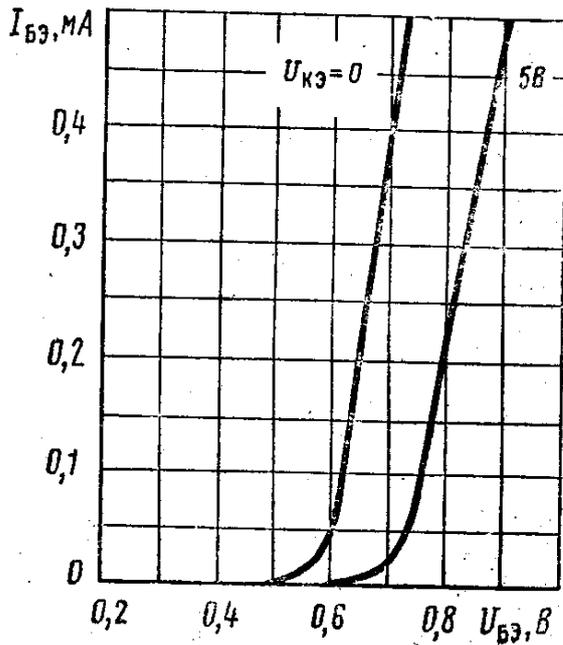
МП114 – $\Delta I_{\sigma} = 0,3 \text{ mA}$ МП115 – $\Delta I_{\sigma} = 0,3 \text{ mA}$ МП116 – $\Delta I_{\sigma} = 0,1 \text{ mA}$
 МП114 – $U_{кэ \text{ max}} = 60 \text{ B}$ МП115 – $U_{кэ \text{ max}} = 30 \text{ B}$ МП116 – $U_{кэ \text{ max}} = 15 \text{ B}$
 $I_{к \text{ max}} = 10 \text{ mA}$ $P_{к \text{ max}} = 150 \text{ мВт}$ $C_{к} = 50 \text{ пФ}$
 МП114 – $f_{гр} = 0,92 \text{ МГц}$ МП116 – $f_{гр} = 2,0 \text{ МГц}$

КТ104А, КТ104Б, КТ104В



КТ104А – $\Delta I_{\sigma} = 1,5 \text{ mA}$ КТ104Б – $\Delta I_{\sigma} = 0,4 \text{ mA}$ КТ104В – $\Delta I_{\sigma} = 0,2 \text{ mA}$
 КТ104А – $U_{кэ \text{ max}} = 30 \text{ B}$ КТ104Б – $U_{кэ \text{ max}} = 15 \text{ B}$ КТ104В – $U_{кэ \text{ max}} = 15 \text{ B}$
 $I_{к \text{ max}} = 50 \text{ mA}$ $P_{к \text{ max}} = 150 \text{ мВт}$ $C_{к} = 50 \text{ пФ}$

КТ201Г, КТ201Б

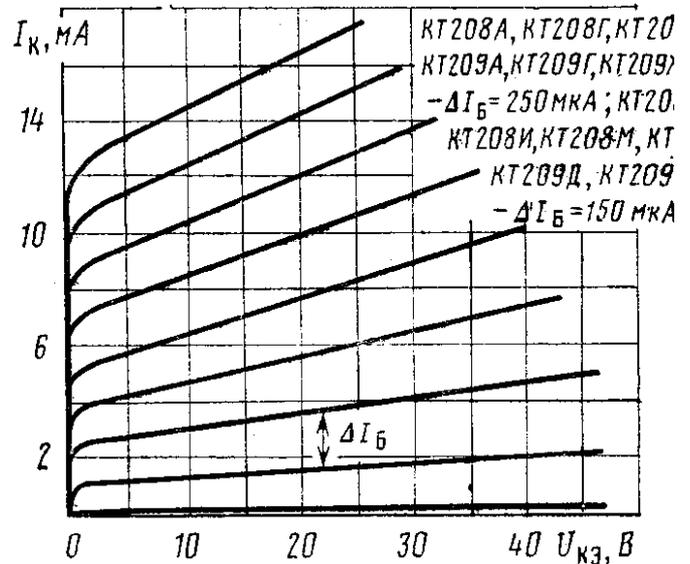
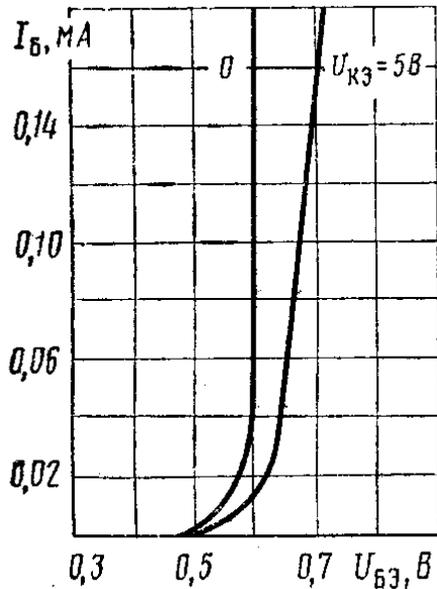


КТ201Б – $\Delta I_{\sigma} = 0,1 \text{ mA}$ КТ201Г – $\Delta I_{\sigma} = 0,05 \text{ mA}$

КТ201Б – $U_{K3 \text{ max}} = 20 \text{ B}$ КТ201Г – $U_{K3 \text{ max}} = 10 \text{ B}$

$I_{K \text{ max}} = 30 \text{ mA}$ $P_{K \text{ max}} = 150 \text{ мВт}$ $C_K = 20 \text{ пФ}$

КТ208А, КТ209Б

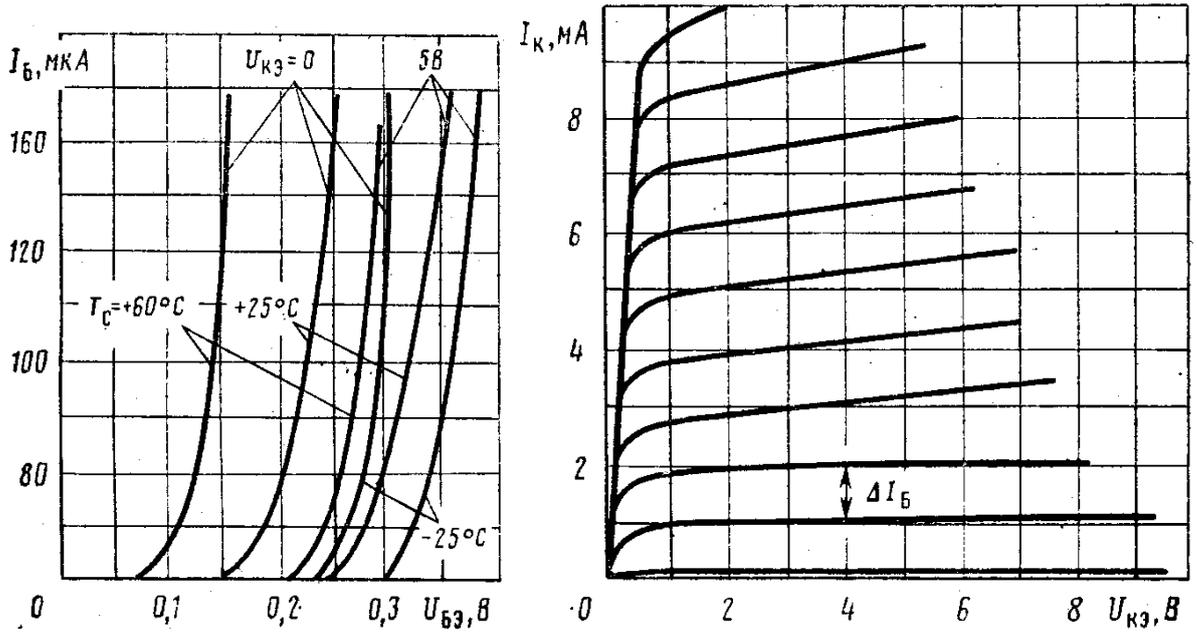


КТ208А – $\Delta I_{\sigma} = 150 \text{ мкА}$ КТ209Б – $\Delta I_{\sigma} = 250 \text{ мкА}$

$U_{K3 \text{ max}} = 15 \text{ B}$ $I_{K \text{ max}} = 300 \text{ mA}$

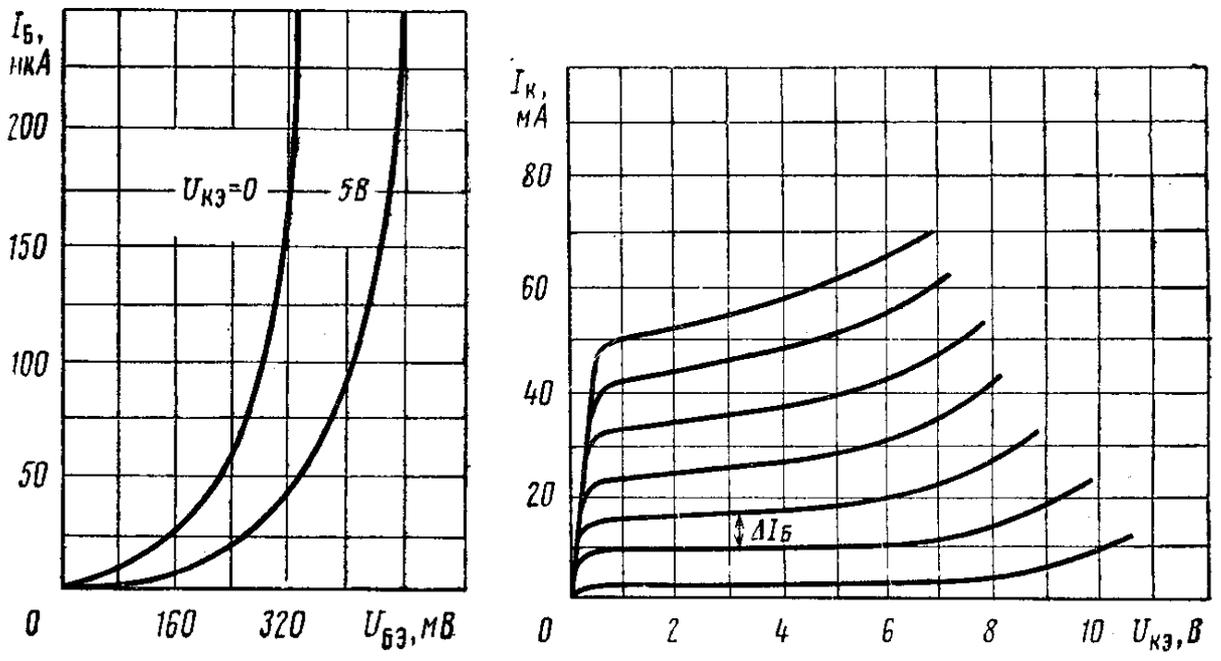
$P_{K \text{ max}} = 200 \text{ мВт}$ $C_K = 20 \text{ пФ}$

ГТ310А, ГТ31Б



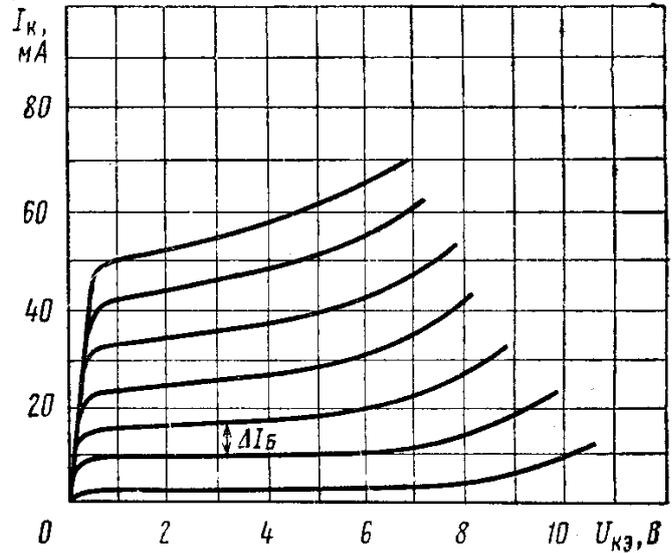
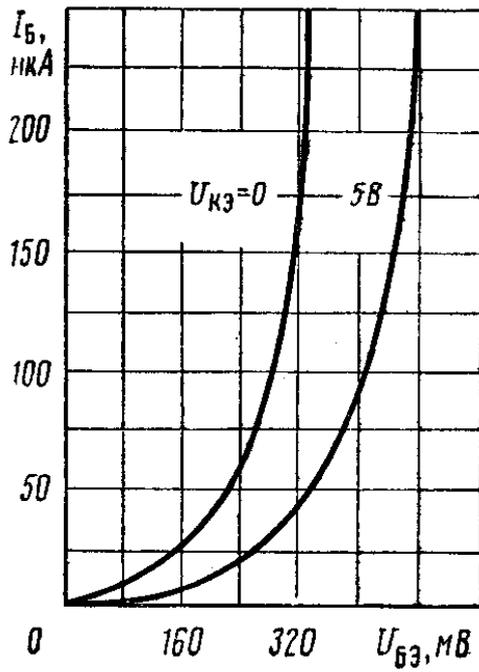
ГТ310А – $\Delta I_{\sigma} = 20 \text{ мкА}$ ГТ310Б – $\Delta I_{\sigma} = 10 \text{ мкА}$
 $U_{кэ \text{ max}}$ (при $R_{\sigma} = 10 \text{ кОм}$) = 10 В $U_{кэ \text{ max}}$ (при $R_{\sigma} = 200 \text{ кОм}$) = 6 В
 $I_{к \text{ max}} = 10 \text{ мА}$ $P_{к \text{ max}} = 20 \text{ мВт}$ $C_{к} = 20 \text{ пФ}$

П416, П416А, П416Б



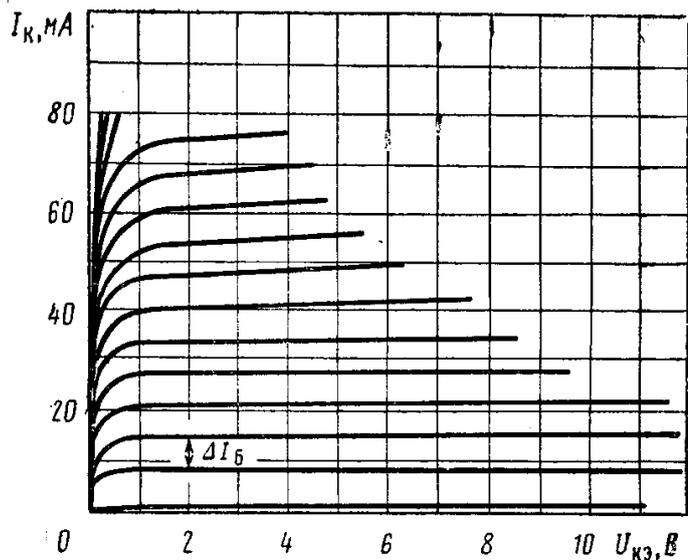
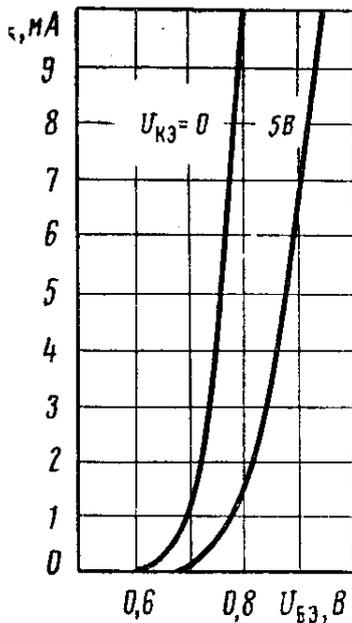
П416 – $\Delta I_{\sigma} = 0,1 \text{ мА}$ П416А – $\Delta I_{\sigma} = 0,05 \text{ мА}$ П416Б – $\Delta I_{\sigma} = 0,03 \text{ мА}$
 $U_{кэ \text{ max}}$ (при $R_{\sigma} = 0$) = 15 В $U_{кэ \text{ max}}$ (при $R_{\sigma} \leq 1 \text{ кОм}$) = 12 В
 $I_{к \text{ max}} = 25 \text{ мА}$ $P_{к \text{ max}} = 100 \text{ мВт}$ $C_{к} = 20 \text{ пФ}$

КТ3107А, КТ3107Б, КТ3107К



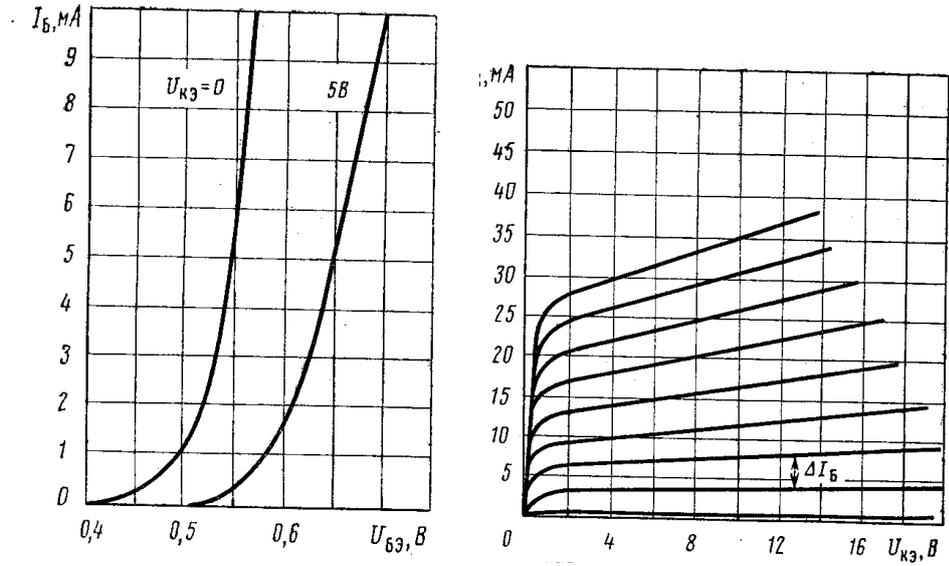
КТ3107А – $\Delta I_{\sigma} = 0,2 \text{ мА}$ КТ3107Б – $\Delta I_{\sigma} = 0,1 \text{ мА}$ КТ3107К – $\Delta I_{\sigma} = 0,04 \text{ мА}$
 КТ3107А – $U_{KЭ \text{ max}} = 45 \text{ В}$ КТ3107Б – $U_{KЭ \text{ max}} = 45 \text{ В}$ КТ3107К – $U_{KЭ \text{ max}} = 25 \text{ В}$
 $I_{K \text{ max}} = 100 \text{ мА}$ $P_{K \text{ max}} = 300 \text{ мВт}$ $C_K = 12 \text{ пФ}$

КТ313А, КТ313Б



КТ313А – $\Delta I_{\sigma} = 0,1 \text{ мА}$ КТ313Б – $\Delta I_{\sigma} = 0,05 \text{ мА}$
 $U_{KЭ \text{ max}}$ (при $R_{\sigma} \leq 1 \text{ кОм}$) = 50В
 $I_{K \text{ max}} = 350 \text{ мА}$ $P_{K \text{ max}} = 300 \text{ мВт}$ $C_K = 12 \text{ пФ}$

КТ345А, КТ345Б



КТ345А – $\Delta I_{\phi} = 0,075$ мА КТ345Б – $\Delta I_{\phi} = 0,05$ мА

$U_{кэ\max}$ (при $R_{\phi} \leq 10$ кОм) = 20В

$I_{к\max} = 200$ мА

$P_{к\max} = 150$ мВт

$C_{к} = 50$ пФ