

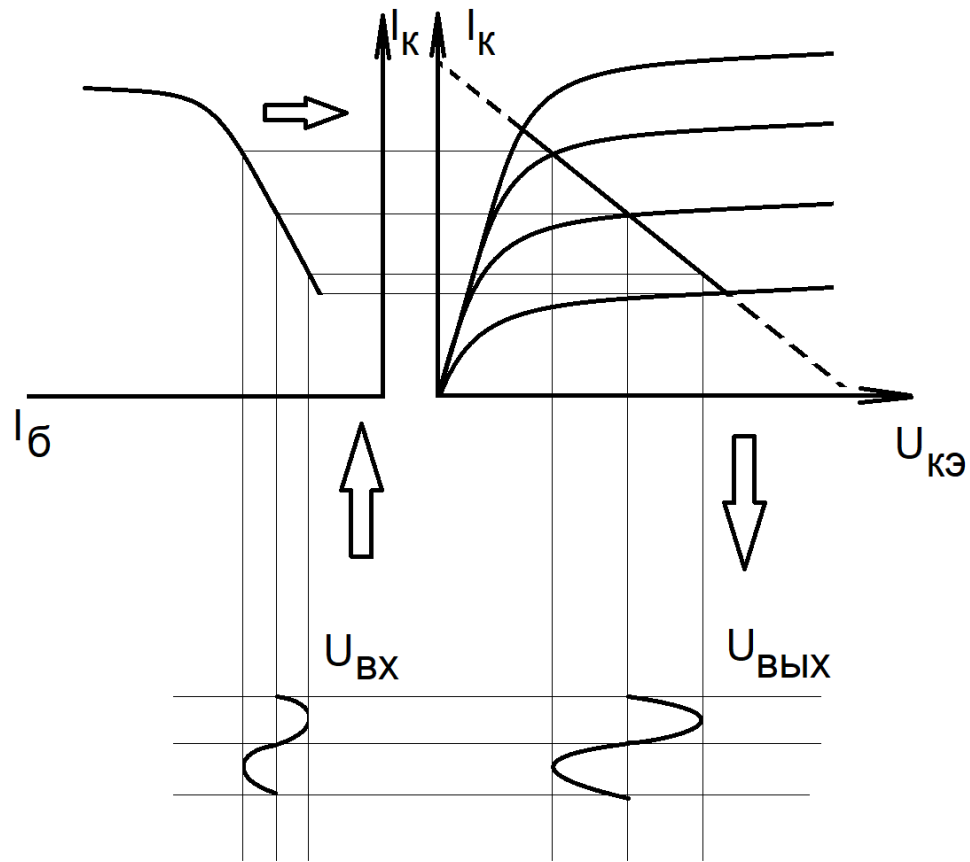
# Практика 3

Выходные каскады. Классы мощности.

# Выходные каскады

Выходные каскады – это усилительные каскады (конечные элементы схем) к которым подключается нагрузка. В зависимости от положения точки покоя на линии нагрузки по постоянному току различают три основных режима (раннее название – класс) работы транзисторов в усилителях мощности: А; В и АВ . Применяют также специфические режимы – С; D (близкие к ключевому) и ключевой – импульсный режим.

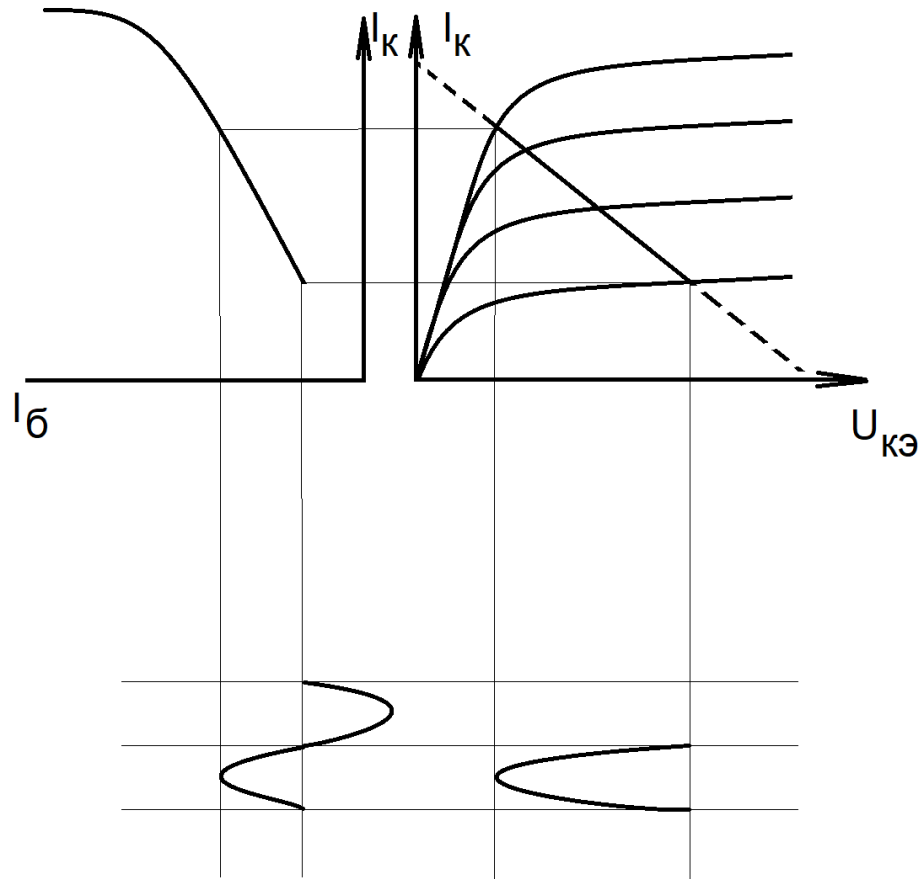
# Режим А



Режим А характеризуется тем, что рабочая точка при перемещении по линии нагрузки не попала в области искажений формы выходного сигнала. Таким образом, все рассмотренные ранее усилительные каскады работают в режиме А.



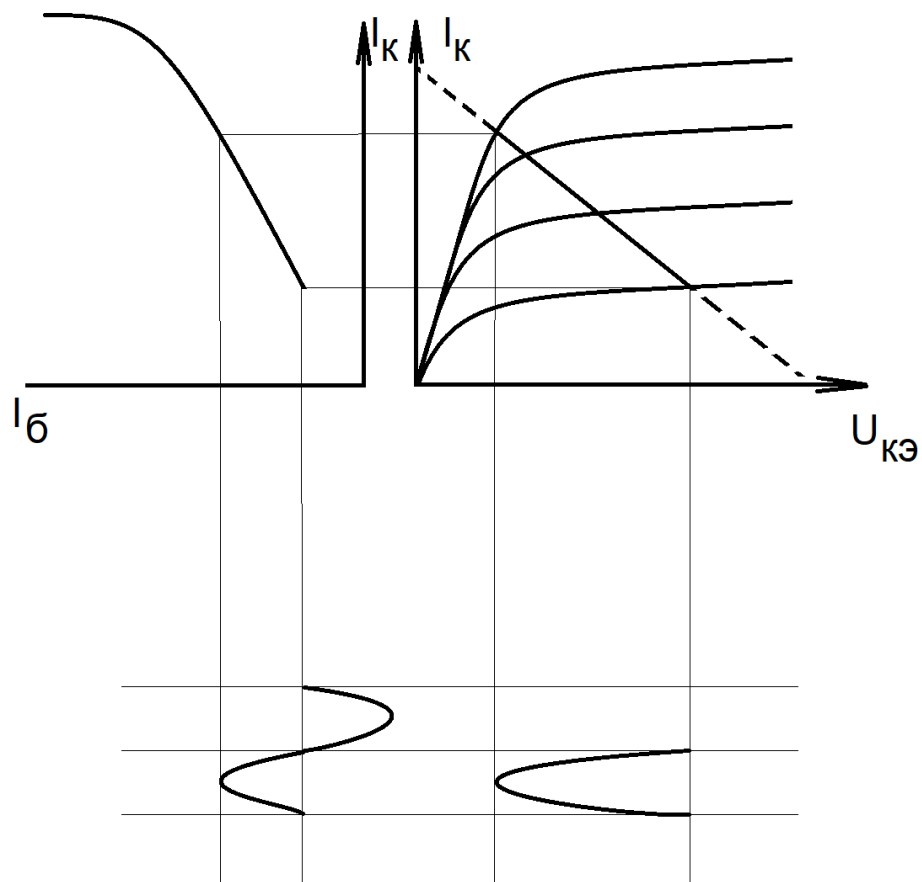
# Режим В



В режиме класса В точка покоя располагается в крайней правой части линии нагрузки каскада по постоянному току. Режиму покоя соответствует напряжение  $U_{БЭ} = 0$ . При наличии входного сигнала ток коллектора транзистора протекает только в течение одного полупериода, а в течение другого транзистор работает в режиме отсечки тока.

В режиме класса В усилитель мощности обычно выполняют по двухтактной схеме с использованием двух транзисторов. Каждый из транзисторов служит для усиления соответствующей полуволны входного сигнала. Выходной каскад при этом обладает более высоким КПД и применяется на более высокие мощности, чем однотактный.

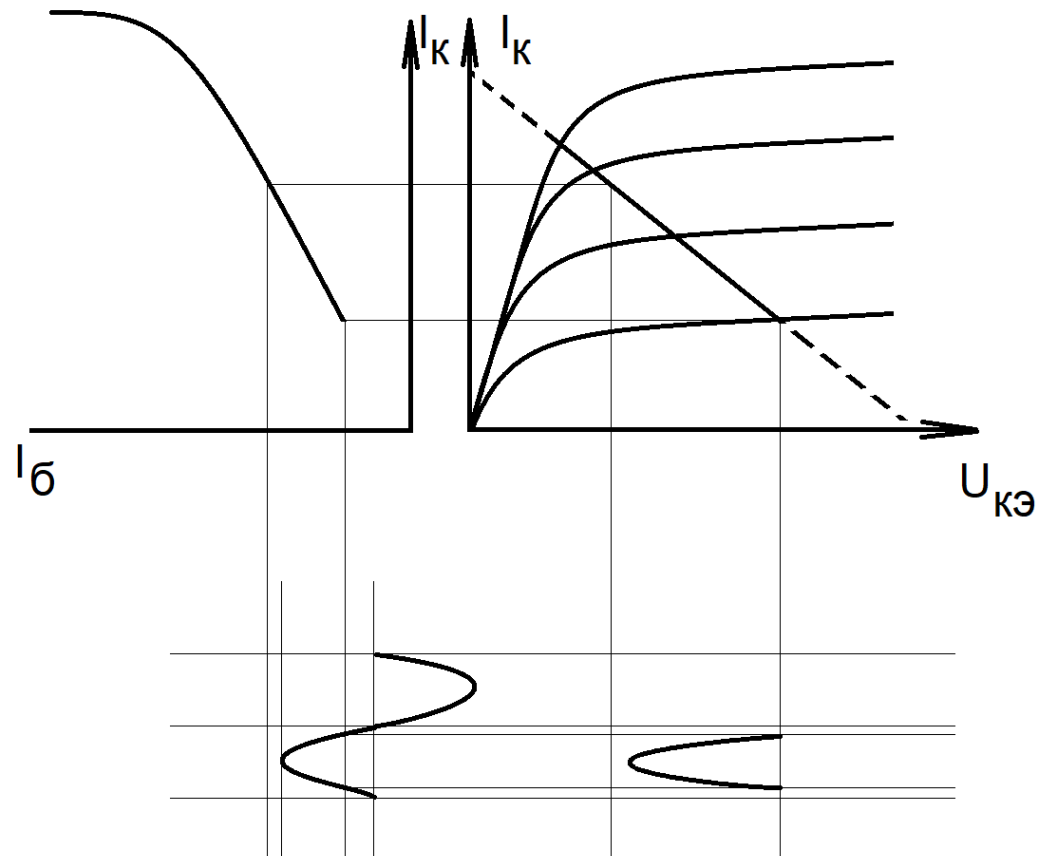
# Режим В



Значительные искажения  $U_{вых}$

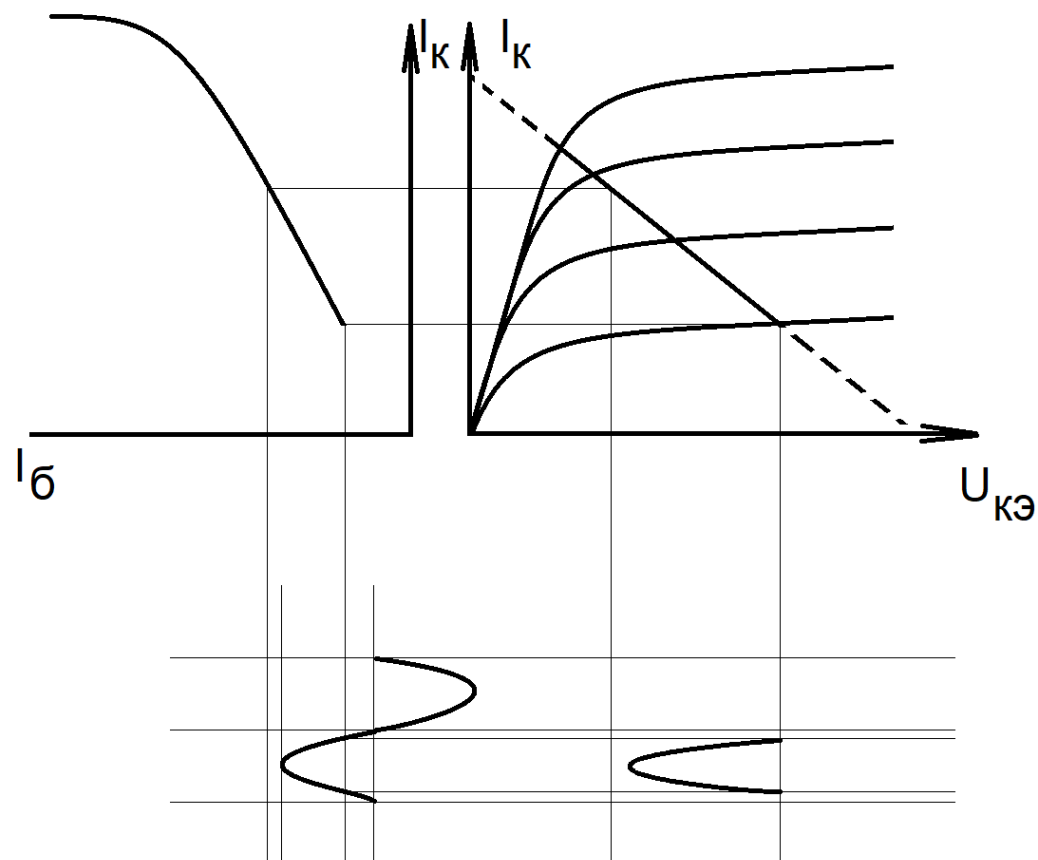
КПД невысокий:  $\eta=0,6-0,7$

# Режим АВ



- Режим класса АВ является промежуточным между режимами классов А и В . Он позволяет уменьшить нелинейные искажения выходного сигнала, сильно проявляющиеся в режиме класса В из-за нелинейности начального участка входной характеристики транзистора

# Режим АВ

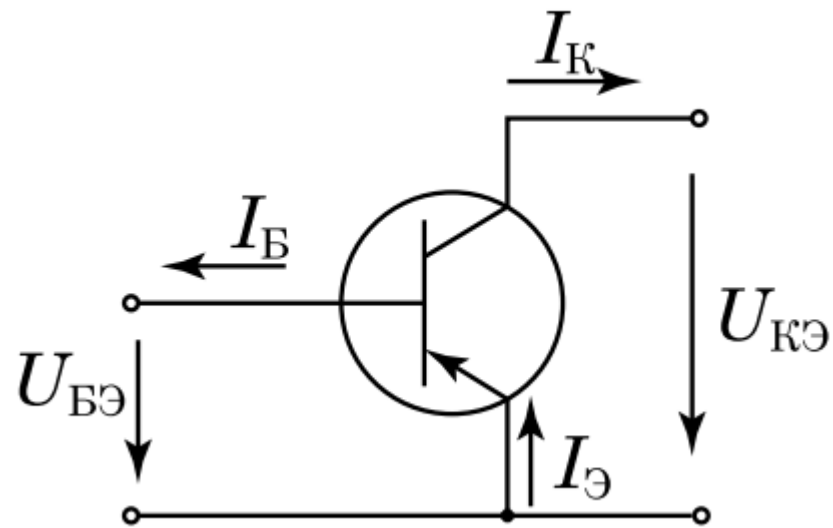


незначительные искажения  $U_{\text{вых}}$

КПД высокий:  $\eta \leq 0,85$

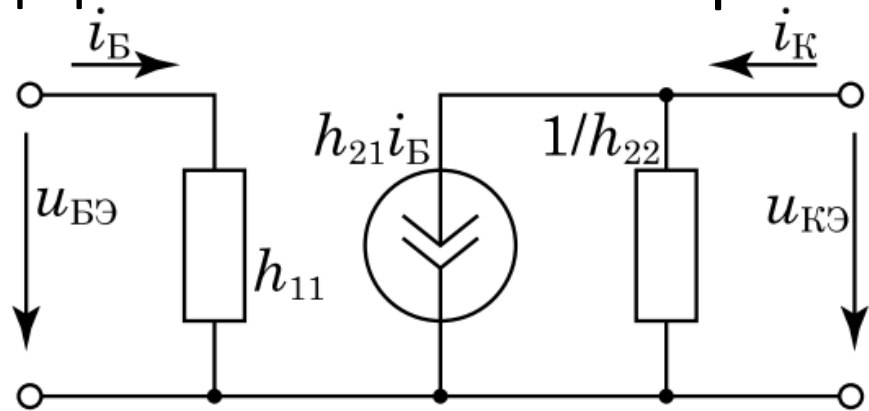


# расчет усилительного каскада в режиме АВ с общим эмиттером

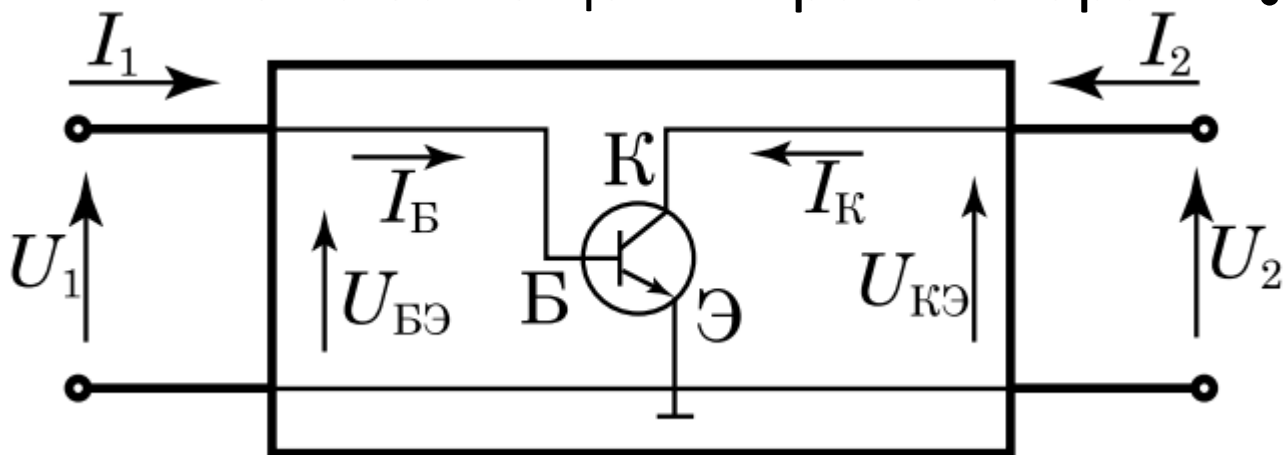


- Слева показана расчетная схема каскада. Задача: рассчитать динамический характеристики для режима АВ

# Динамический расчет



- Схема замещения транзистора



- Схема замещения транзистора

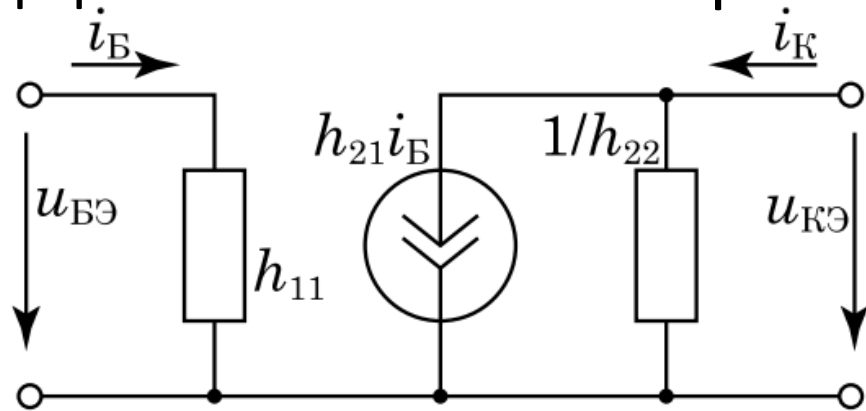
- $h$ -параметры

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{cases}$$

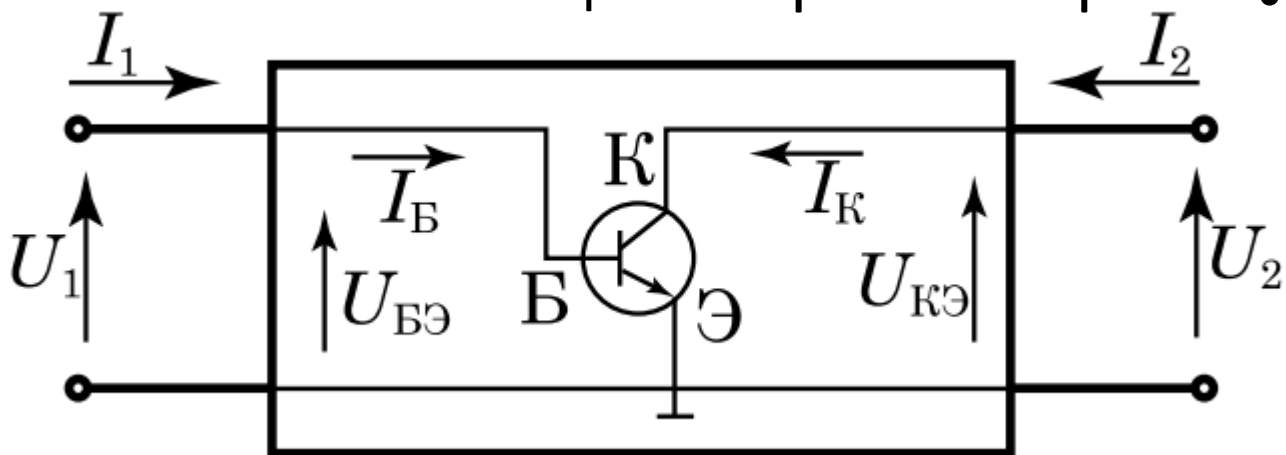
- Приращение  $h$ -параметров

$$\begin{cases} \Delta I_{БЭ} = h_{11}\Delta I_B + h_{12}\Delta I_{КЭ} \\ \Delta I_K = h_{21}\Delta I_B + h_{22}\Delta U_{КЭ} \end{cases}$$

# Динамический расчет



- Схема замещения транзистора



- Схема замещения транзистора

- Основные соотношения

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{\Delta I_{Б}=0}, \quad h_{22} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{\Delta I_{Б}=0},$$

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{\Delta U_{КЭ}=0}, \quad h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \right|_{\Delta U_{КЭ}=0}$$

- Приращение  $h$ -параметров

$$\begin{cases} \Delta I_{БЭ} = h_{11} \Delta I_{Б} + h_{12} \Delta I_{КЭ} \\ \Delta I_{К} = h_{21} \Delta I_{Б} + h_{22} \Delta U_{КЭ} \end{cases}$$

# Динамический расчет

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}}$$

— входное сопротивление, при коротком замыкании на выходе;

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}}$$

— коэффициент обратной связи по напряжению;

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}}$$

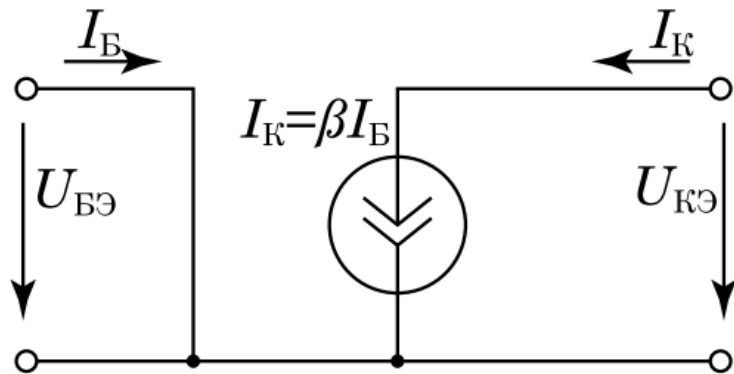
— коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе;

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}}$$

— выходная проводимость при холостом ходе на входе.

# Динамический расчет

Кроме  $h$ -параметров, для анализа работы транзисторов применяются коэффициенты передачи тока эмиттера ( $\alpha = \Delta I_K / \Delta I_E$ ) и тока базы ( $\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$ ). Значение коэффициента  $\alpha$  для современных транзисторов, подключенных по схеме с общим эмиттером, около единицы ( $\alpha = 0,9 \dots 0,995$ ), поэтому при анализе схем с ОЭ он используется.

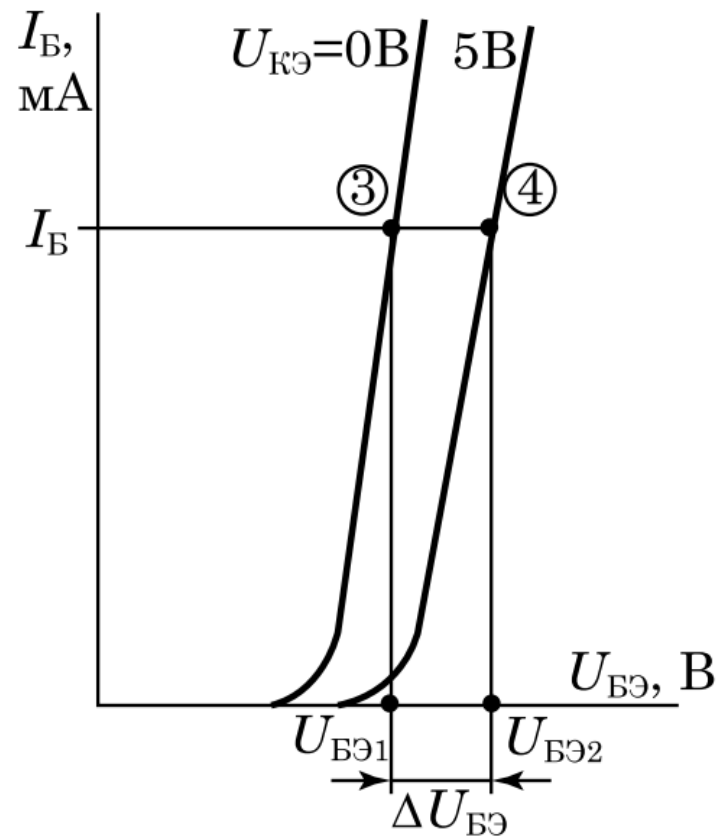
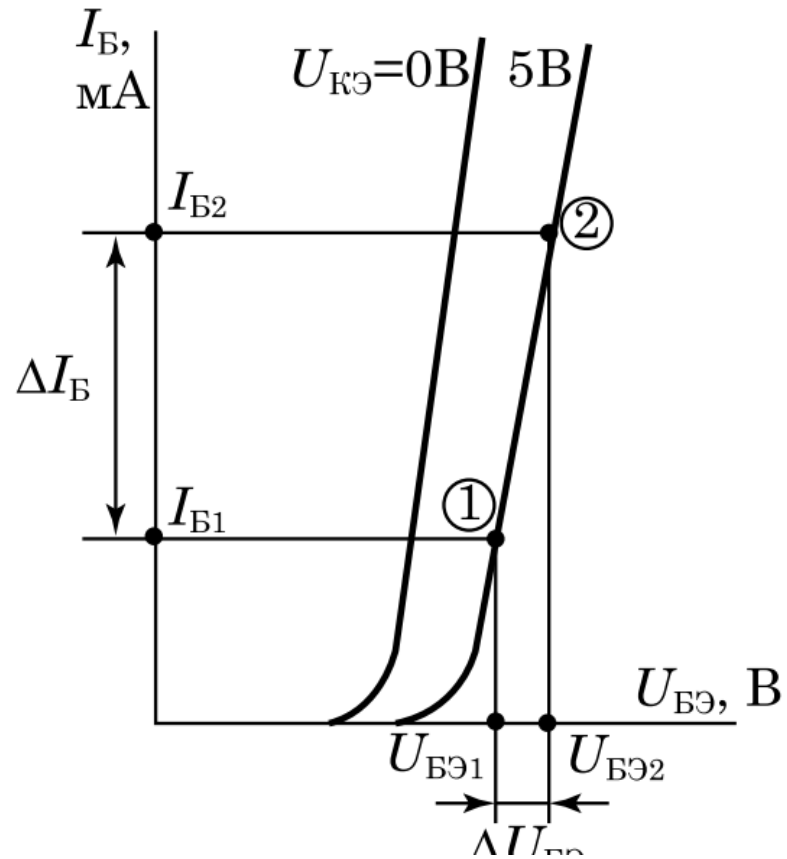


При расчёте схем с общим эмиттером имеет коэффициент  $\beta$ , значение которого составляет  $\beta = (20 \dots 200)$ . При грубых расчётах схем с ОЭ, коэффициент  $\beta$  может использоваться как основной параметр, характеризующих транзистор, В этом случае используется схема замещения, приведённая на рисунке слева

# Динамический расчет.

- При расчёте  $h$ -параметров необходимо обратить внимание на то, что каждой точке характеристики соответствуют три величины:
- для входной характеристики —  $I_B$ ,  $U_{BЭ}$  и  $U_{кЭ}$ ;
- для выходной характеристики —  $I_K$ ,  $U_{кЭ}$  и  $I_B$ .

# Динамический расчет. Расчёт по входным характеристикам транзистора



# Динамический расчет. Расчет по входным характеристикам транзистора

Расчет параметра  $h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}}$  производится следующим образом: на одной из имеющихся входных характеристик (соответствующих выбранному напряжению на коллекторе —  $U_{КЭ} = \text{const}$ ) выбирается линейный (или максимально близкий к нему) участок и на нём две точки ( точки 1 и 2 на ). Разность напряжений базы, соответствующих этим точкам, даст нам  $\Delta U_{БЭ} = U_{БЭ2} - U_{БЭ1}$ , а разность соответствующих значений тока — изменение тока базы  $\Delta I_{Б} = I_{Б2} - I_{Б1}$ .

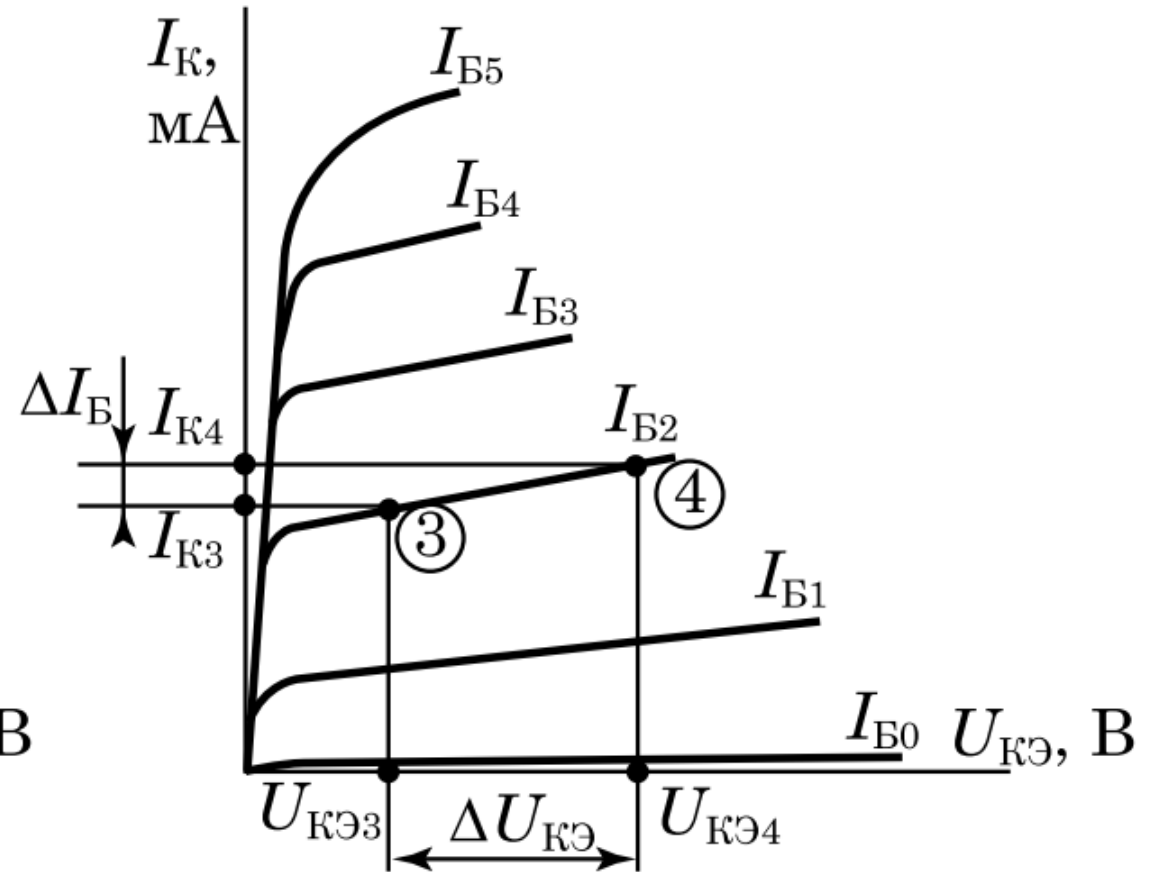
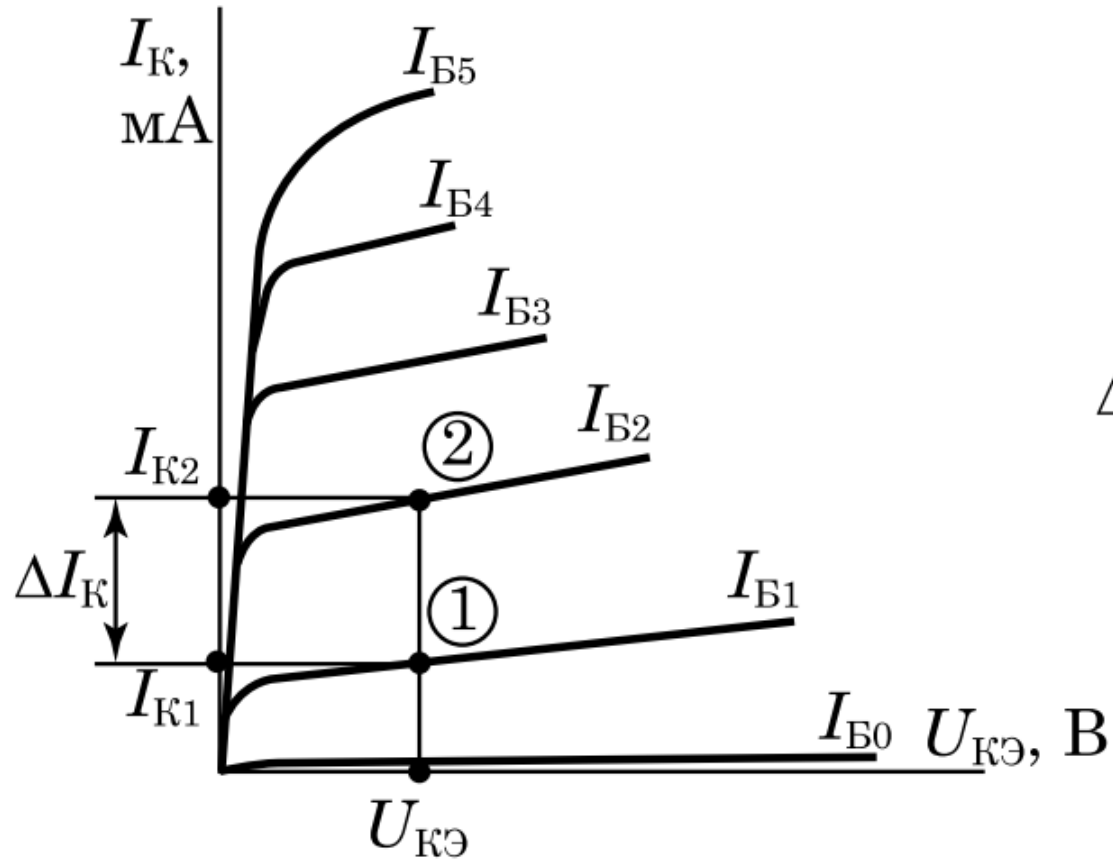


# Динамический расчет. Расчёт по входным характеристикам транзистора

При расчёте параметра  $h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B = \text{const}}$ , выбираем значение тока базы, для которого будем производить расчёт (т. е. обеспечиваем выполнение условия  $I_B = \text{const}$ ), и на двух кривых, построенных для разных значений напряжения коллектора, отмечаем соответствующие этому току точки (точки 3 и 4).

Разность напряжений  $U_{БЭ}$ , соответствующих этим точкам, даёт изменение напряжения между базой и эмиттером:  $\Delta U_{БЭ} = U_{БЭ4} - U_{БЭ3}$ . Величина  $\Delta U_{КЭ}$  определяется как разность между напряжениями  $U_{КЭ}$ , для которых строились входные характеристики (для характеристик, а  $\Delta U_{КЭ} = 5 - 0 = 5\text{В}$ ).

# Динамический расчет. Расчёт по выходным характеристикам транзистора



# Динамический расчет. Расчёт по выходным характеристикам транзистора

Для расчёта параметр  $h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KЭ}=\text{const}}$  необходимо выбрать значение  $U_{KЭ}$  и на кривых, соответствующим двум значениям тока базы, различающихся на  $\Delta I_B$  отметить соответствующие точки (точки 1 и 2 ). Разность значений  $I_K$ , соответствующих этим точкам, даст нам значение  $\Delta I_K = I_{K2} - I_{K1}$ . Величина  $\Delta I_B$  берётся из справочника.

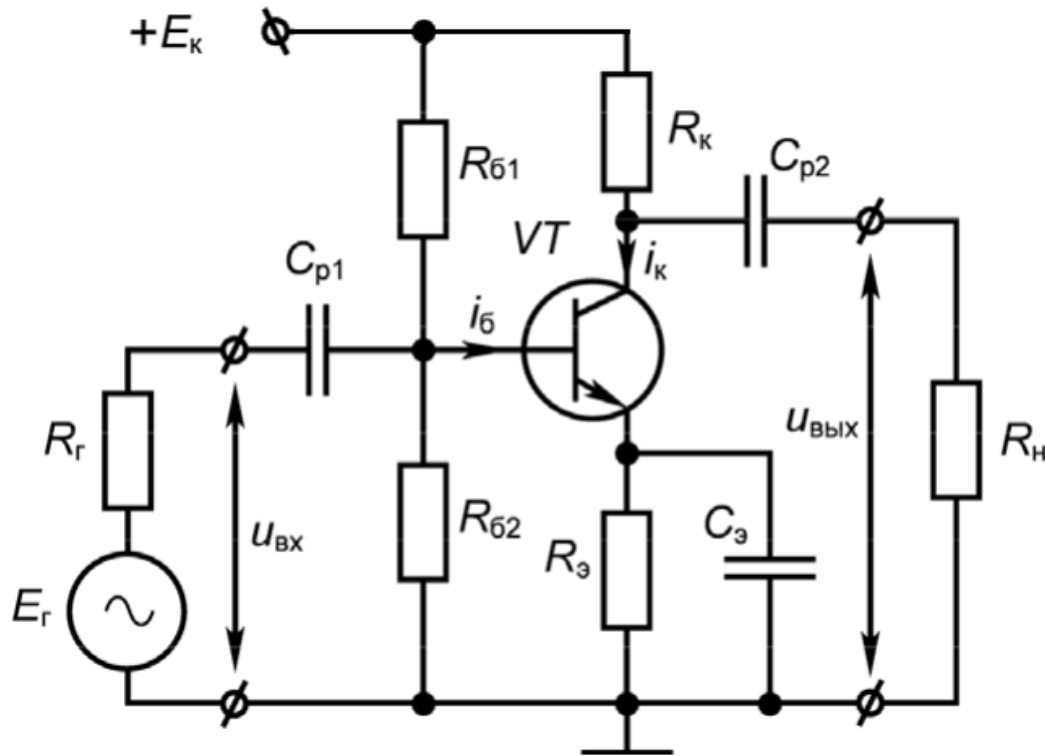
При расчёте параметра  $h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} \right|_{I_B=\text{const}}$ , выбирается одна из имеющихся характеристик  $I_B$  и на ней отмечаются две точки (точки 3 и 4 ). Разность напряжений коллектора, соответствующих этим точкам, даст нам  $\Delta U_{KЭ} = U_{KЭ4} - U_{KЭ3}$ , а разность соответствующих значений тока — изменение тока коллектора ( $\Delta I_K = I_{K4} - I_{K3}$ ).

# Динамический расчет. Расчёт по выходным характеристикам транзистора

Типовые значения  $h$ -параметров для биполярных транзисторов находятся в следующих пределах:

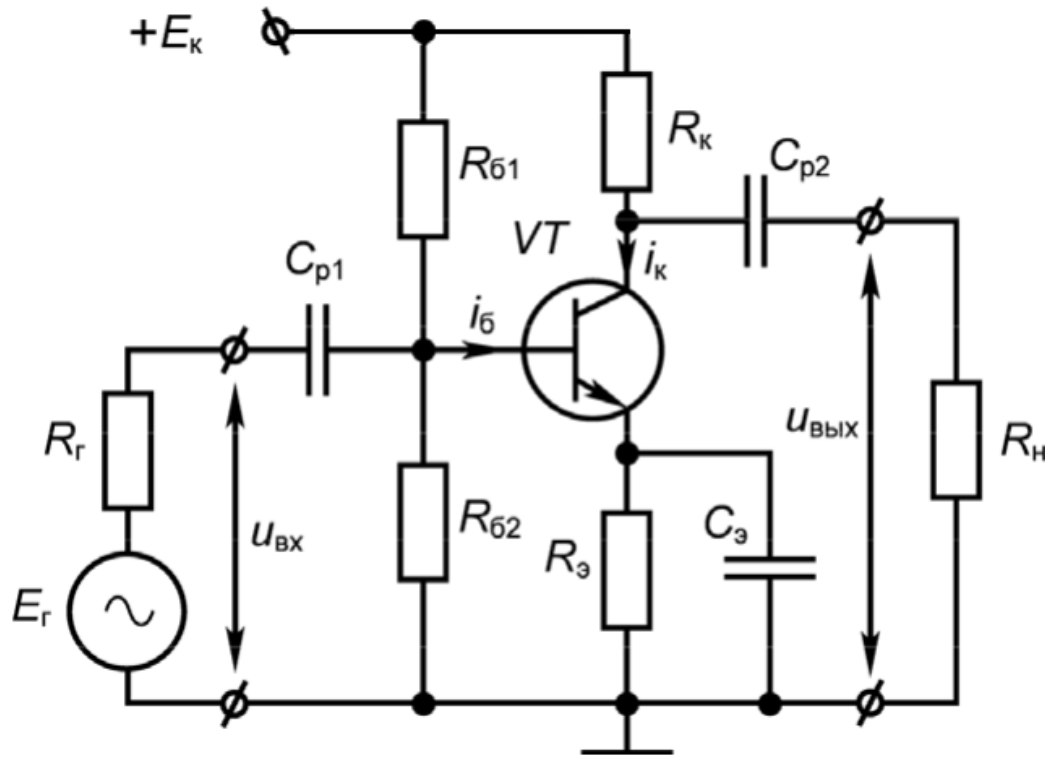
$h_{11}$	$h_{12}$	$h_{21}$	$h_{22}$
$10^3 \dots 10^4$ Ом	$2 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3}$	20 ... 200	$10^{-5} \dots 10^{-6}$ См

# Динамический расчет. Задание 1



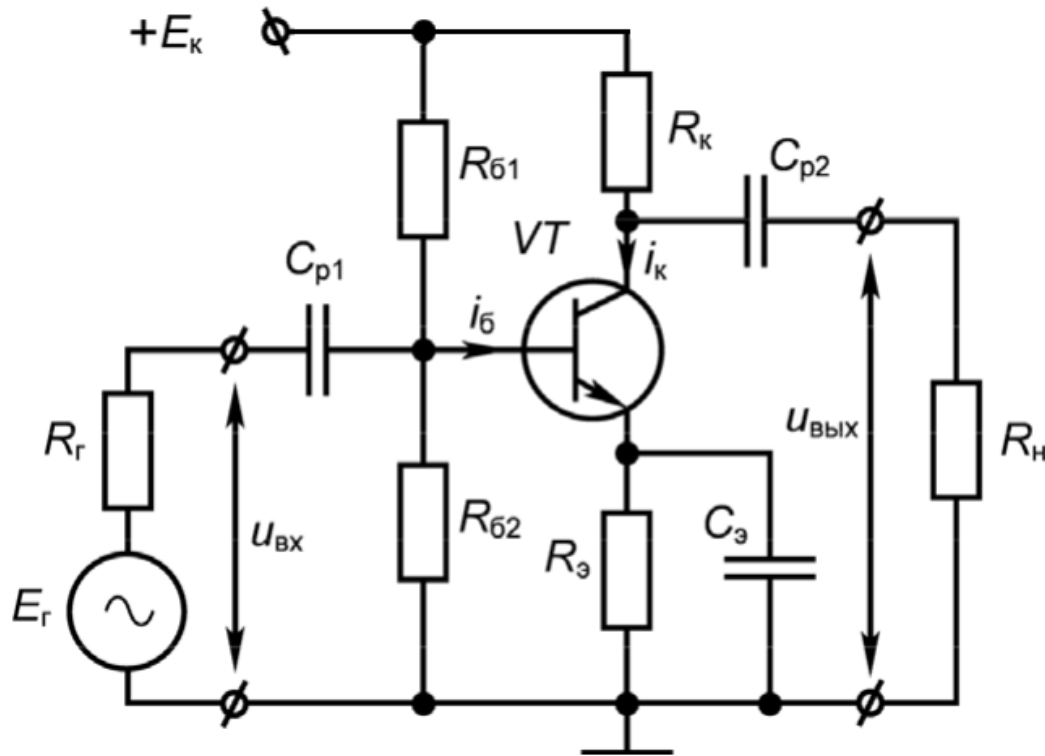
- Обеспечить работу усилительного каскада в режиме АВ на транзисторе ВД139 (КТ317). Подавать на вход синусоидальный сигнал с амплитудой 1В и частотой 1кГц. В качестве нагрузки использовать сопротивление 8 Ом,  $E_k=20В$ , максимальный ток нагрузки 400мА.

# Динамический расчет. Параметры.



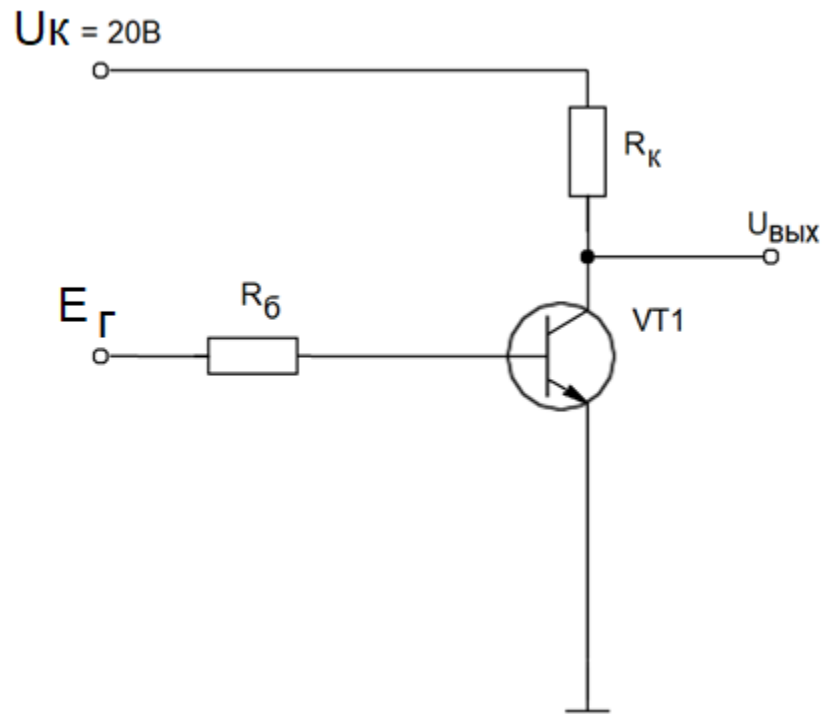
- $R_k$  – ограничивает ток (если  $R_k = 0$ , то  $U_{кэ} = E_k$  и на выходе не будет изменения сигнала, как бы не менялся входной сигнал ( $E_r$  – ЭДС генератора), а транзистор переходит в ключевой режим работы;
- $R_{B1}, R_{B2}$  - делитель напряжения предназначен для задания рабочей точки транзистора методом фиксированного напряжения;
- $R_э$  - сопротивление в эмиттерной цепи для создания последовательной отрицательной обратной связи (ООС) по току, служит для термостабилизации положения рабочей точки транзистора;
- $C_э$  - шунтирует  $R_э$  по переменному току с целью устранения ООС по переменной составляющей, поскольку ООС снижает коэффициент усиления каскада;
- $E_k$  - источник питания;
- $E_r, R_r$  - элементы последовательной схемы замещения источника сигнала: идеальный источник напряжения, сопротивление генератора;
- $C_{p1}, C_{p2}$  - разделительные конденсаторы предназначены для разделения по постоянному току каскад, нагрузки и источника сигнала.

# Динамический расчет. Задание 1



- Статическое сопротивление при  $E_r=0В$ , определим  $R_H = \cong R_k + R_э$ . Такое состояние называется режим покоя транзистора.
- $i_k(t) = \beta \cdot i_б(t)$ , где  $\beta = h_{21э}$  - коэффициент передачи базового тока транзистора. Коллекторный ток повторяет базовый ток и  $\beta$  является коэффициентом усиления  $I_б$ .

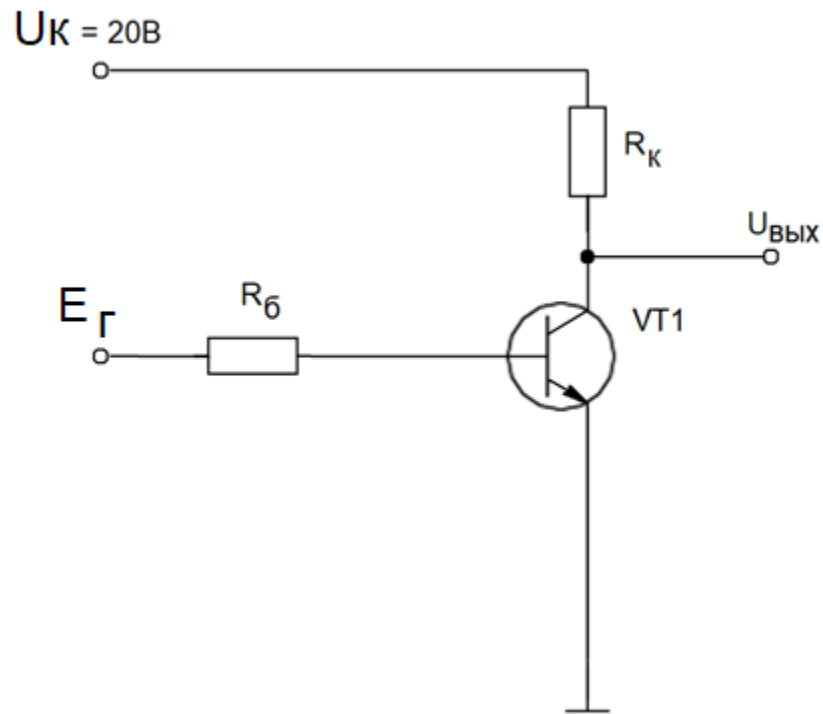
# Динамический расчет. Расчет



- Рассмотрим коллекторную цепь. Она состоит из  $R_k$  и транзистора  $VT1$ . Максимальный ток  $0,4\text{ А}$ , значит  $R_k = E_k / I = 20 / 0,4 = 50\text{ Ом}$ .
- Нагрузочная прямая строится по двум точкам:
  - 1)  $U_{кэ} = 0; I_k = E_k / R_k;$
  - 2)  $I_k = 0; U_{кэ} = E_k.$

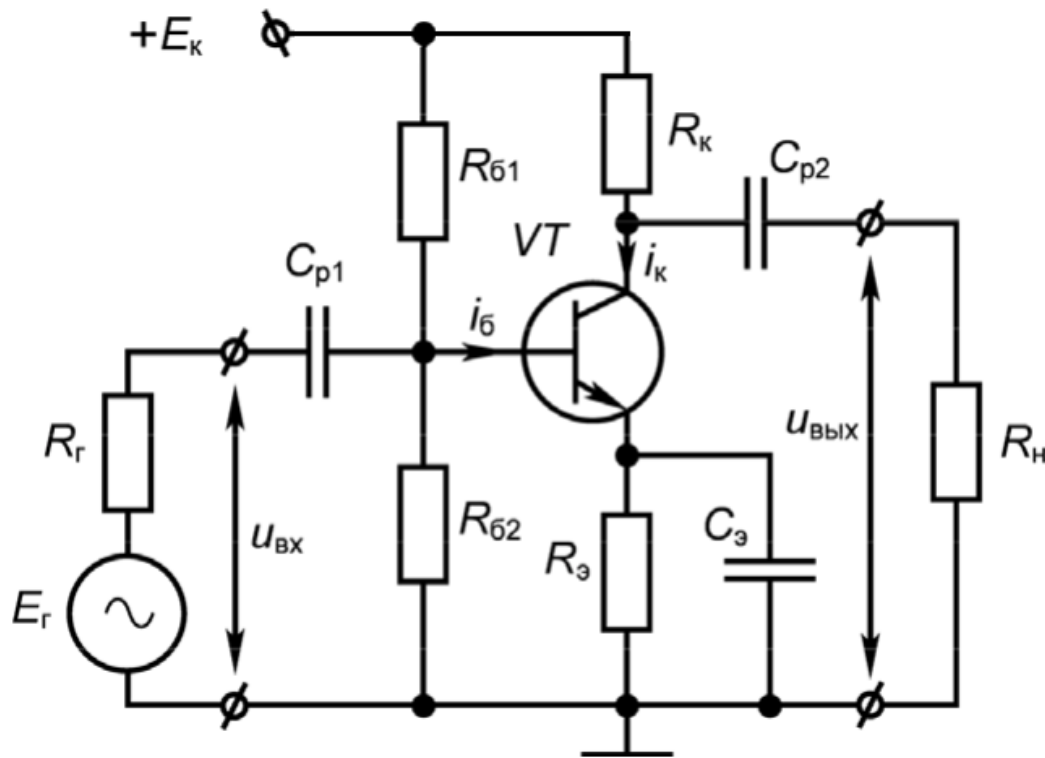


# Динамический расчет. Расчет



- Полное открытие транзистора происходит при токе  $I_{бэ} = 50\text{мА}$ . Минимальное напряжение при котором происходит открытие транзистора – это напряжение база-эмиттер включения  $U_{бэ}(\text{включения})$  в нашем случае  $1\text{В}$ .
- $U_{упр} = U_b + U_{бэ}$ , найдем  $U_b = U_{упр} - U_{бэ}(\text{вкл}) = 5 - 1 = 4\text{В}$
- Определим сопротивление  $R_b = U_b / I_{бэ} = 4 / 0,05 = 80\text{ Ом}$   
Принимаем  $R_b = 82\text{ Ом}$

# Динамический расчет. Расчет



- Для исходной полной схемы каскада конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_э$  рассчитываются по формуле:

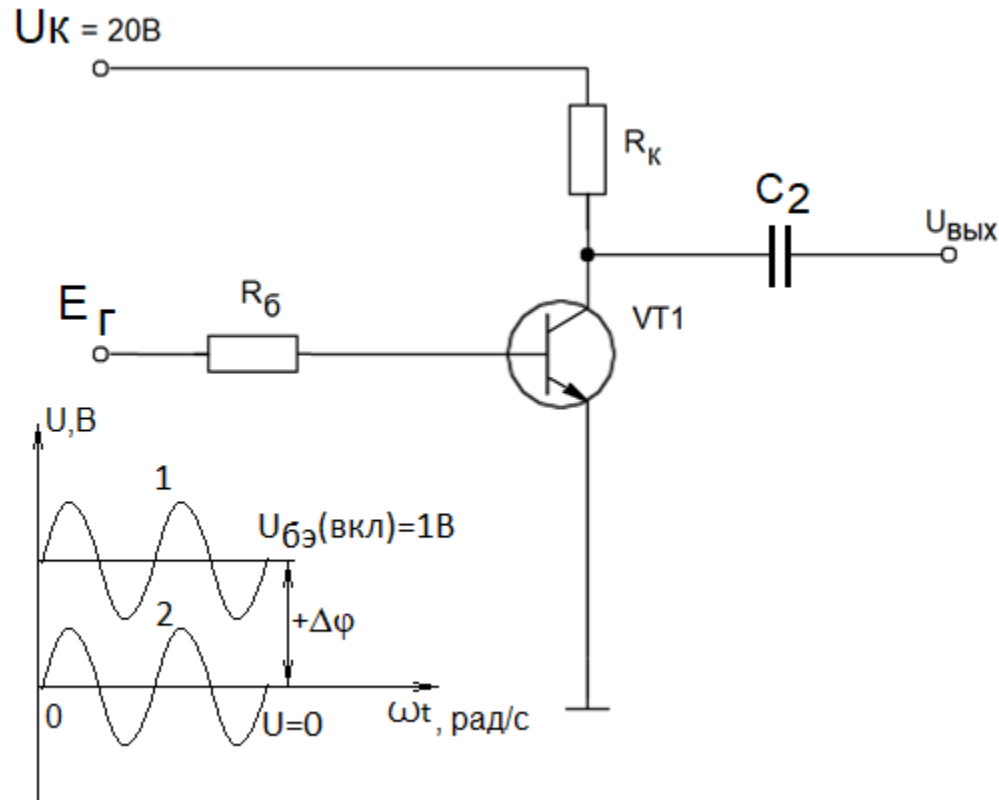
$$C_1 = \frac{M_{k1}}{2\pi f_H (R_r + R_{вх}) \sqrt{1 - M_{k1}^2}} = 1.3 \cdot 10^{-6} \Phi$$

$$C_2 = \frac{M_{k2}}{2\pi f_H (R_k + R_н) \sqrt{1 - M_{k2}^2}} = 3.6 \cdot 10^{-7} \Phi$$

$$C_э = \frac{(1 + \beta) M_{kэ}}{2\pi f_H (R_r + R_{вх}) \sqrt{1 - M_{kэ}^2}} = 1.8 \cdot 10^{-4} \Phi$$

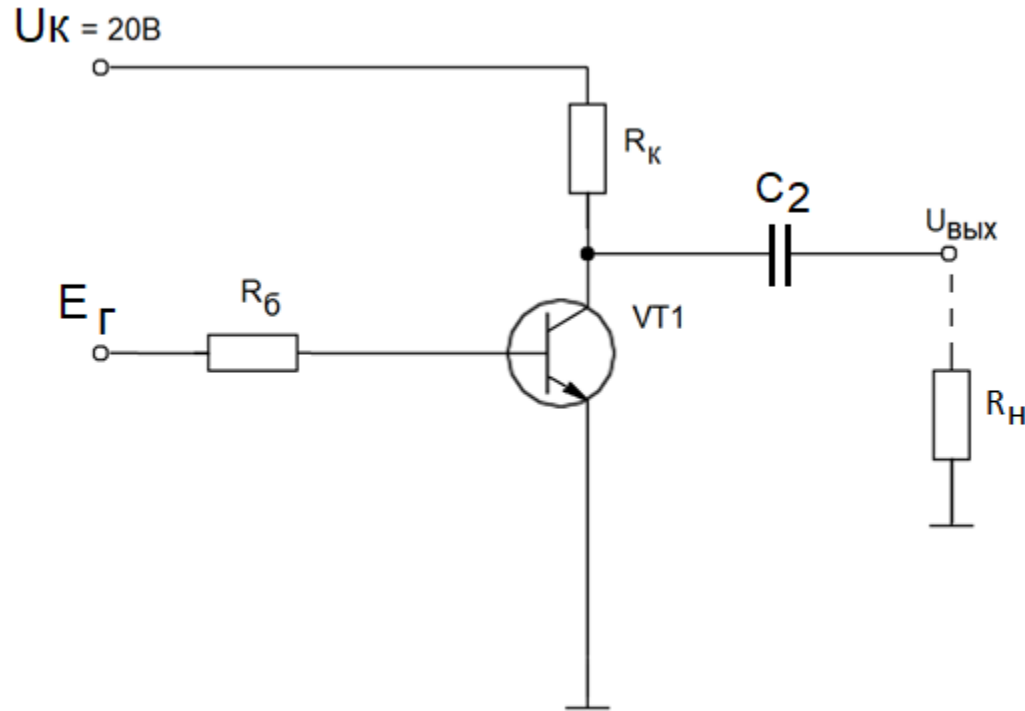
- Где  $M_{k1} = M_{k2} = 0,8 \dots 0,97$  – коэффициент гармонических искажений, примем равным  $M_{k1} = 0,9$ .
- $R_{вх}$  суммарное комплексное сопротивление на входе база-эмиттерного перехода. При отсутствии согласующего конденсатора принимает только реальные значения  $R_{вх} = R_б$

# Динамический расчет. Расчет



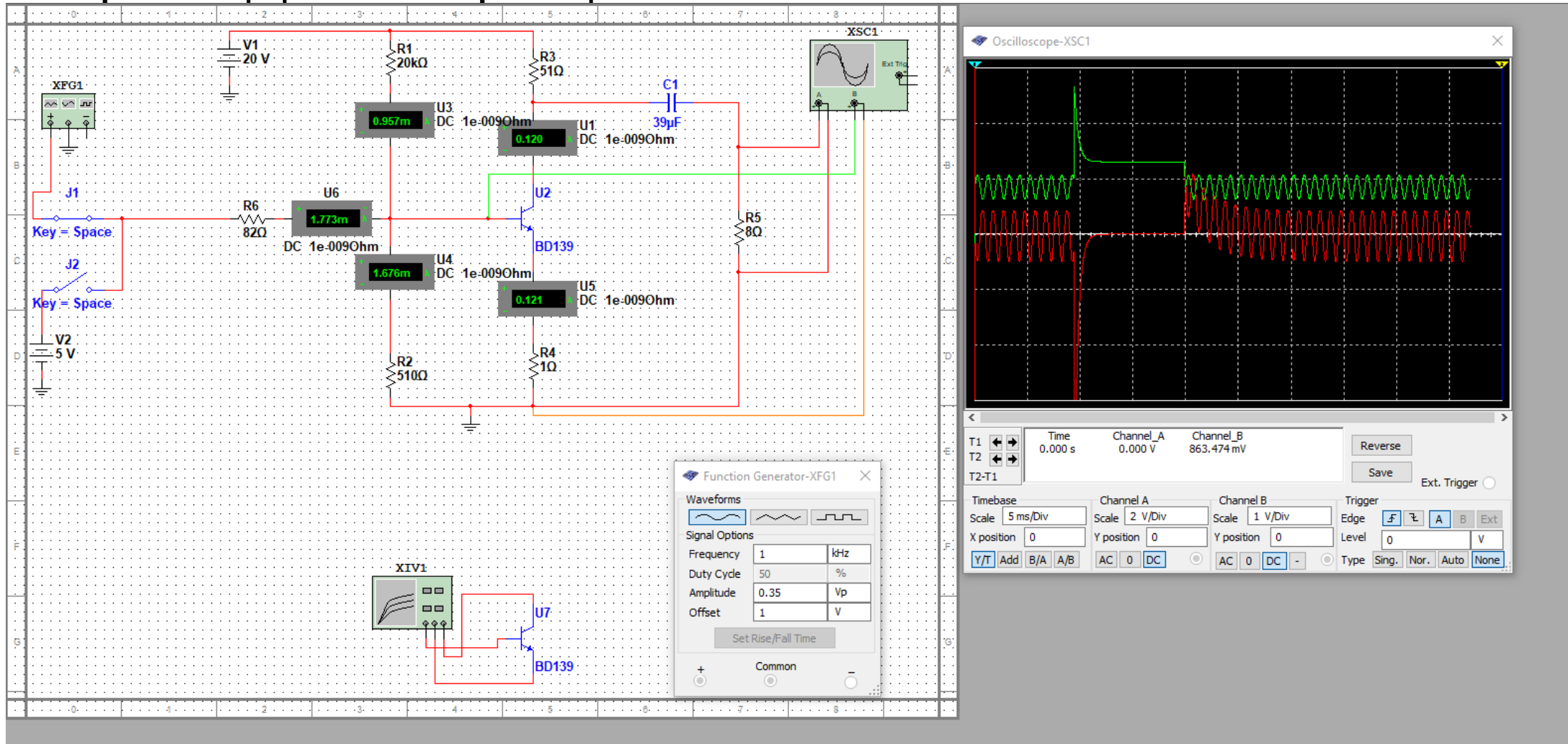
- В случае использования управляющего сигнала (2), симметричного относительно оси абсцисс, на вход устанавливается согласующий конденсатор  $C_1$ , а если на вход попадает (1) однополярный сигнал, то необходимость использования согласующих конденсаторов отпадает. По причине использования однополярного сигнала используем только конденсатор  $C_2$ . Принимаем значение  $C_2 = 36,5126 = 39\text{мкФ}$

# Динамический расчет. Расчет

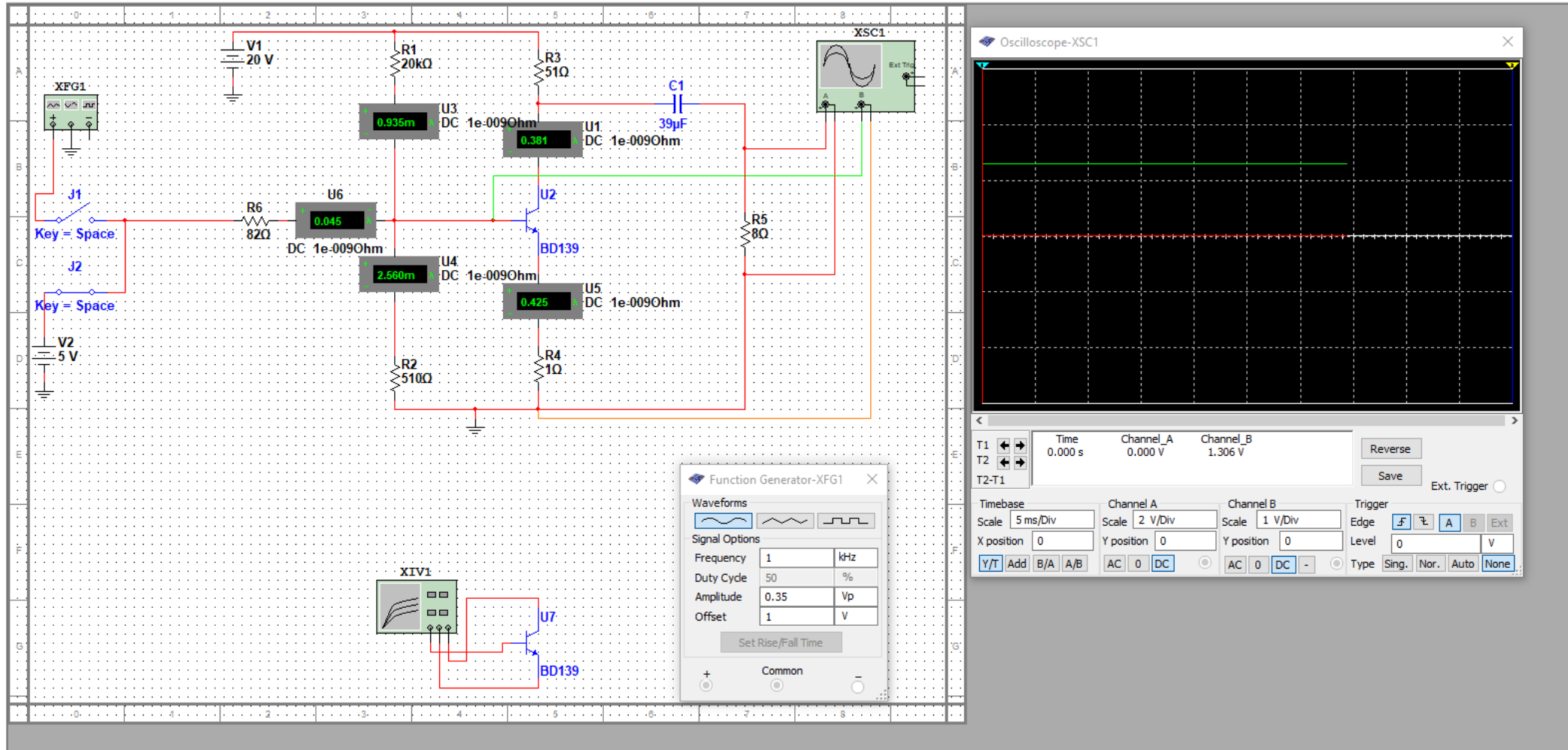


- В случае работы транзистора в ключевом режиме на нагрузке будет постоянный однополярный сигнал  
В случае работы транзистора в усилительном режиме на нагрузке из-за согласующего конденсатора  $C_2$  формируется двухполярная синусоида. Подобный способ усиления сигнала так же используется на выходе воспроизводящих устройств для усиления звука (громкоговорители, системы объемного звучания, низкочастотные динамики и пр...)

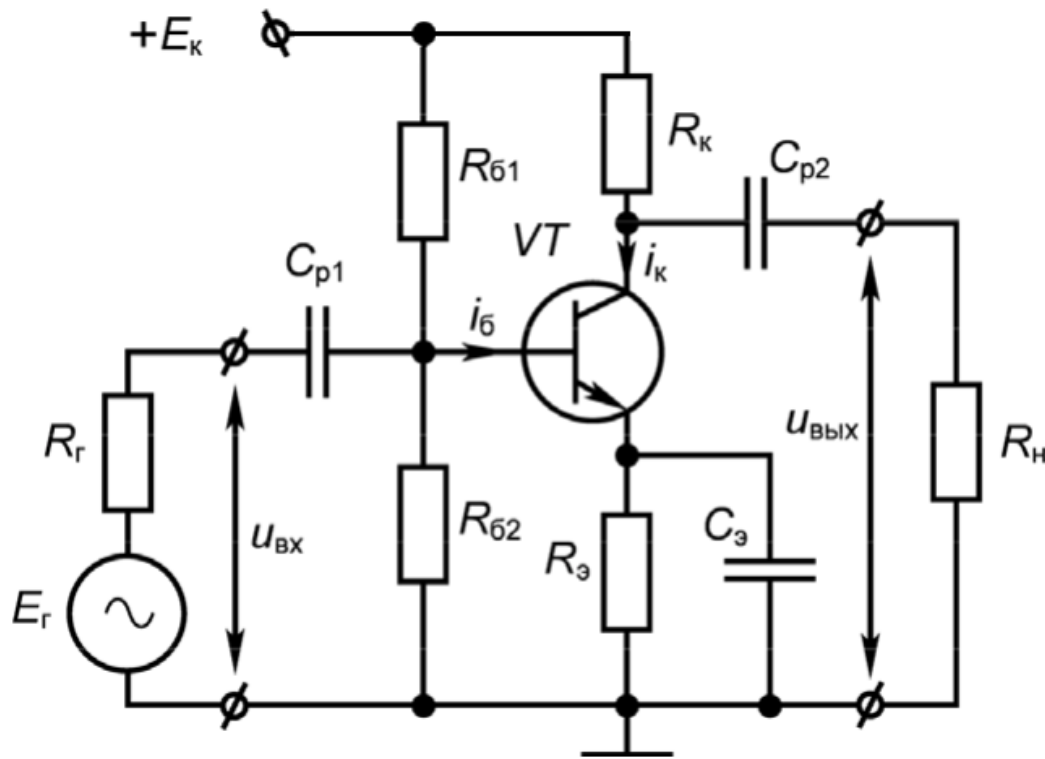
# Динамический расчет. Результаты моделирования – режим усилителя и переходный процесс



# Динамический расчет. Результаты моделирования – ключевой режим



# Динамический расчет. Задание 2



- Для представленной схемы определить параметры  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_k$ ,  $R_э$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_э$ .
- На основе полученных  $h$ -параметров оценить входные и выходные характеристики каскада ( $U_m$ ,  $I_{km}$ ,  $I_{k0}$  и другие)
- Остальные параметры взять из таблицы, где XX-две последние цифры студенческого билета

- Примерные задания. Практическая работа №3

Номер п/п	Исходные параметры			
	Ек	Ре	Рн	VT1
1	10	1	2	2n2222a
2	11	1	4	BC550BP
3	12	1	8	BD135
4	13	1	2	BD137
5	14	1	4	2n2222a
6	15	0,5	8	BC550BP
7	16	0,5	2	BD135
8	17	0,5	4	BD137
9	18	0,5	8	BD139
10	19	1	2	2n2222a
11	20	1	4	BC550BP
12	10	1	8	BD135
13	11	1	2	BD137
14	12	0,5	4	BD139
15	13	0,5	8	2n2222a
16	14	0,5	2	BC550BP
17	15	0,5	4	BD135
18	16	1	8	BD137
19	17	1	2	BD139
20	18	1	4	2n2222a

- ХХ – две последние цифры студенческого билета