

# **ЛИНЕЙНЫЙ ОДНОКАСКАДНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ СИГНАЛА ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ**

Курсовая работа

по курсу «Электроника»

# Техническое задание

Рассчитать элементы схемы однокаскадного усилителя, удовлетворяющего указанным техническим требованиям (см. таблиц с вариантами заданий):

1. Рекомендуемый тип транзистора .....
2. Амплитуда неискаженного выходного сигнала не менее ..... В;
3. Коэффициент усиления напряжения  $K_e = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{e_r}$  при заданном сопротивлении нагрузки  $R_H = \dots$  кОм и внутреннем сопротивлении источника сигнала  $R_T = \dots$  кОм не менее .....
4. Усилитель при заданной емкости нагрузки  $C_H = \dots$  нФ должен обеспечить полосу пропускания от  $f_H = \dots$  Гц до  $f_B = \dots$  кГц;
5. Температурный диапазон для всех вариантов:  $-40^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$ .

Транзистор	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$ (не менее)	$K_e$	$R_H, \text{кОм}$	$R_T, \text{кОм}$	$C_H, \text{нФ}$	$f_H, \text{Гц}$	$f_B, \text{кГц}$
2N2906A	3,9	6	3	0,3	0,6	500	30

# Справочные данные БТ 2N2906А

## Цоколевка 2N2906А

1. Эмиттер
2. База
3. Коллектор



## Характеристики транзистора 2N2906А

- Структура - **p-n-p**
- Напряжение коллектор-эмиттер, не более: **-60 В**
- Напряжение коллектор-база, не более: **-60 В**
- Напряжение эмиттер-база, не более: **-5 В**
- Ток коллектора, не более: **-0.6 А**
- Рассеиваемая мощность коллектора, не более: **0.4 Вт**
- Коэффициент усиления транзистора по току ( $h_{fe}$ ): от **40** до **120**
- Граничная частота коэффициента передачи тока: **200 МГц**
- Корпус: **ТО-18**

$$U_{кэ \text{ max доп}} = 60 \text{ В}$$

$$I_{к \text{ max доп}} = 100 \text{ мА}$$

$$P_{к \text{ max}} = 0,4 \text{ Вт}$$

$$\beta = 40 \dots 120$$

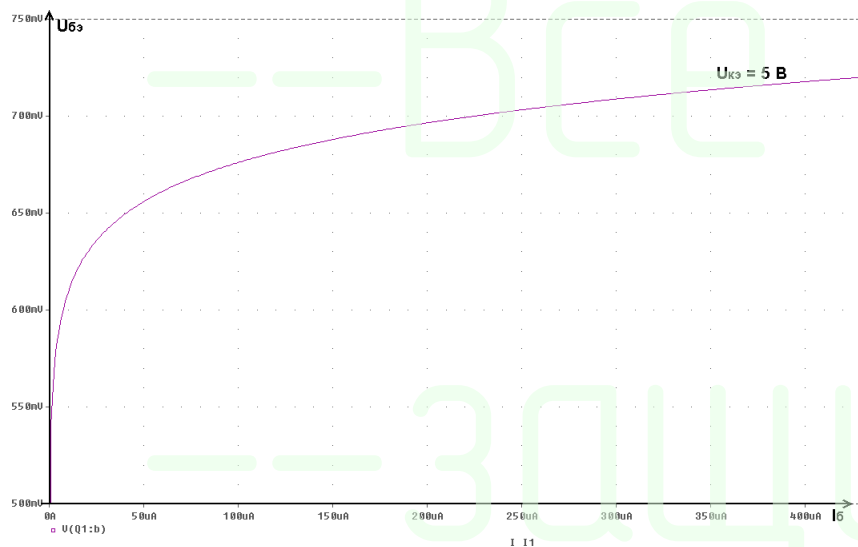
$$f_{гр} = 200 \text{ МГц}$$

# Характеристики транзистора

1. Для заданного типа транзистора с помощью программы схемотехнического проектирования *OrCad 9.2* (или любой другой) снять входные и выходные характеристики для схемы включения ОЭ.

Дан подробный алгоритм работы при снятии ВАХ транзистора.

**входная ВАХ**



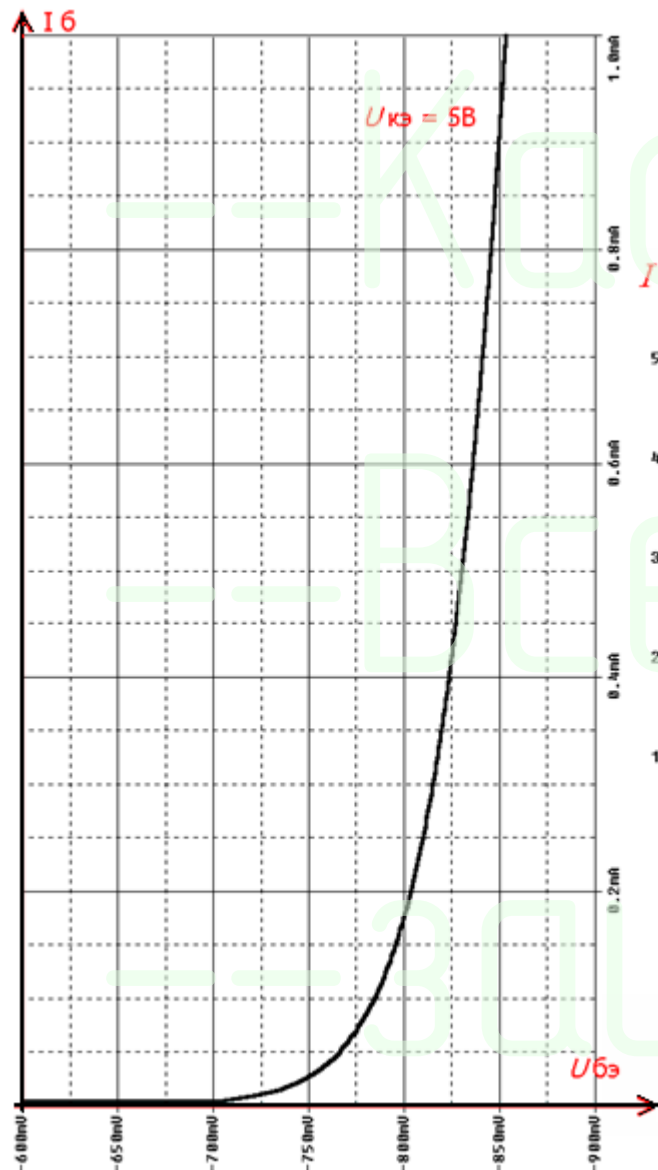
$$I_{б} = f(U_{бэ}) \Big|_{U_{кэ}=const}$$

**выходная ВАХ**

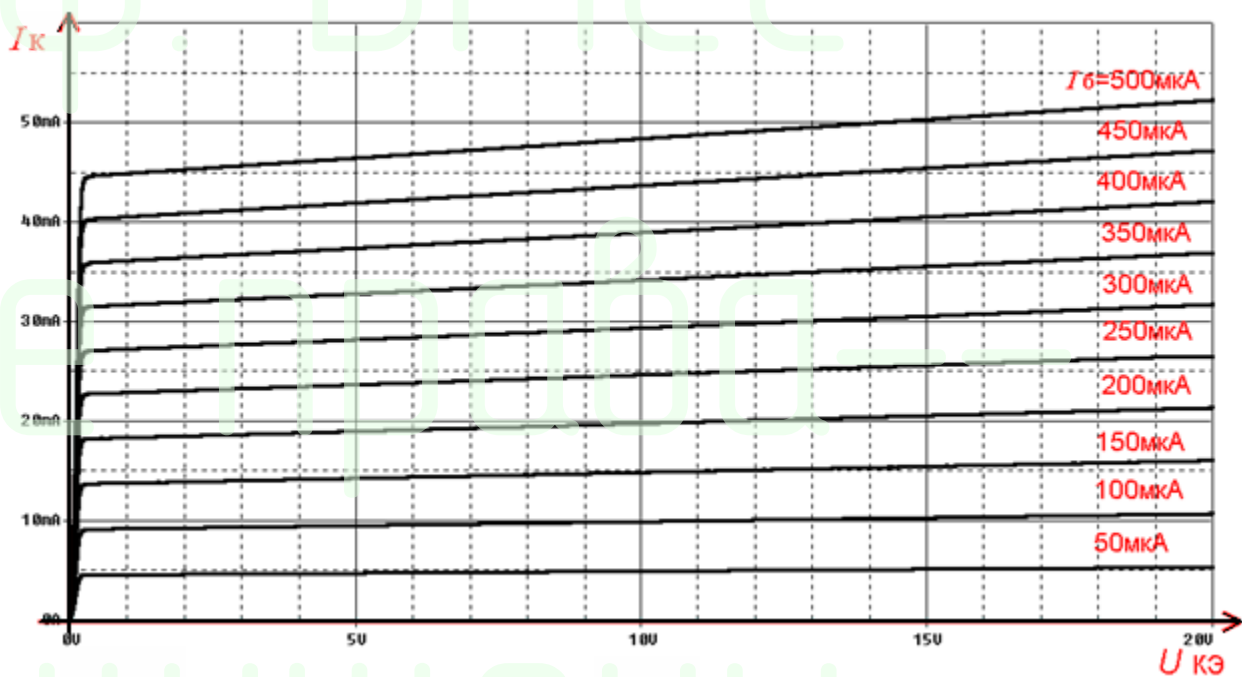


$$I_{к} = f(U_{кэ}) \Big|_{I_{б}=const}$$

# Характеристики транзистора



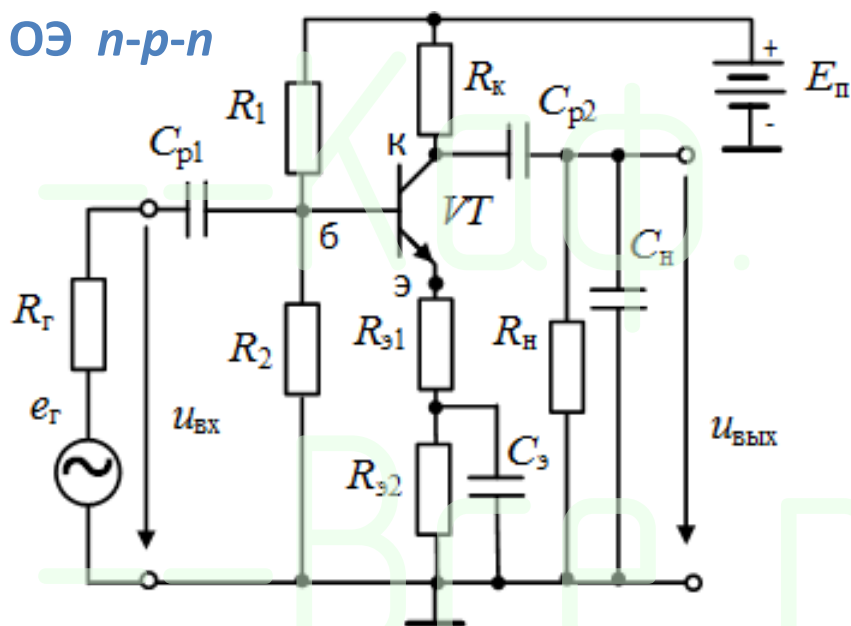
$$I_C = f(U_{BE}) \big|_{U_{CB} = const}$$



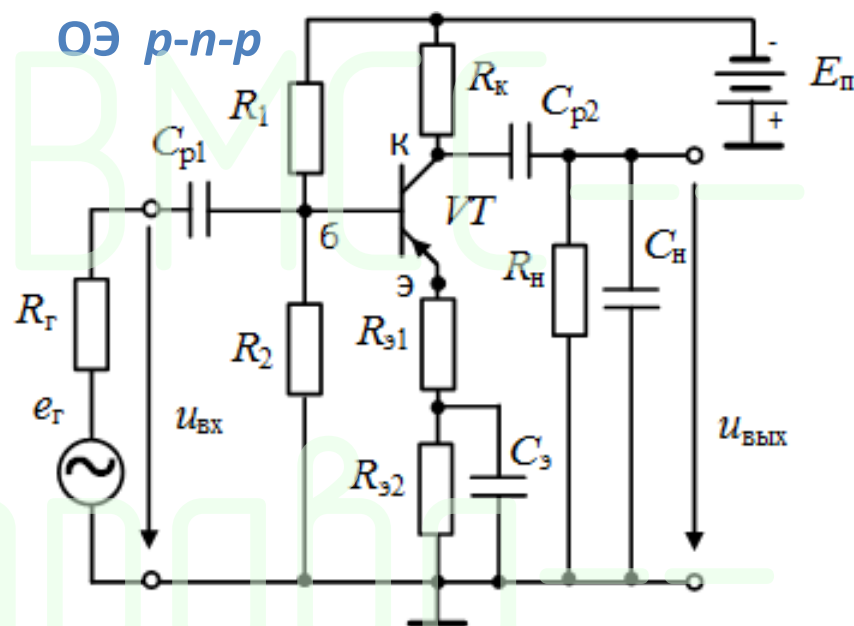
$$I_C = f(U_{CB}) \big|_{I_B = const}$$

# Схемы усилительных каскадов

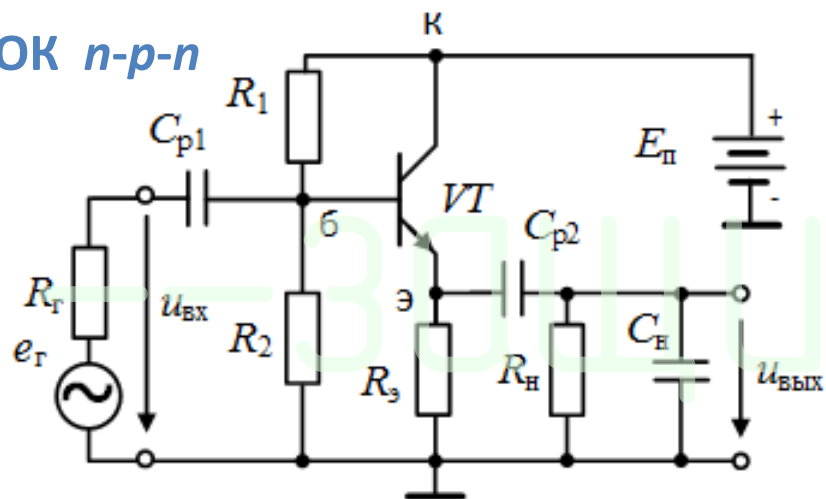
ОЭ *n-p-n*



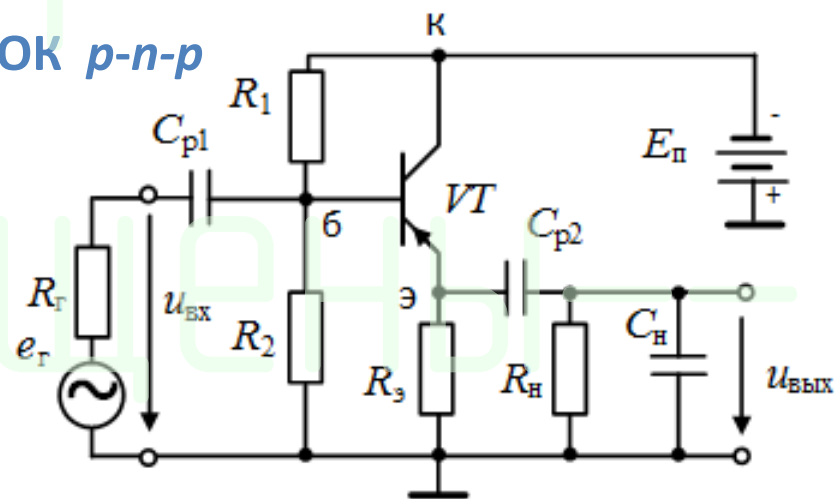
ОЭ *p-n-p*



ОК *n-p-n*



ОК *p-n-p*

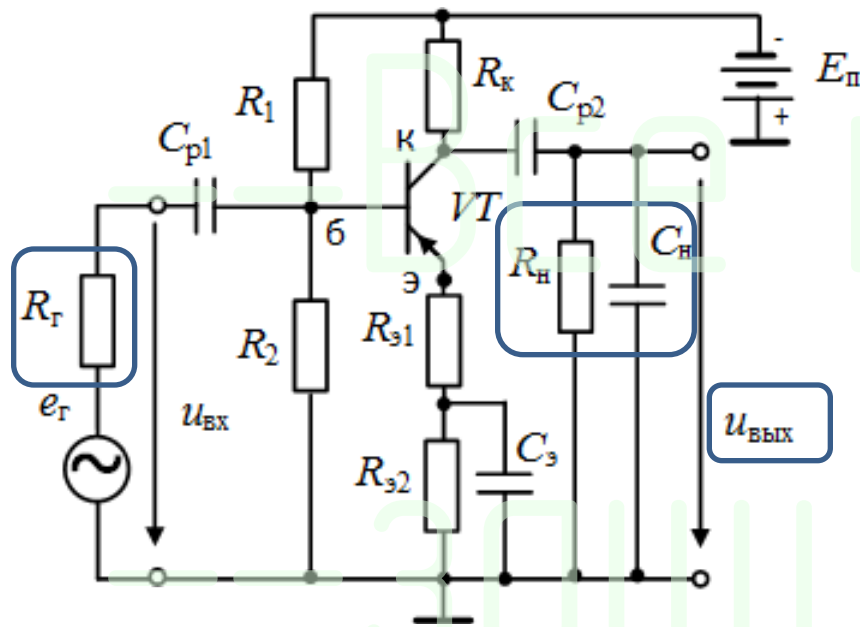


# Выбор схемы усилительного каскада

2. По заданным техническим требованиям обосновать выбор схемы усилительного каскада.

$$K_e > 1$$

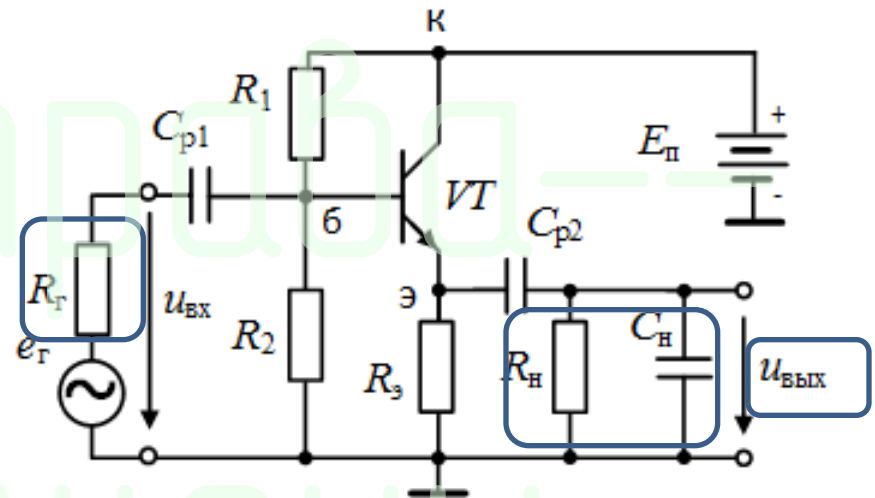
$K_e$  не менее 3 **ОЭ p-n-p**



Дано:  $R_h$   $C_h$   $R_r$   $U_{\text{БЫХ}}$   $K_e$  ( $f_h \dots f_b$ )

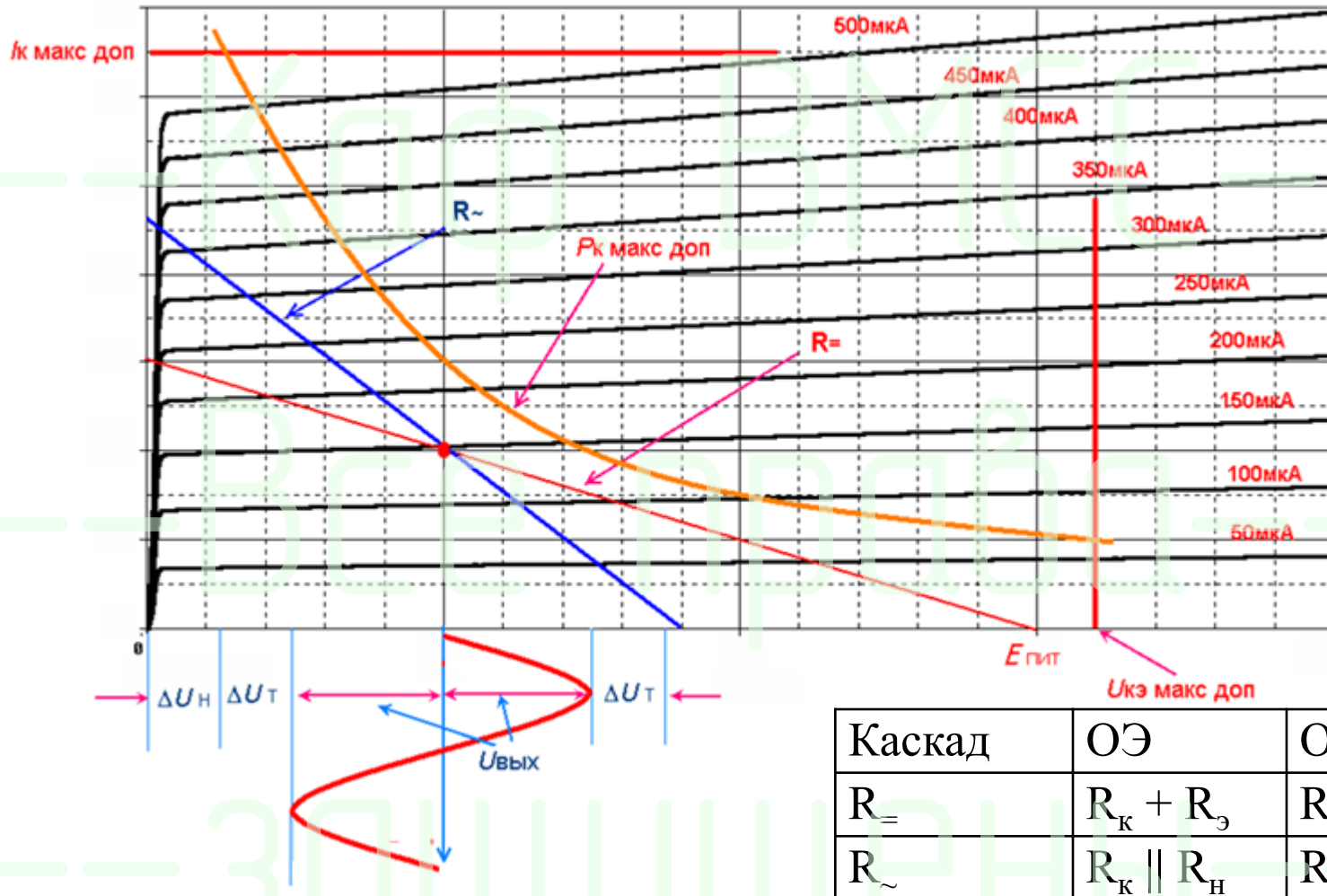
$$K_e < 1$$

$K_e$  не менее 0,75 **ОК n-p-n**



Выбрать: параметры элементов УК

3. Дать графическое обоснование выбора рабочей точки и напряжения источника питания.



По максимальной амплитуде выходного сигнала и сопротивлению нагрузки определить рабочий режим транзистора и номинальное напряжение источника питания  $E_{\text{пит}}$ .



# Выбор рабочей точки

$$U_{кэ} \geq \Delta U_{нел} + \Delta U_T + U_{вых}$$

Запас напряжения, связанный с нелинейностью вольт-амперных выходных характеристик

$$\Delta U_{нел} = 1...2 \text{ В}$$

Амплитуда выходного напряжения

Запас напряжения, связанный с уходом рабочей точки из-за температуры и разброса параметров транзистора

$$\Delta U_T = 1...2 \text{ В}$$

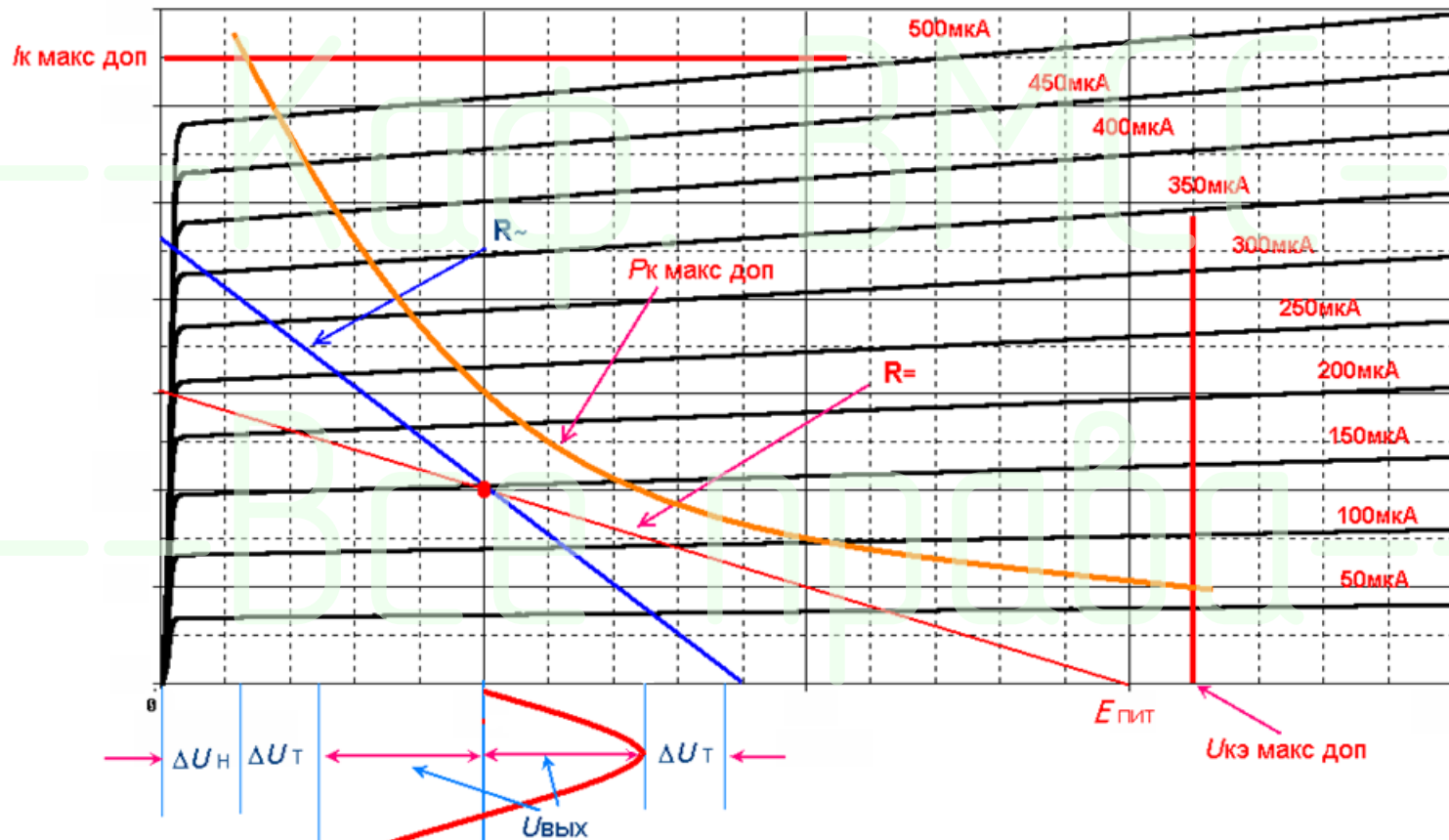
$$I_{к\sim} \geq \frac{U_{вых} + \Delta U_T}{R_{\sim}} = (2...5) \frac{U_{вых}}{R_H}$$

Амплитуда выходного напряжения

$$U_{вых} = 3,5 \text{ В} \quad U_{кэА} \geq 1 + 1 + 3,5 = 5,5 \text{ В}$$

$$U_{вых} = 4,3 \text{ В} \quad U_{кэА} \geq 2 + 2 + 4,3 = 8,3 \text{ В}$$

# Выбор напряжения источника питания



$$E_{\text{пит}} \geq \Delta U_{\text{нел}} + 2\Delta U_{\text{т}} + 2U_{\text{вых}} + kU_{\text{вых}} < U_{\text{кэ доп}}$$

# Выбор напряжения источника питания

П2. Номинальный ряд напряжений (В)

5; 9; 12; 15; 18; 24; 27; 30; 36; 48.

$$E_{\text{пит}} \geq \Delta U_{\text{нел}} + 2\Delta U_{\text{т}} + kU_{\text{вых}} < U_{\text{кэ доп}}$$

$$E_{\text{пит}} = 1 + 2 \cdot 1 + 4 \cdot 3,5 = 17 \text{ В} < U_{\text{кэ доп}}$$

$$E_{\text{пит}} = 2 + 2 \cdot 2 + 5 \cdot 4,3 = 26,9 \text{ В} < U_{\text{кэ доп}}$$

Проверка:

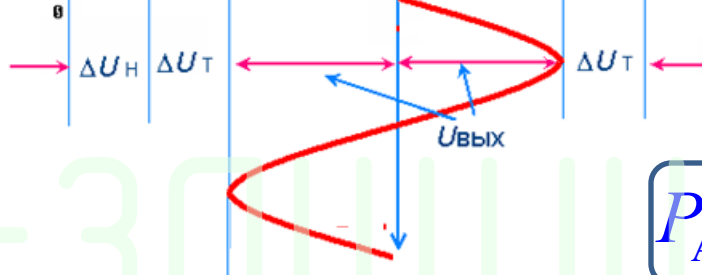
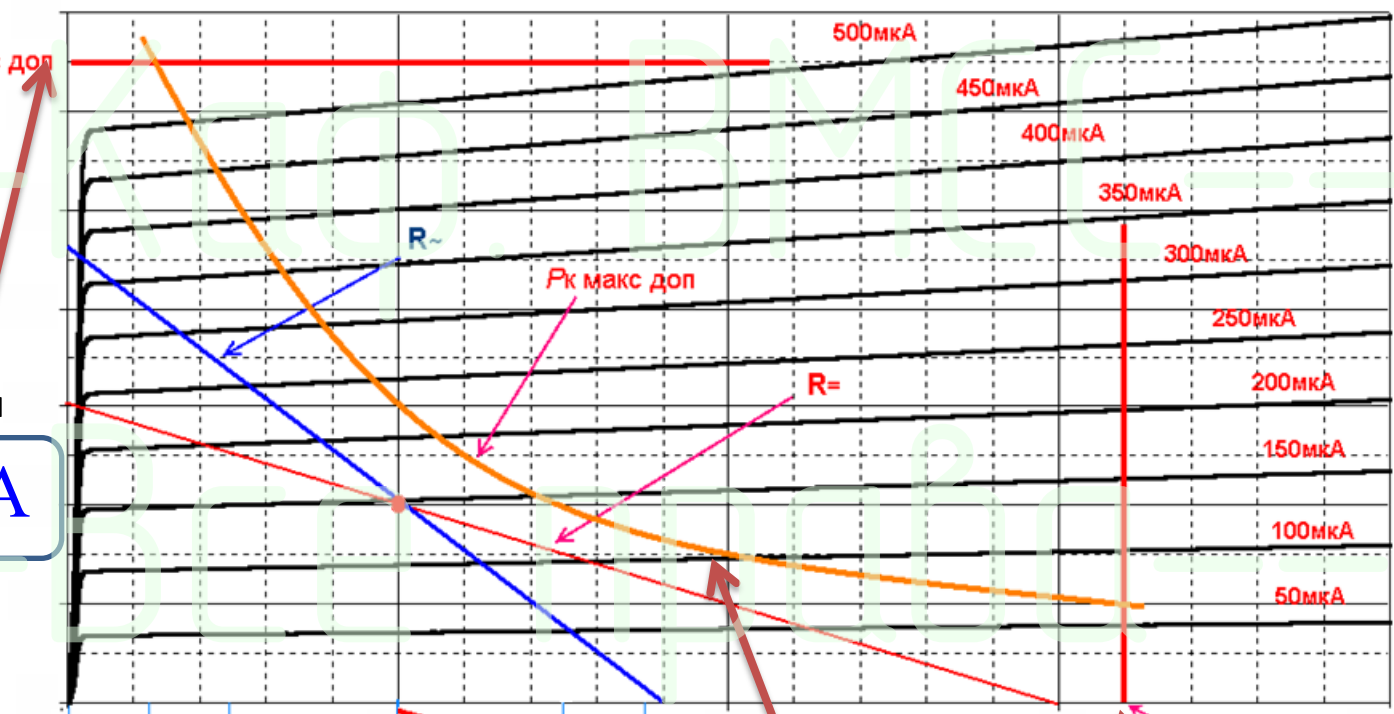
$$U_{\text{кэА}} \approx (0,4 \dots 0,6) E_{\text{пит}} = (7,2 \dots 10,8) \text{ В} \quad U_{\text{кэА}} \geq 5,5 \text{ В} \quad U_{\text{кэА}} = 8 \text{ В}$$

$$U_{\text{кэА}} \approx (0,4 \dots 0,6) E_{\text{пит}} = (10,8 \dots 16,2) \text{ В} \quad U_{\text{кэА}} \geq 8,3 \text{ В} \quad U_{\text{кэА}} = 12 \text{ В}$$

100 мА  $I_{k \text{ макс доп}}$

$I < I_{k \text{ макс доп}}$

$I_{KA} = 10 \text{ мА}$



0,4 Вт  $P < P_{k \text{ доп}}$

$P_A = 0,08 \text{ Вт}$

60 В  $U_K < U_{k \text{ макс доп}}$

$U_{кэА} = 8 \text{ В}$

$$I_{K\sim} = (2...5) \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_H}$$

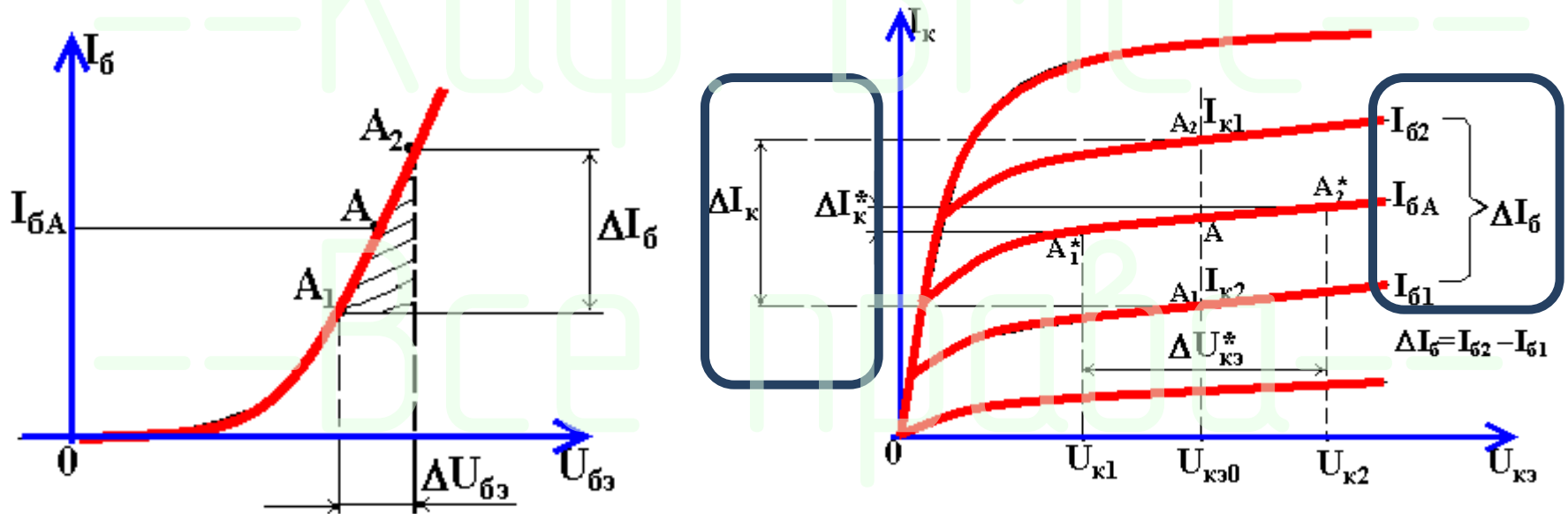
$$I_{KA} = I_{K\sim} + I_{K0}$$

$$I_{K0} = 2 \text{ мА}$$

После определения  $E_{\text{пит}}$  и рабочего режима ( $U_{\text{кэА}}, I_{\text{кА}}$ ) надо построить точки ( $E_{\text{пит}}, 0$ ) и ( $U_{\text{кэА}}, I_{\text{кА}}$ ) на выходных характеристиках транзистора (обозначить рабочая точка  $A_3$ , где 3 – номер пункта раздела «Содержание работы»), провести через эти точки предварительную линию нагрузки по постоянному току.

**Замечание:** рабочая точка  $A_3$  должна лежать на пологом участке выходных характеристик **под гиперболой**  $I_{\text{к}} = P_{\text{доп}} / U_{\text{кэ}}$  и **вдалеке** от построенных перед началом расчета прямых ( $U_{\text{кэ}} = U_{\text{кэ макс доп}}$  и  $I_{\text{к}} = I_{\text{к макс доп}}$ ) и **от осей**.

4. По вольтамперным характеристикам транзистора определить в рабочей точке малосигнальные  $h$ -параметры транзистора.



$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{63}}{\Delta I_6} \quad \text{при} \quad \Delta U_{K3} = 0 \quad h_{21э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \quad \text{при} \quad \Delta U_{K3} = 0$$

5. По заданному типу транзистора и его предельным параметрам, определенным по справочным данным, обосновать возможность применения транзистора в заданной схеме усилительного каскада. В противном случае тип транзистора согласовать с преподавателем.

$$E_{\text{пит}} < U_{\text{кэ макс доп}}$$

$$I_{\text{к макс}} < I_{\text{к макс доп}}$$

?



6. Рассчитать сопротивления резисторов схемы с учетом разброса коэффициента усиления транзистора (смотри в справочнике) и колебаний внешней температуры.

**Расчет сопротивлений резисторов выходной цепи**

$$R_{\text{=}} = \frac{E_{\text{пит}} - U_{\text{кэА}}}{I_{\text{кА}}}$$

$$E_{\text{пит}} = 18 \text{ В} \quad U_{\text{кэА}} = 8 \text{ В} \quad I_{\text{кА}} = 10 \text{ мА}$$

$$R_{\text{=}} = \dots$$

**ОК**

**ОЭ**

$$R_{\text{=}} = R_{\text{э}} = \dots$$

$$R_{\text{к}} = 0$$

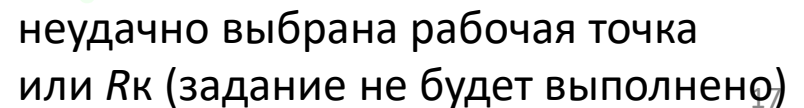
$$R_{\text{к}} = (0,5 \dots 0,8) R_{\text{=}}$$

$$R_{\text{=}} = R_{\text{к}} + R_{\text{э}} \quad R_{\text{э}} = R_{\text{=}} - R_{\text{к}}$$

$$R_{\text{э}} = \dots$$



?



## Расчет сопротивлений резисторов входной цепи

Переходим к упрощенной схеме  $R_6 = ?$

$$R_6 \leq \frac{\beta(\Delta I_{\text{к доп}} \cdot R_9 - |\xi \Delta T|)}{I_{6A} \Delta \beta - \Delta I_{\text{к доп}}} - R_9$$

$$\Delta I_{\text{к доп}} = \frac{\Delta U_{\text{т}}}{R_{=}}$$

$$I_{6A} = \frac{I_{\text{кА}}}{\beta}$$

$$\xi \approx 1...2 \text{ мВ/град}$$

$\beta = h_{21э}$  определили по выходным характеристикам  
(проверка  $\beta_{\min} < \beta < \beta_{\max}$  )

$$\left. \begin{array}{l} \Delta \beta = \beta_{\max} - \beta \\ \Delta \beta = \beta - \beta_{\min} \end{array} \right\} \text{наибольшее} \quad \left. \begin{array}{l} \Delta T = T_{\max} - 20^{\circ}\text{C} \\ \Delta T = |T_{\min} - 20^{\circ}\text{C}| \end{array} \right\} \text{наибольшее}$$

## Расчет сопротивлений резисторов входной цепи

$$R_6 \leq \frac{\beta(\Delta I_{\text{к доп}} \cdot R_9 - |\xi \Delta T|)}{I_{6A} \Delta \beta - \Delta I_{\text{к доп}}} - R_9$$

$$R_6 = \dots$$

**Замечание:** если расчетное  $R_6 < 0$  или мало, необходимо сместить рабочую точку выше и правее

Возвращаемся к исходной схеме

$$I_{6A} = \frac{I_{\text{кА}}}{\beta} \quad I_{\text{эА}} = I_{6A} + I_{\text{кА}}$$

$$E_{\text{см}} = E_{\text{пит}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_6 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 = \frac{E_{\text{пит}} \cdot R_6}{U_{6\text{эА}} + I_{6A} \left( (1 + \beta) \cdot R_9 + R_6 \right)}$$

$$R_2 = \frac{R_6 R_1}{R_1 - R_6}$$

$$R_1 = \dots$$

$$R_2 = \dots$$

# Выбор сопротивлений из номинального ряда

П1. Номинальные ряды

Ряд	Номиналы											
Е6	10				15				22			
	33				47				68			
Е12	10		12		15		18		22		27	
	33		39		47		56		68		82	
Е24	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30
	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91

Резистор	Расчет, Ом	Округление до ряда E24, Ом
$R_K$	525	510
$R_{\Sigma} = R_{\Sigma 1} + R_{\Sigma 2}$	225 *	
$R_1$	7100	6800
$R_2$	1238	1200

Ряд E6 - 20%. Применяется обычно для электролитических конденсаторов.

Ряд E12 - 10%. Применяется для резисторов и конденсаторов.

Ряд E24 - 5%. Применяется для резисторов и конденсаторов.

\* $R_{\Sigma}$  для схемы с ОЭ округлять до номиналов ряда не надо, т.к. далее его придется разбивать на два сопротивления:  $R_{\Sigma 1}$  и  $R_{\Sigma 2}$

для схемы с ОК надо округлять до номинального ряда  $R_{\Sigma} = 220 \text{ Ом}$

# Замечания к выбору параметров

- Для схемы с ОК рекомендуется сделать **проверку** на получение требуемого коэффициента усиления:

$$\xi_{\text{BX}} = \frac{R_{\text{BX}}}{R_{\Gamma} + R_{\text{BX}}} \quad R_{\text{BX}} = R_6 \parallel (h_{113} + (1 + h_{213})R_{\sim})$$
$$K_{e \text{ ТЗ}}(1 + 0,05) \approx \xi_{\text{BX}}$$

- Для схемы с ОК **значения** сопротивлений лучше округлять **в большую сторону** (иначе могут возникнуть проблемы с обеспечением коэффициента усиления каскада).
- Для **каскада ОЭ** в некоторых случаях сопротивление  $R_6$  получается довольно большим (5-10 кОм). В этом случае для обеспечения лучшей термостабильности каскада желательно взять  $R_6$  **меньше** рассчитанного значения.

7. Для выбранных сопротивлений резисторов схемы аналитически рассчитать рабочий режим каскада и проверить, совпадает ли он с выбранным в п. 3.
- Нарисовать схему замещения каскада (ОЭ или ОК) для постоянного тока.
  - Принять для расчета  $U_{бэ} = 0,7\text{В}$ .

Результат расчета – рабочие точки  $(I_{бА}, U_{бэА})$  и  $(I_{кА}, U_{кэА})$ , которые необходимо нанести на соответственно входные и выходные характеристики транзистора.

Точка на выходных характеристиках (обозначим ее  $A_7$ ) должна лежать близко от построенной на этапе предварительного расчета точки  $A_3$ .

8. Рассчитать возможный уход рабочего тока из-за колебаний температуры и из-за разброса коэффициента усиления. Проверить, лежит ли это изменение в заданном диапазоне, определенном в п. 3.

Необходимо пересчитать  $\Delta I_{\kappa} = \Delta I_{\tau} + \Delta I_{\beta} \leq \Delta I_{\kappa \text{ доп}}$

$$\Delta I_{\tau} = \frac{|\xi \Delta T|}{R_6 + (\beta + 1)R_9} \cdot \beta \quad \Delta I_{\beta} = \frac{\Delta \beta \cdot I_{\kappa}}{\beta(1 + \gamma_6 \beta)} \quad \gamma_6 = \frac{R_9}{R_9 + R_6}$$

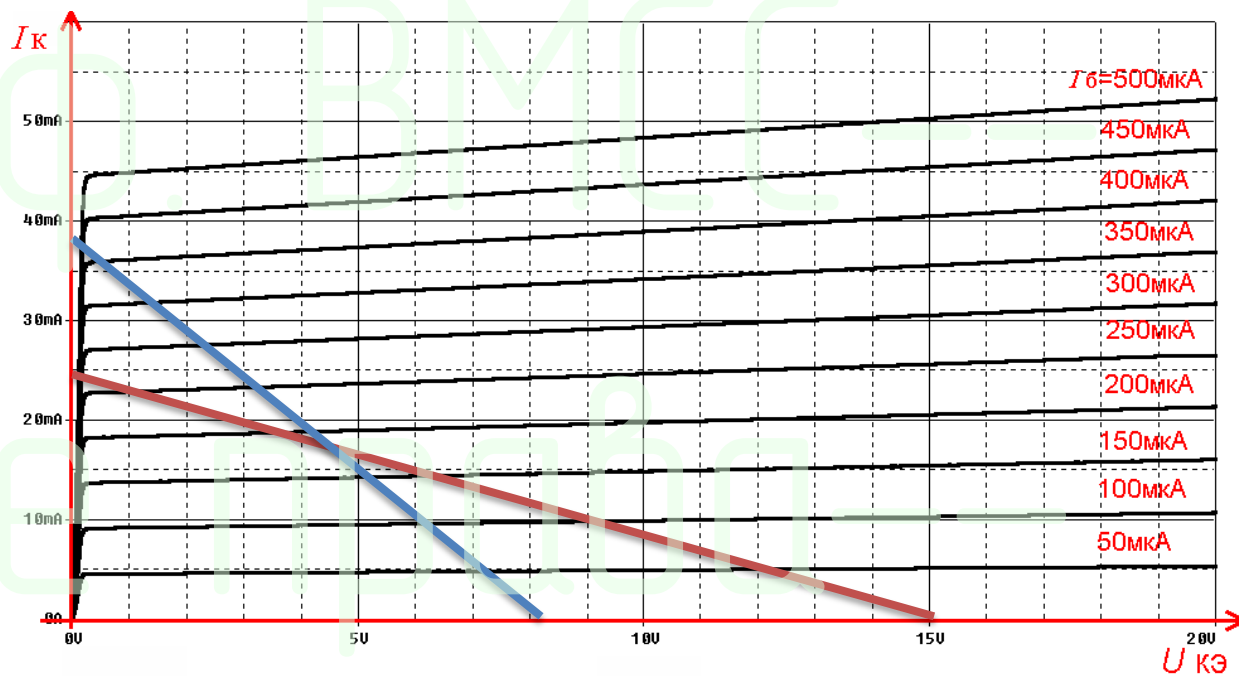
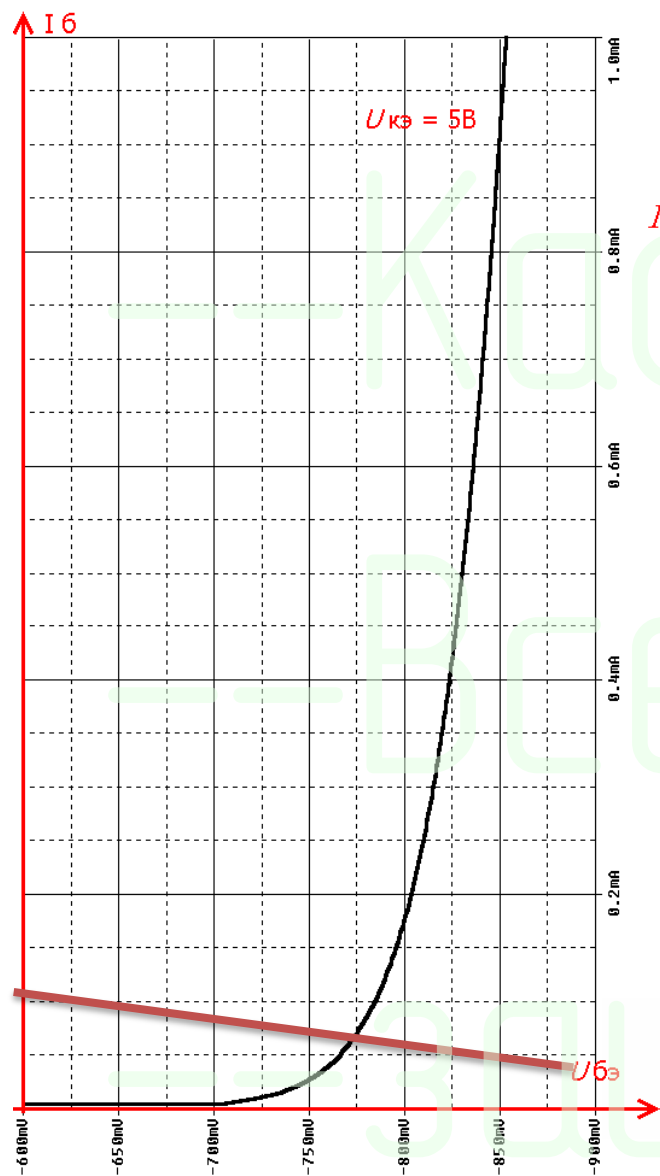
После определения  $\Delta I_{\kappa}$  надо рассчитать  $\Delta U_{\tau} = \Delta I_{\kappa} R_{\tau}$  и сравнить с величиной  $\Delta U_{\tau}$ , выбранной в п. 3 при расчете рабочей точки.

Если полученное в этом пункте значение  $\Delta U_{\tau}$  меньше выбранной в п. 3 величины, то можно продолжить расчет, если существенно больше – надо искать ошибку или начинать расчёт заново с п. 3.

9. Для выбранных сопротивлений резисторов схемы определить рабочий режим графически, используя ВАХ транзистора [см. методические указания к ЛР4]. Для этого:

- с помощью программы OrCAD на входной ВАХ транзистора построить линию нагрузки по постоянному току и определить рабочий базовый ток;
- На семействе выходных характеристик с помощью программы OrCAD построить линии нагрузки по постоянному и переменному току.
- Определить максимальную амплитуду неискаженного выходного сигнала. Сравнить с заданием.





## 10. Рассчитать входное и выходное сопротивление усилителя

**Для схемы ОК:**

(см. материалы Л9)

**Для схемы ОЭ:**

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{с}} \parallel \left[ h_{11\text{э}} + R_{\text{э1}} (1 + h_{21\text{э}}) \right]$$

$$R_{\text{вых}} \approx R_{\text{к}}$$

## 11. Рассчитать коэффициент усиления с учетом внутреннего сопротивления источника сигнала

$$K_{e0} = K_{u \text{ xx}} \xi_{\text{вх}} \xi_{\text{вых}}$$

**Для схемы ОК:**

(см. материалы Л9)

**Для схемы ОЭ:**

$$K_{u \text{ xx}} = -h_{21\text{э}} \cdot \frac{R_{\text{к}}}{h_{11\text{э}} + (1 + h_{21\text{э}}) R_{\text{э1}}}$$

Проверить выполнение условия  $K_{e0} \geq K_{e \text{ тз}}$  (сделать таблицу).

**12.** По заданной нижней границе полосы пропускания рассчитать емкости конденсаторов.

(см. материалы практики Э3)

**Примечание.** Емкости конденсаторов выбирать из номинальных рядов E12 или E6 (в зависимости от величины емкости).

**13.** Определить верхнюю границу полосы пропускания, используя справочные данные на транзистор и данные на емкость нагрузки.

(см. файл «Оценка верхней границы АЧХ» на сайте кафедры ВМСС)

**14.** Проверить с помощью программы схемотехнического моделирования OrCad 9.2 работоспособность схемы.

(см. архив «Задание на КП», файл «3 Анализ каскада с помощью моделирования» на сайте кафедры ВМСС)