

## Анализ схемы

После определения сопротивлений резисторов каскада можно начать проверку работы схемы. Забываем про предварительный расчет и считаем, что надо исследовать заданный каскад (ОЭ или ОК), имеющий рассчитанный в процессе синтеза набор параметров (каскад нарисован в конце предыдущего пункта). Проверка состоит из ручной и компьютерной (с помощью программы OrCad) частей. Ручная часть включает:

- расчет по постоянному току (определение рабочего режима аналитическим и графическим способом, а также определение возможного ухода р.т. **из-за влияния температуры и технологического разброса параметра  $\beta$** ),
- расчет по переменному току (определение основных параметров каскада, расчет на низкой и высокой частоте).

### 7. Расчет рабочего режима каскада.

Перед расчетом рабочего режима (т.е. определения координат рабочей точки) надо **нарисовать схему каскада по постоянному току** с учетом типа транзистора и знака  $E_n$ , **обозначить токи  $I_b, I_k, I_e$  и напряжения  $U_{бэ}$  и  $U_{кэ}$** . Источник  $E_n$  должен быть в этой схеме нарисован в явном виде. Схема не должна содержать конденсаторов (сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно). Токи и напряжение  $U_{кэ}$  определяются из системы уравнений, составленных на основе законов Кирхгофа и с учетом того, что при аналитическом расчете можно принять  $U_{бэ}=0.7\text{В}$  (см. лекции). Отмечу, что для р-п-р транзистора при расчете рабочей точки считается, что  $U_{бэ} = -0.7\text{В}$  (напряжение  $U_{кэ}$  также должно получиться меньше нуля:  $U_{кэ} < 0$ ).

Результат расчета – рабочие точки ( $I_{бА}, U_{бэА}$ ) и ( $I_{кА}, U_{кэА}$ ), которые надо нанести на соответственно входную и выходные характеристики транзистора. Точка на выходных характеристиках (обозначим ее  $A_7$ ) должна лежать близко от построенной на этапе предварительного расчета точки  $A_3$ . Если расхождение велико, продолжать бесполезно и имеет смысл искать ошибку в расчетах.

Сразу после выполнения аналитического расчета по постоянному току вручную рекомендую определить рабочий режим с помощью программы OrCad (см. в конце файла «Как графически рассчитать рабочий режим схемы» или методические указания к ЛР4). Затем нужно сравнить результаты ручного и машинного расчета, и в случае значительных расхождений искать ошибку в расчетах. Результаты компьютерного расчета в этом п. представлять не нужно.

### 8. Расчет возможного ухода рабочего тока.

В пункте требуется определить **максимально возможную величину ухода рабочего тока**  $\Delta I_k = \Delta I_{k1} + \Delta I_{k2}$ , все необходимые для расчета формулы приведены в п. 5а в Приложении, ограниченном знаками\*\*\*.

Для всех изменяющихся параметров (которые могут принимать несколько различных значений) следует **брать их наибольшие величины**, чтобы и в наихудшем случае (когда параметры отклоняются от расчетных значений больше всего) усилитель работал в линейном режиме (транзистор не вышел на участки работы в режиме насыщения и/или отсечки).

После определения  $\Delta I_k$ , надо посчитать величину  $\Delta U_T = \Delta I_k R_+ =$  и сравнить с величиной  $\Delta U_T$ , выбранной в п. 3 при расчете рабочей точки. Если полученное в этом пункте значение  $\Delta U_T$  меньше выбранной в п. 3 величины – все в порядке, и можно продолжить расчет, если больше – надо искать ошибку или начинать расчет заново с п. 3.

### 9. Графический расчет рабочего режима.

Для графического расчета желательно сделать отдельный «чистый» экземпляр характеристик транзистора (**без всяких построений** (гиперболы и прямых) и всевозможных **точек**; оси и режимы наносятся на графики с помощью любого графического редактора уже после окончания расчета). При выполнении графического расчета следует руководствоваться файлом «Как графически рассчитать рабочий режим схемы» или методическими указаниями к ЛР4. Перед началом расчета надо написать **в общем виде и в числах уравнения линий нагрузки** для входной и выходных характеристик сначала в классическом виде, а потом в том виде, в котором эти уравнения будут введены в OrCad.

- С помощью программы OrCad построить на входных характеристиках нагрузочную прямую  $U_{бэ}(I_б) = E_{см} - I_б R_{см}$  (как это делали при выполнении ЛР4) или  $U_{бэ}(I_б) = E_{см} - I_б R_б - I_э R_э$  (как рекомендуется в методических указаниях), точку пересечения входной характеристики и нагрузочной прямой отметить маркером курсора и обозначить  $A_9$  – это и есть р.т. ( $U_{бэА}$  и  $I_{бА}$ ), найденная графическим методом. После построения нагрузочной прямой характеристику надо «обрезать» так, чтобы р.т. лежала примерно в середине графика.

- На выходных характеристиках с помощью программы OrCad построить нагрузочную прямую  $U_{кэ}(I_к) = E_n - I_к R_+$  (как это делали при выполнении ЛР4) или  $U_{кэ}(I_к) = E_n - I_к R_к - I_э R_э$  (она может отличаться от прямой, построенной в п. 3 на этапе предварительного расчета) и фрагмент **дополнительной выходной характеристики**, соответствующей найденному графическим методом в этом пункте значению тока  $I_{бА}$ . Или (как мы это делали при выполнении ЛР4) можно грамотно выбрать начальное ( $I_{бА}/4$ ) и конечное ( $2 I_{бА}$ ) значения и приращение ( $I_{бА}/4$ ) тока базы при задании анализа, тогда дополнительную характеристику строить не надо (берется то значение  $I_{бА}$ , что получено **в этом пункте**). Точку пересечения выходной характеристики, соответствующей рабочему току базы, и нагрузочной прямой надо отметить маркером курсора и обозначить  $A_9$  – это и есть р.т. ( $U_{кэА}$  и  $I_{кА}$ ), найденная графическим методом. После построения нагрузочной прямой характеристику надо «обрезать» так, чтобы р.т. лежала примерно в середине графика.

Далее на выходные характеристики надо нанести нагрузочную прямую по переменному току и определить отрезок, который эта прямая отсечет на горизонтальной оси (на рис. 2 этот отрезок обозначен  $U_n$ ).

Из полученной величины надо отнять значение  $\Delta U_T$ , **полученное в п. 8**, тогда:

$$U_{n \text{ макс}} = U_n - \Delta U_T.$$

Если  $U_{n \text{ макс}}$  получится меньше  $U_{n \text{ тз}}$ , то надо или менять положение р.т., или брать другие значения сопротивлений  $R_+$  и/или  $R_к$ , т.е. начинать расчет заново с п. 3.

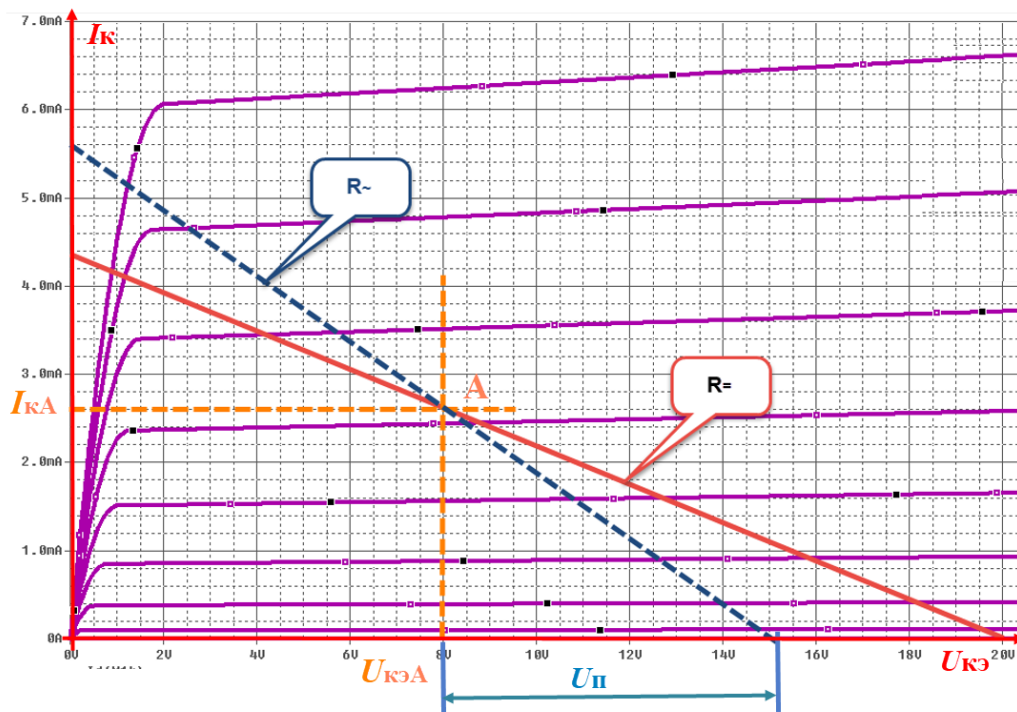


Рис. 2

### 10, 11. Определение основных параметров каскада.

Перед расчетом основных параметров каскада надо **нарисовать схему замещения каскада по переменному току** на основе схемы замещения транзистора в  $h$ -параметрах (при этом можно принять  $h_{22} = 0$ ). В схеме **обозначить все элементы**, а также  $u_{вх}$  и  $u_{вых}$ . Источник  $u_{вх}$  надо нарисовать в явном виде.

Для **каскада ОК** рассчитать параметры каскада  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$  и  $K_{e0}$  (сначала надо найти  $K_{u_{xx}}$ ,  $\xi_{вх}$ ,  $\xi_{вых}$ ) можно по формулам, приведенным в лекциях.

Для каскада ОК надо проверить выполнение соотношения:  $K_{e0} \geq K_{e0 \text{ ТЗ}}$ , если неравенство не выполняется, надо вернуться к синтезу схемы и попробовать увеличить сопротивление  $R_6$ .

Для **каскада ОЭ** надо сначала разделить  $R_3$  на два сопротивления:  $R_{31}$  и  $R_{32}$ . Это можно сделать, записав известные формулы определения основных параметров каскада ОЭ:

$K_{e0} = K_{u_{xx}} \cdot \xi_{вх} \cdot \xi_{вых}$ , далее надо написать выражения для  $K_{u_{xx}}$ ,  $\xi_{вх}$ ,  $\xi_{вых}$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$  (см. лекции) и подставить в формулу для  $K_{e0}$ .

Приравняв это выражение к значению  $K_{e \text{ ТЗ}}$  (лучше взять чуть большую величину, с небольшим запасом), можно найти величину  $R_{31}$ ,  **$R_{31}$  надо округлить до числа из ряда Е24**, причем  $R_{31}$  лучше округлять в меньшую сторону (иначе может не пройти коэффициент усиления каскада), потом нужно определить  $R_{32} = R_3 - R_{31}$ ;  **$R_{32}$  надо тоже округлить до числа из ряда Е24.**

**После этого надо пересчитать  $K_{e0}$  и  $R_{вх}$ , с учетом округленного значения  $R_{31}$ .**

Модуль коэффициента усиления  $K_{e0}$  не должен превышать заданную в ТЗ величину более, чем на 10%:  $1.1 |K_{e0 \text{ ТЗ}}| \geq |K_{e0}| \geq 0.9 |K_{e0 \text{ ТЗ}}|$ . Если значение модуля  $K_{e0}$  получилось больше требуемого, надо увеличивать значение  $R_{31}$  (потом заново определять  $R_{32}$ , чтобы значение  $R_3$  оставалось неизменным, иначе придется

пересчитывать пп. 5-8). Если модуль коэффициента усиления  $K_{e0}$  получится значительно меньше заданного в ТЗ, то  $R_{э1}$  надо уменьшать.

### 12. Расчет емкостей конденсаторов. (Расчёт на НЧ).

Постоянную времени усилителя для диапазона низких частот  $\tau_n$  можно определить по формуле:

для каскада ОК

$$\tau_n = \left( \frac{1}{\tau_{n1}} + \frac{1}{\tau_{n2}} \right)^{-1}, \text{ где } \tau_{n1} = C_{p1}(R_r + R_{вх}), \tau_{n2} = C_{p2}(R_{вых} + R_n),$$

для каскада ОЭ

$$\tau_n = \left( \frac{1}{\tau_{n1}} + \frac{1}{\tau_{n2}} + \frac{1}{\tau_{Cэ}} \right)^{-1}, \text{ где } \tau_{n1} = C_{p1}(R_r + R_{вх}), \tau_{n2} = C_{p2}(R_{вых} + R_n),$$

$$\tau_{Cэ} = C_э(R_{э2} \parallel r_{TP.э}); \quad r_{TP.э} = \frac{h_{11э} + (R_6 \parallel R_r)}{1 + h_{21э}} + R_{э1},$$

Учитывая, что

$$\tau_n = \frac{1}{\omega_n} = \frac{1}{2\pi f_n}, \text{ где } f_n - \text{частота, заданная в ТЗ, можно принять:}$$

для каскада ОК

$$\tau_{n1} = \tau_{n2} = 2\tau_n,$$

а для каскада ОЭ

$$\tau_{n1} = \tau_{n2} = \tau_{Cэ} = 3\tau_n.$$

Емкости конденсаторов можно определить из написанных выше соотношений.

Емкости всех конденсаторов надо округлить (лучше в большую сторону) до чисел из ряда Е12 (для  $C < 1\text{мкФ}$ ) или Е6 (для  $C > 1\text{мкФ}$ ). Если при компьютерном расчете каскад не пройдет по нижней частоте, надо просто увеличить рассчитанные в этом пункте емкости всех конденсаторов.

### 13. Определение верхней границы полосы пропускания каскада. (Расчёт на ВЧ).

Постоянную времени усилителя для диапазона высоких частот  $\tau_v$  можно определить по формуле:

$$\tau_v = \sqrt{\tau_{вх}^2 + \tau_{вых}^2 + \tau_T^2}, \text{ где}$$

$\tau_{вх} = C_{вх}(R_{вх} \parallel R_r)$ , где  $C_{вх} = C_{эп} + C_{кп} |K_u|$ ,  $C_{эп}$  и  $C_{кп}$  – емкости эмиттерного и коллекторного переходов транзистора (если в справочнике есть емкость только одного перехода, то емкость второго перехода надо взять равной той, что дана),  $K_u = K_{e0}$  – коэффициент усиления каскада (см. п. 11),

$$\tau_{вых} = C_{н экв}(R_n \parallel R_{вых}), \text{ где } C_{н экв} = C_n + C_{кп} \beta,$$

$$\tau_T = \beta / (2\pi f_T (1 + \gamma_6 \beta)),$$

где  $\gamma_6 = \frac{R_3}{R_3 + R_6}$ ,  $f_T$  – частота единичного усиления (см. ниже справочный материал).

Таким образом надо сначала найти  $\tau_B$ , а затем определить  $f_B = \frac{1}{2\pi\tau_B}$ , полученную величину надо сравнить с  $f_{BTЗ}$ . Эта частота получается существенно больше заданной в ТЗ, пугаться этого не нужно. При компьютерном расчете верхняя частота обычно получается еще больше (особенно для каскада ОК). Это тоже не повод для волнений. Так и должно быть.

#### Справочный материал. Частотные параметры транзисторов.

**Справочники** могут содержать следующие частотные параметры транзисторов

(можно принять  $|h_{21}|_0 = \beta$ ):

- 1)  $f_{гр} = f_{h21} = f_\beta$  – граничная частота;
- 2)  $f_T = f_1$  – частота единичного усиления  
 $f_T = |h_{21}|_0 f_{h21}$ ;
- 3) модуль коэффициента передачи тока  $|h_{21}|_{BЧ}$  на заданной высокой частоте  $f_{BЧ}$

$$f_{h21} = f_{BЧ} \frac{|h_{21}|_{BЧ}}{|h_{21}|_0}.$$

