

Электроника
микроэлектроника
И
наноэлектроника

Литература

1. В. К. Захаров, Ю. И. Лынарь.

«Электронные устройства автоматики и телемеханики»
1984г.

2. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев.

«Электроника» М. ВШ. 1982.

3. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев.

«Электроника» М. ВШ. 1991.

4. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев.

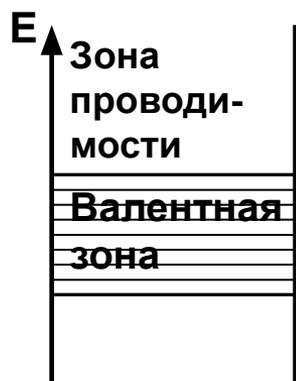
«Электроника и МПТ» М. 2005.

Тема: Электропроводность полупроводников

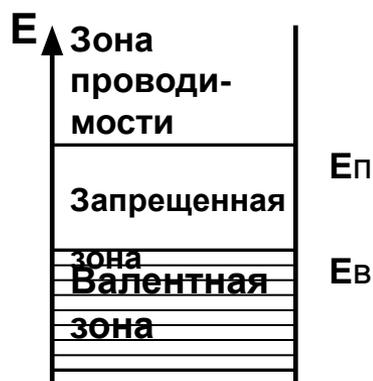
Металлы, диэлектрики, полупроводники

Ковалентные связи

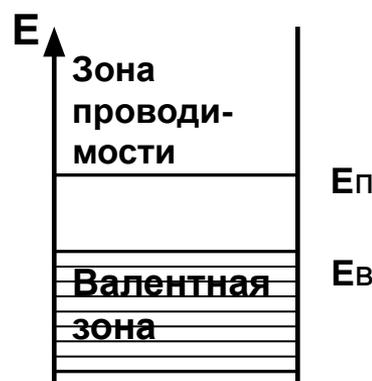
Энергетические диаграммы



металлы



диэлектрики



п/п

$$\Delta E_d > \Delta E_{п/п}$$

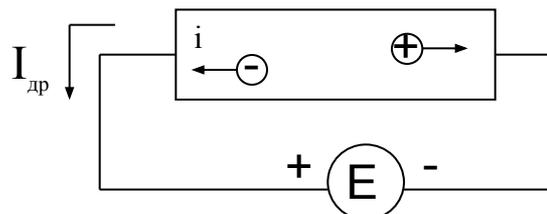
Если $\Delta E_{п/п} < 3\text{эВ}$,
то это п/п

$$\Delta E_d = E_p - E_v$$

$$\Delta E_{п/п} = E_p - E_v$$

Собственная электропроводность

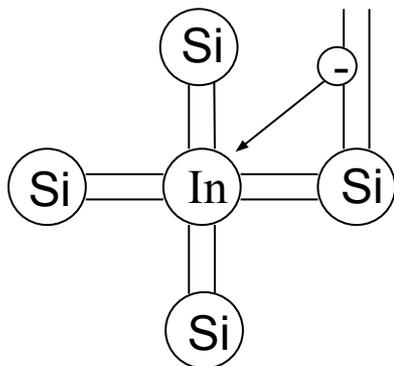
Ток дрейфа (i-типа)



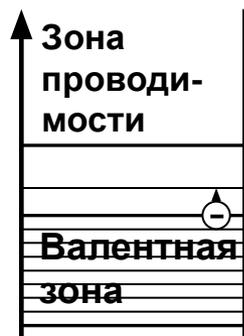
$$I_{др} = I_n + I_p$$

Примесная электропроводность

1. Дырочная.

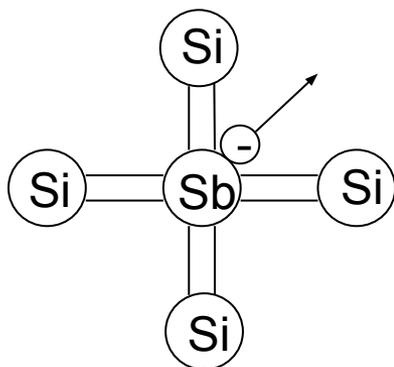


In – акцепторная примесь



Уровни акцепторов

2. Электронная.



Sb – донорная примесь



Уровни доноров

Температурный потенциал

$$\varphi_T = kT/q \approx T/11600 \text{ (В)}$$

k – постоянная Больцмана

T – абсолютная температура

q – заряд электрона

$$\varphi_{T=300\text{K}} \approx 0,025 \text{ (В)}$$

Тема: Электрические переходы

I. Определение: электрические переходы

II. Типы переходов.

1. металл – п/п

а) невыпрямляющий

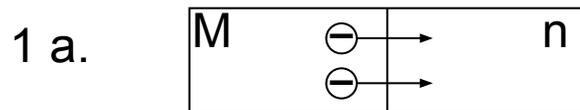
б) выпрямляющий

2. П/п – п/п

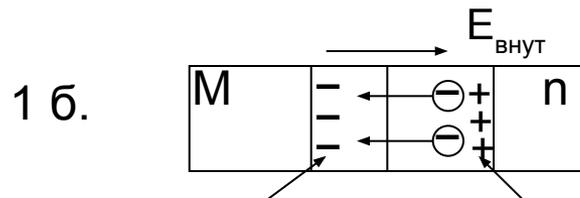
а) p – n (n – p)

б) p⁺ – p (n⁺ – n)

в) p – i (n – i)



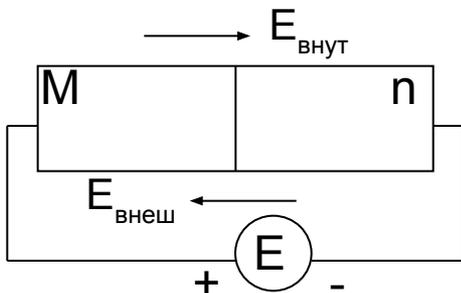
$A_M < A_n$ - невыпрямляющий



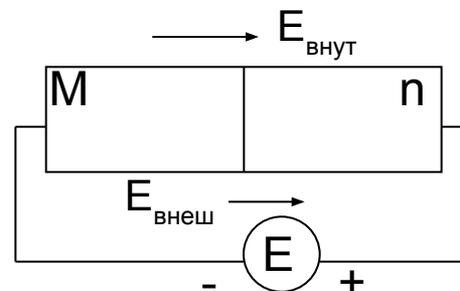
$A_M > A_n$ - выпрямляющий

Отрицательный
объемный заряд

Положительный
объемный заряд



$E_{\text{внеш}} > E_{\text{внут}}$
Переход
открыт



$E_{\text{внут}} + E_{\text{внеш}}$
Переход
закрит

р – n переход

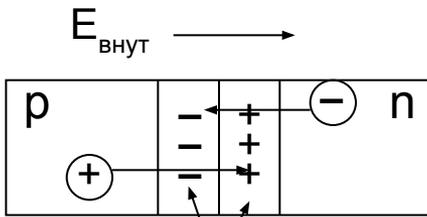
$P_p = n_n$ – симметричный, $P_p \neq n_n$ – несимметричный

$P_p \gg n_n, n_n \gg P_p$ (не менее 10^3 раз)

Режимы:

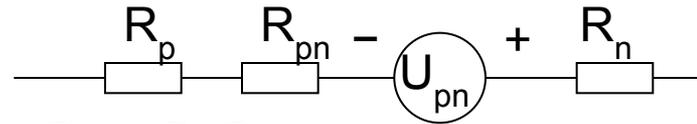
1. Равновесный
2. Прямое смещение
3. Обратное смещение

Равновесный Режим



объемные заряды атомов примесей

Схема замещения в равновесном режиме



$R_{pn} \gg R_p, R_n$

U_{pn} – барьерная разность потенциалов

$U_{pn} \approx 0,4 \text{ В (Ge)}$ $U_{pn} \approx 0,7 \text{ В (Si)}$

$R_p \gg R_n$ или наоборот – несимметричный переход

Прямое смещение

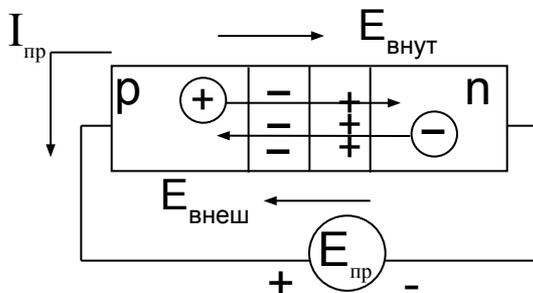
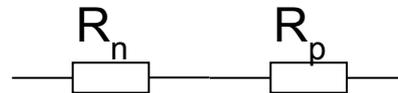


Схема замещения

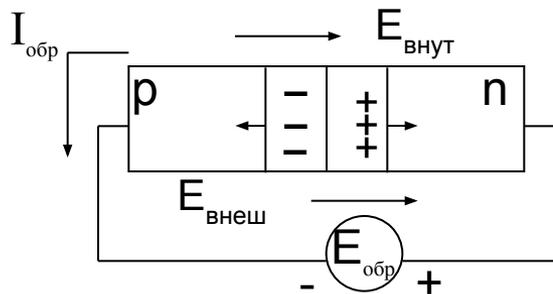


Если $E_{внеш} = E_{внут}$, то толщина объемных зарядов = 0

При $E_{внеш} > E_{внут}$ через переход потечет ток $I_{пр}$

$$I_{пр} = I_0 (e^{E_{пр}/\varphi_t} - 1) \quad E = \varphi_t * \ln(I_{пр}/I_0 + 1)$$

Обратное смещение



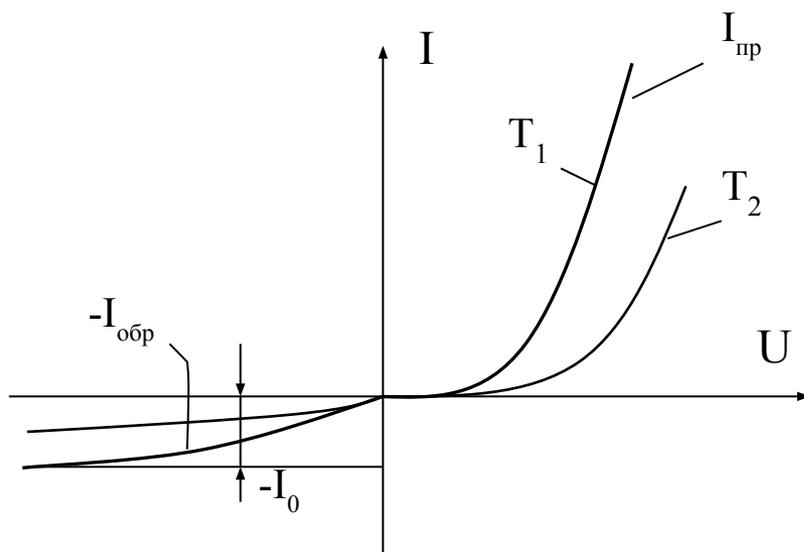
$$I_{\text{обр}} = I_0 (e^{-E_{\text{обр}}/\varphi_t} - 1)$$

Поля складываются

$$I_0 e^{-E/\varphi_t} \quad \text{— диффузионный ток}$$

$$I_0 \quad \text{— тепловой ток}$$

ВАХ перехода



$$T_1 > T_2$$

$$r_{\text{диф}} = dU/dI = \frac{d\varphi_T * \ln(I_{\text{пр}}/I_0 + 1)}{dI_{\text{пр}}} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{пр}} + I_0} \approx \frac{\varphi_T}{I_{\text{пр}}}$$

При $I_{\text{пр}} \gg I_0$

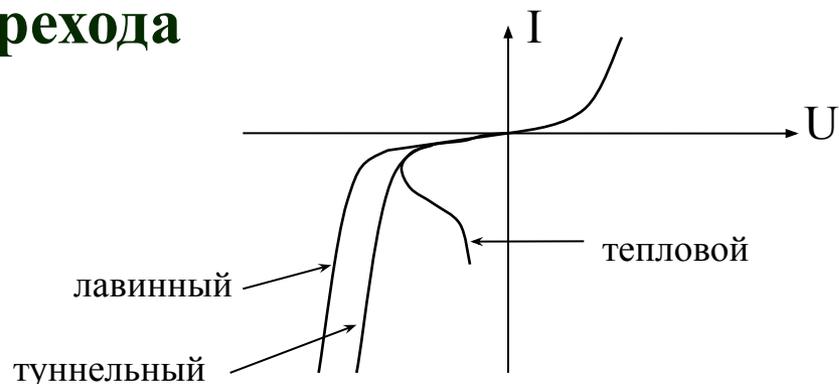
Сопротивление постоянному току

$$R_{\text{пр}} = \frac{U}{I_{\text{пр}}} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{пр}}} * \ln(I_{\text{пр}}/I_0 + 1)$$

$$R_{\text{обр}} = \frac{|U|}{I_0} \quad ; \quad \text{при } |U| \gg \varphi_T$$

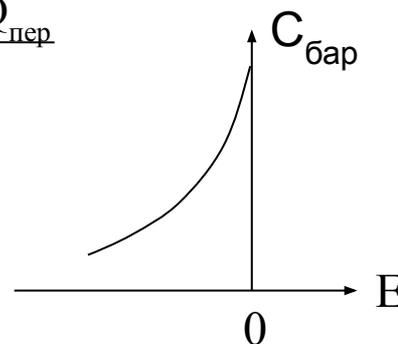
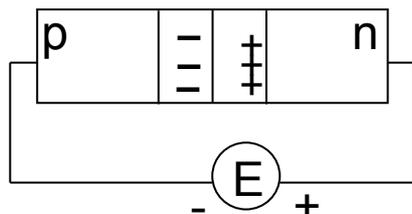
Пробой перехода

Туннельный, лавинный, тепловой
Обратимый, необратимый



Емкость перехода

1. Барьерная ($C_{\text{бар}}$) $I = C_{\text{бар}} \frac{dE}{dt} = \frac{dQ_{\text{пер}}}{dt}$

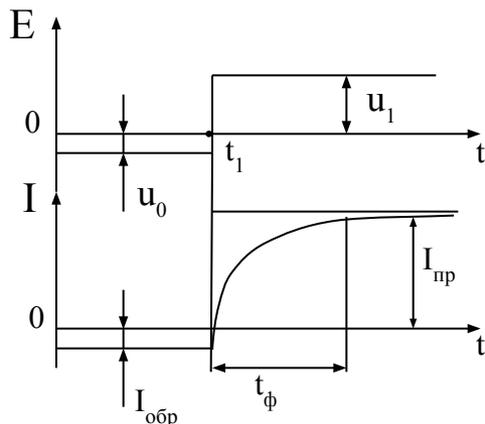


Вольт-фарадная
зависимость
 $C_{\text{бар}} = f(E)$

2. Диффузионная ($C_{\text{диф}}$) – связана с изменением концентрации свободных носителей заряда при прямом смещении

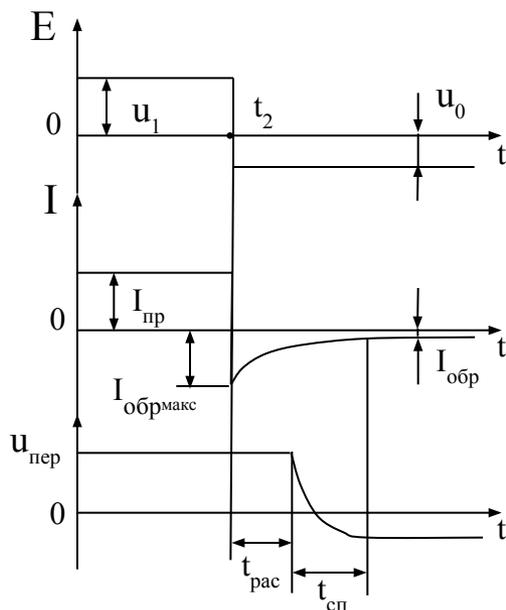
Переходные процессы в р-п переходе

1. Включение



$t_ф$ – длительность фронта; определяется временем изменения концентрации неосновных носителей в базе при прямом смещении

2. Выключение



$u_{пер}(t)$ – зависимость падения U на переходе от времени, при запирации

$t_{рас} = \tau \ln(1 + I_{пр} / I_{обрмакс})$ – время рассасывания неосновных носителей в базе

τ – время жизни неосновных носителей в базе

$t_{сп}$ – время убывания инжекции до нуля

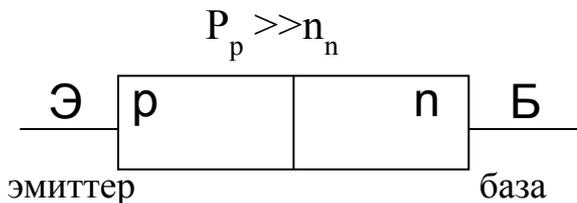
Параметры и разновидности диодов

1. по технологии изготовления

- точечные,
- плоскостные (сплавные),
- планарные,
- мезадиоды.

2. по функциональному назначению

- выпрямительные,
- стабилитроны,
- туннельные,
- фотодиоды,
- светодиоды,
- диоды Шоттки.



Диод – полупроводниковый прибор, содержащий один или несколько переходов и имеющий два электрода.

Прямая ветвь диода

$$I_{\text{пр}} = I_0 \left(e^{\frac{E - I_{\text{пр}} \tau_{\text{б}}}{\varphi_t}} - 1 \right)$$

$\tau_{\text{б}}$ – омическое сопротивление базы

$$E = \varphi_t \ln \left(\frac{I_{\text{пр}}}{I_0} + 1 \right) + I_{\text{пр}} \tau_{\text{б}}$$

Для малых $I_{\text{пр}}$

$$E \approx \varphi_t \ln \left(\frac{I_{\text{пр}}}{I_0} + 1 \right)$$

Выпрямительные диоды

(Сплавные, планарные)

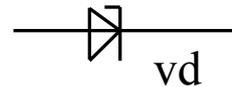
- предельное $U_{обр}$

- средний $I_{пр}$

- прямое падение $U_{пр}$

- рассеиваемая мощность $P_{д}$

Стабилитроны



$U_{стмакс}$ – номинальное напряжение стабилизации

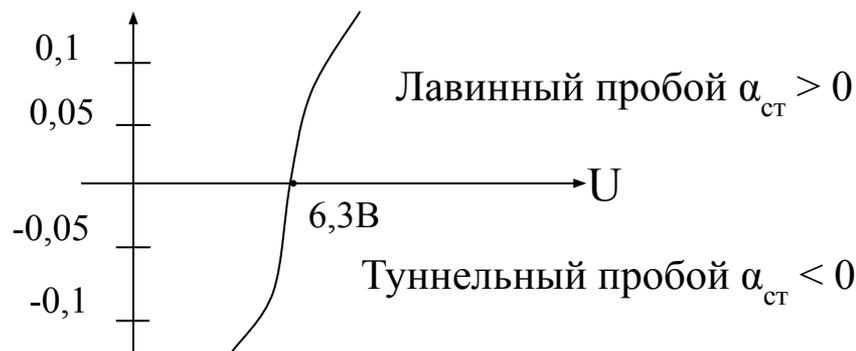
$I_{стмакс}$ – максимальный ток

$I_{стмин}$ – минимальный ток

$I_{стн}$ – номинальный ток

$\alpha_{ст}$ – средний температурный коэффициент стабилизации

$\alpha_{ст}$ (% / град)

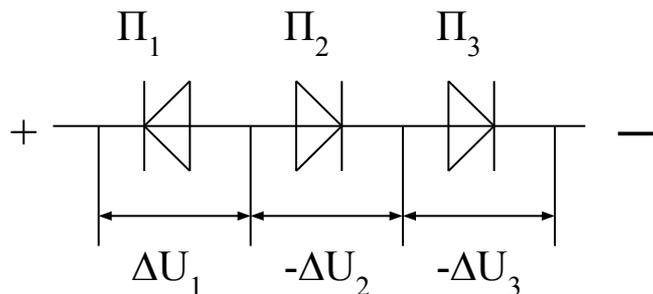
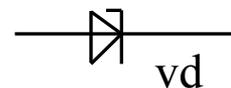


$$\alpha_{ст} = \frac{\delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T}$$

$U_{ст}$ – напряжение стабилизации

$\delta U_{ст}$ – изменение $U_{об}$ при изменении температуры на ΔT

Прецизионные стабилитроны

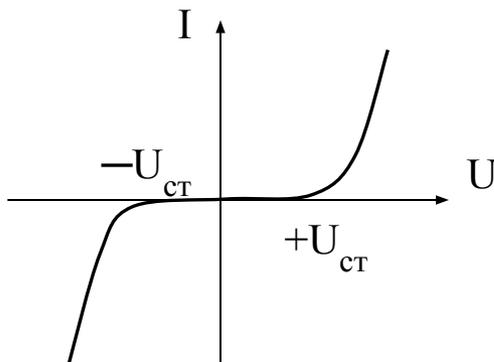
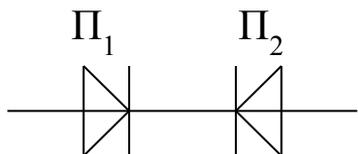
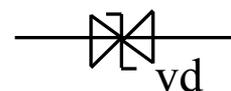


$$|\Delta U_2| \approx |\Delta U_3| \approx |\Delta U|$$

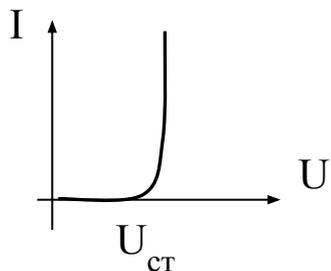
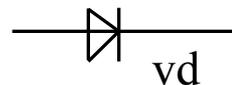
При изменении T: $\Delta U_1 - \Delta U \approx 0$

$$\alpha_{\text{ст}} = (-1 \div 20) \cdot 10^5 \frac{1}{\text{град}}$$

Двуханодные стабилитроны



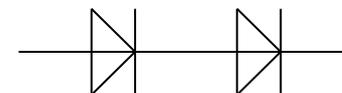
Стабисторы



$$U_{\text{ст}} \approx 0,7\text{В}$$

Используется кремний с высокой концентрацией

$$U_{\text{ст}} \approx 1,4\text{В}$$



Варикапы

(кремний, арсенид галлия)



Параметры: $C_d = C_{бар} (1 \div 3 \cdot 10^2 \text{ пФ})$

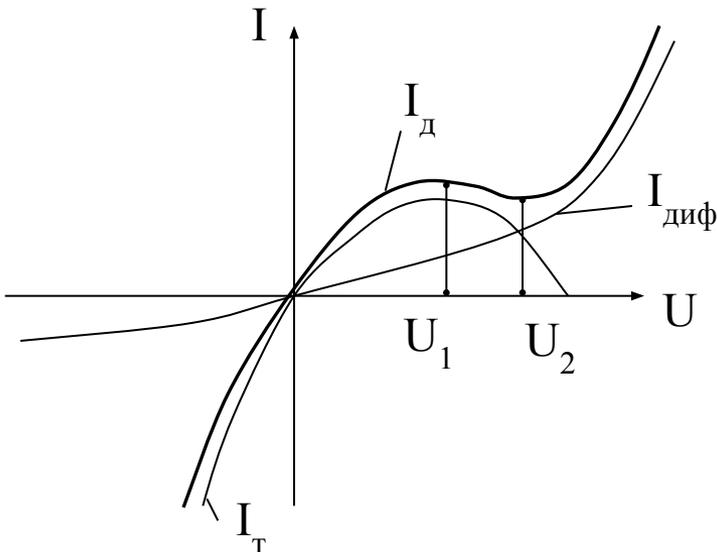
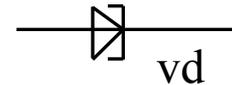
C_n – номинальная емкость

$TKE = \frac{\delta C_n}{C_n \Delta T}$ – температурный коэффициент емкости

$K_c = \frac{C_{макс}}{C_{мин}}$ – коэффициент перекрытия

Q – добротность

Туннельные диоды



$$I_d = I_{диф} + I_T$$

Параметры:

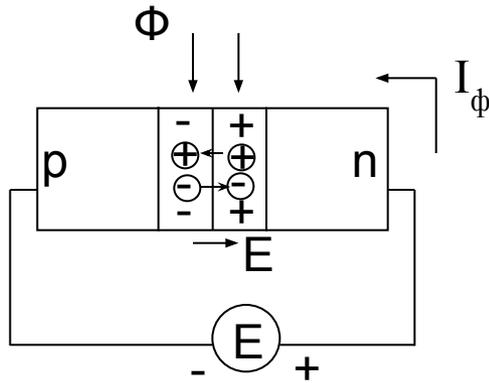
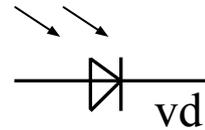
$U_1(I_1)$ – напряжение (ток) максимума

$U_2(I_2)$ – напряжение (ток) минимума

$I_{прмакс}$ – предельный прямой ток

$U_{обрмакс}$ – максимальное обратное U при предельном обратном токе

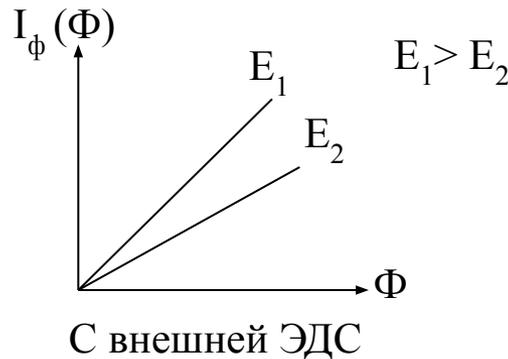
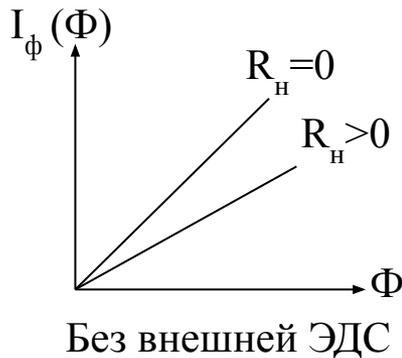
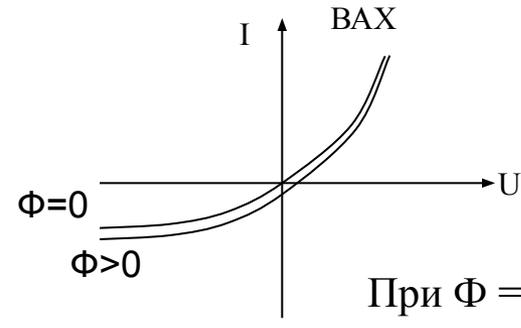
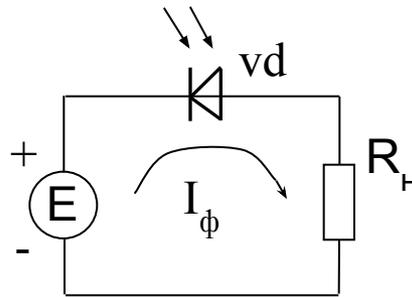
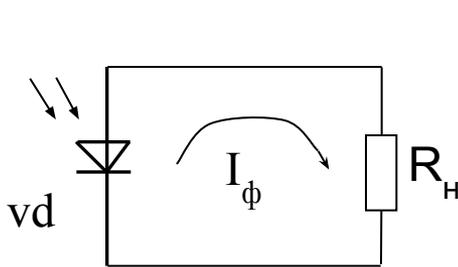
ФОТОДИОДЫ



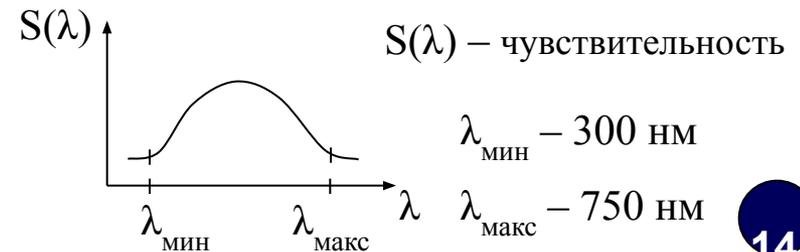
Фототок I_ϕ является следствием переноса через переход неосновных зарядов. Они изменяют концентрацию объемных зарядов у перехода, поэтому барьерная разность потенциалов $U = U_{pn} - E_\phi$

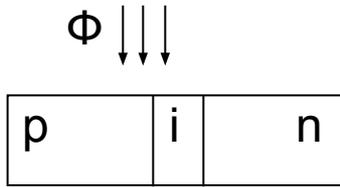
(E_ϕ – фотоЭДС, U_{pn} – барьерная разность при $\Phi = 0$)

Схемы включения

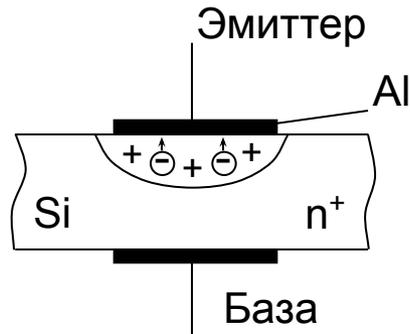


Спектральная характеристика





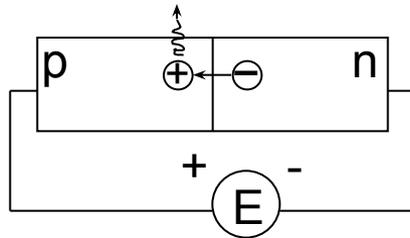
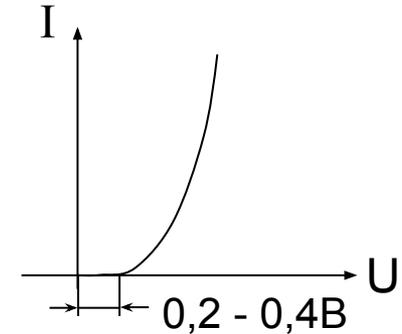
Р-і-п диоды



Диоды Шоттки

$$A_{Al} > A_{Si}$$

+ это объемный заряд донорных атомов



Светодиоды

Параметры

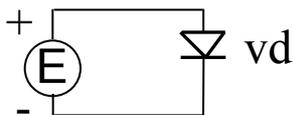
1. Φ – сила светового потока
2. Цвет – (частота излучения)
3. $U_{пр}$ – напряжение отпираия перехода

Материал – арсенид галлия
фосфид галлия

Расчет цепей с диодами

1. Расчет по постоянному току

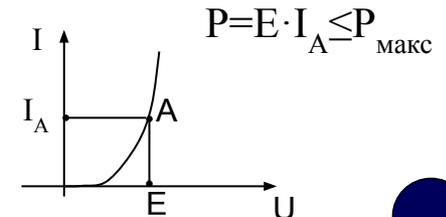
а)

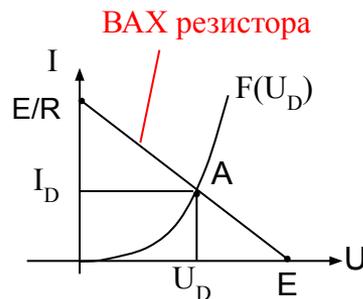
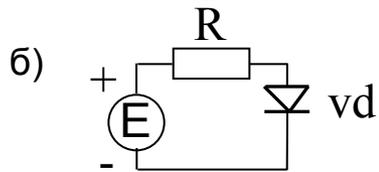


$$U_D = E \quad I_D = I_A$$

$$r_{пр} = E / I_A \text{ – прямое сопротивление}$$

$$r_{д} = \phi_{\tau} / I_A \text{ – дифференциальное сопротивление}$$





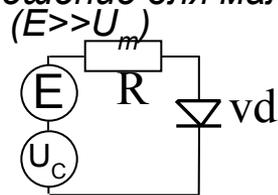
ВАХ резистора (линия нагрузки) строится по точкам соответствующим режиму КЗ ($r_{np}=0$) и ХХ ($r_{np}=\infty$)

По т. А определяют $U_D, I_D, r_{np}, r_d, P_{ст}$

$$\begin{cases} E = U_R + U_D = I_D \cdot R + U_D \\ I_D = f(U_D) = I_0 (e^{\frac{U_D}{\Phi T}} - 1) \end{cases}$$

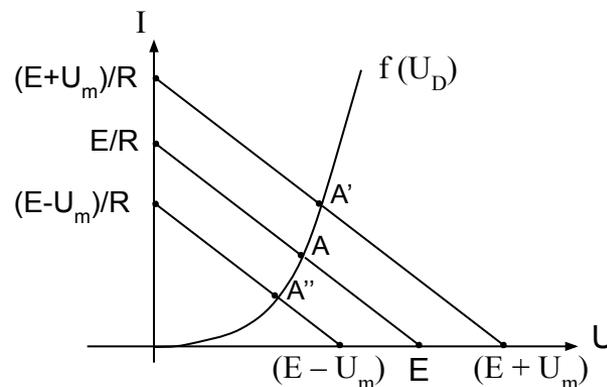
2. Расчет по переменному току

а) решение для малого сигнала



$$U_C = U_m \sin \omega t$$

$$\begin{cases} E + U_m \sin \omega t = U_R + U_D = I_D \cdot R + U_D \\ I_D = f(U_D) \end{cases}$$

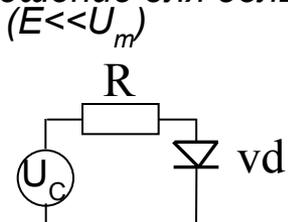


$$U_{mD} = U_{A'} - U_A = U_A - U_{A''}$$

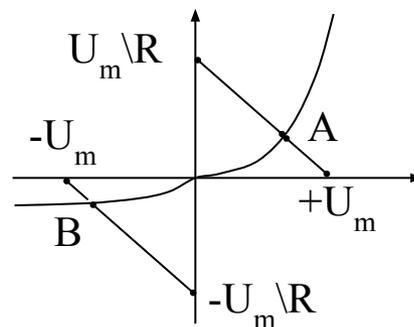
$$I_{mD} = I_{A'} - I_A = I_A - I_{A''}$$

$$r_d = \frac{U_{mD}}{I_{mD}}$$

б) решение для большого сигнала



$$U_C = U_m \sin \omega t$$

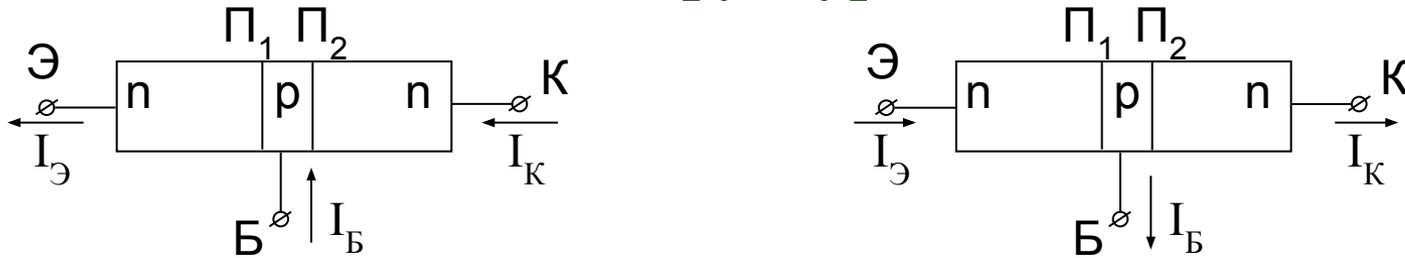


$$I_A \gg I_B$$

Тема: транзисторы

1. Биполярные
2. Полевые (униполярные)

Структура БТ

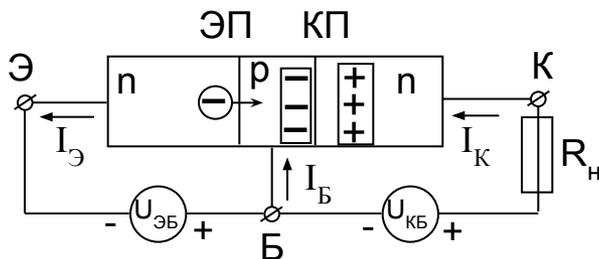


Π_1 – эмиттерный переход; Π_2 – коллекторный переход;

Режимы БТ

1. Активный – ЭП открыт, КП закрыт
2. Отсечка – ЭП, КП закрыты
3. Насыщения – ЭП, КП открыты
4. Инверсный – ЭП закрыт, КП открыт

Процессы в БТ в активном режиме



Через ЭП - инжекция

В базе диффузия и дрейф

Через КП – электрическое поле

$$n_{нэ} \gg P_{РБ}; n_{нк} \gg P_{РБ}$$

$$I_{\ominus} = I_K + I_B \quad - \text{уравнение токов}$$

$$0 < \alpha < 1;$$

$\alpha \neq 1$ за счет рекомбинации

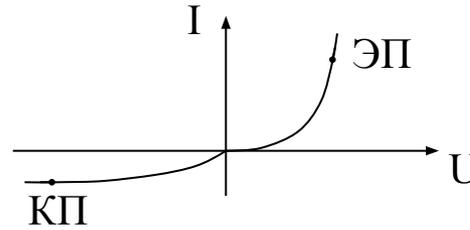
$$I_K = \alpha I_{\ominus} \quad - \text{уравнение переноса}$$

$$\Delta I_{\ominus} \approx \Delta I_K; \quad \Delta P_{\text{вх}} = \Delta I_{\ominus} \cdot \Delta U_{\ominus\text{Б}} = \Delta I_{\ominus}^2 \cdot r_{\ominus\text{д}}$$

$$\Delta P_{\text{вых}} = \Delta I_K \cdot \Delta U_H = \Delta I_K^2 \cdot R_H$$

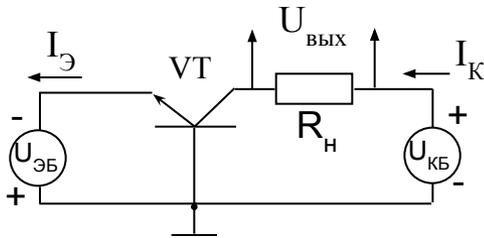
$$K_P = \frac{\Delta P_{\text{вых}}}{\Delta P_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_K^2 R_H}{\Delta I_{\ominus}^2 r_{\ominus\text{д}}} \approx \frac{R_H}{r_{\ominus\text{д}}}$$

Если $R_H > r_{\ominus\text{д}}$, то $K_P > 1$



$$r_{\text{Кд}} = \frac{\alpha U_{\text{КБ}}}{\alpha I_K} \gg r_{\ominus\text{д}} = \frac{\alpha U_{\ominus\text{Б}}}{\alpha I_{\ominus}}$$

Схема включения БТ



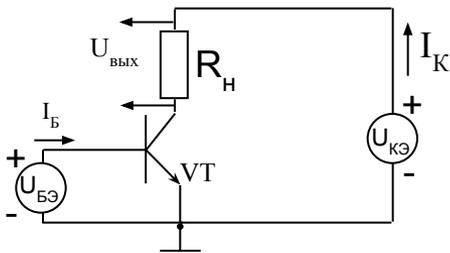
1. Схема с ОБ

$$K_P > 1; K_U > 1 (\Delta U_{\text{вых}} > \Delta U_{\ominus\text{Б}})$$

$$I_{\text{вх}} = I_{\ominus}; \quad I_{\text{вых}} = I_K;$$

$$K_I < 1 (\Delta I_K < \Delta I_{\ominus})$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\ominus\text{Б}}; \quad U_{\text{вых}} = U_H$$

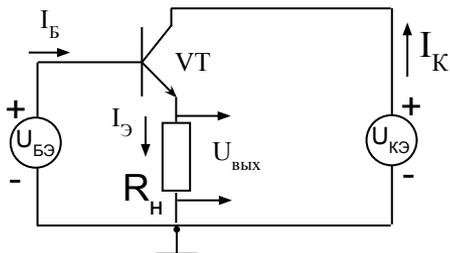


2. Схема с ОЭ

$$K_P > 1; K_U > 1; K_I > 1$$

$$I_{\text{вх}} = I_B; \quad I_{\text{вых}} = I_K$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{Б}\ominus}; \quad U_{\text{вых}} = U_H$$



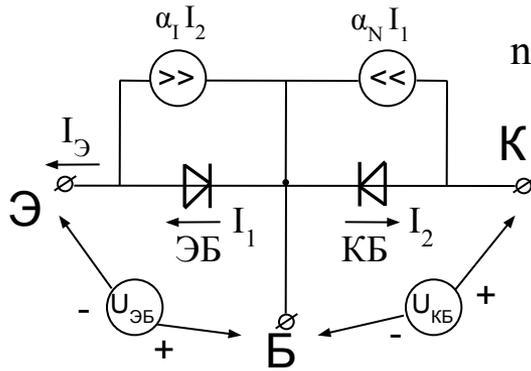
3. Схема с ОК

$$K_P > 1; K_U < 1; K_I > 1$$

$$I_{\text{вх}} = I_B; \quad I_{\text{вых}} = I_{\ominus}$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{Б}\ominus}; \quad U_{\text{вых}} = U_H$$

Модель БТ Эберса - Молла



n - p - n

$\alpha_N -$

$\alpha_I -$

Для симметричных $\alpha_N = \alpha_I$

Для реальных БТ $\alpha_N \gg \alpha_I$

$$\begin{cases} I_{\text{Э}} = I_1 - \alpha_I I_2 \\ I_{\text{К}} = \alpha_N I_1 - I_2 \\ I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}} \end{cases} \quad \left| \quad \begin{cases} I_1 = I_{\text{Э}}' \left(e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right) \\ I_2 = I_{\text{К}}' \left(e^{\frac{U_{\text{КБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right) \end{cases}$$

Если ЭП замкнут накоротко, то $I_{\text{Э}} = 0$ и $I_1 - \alpha_I I_2 = 0$; $I_1 = \alpha_I I_2$

При условии, что $|U_{\text{КБ}}| \gg \varphi_T$ $I_2 = -I_{\text{К}}'$; $I_{\text{К}} = \alpha_N I_1 - I_2 = \alpha_N \alpha_I I_2 - I_2 = -\alpha_N \alpha_I I_{\text{К}}' + I_{\text{К}}' = I_{\text{К}0}$

$$I_{\text{К}}' = \frac{I_{\text{К}0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} \quad I_{\text{Э}}' = \frac{I_{\text{Э}0}}{1 - \alpha_N \alpha_I}$$

Подставляем в исходную систему

$$\begin{cases} I_{\text{Э}} = I_{\text{Э}}' \left(e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \alpha_I I_{\text{К}}' \left(e^{\frac{U_{\text{КБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right) \\ I_{\text{К}} = \alpha_N I_{\text{Э}}' \left(e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right) - I_{\text{К}}' \left(e^{\frac{U_{\text{КБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right) \\ I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}} \end{cases}$$

1. Выходные характеристики ($I_{\text{К}} = f(U_{\text{КБ}})$)

Второе уравнение делим на α_N и вычитаем из первого

$$I_{\text{Э}} - \frac{I_{\text{К}}}{\alpha_N} = \left(e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right) I_{\text{Э}}' \left(\frac{1}{\alpha_N} - \alpha_I \right)$$

$$I_{\text{К}} = \alpha_N I_{\text{Э}} - I_{\text{К}0} \left(e^{\frac{U_{\text{КБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$I_{\text{Э}}$ – параметр

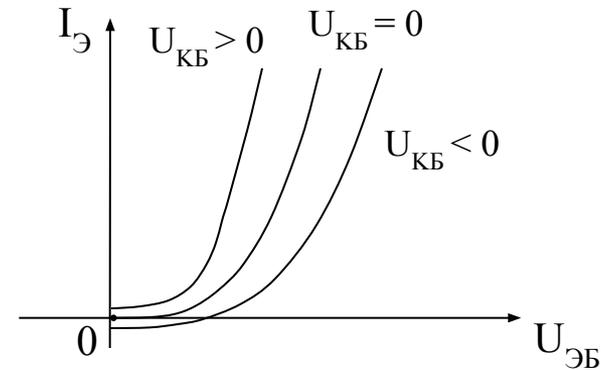
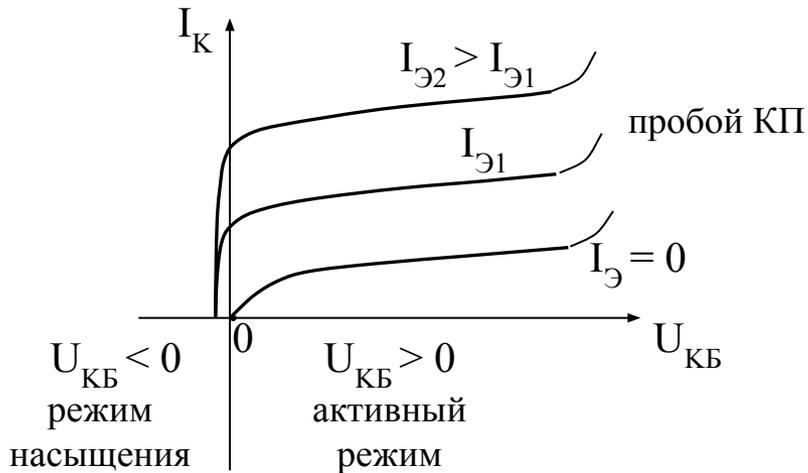
2. Входные характеристики ($I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}})$)

Находим из 1-го уравнения системы с учетом $\frac{\alpha_N}{\alpha_I} = \frac{I_{K0}}{I_{\text{Э}0}} = \frac{I_K'}{I_{\text{Э}'}}$

$$I_{\text{Э}'} \left(e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right) = I_{\text{Э}} + \alpha_I I_K' \left(e^{\frac{U_{\text{КБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$U_{\text{КБ}}$ – параметр

$$U_{\text{ЭБ}} = \varphi_T \ln \left(1 + \frac{I_{\text{Э}}}{I_{\text{Э}'}} + \alpha_N \left(e^{\frac{U_{\text{КБ}}}{\varphi_T}} - 1 \right) \right)$$



Упрощение характеристик

Так как $|U_{\text{КБ}}| \gg \varphi_T$, то $\left(e^{\frac{U_{\text{КБ}}}{\varphi_T}} \ll 1 \right)$

$$I_K \approx \alpha_N I_{\text{Э}} + I_{K0}$$

Также $1 - \alpha_N \approx 0$, т. к. $\alpha_N \rightarrow 1$

$$U_{\text{ЭБ}} \approx \varphi_T \ln \frac{I_{\text{Э}}}{I_{\text{Э}'}} = \varphi_T \ln \frac{I_{\text{Э}}}{I_{\text{Э}'}} (1 - \alpha_N \alpha_I)$$

Так как I_K в реальных транзисторах зависит от $U_{\text{КБ}}$, то используют следующую выходную характеристику

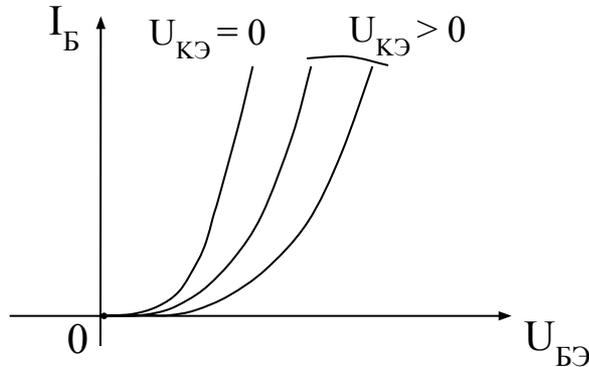
$$I_K = \alpha I_{\text{Э}} + I_{K0} + \frac{U_{\text{КБ}}}{I_{\text{Кд}}}$$

Рост I_K с увеличением $U_{\text{КБ}}$ связан с эффектом Эрли

Схема с ОЭ

1. Входные характеристики ($I_B = f(U_{БЭ})$) $I_{КЭ}$ – параметр

При $U_{КЭ} = 0$ $U_{БЭ} > 0$, транзистор в насыщении и I_B – максимален.
С ростом $U_{КЭ}$ КП закрывается и I_B уменьшается.



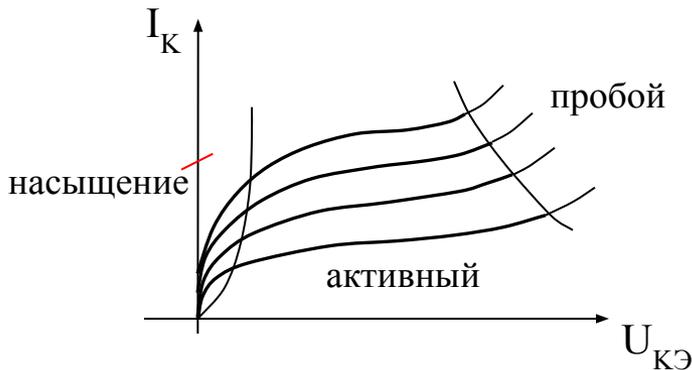
2. Выходные характеристики ($I_K = f(U_{КЭ})$) I_B – параметр

$$I_{Э} = I_B + I_K \quad I_K = \alpha I_{Э} + I_{К0} = \alpha (I_B + I_K) + I_{К0} \quad I_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{К0}$$

$$\frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta \quad \alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$$

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta) I_{К0}$$

При $\alpha = \alpha_N \rightarrow 1$; $\beta \rightarrow \infty$



1) в $(1 + \beta)$ раз более чувствительна к температуре

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta) I_{К0} + \frac{U_{КБ}}{r_{КД}}$$

– с учетом эффекта Эрли

Физические параметры БТ

1. Дифференциальное сопротивление переходов

Схема с ОЭ

$$r_{ЭД}^{\text{Э}} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{Э}}} \quad (I_{\text{Э}} \gg I_{\text{Э0}})$$

$$r_{КД}^{\text{Э}} = \frac{d U_{\text{КБ}}}{d I_{\text{К}}} \approx \frac{1}{I_{\text{Б}} \frac{d \beta}{d U_{\text{КБ}}}}$$

Схема с ОБ

$$r_{ЭД}^{\text{Б}} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{Э}}}$$

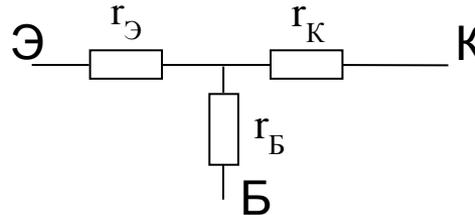
$$r_{КД}^{\text{Б}} = \frac{1}{I_{\text{Э}} \frac{d \alpha}{d U_{\text{КБ}}}} = \frac{1 + \beta}{I_{\text{Б}} \frac{d \beta}{d U_{\text{КБ}}}}$$

$$\begin{cases} I_{\text{Э}} = I_{\text{Б}} (1 + \beta) \\ \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \end{cases}$$

$$r_{ЭД}^{\text{Б}} = r_{ЭД}^{\text{Э}} (1 + \beta)$$

2. Объемные сопротивления

$$r_{\text{Б}} \gg r_{\text{К}} \gg r_{\text{Э}}$$



3. Коэффициент обратной связи

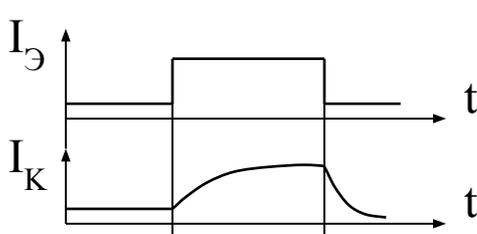
$$K_{\text{ОС}}^{\text{Э}} = \frac{d U_{\text{БЭ}}}{d U_{\text{КЭ}}}$$

$$K_{\text{ОС}}^{\text{Б}} = \frac{d U_{\text{ЭБ}}}{d U_{\text{КБ}}}$$

$$K_{\text{ОС}} \approx 10^{-3} \div 10^{-4}$$

4. Емкость переходов \$C_K, C_{\text{Э}}\$ (\$C_K \gg C_{\text{Э}}\$)

Определяет динамические свойства транзистора



\$I_{\text{К}}\$ меняется по экспоненте

Быстродействие определяется постоянной времени транзистора

$$\tau_{\alpha} = \frac{1}{2 \pi f_{\alpha}} \quad \text{— схема с ОБ}; \quad \tau_{\beta} = \frac{1}{2 \pi f_{\beta}} \quad \text{— схема с ОЭ}$$

\$f_{\alpha}\$ и \$f_{\beta}\$ — граничная частота

$$f_{\alpha} = \frac{\beta}{\alpha} f_{\beta} \quad f_{\alpha} \gg f_{\beta}$$

5. Тепловые токи \$I_{\text{Э0}}, I_{\text{К0}}\$ (\$I_{\text{К0}} \gg I_{\text{Э0}}\$)

6. Предельно допустимые параметры \$U_{\text{ЭБдоп}}, U_{\text{КБдоп}}, U_{\text{КЭдоп}}, I_{\text{Кдоп}}, P_{\text{Кдоп}}\$

h – параметры БТ



$$\begin{cases} \Delta U_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \Delta U_2 \end{cases}$$

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

$$h_{11} = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \quad - R_{\text{вх}} \text{ при } U_2 = 0; \text{ (КЗ на входе)}$$

$$h_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \quad - \text{коэффициент передачи тока при } U_2 = 0; \text{ (КЗ на входе)}$$

$$h_{12} = \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \quad - K_{\text{ОС}} \text{ при } I_1 = 0; \text{ (ХХ на входе)}$$

$$h_{22} = \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \quad - \text{выходная проводимость при } I_1 = 0; \text{ (ХХ на входе)}$$

Связь физических и h – параметров

1. Входное сопротивление

$$h_{11Б} = \frac{\Delta U_{\text{ЭБ}}}{\Delta I_{\text{Э}}} = r_{\text{Эд}} + (1 - \alpha) r_{\text{Б}}$$

$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{\text{БЭ}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = (\beta + 1) r_{\text{Эд}} + r_{\text{Б}}$$

$$h_{11К} = h_{11Э}$$

2. Коэффициент передачи тока

$$h_{21Б} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Э}}} = \alpha + I_{\text{Э}} \frac{d\alpha}{dI_{\text{Э}}}$$

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \beta + I_{\text{Б}} \frac{d\beta}{dI_{\text{Б}}}$$

$$h_{21К} = \frac{\Delta I_{\text{Э}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = (\beta + 1) + I_{\text{Б}} \frac{d\beta}{dI_{\text{Б}}} \approx h_{21Э}$$

3. Выходная проводимость

$$h_{22Б} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{КБ}}} = \frac{1}{r_{\text{КД}}^{\text{Б}}}$$

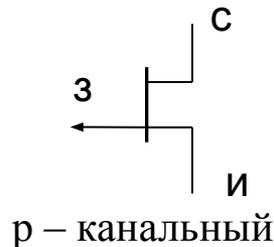
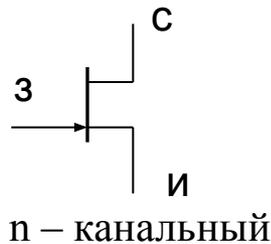
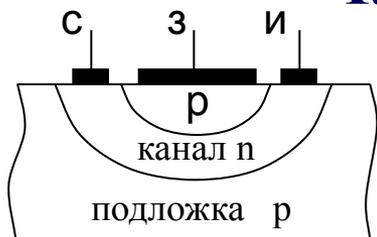
$$h_{22Э} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{КБ}}} = \frac{1 + \beta}{r_{\text{КД}}^{\text{Б}}}$$

$$h_{22К} = \frac{\Delta I_{\text{Э}}}{\Delta U_{\text{ЭК}}} \approx \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{КБ}}} = h_{22Э}$$

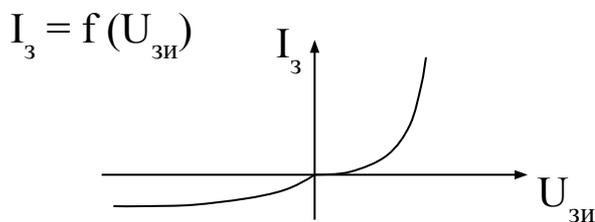
$$\begin{cases} \Delta I_{\text{Э}} \approx \Delta I_{\text{К}} \\ \Delta U_{\text{ЭК}} = \Delta U_{\text{КБ}} + \Delta U_{\text{БЭ}} \\ \Delta U_{\text{КБ}} \gg \Delta U_{\text{БЭ}} \end{cases}$$

Полевые транзисторы (ПТ)

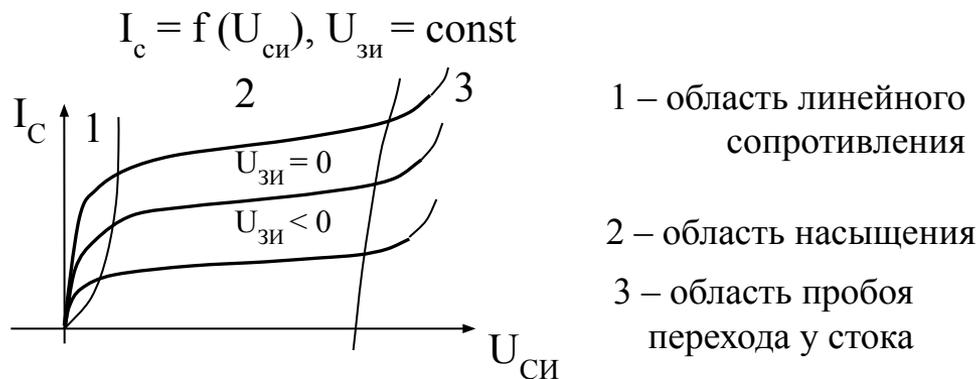
I. ПТ с управляющим p – n переходом



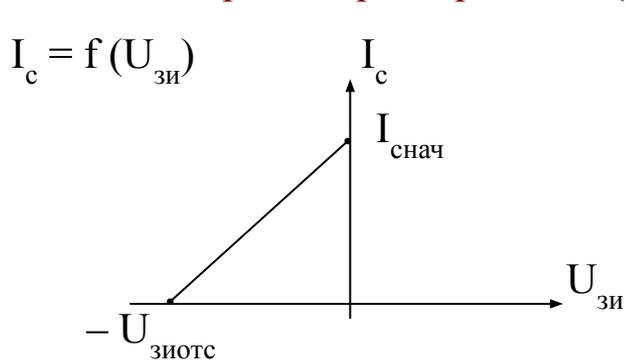
Входная характеристика (n - канал)



Выходная характеристика (n - канал)



Стоко – затворная характеристика (n - канал)



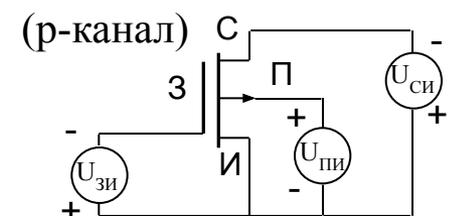
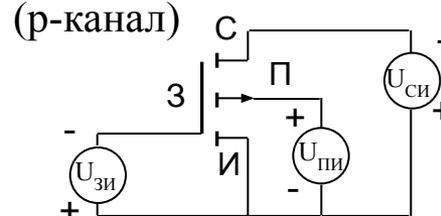
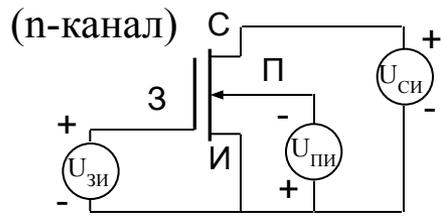
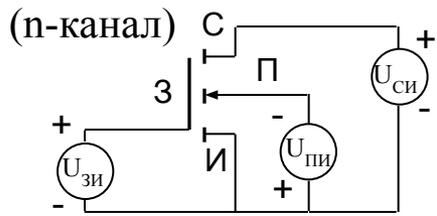
$$I_c = I_{снач} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зиотс}}\right)^2 \quad |U_{зиотс}| > |U_{зи}| > 0$$

$$S = \frac{d I_c}{d U_{зи}} - \text{крутизна стоко - затворной характеристики}$$

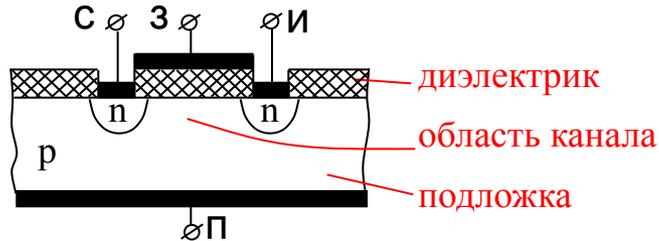
$$K = \frac{d U_{си}}{d U_{зи}} = S R_{си} = \frac{d I_c}{d U_{зи}} \frac{d U_{си}}{d I_c} \quad R_{зи} = R_{вх} - 10^7 \div 10^9 \text{ Ом}$$

$R_{си}$ – дифференциальное сопротивление канала

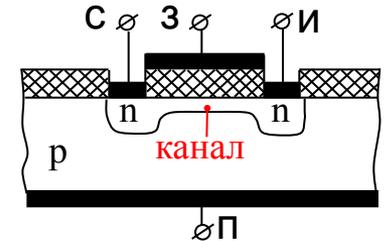
II. МДП – транзисторы



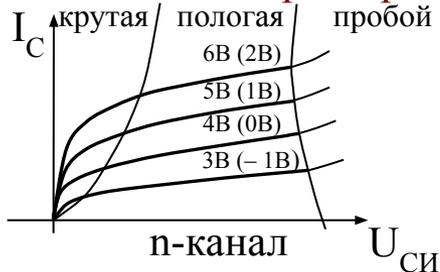
МДП с индуцированным каналом



МДП со встроенным каналом



Выходные характеристики

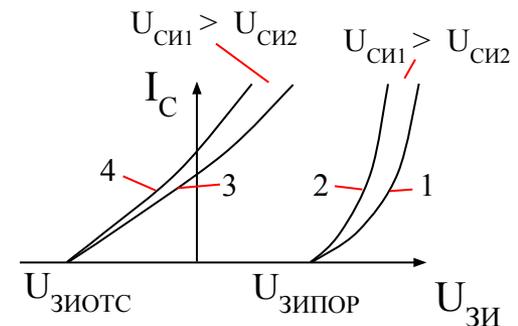


$$I_c = f(U_{си}) \text{ при}$$

$$U_{зи} = \text{const} \quad U_{пи} = \text{const}$$

В скобках $U_{зи}$ для МДП со встроенным каналом

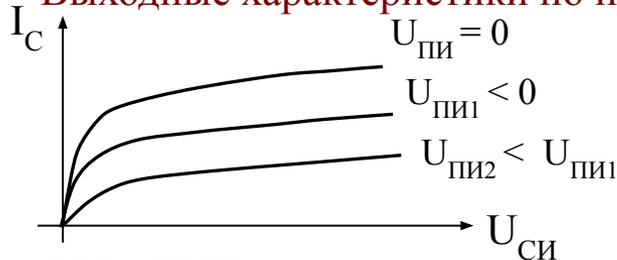
Стоко – затворные характеристики



1, 2 – характеристики для МДП транзисторов с индуцированным n - каналом

3, 4 – характеристики для МДП транзисторов со встроенным n - каналом

Выходные характеристики по подложке (n - канал)

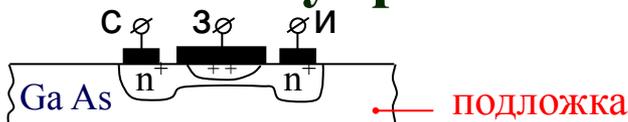


$$I_c = f(U_{си})$$

$$U_{пи} = \text{const}$$

$$U_{зи} = \text{const}$$

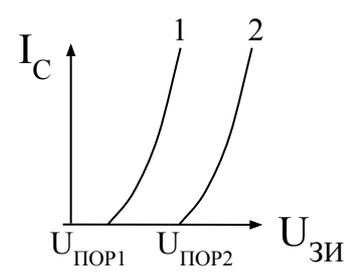
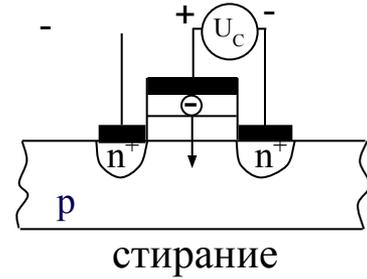
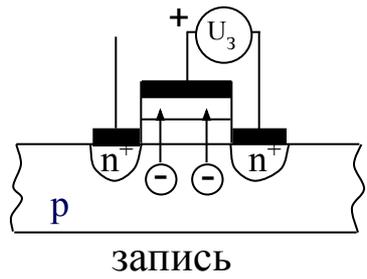
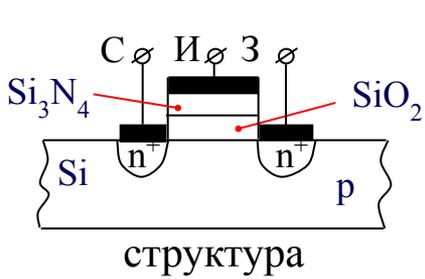
III. ПТ с управляющим переходом металл – полупроводник



$$A_M > A_{П/П}$$

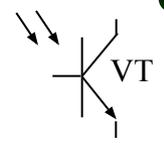
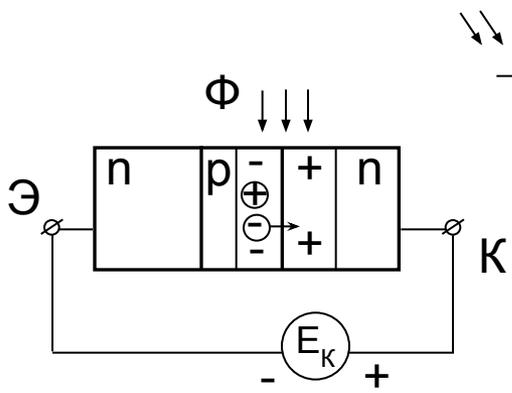


IV. МНОП – транзисторы

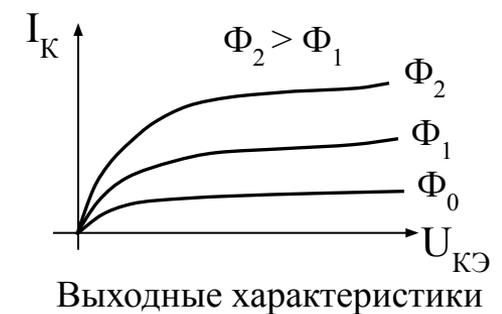
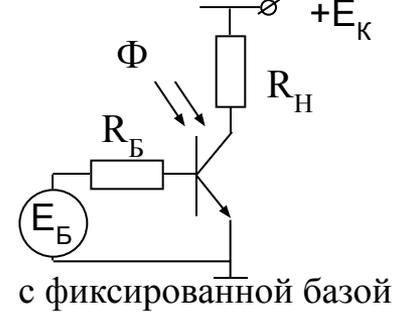
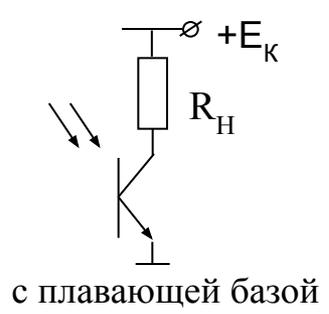


1 – стоко - затворная характеристика до записи
 2 – после записи
 $U_{ПОР1} < U_{ЗИ} < U_{ПОР2}$

Фототранзисторы



Схемы включения

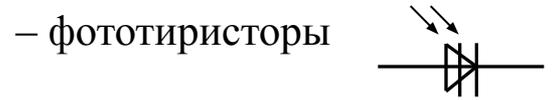
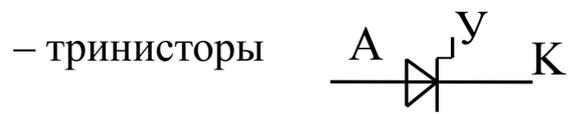


Коэффициент усиления определяется как $K = \frac{I_{\Phi} + I_{К\Phi}}{I_{\Phi}} = 1 + \beta$

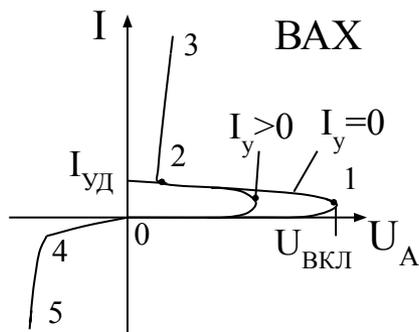
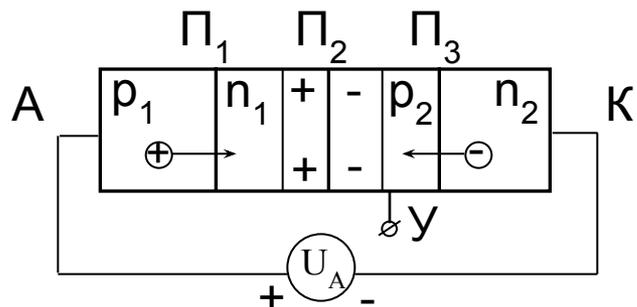
I_{Φ} – ток коллектора обусловленный фотогенерацией

I_{Φ} – ток коллектора обусловленный инжекцией через эмиттерный переход

Тиристоры



Динистор



- 0 – 1 – режим прямого запираания
- 1 – 2 – лавинообразное отпирание П₂
- 2 – 3 – режим прямой проводимости
- 0 – 4 – режим обратного отпирания
- 4 – 5 – режим пробоя (П₁ и П₃)

Штриховая характеристика для тринистора с $I_Y > 0$

Усилители на транзисторах

Определение: устройство для увеличения мощности сигнала за счет энергии вспомогательного источника.

Классификация:

1. По усиливаемому параметру

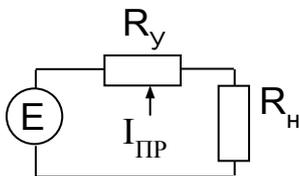
- усиление напряжения $K_U = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta U_{ВХ}}$
- усиление тока $K_I = \frac{\Delta I_{ВЫХ}}{\Delta I_{ВХ}}$
- усиление мощности $K_P = \frac{\Delta P_{ВЫХ}}{\Delta P_{ВХ}}$

2. По частотным свойствам

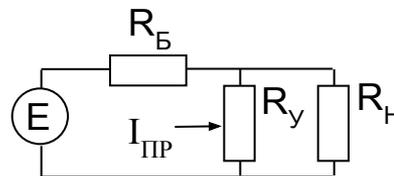
- УПТ — АЧХ
- УНЧ
- УВЧ
- избирательные

3. По способу соединения с нагрузкой

– с последовательной нагрузкой

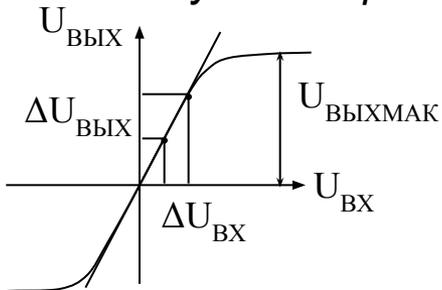


– с параллельной нагрузкой



Характеристики усилителей

1. Амплитудная характеристика

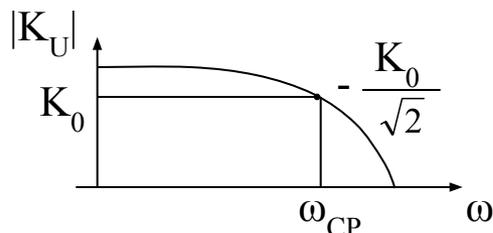


$$U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$$

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$$

2. Амплитудно-частотная характеристика

АЧХ $|K_U| = F(\omega)$



3. Фазо-частотная характеристика

ФЧХ $\varphi = F(\omega)$

φ – угол между $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВХ}}$

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} 2\pi = \Delta t \omega$$



4. Диапазон рабочих частот –

диапазон в котором коэффициент нормирован

5. Динамический диапазон

$$D = \frac{U_{\text{ВХМАК}}}{U_{\text{ВЫХМИН}}}$$

7. КПД

$$\theta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0}$$

6. Искажения

а) нелинейные

$$K_H = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n}}$$

б) частотные

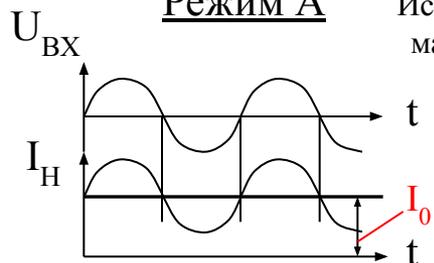
в) фазовые

8. Входное и выходное сопротивление

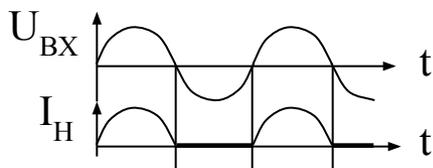
Режимы усилительных каскадов

Режим А

Используется в маломощных каскадах

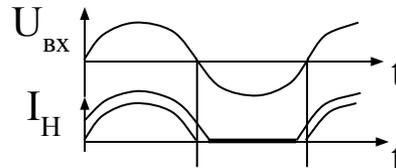


Режим В



Используется в двухтактных каскадах

Режим АВ

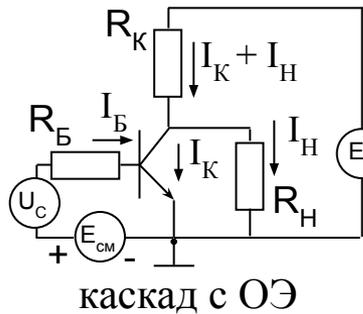


Модифицированный режим В

Режим С

Режим D

Статический режим усилительного каскада



Определение:

$$\begin{cases} I_B = f(U_{БЭ}) \\ E_{СМ} = I_B R_B + U_{БЭ} \end{cases}$$

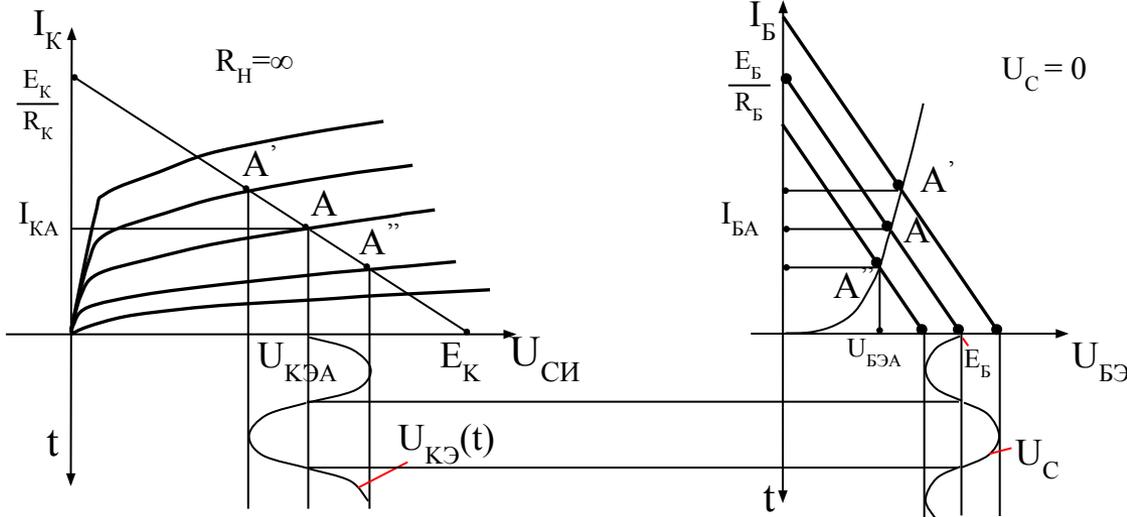
Система уравнений для входной цепи ($U_C = 0$)

$$\begin{cases} I_K = f(U_{КЭ}) \\ E_K = (I_K + I_H)R_K + U_{КЭ} \end{cases}$$

Система уравнений для выходной цепи ($I_H = U_{КЭ}/R_H$)

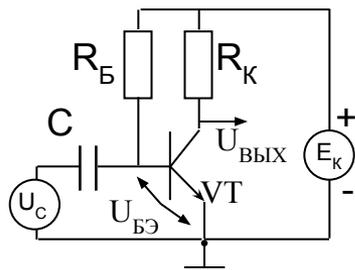
каскад с ОЭ

Графо - аналитический метод расчета статического режима

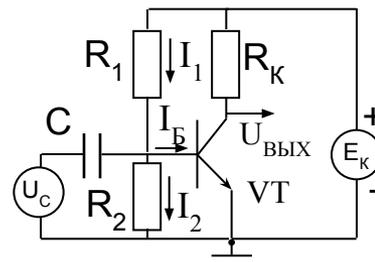


$$\begin{aligned} U_H &= \frac{R_H}{R_K + R_H} (E_K - I_K R_H) = \\ &= \frac{R_H}{R_K + R_H} (E_K - \beta I_B R_K) \end{aligned}$$

Задание рабочей точки транзистора (статического режима)



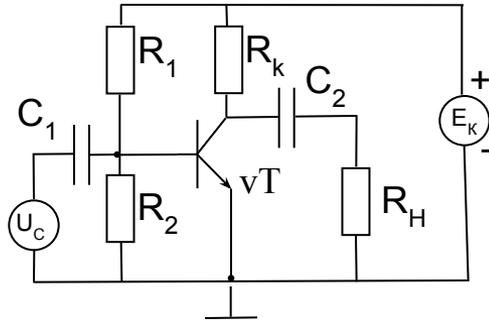
$$\begin{aligned} I_B &= \frac{E_K - U_{БЭ}}{R_B} = I_{БА} \\ E_K &\gg U_{БЭ} \\ I_B &\approx \frac{E_K}{R_K} = I_{БА} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 + I_B & I_B &= I_1 - I_2 \\ I_B &= \frac{E_K - U_{БЭ}}{R_1} - \frac{U_{БЭ}}{R_2} \\ E_K &\gg U_{БЭ} & U_{БЭ} &\approx \frac{E_K}{R_1 + R_2} R_2 \\ I_B &\approx \frac{E_K}{R_1} - \frac{U_{БЭ}}{R_2} & I_B &\approx E_K \frac{R_2}{(R_1 + R_2) R_1} \end{aligned}$$

Параметры усилительных каскадов

I. Схема с ОЭ



2. Выходное сопротивление:

$$R_{\text{вых } \Theta} = R_{\text{к}} \parallel r_{\text{кд}} + \frac{1}{\omega C_2}$$

3. Коэффициент усиления напряжения:

$$K_{\text{U}} = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{\Delta U_{\text{с}}}; \quad X_{C1} = X_{C2} \approx 0 \quad (\text{на рабочих частотах})$$

$$\Delta U_{\text{н}} = -\Delta I_{\text{к}} (R_{\text{н}} \parallel R_{\text{к}}); \quad \Delta I_{\text{к}} = \beta \Delta I_{\text{б}}$$

$$\Delta I_{\text{к}} = -\beta \Delta I_{\text{б}} (R_{\text{н}} \parallel R_{\text{к}})$$

$$\Delta U_{\text{с}} = \Delta I_{\text{б}} R_{\text{вх } \Theta}; \quad R_1 R_2 \gg h_{11\Theta}$$

$$\Delta U_{\text{с}} \approx \Delta I_{\text{б}} h_{11\Theta}; \quad R_{\text{н}} \gg R_{\text{к}}$$

$$K_{\text{U}\Theta} \approx \frac{-\beta R_{\text{к}}}{h_{11\Theta}}$$

1. Входное сопротивление:

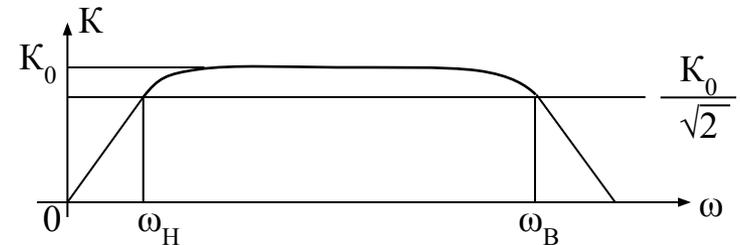
$$h_{11\Theta} = \frac{U_{\text{б}\Theta}}{I_{\text{б}}} = r_{\text{б}} + (1+\beta) r_{\text{эд}}$$

$$R_{\text{вх } \Theta} = \frac{(R_1 \parallel R_2) h_{11\Theta}}{(R_1 \parallel R_2) + h_{11\Theta}} + \frac{1}{\omega C_1}$$

4. Коэффициент усиления тока:

$$K_{\text{I}\Theta} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \beta$$

5. Частотные свойства



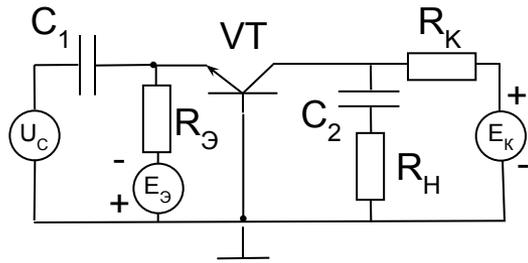
ω_{H} – определяется C_1 и C_2

ω_{B} – определяется быстродействием транзистора и эффектом Миллера

$$C_{\text{к}\Theta} = (1 + \beta) C_{\text{к}}$$

$C_{\text{к}}$ – барьерная емкость КП

II. Схема с ОБ



1. Входное сопротивление:

$$h_{11Б} = r_{ЭД} + (1-\alpha) r_B$$

$$R_{ВХБ} = h_{11Б} \parallel R_{Э} + \frac{1}{\omega C_1}$$

2. Выходное сопротивление:

$$R_{ВЫХБ} = r_{КДБ} \parallel R_К + \frac{1}{\omega C_2}$$

3. Коэффициент K_U :

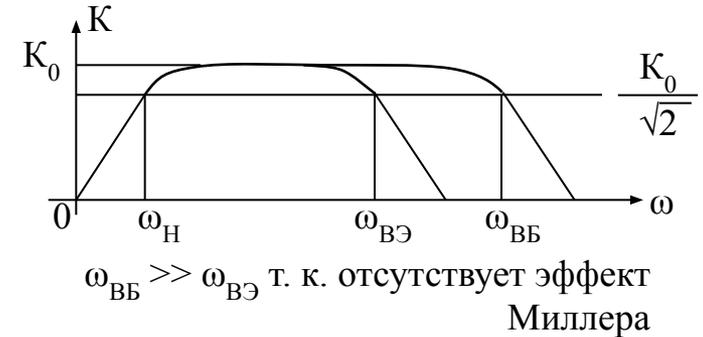
$$K_{УБ} = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_c} = \frac{\alpha \cdot (R_К \parallel R_Н)}{R_{ВХБ}} \approx \alpha \frac{R_К}{h_{11Б}}$$

$(R_Н \gg R_К ; R_{Э} \gg h_{11Б})$

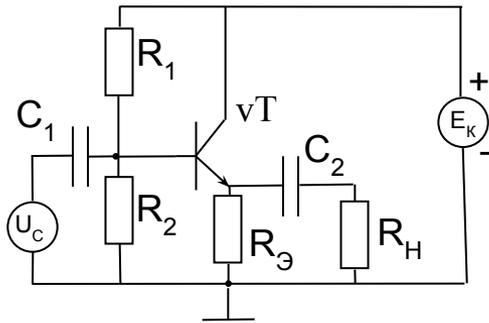
4. Коэффициент K_I :

$$K_{ИБ} = \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Э} = \alpha < 1$$

5. Частотные свойства



II. Схема с ОК (повторитель напряжения)



1. Входное сопротивление:

$$h_{11К} = r_B + (1+\beta) [r_{ЭД} + (R_{Э} \parallel R_Н)]$$

$$R_{ВХК} = R_1 \parallel R_2 \parallel h_{11К} + \frac{1}{\omega C_1}$$

2. Выходное сопротивление:

$$R_{ВЫХК} = r_{ЭД} + \frac{r_B}{1+\beta}$$

3. Коэффициент K_U :

$$K_{УК} = \frac{(1+\beta)(R_{Э} \parallel R_Н)}{r_B + (1+\beta)(R_{Э} \parallel R_Н)} < 1$$

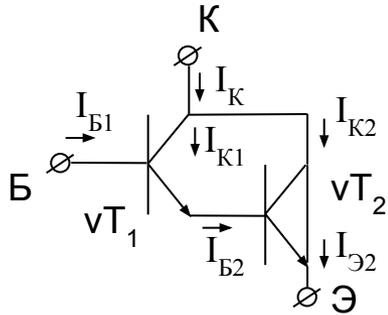
4. Коэффициент K_I :

$$K_{ИК} = \frac{I_Э}{I_Б} = 1+\beta$$

5. Частотные свойства такие же как и в схеме с ОЭ

Улучшение параметров каскадов

1. Увеличение β



$$I_{K1} = \beta_1 I_{B1}$$

$$I_{E1} = I_{B2} = (1 + \beta_1) I_{B1}$$

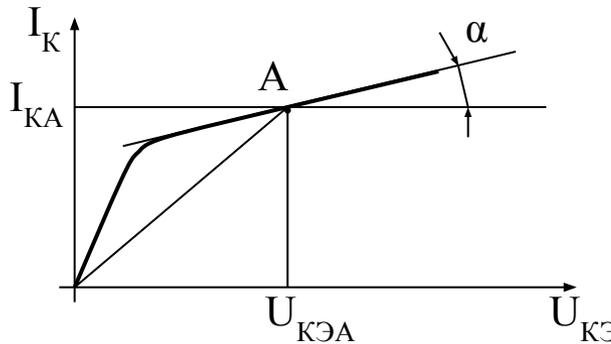
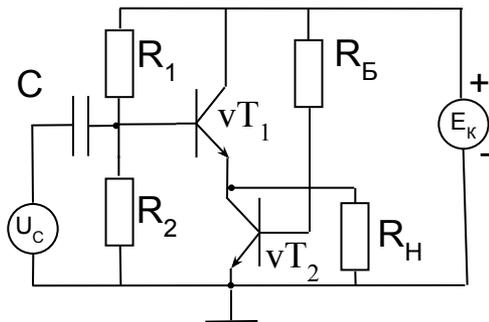
$$\beta = \frac{I_K}{I_{B1}} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2$$

$$I_{K2} = I_{B2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_2 (1 + \beta_1) I_{B1}$$

$$I_K = I_{K1} + I_{K2} = \beta_1 I_{B1} + \beta_2 (1 + \beta_1) I_{B1}$$

$$\beta \approx \beta_1 \beta_2$$

2. Динамическая нагрузка



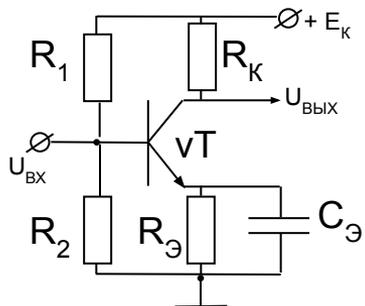
$$R_{CT} = \frac{U_{KЭА}}{I_{KA}}$$

$$R_D = \text{ctg } \alpha_1 = r_{кД}$$

$$R_D \gg R_{CT}$$

Стабилизация рабочей точки

1. Стабилизация с помощью ОС



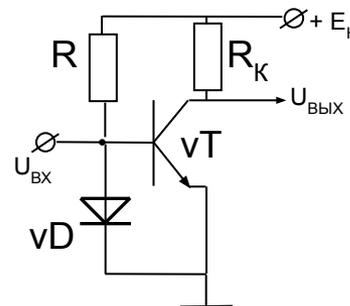
$$U_B = E_K \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_B = I_E R_E$$

$$U_B = E_K \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_E R_E =$$

$$= E_K \frac{R_2}{R_1 + R_2} - (1 + \beta) I_B R_E$$

2. Параметрическая стабилизация



$$U_{BЭ} = f(t^\circ C)$$

$$U_{BЭ} \approx \varphi_T \ln\left(\frac{I_{ПП}}{I_0} + 1\right)$$

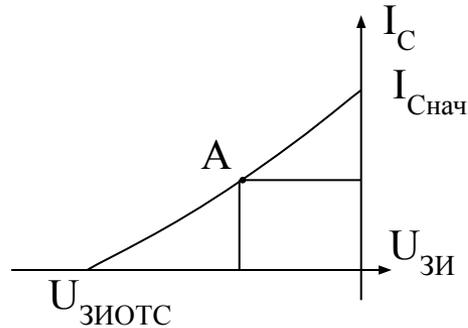
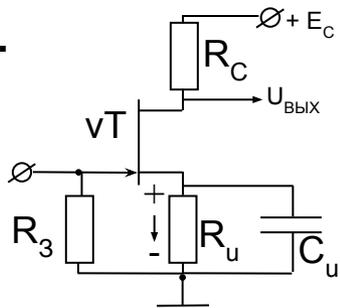
$$U_{BЭ} = U_D$$

Усилители на ПТ

ОС(ОК), ОН(ОЭ), ОЗ(ОБ)

Задание рабочей точки

1.

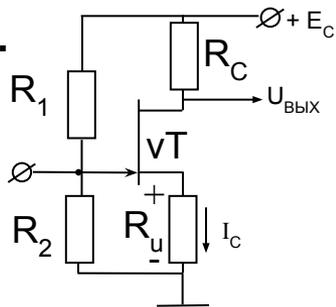


$$U_H = I_{CA} R_u$$

$$U_{ЗИ} = -I_{CA} R_u$$

$$U_{ЗИ} = f(R_u)$$

2.



$$U_3 = E_C \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad U_H = I_C R_H$$

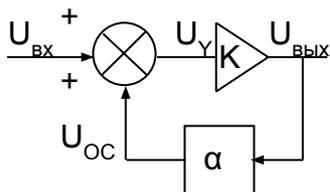
$$U_{ЗИ} = E_C \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_C R_H$$

$$U_{ЗИ} = f(R_1, R_2) \quad R_u - \text{для стабилизации}$$

Элементы теории ОС

Определение:

1. ПОС



$$U_{OC} = \alpha U_{ВЫХ}$$

$$1 < K < \infty \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$U_Y = U_{ВХ} + U_{OC}$$

$$U_{ВЫХ} = k U_Y = k U_{ВХ} + k\alpha U_{ВЫХ}$$

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} \frac{k}{1 - k\alpha}$$

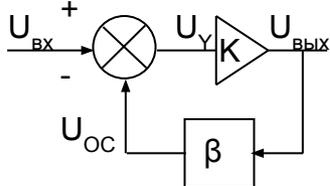
$$k_U^{OC} = \frac{k}{1 - k\alpha}$$

$k\alpha -$

$k\alpha < 1$

$k\alpha < 1$

2. ООС



$$U_{OC} = \beta U_{ВЫХ}$$

$$0 \leq \beta \leq 1$$

$$U_Y = U_{ВХ} - U_{OC}$$

$$U_{ВЫХ} = k U_Y = k U_{ВХ} - k\beta U_{ВЫХ}$$

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} \frac{k}{1 + k\beta}$$

$$k_U^{OC} = \frac{k}{1 + k\beta}$$

$k\beta -$

$k_U^{OC} < K$

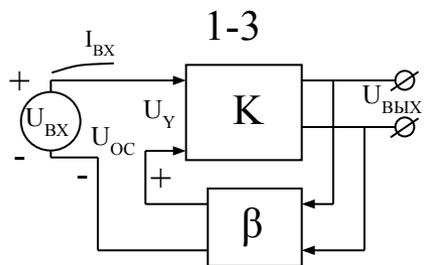
Виды ООС

1. Последовательная – на входе вычитаются U

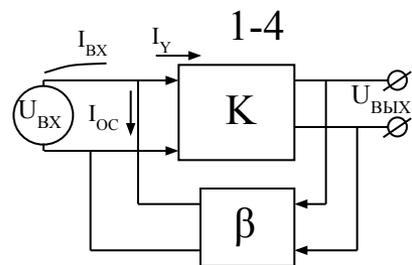
2. Параллельная – на входе вычитаются I

3. По напряжению – сигнал ОС формируется из $U_{ВЫХ}$

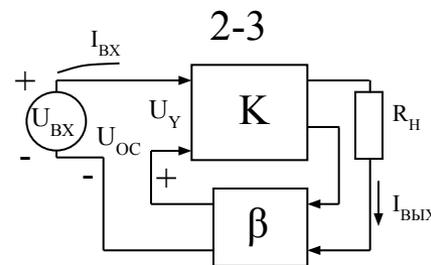
4. По току – сигнал ОС формируется из $I_{ВЫХ}$



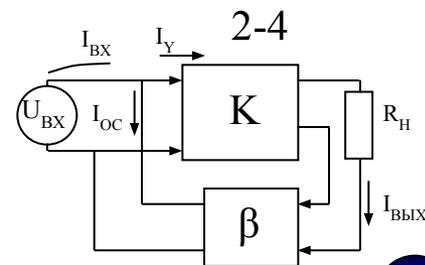
$$U_{OC} = \beta U_{ВЫХ} \quad U_Y = U_{ВХ} - U_{OC}$$



$$I_{OC} = \beta I_{ВЫХ} \quad I_{YC} = I_{ВХ} - I_{OC}$$



$$U_{OC} = \beta U_{ВЫХ} \quad U_Y = U_{ВХ} - U_{OC}$$



$$I_{OC} = \beta I_{ВЫХ} \quad I_Y = I_{ВХ} - I_{OC}$$

Входное сопротивление усилителя с ООС

1. Последовательная ОС по U

$$R_{BX}^{OC} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} \quad U_{ВЫХ} = U_Y + U_{OC} \quad U_{OC} = \beta U_{ВЫХ} \quad U_{ВЫХ} = k U_Y$$

$$U_{BX} = U_Y + k\beta U_Y = U_Y(1 + k\beta) \quad U_Y = I_{BX} R_{BXY} \quad U_{BX} = R_{BXY} I_{BX}(1 + k\beta)$$

$$R_{BX}^{OC} = R_{BXY} (1 + k\beta)$$

2. Параллельная ОС по U

$$R_{BX}^{OC} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{U_{BX}}{I_Y + I_{OC}} \quad I_{OC} = \beta U_{ВЫХ} \quad U_{ВЫХ} = k U_Y \quad R_{BX}^{OC} = \frac{I_Y R_{BXY}}{I_Y + k\beta R_{BXY} I_Y}$$

$$R_{BX}^{OC} = \frac{R_{BXY}}{1 + k\beta R_{BXY}}$$

Выходное сопротивление усилителя с ООС

1. ОС по напряжению

$$R_{ВЫХ} = \frac{U_{XX}}{I_{K3}} \quad U_{XX} = U_{ВХ} \frac{k}{1 + k\beta} \quad \text{При КЗ сигнал ОС} = 0. \text{ Тогда } I_{K3} = \frac{k U_{ВХ}}{R_{ВЫХ}} \quad R_{ВЫХ}^{OC} = \frac{R_{ВЫХ}}{1 + k\beta}$$

2. ОС по току

В режиме XX $I_{ВЫХ} = 0$, сигнал ОС = 0 и $U_{XX} = k U_{ВХ}$

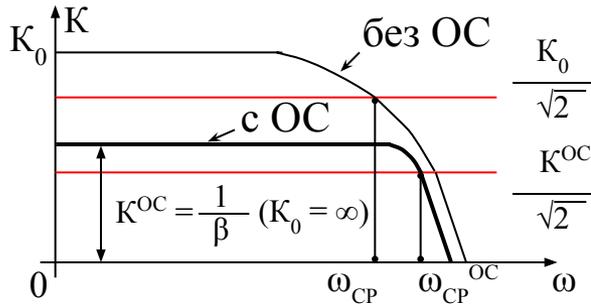
В режиме КЗ $I_{ВЫХ} = I_{K3}$, $U_{OC} = \beta I_{K3}$

$$I_{K3} = \frac{U_{ВЫХ}}{R_{ВЫХ} + R_{ВХ\beta}} \quad U_{ВЫХ} = I_{K3}(R_{ВЫХ} + R_{ВХ\beta}) \quad (1) \quad U_{ВЫХ} = k U_Y = k(U_{ВХ} - U_{OC}) = k U_{ВХ} - k\beta I_{K3} \quad (2)$$

Приравняв (1) и (2) получим: $I_{K3} = \frac{K U_{ВХ}}{(R_{ВЫХ} + R_{ВХ\beta}) + k\beta}$

$$R_{ВЫХ}^{OC} = \frac{U_{XX}}{I_{K3}} = (R_{ВЫХ} + R_{ВХ\beta}) + k\beta$$

АЧХ усилителя с ОС

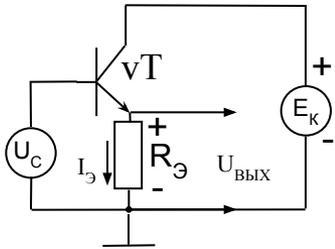


$$K^{OC} = \frac{K_0}{1 + K_0\beta} \quad \text{Если } K_0 \rightarrow \infty, K^{OC} \rightarrow \frac{1}{\beta}$$

$$\omega_{CP}^{OC} > \omega_{CP} \quad K_0\omega_{CP} = K^{OC}\omega_{CP}^{OC}$$

$$\omega_{CP}^{OC} = \omega_{CP} \frac{K_0}{K^{OC}} = \omega_{CP} (1 + K_0\beta)$$

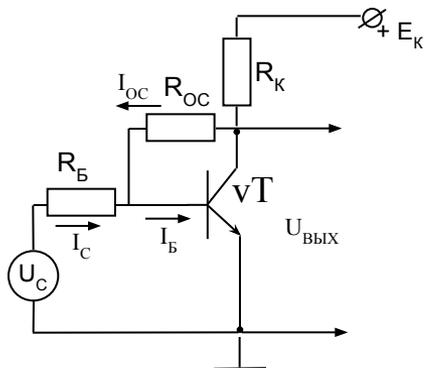
Пример 1.



$$U_C = U_{БЭ} + I_Э R_Э$$

$$U_{БЭ} = U_Y \quad \beta = 1 \quad U_{OC} = U_{ВЫХ}$$

Пример 2.

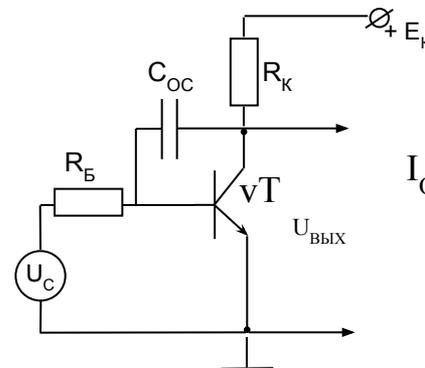


$$I_B = I_C + I_{OC}$$

$$I_C \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow (I_K = \beta I_B) \uparrow \rightarrow U_K \downarrow \rightarrow I_{OC} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow$$

$$I_{OC} = \frac{U_K - U_B}{R_{OC}}$$

Пример 3.

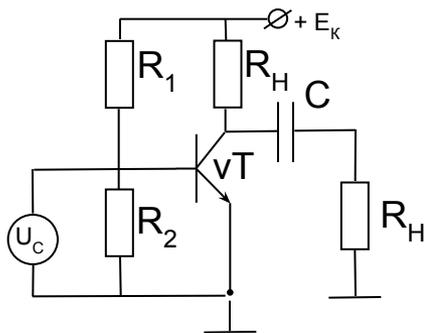


$$I_{OC} = \frac{U_K - U_B}{1/\omega C_0} = \omega C_0 (U_K - U_B)$$

Оконечные (выходные) каскады

Назначение. Режимы (А, В, АВ)

1. Каскад в режиме А



$I_K, U_{KЭ}, P_K$ – близки к идеальным

Недостатки:

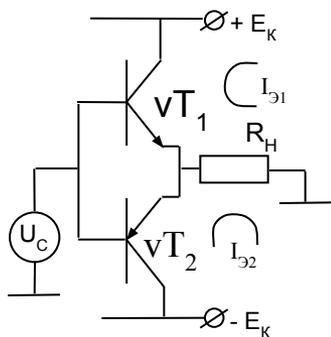
- а.** низкий КПД ($< 10\%$)
- б.** через R_H протекает постоянная составляющая

Улучшает характеристики за счет емкостных или трансформаторных связей.

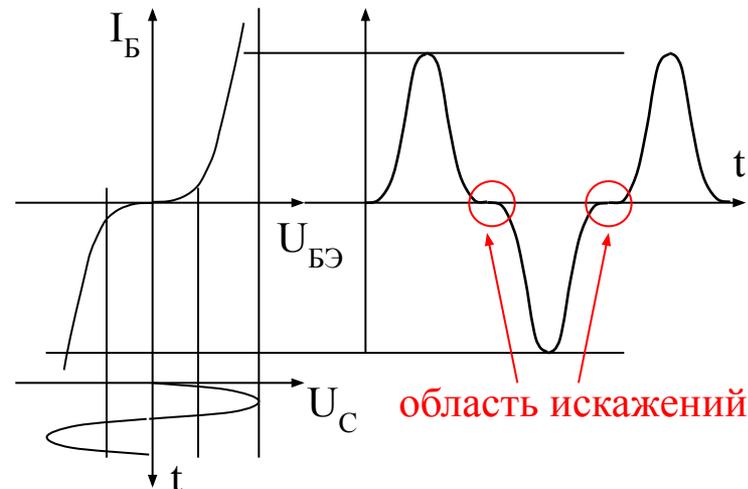
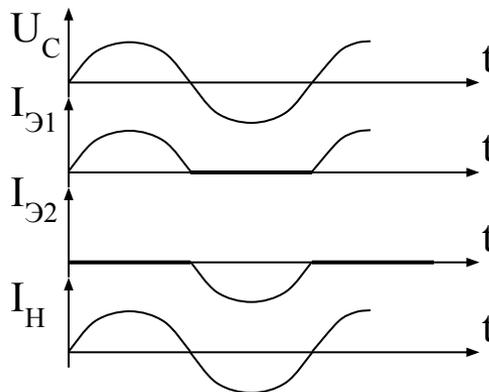
В каскадах с трансформаторными связями КПД достигает 50% за счет согласования R_H и $R_{ВЫХ}$ каскада.

2. Каскад в режиме В

Двухтактные каскады. Схемы включения.

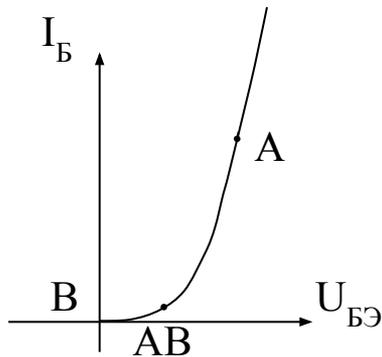
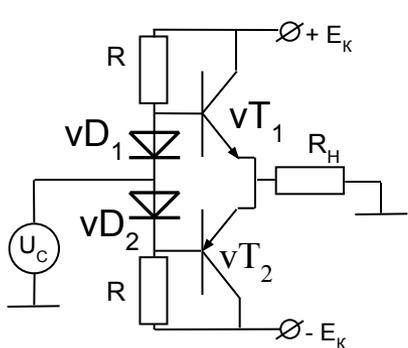


КПД $\approx 70\%$



Недостаток: искажения при малых уровнях U_C

3. Каскад в режиме АВ (ОК-ОК)



$$U_{БЭ1} = U_C + U_{D1}$$

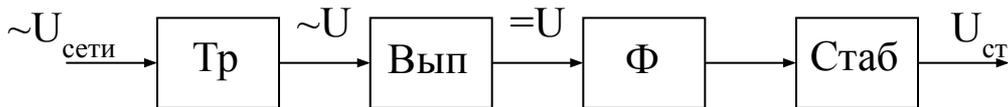
$$U_{БЭ2} = (U_C - U_{D2})$$

Т. к. $R_{ВЫХ}$ этих каскадов мало, то они снабжаются схемами защиты от КЗ по выходу

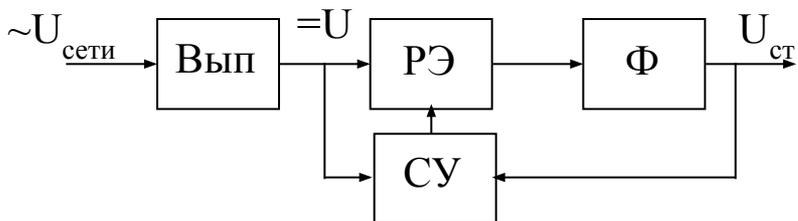
Источники питания измерительной техники

- назначение
- трансформаторные
- безтрансформаторные
- Без преобразования f
- С преобразованием f

Трансформаторный без преобразования (классический)



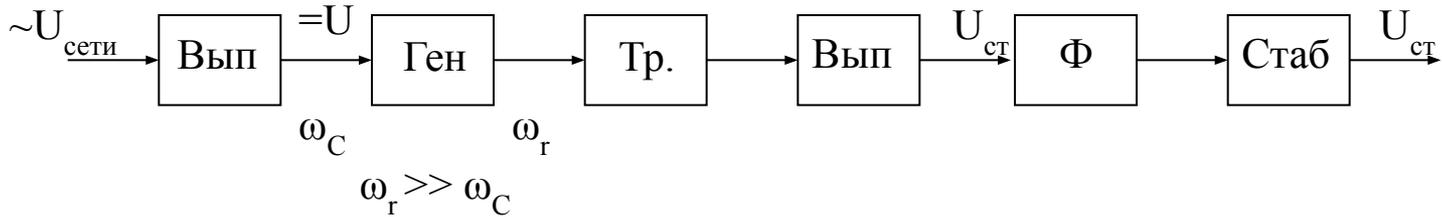
Безтрансформаторный



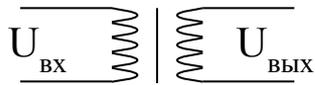
РЭ – регулирующий элемент

СУ – схема управления

Трансформаторный с преобразованием



1. Трансформатор. Назначение

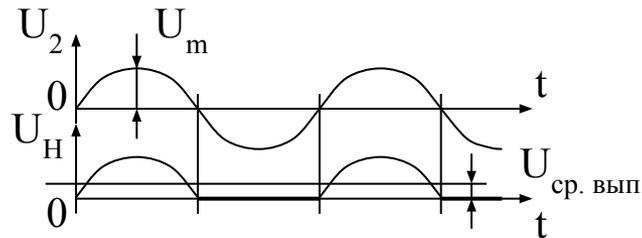
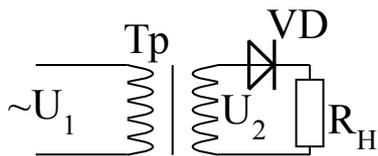


$$n = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{W_{\text{ВЫХ}}}{W_{\text{ВХ}}}$$

W – ЧИСЛО ВИТКОВ

2. Выпрямитель. Назначение

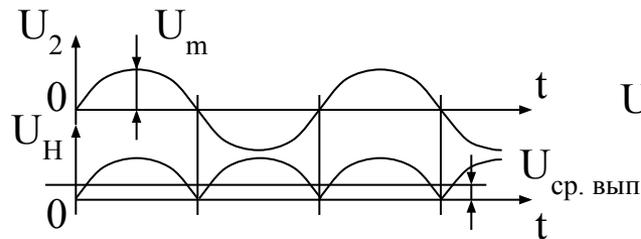
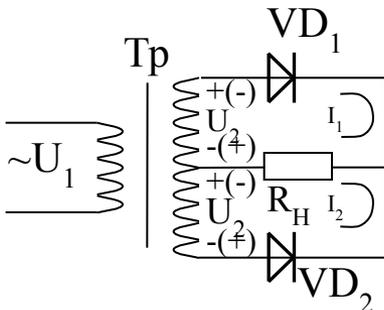
- однополупериодный



$$U_{\text{сп. вып.}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t \, dt = \frac{U_m}{\pi}$$

$$U_{\text{ОБР}} = U_m$$

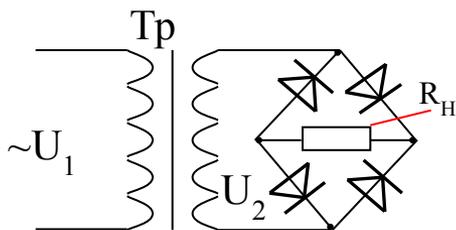
- двухполупериодный



$$U_{\text{сп. вып.}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t \, dt = \frac{2U_m}{\pi}$$

$$U_{\text{ОБР}} = 2U_m$$

- МОСТОВОЙ

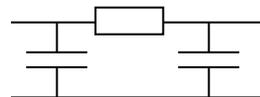
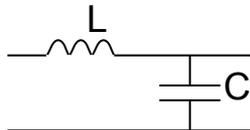
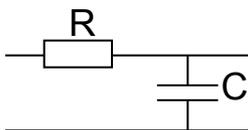


$$U_{\text{ср. вып.}} = \frac{2U_m}{\pi}$$

$$U_{\text{ОБР}} = U_m$$

3. Фильтры. Назначение

Г – образные, П – образные



4. Стабилизаторы. Назначение. Характеристики

– относительный коэффициент стабилизации

$$K_{\text{СТ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}} / U_{\text{ВХ}}}{\Delta U_{\text{СТ}} / U_{\text{СТ}}}$$

– выходное сопротивление

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{СТ}}}{\Delta I_{\text{Н}}} \quad \Delta I_{\text{Н}} - \text{изменение тока в } R_{\text{Н}}$$

– дрейф $U_{\text{СТ}}$ (температурный и временной)

– КПД

$$\Theta = \frac{P_{\text{Н}}}{P_0}$$

$P_{\text{Н}}$ – мощность в нагрузке

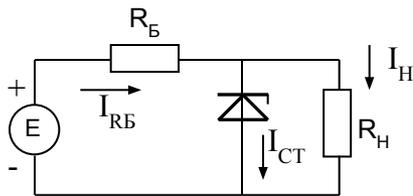
P_0 – общая мощность потребляемая стабилизатором

Типы стабилизаторов

- параметрические
- компенсационные

- импульсные

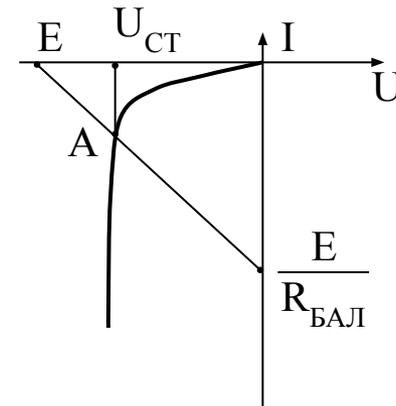
Параметрические



$$I_{RB} = I_{CT} + I_H$$

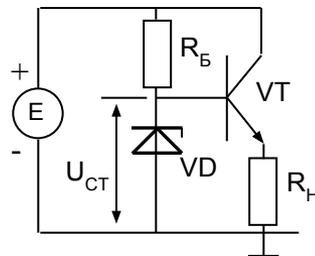
$$E = U_{RB} + U_{CT}$$

$$R_B = \frac{E - U_{CT}}{I_{RB}} = \frac{E - U_{CT}}{I_{CB} + U_{CT}/R_H}$$



- Недостатки:** – низкий K_{CT} при изменении E и R_H (почему?)
 – высокое $R_{ВЫХ}$ (опред. $r_{ДСТ}$)

Для снижения $R_{ВЫХ}$ используется ЭП

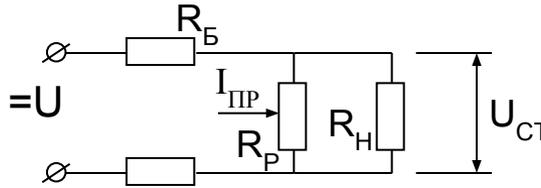
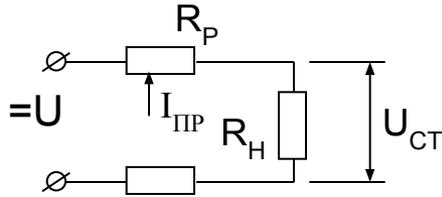


$$R_{ВЫХ}^{OK} \ll r_{ДСТ}$$

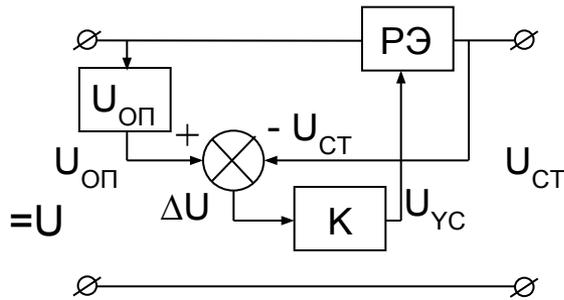
Компенсационный

– с последовательным регулирующим элементом

– с параллельным



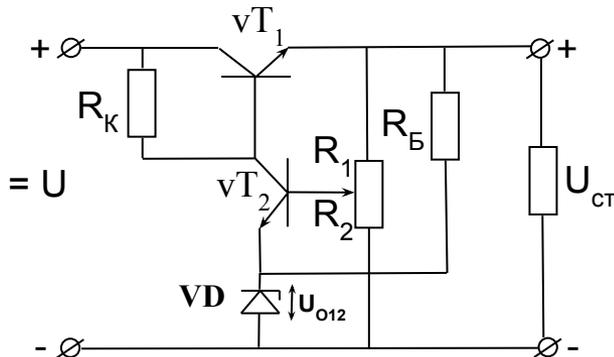
R_P – транзистор



$$\Delta U = U_{\text{оп}} - U_{\text{CT}} \quad U_{\text{YC}} = K (U_{\text{оп}} - U_{\text{CT}})$$

$$=U \uparrow \rightarrow U_{\text{CT}} \uparrow \rightarrow \Delta U \downarrow \rightarrow U_{\text{YC}} \downarrow \rightarrow R_P \uparrow \rightarrow U_{\text{CT}} \downarrow$$

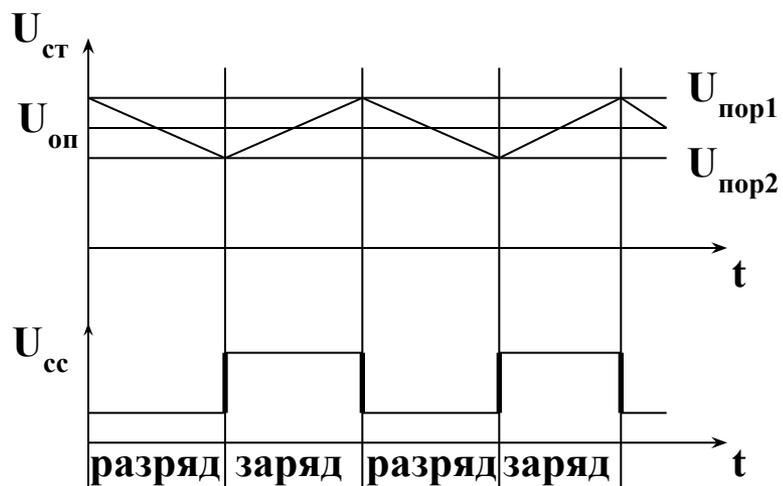
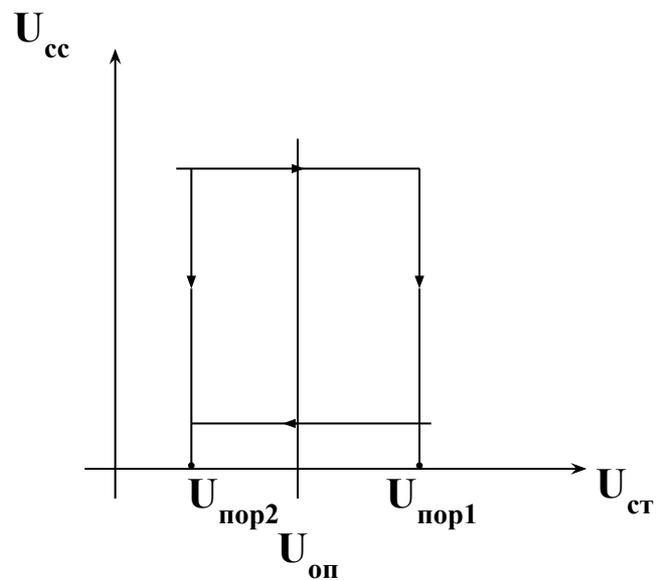
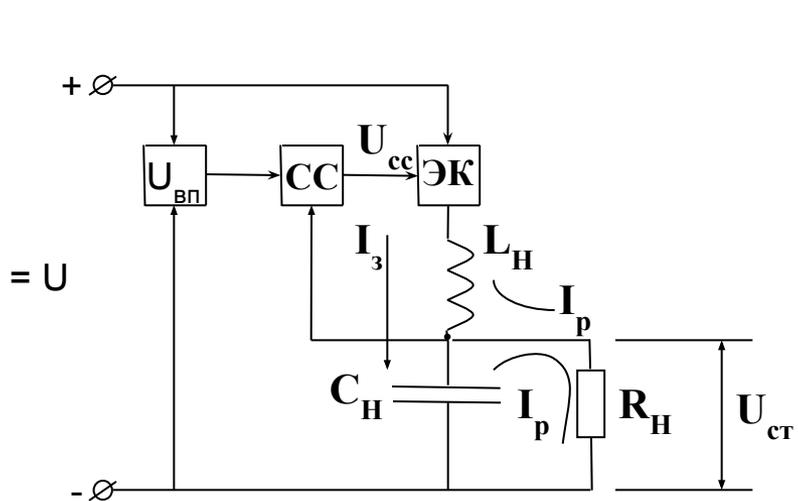
Цикл регулирования от $+\Delta U_{\text{CT}}$ до $-\Delta U_{\text{CT}}$



$$=U \uparrow \rightarrow +\Delta U_{\text{CT}} \rightarrow =U_{R1} \uparrow \rightarrow (U_{\text{БЭ2}} = U_{R1} - U_{\text{О11}}) \uparrow \rightarrow I_{\text{Б2}} \uparrow \rightarrow$$

$$\rightarrow I_{\text{К2}} \uparrow \rightarrow U_{\text{К2}} \downarrow \rightarrow I_{\text{Б1}} \downarrow \rightarrow \underline{\underline{-\Delta U_{\text{CT}}}} \downarrow$$

Импульсный



Электронные ключи

I По функциональному назначению

- цифровые
- аналоговые

II По соединению с нагрузкой

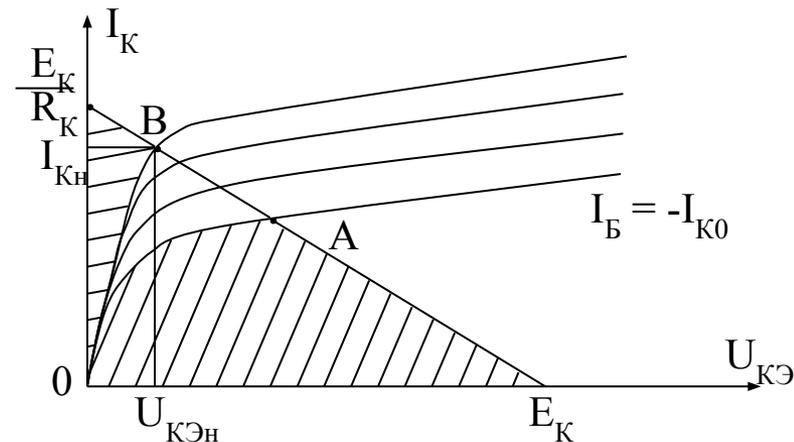
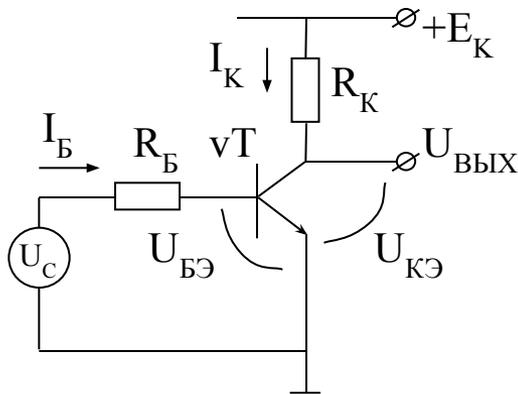
- последовательные
- параллельные

III По элементной базе

- диодные
- транзисторные
- тиристорные

Транзисторный ключ на БТ

Такие ключи работают в режиме D. Основная схема – ОЭ.



ОАЕ_К – область отсечки

ОВ $\frac{E_K}{R_K}$ – область насыщения

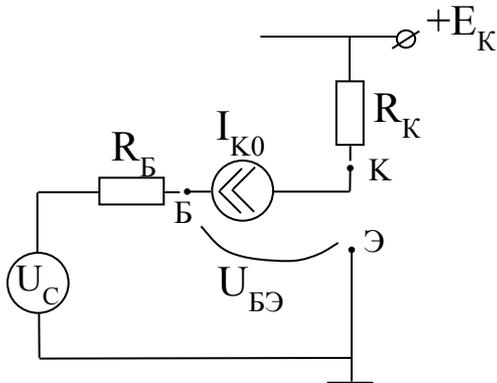
Режим отсечки (т. А) $U_{БЭ} < 0, U_{БК} < 0,$

Из уравнений Эберса – Молла можно получить:

$$I_K \approx I_{K0}; \quad I_B \approx -I_{K0}; \quad I_{Э} \approx -\frac{\beta_I}{\beta_N} I_{K0} \approx 0$$

$$(\beta_N \gg \beta_I)$$

Схема замещения



$$U_{КЭ} = E_K - I_{K0} R_K \approx E_K$$

Если $U_{БЭ} = -(3 \div 5)\phi_T$, то отсечка глубокая

Режим насыщения (т. В) $U_{БЭ} > 0, U_{БК} > 0$

$$I_B = \frac{U_C - U_{БЭ}}{R_B} \approx \frac{U_C}{R_B}, \quad (U_C \gg U_{БЭ})$$

$$I_K = \frac{E_K - U_{КЭН}}{R_K} \approx \frac{E_K}{R_K}, \quad (E_K \gg U_{КЭН})$$

Между А и В активный режим, т.е. $I_K = \beta I_B$

$$\text{В т. В} \quad I_{КН} = \beta I_{БН}$$

При $I_B > I_{БН}$ линейная связь между I_K и I_B отсутствует. Если $I_B > I_{БН}$, то $I_B > \frac{I_K}{\beta}$

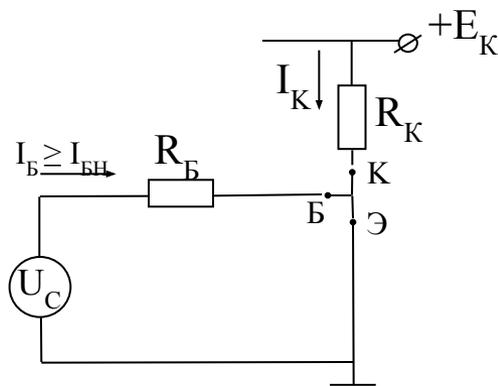
Степень насыщения транзистора

$$S = \frac{I_B}{I_{БН}} \geq 1$$

$$U_{КЭ\text{мин}} = \varphi_T \ln \alpha_1 \text{ (при } I_B \rightarrow \infty \text{)}$$

Т.к. $I_B \neq 0$, то $U_{КЭ\text{мин}} = 10 \div 20$ мВ

Схема замещения



$U_{КЭ}$ и $U_{БЭ} \approx 0$, а транзистор считают эквипотенциальной точкой

Переходные процессы в ключе

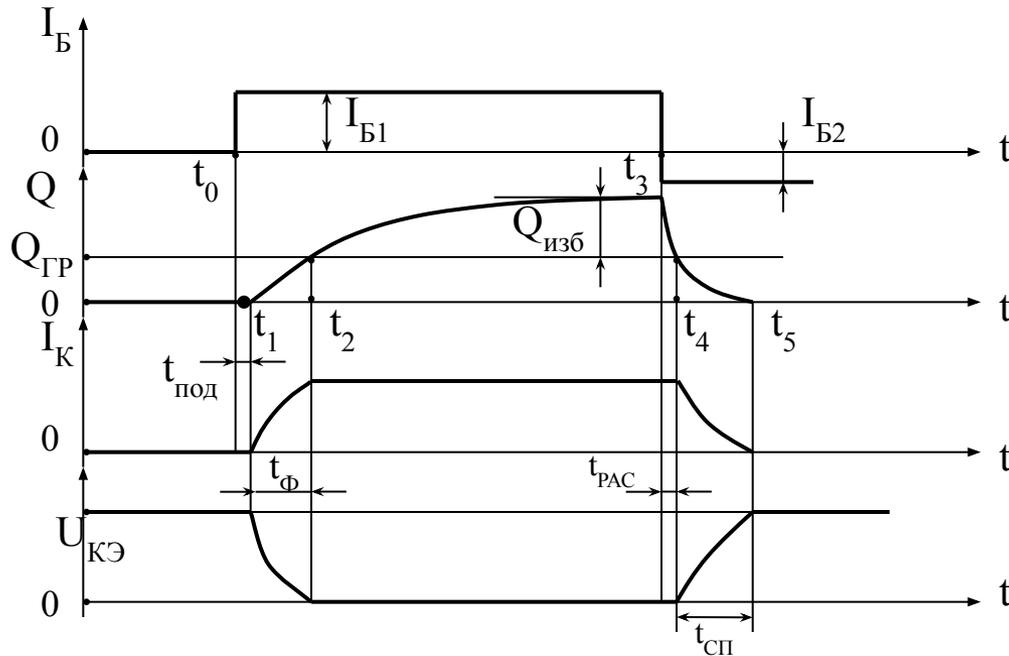
При анализе переходных процессов считается, что транзистор управляется зарядом неосновных носителей в базе, а экспоненциальные процессы протекают с постоянной времени τ_β (схема с ОЭ)

Включение

1. Подготовка к включению
2. Формирование фронта I_K
3. Накопление избыточного заряда

Выключение

1. Рассасывание избыточного заряда
2. Формирование спада I_K



$t_{под} = t_1 - t_0$ Определяется I_B , и быстродействием транзистора

$$t_{Ф} = t_2 - t_1; \quad Q(t) = I_B \tau_{\beta} (1 - e^{-t/\tau_{\beta}})$$

$$t_{Ф} = \tau_{\beta} \ln \frac{Q(\infty) - Q(t_1)}{Q(\infty) - Q(t_2)}$$

$$Q(\infty) = I_B \tau_{\beta}; \quad Q(t_1) = 0; \quad Q(t_2) = Q_{гр} = I_{БН} \tau_{\beta}$$

$$t_{Ф} = \tau_{\beta} \ln \frac{I_{B1}}{I_{B1} - I_{БН}} = \tau_{\beta} \ln \frac{S}{S - 1}; \quad (S = \frac{I_B}{I_{БН}})$$

$$t_{РАС} = t_4 - t_3 = \tau_{\beta} \ln \frac{Q'(\infty) - Q(t_3)}{Q'(\infty) - Q(t_4)}$$

$Q'(\infty) = -I_{B2} \tau_{\beta}$; - предельный заряд в базе под действием тока I_{B2}

4) Серия спада $t_{сп}$

$$t_{сп} = t_5 - t_4 = \tau * \ln \frac{Q'(\infty) - Q(t_4)}{Q'(\infty) - Q(t_5)} ; \quad Q'(\infty) = -I_{Б2} * \tau ; \quad Q(t_4) = Q_{гр} ; \quad Q(t_5) = 0$$

Если $I_{Б2} \uparrow$, то $t_{сп} \downarrow$

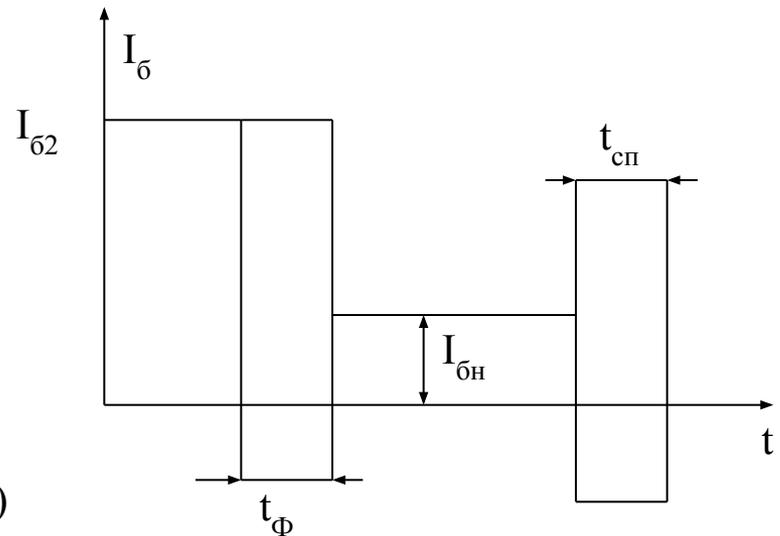
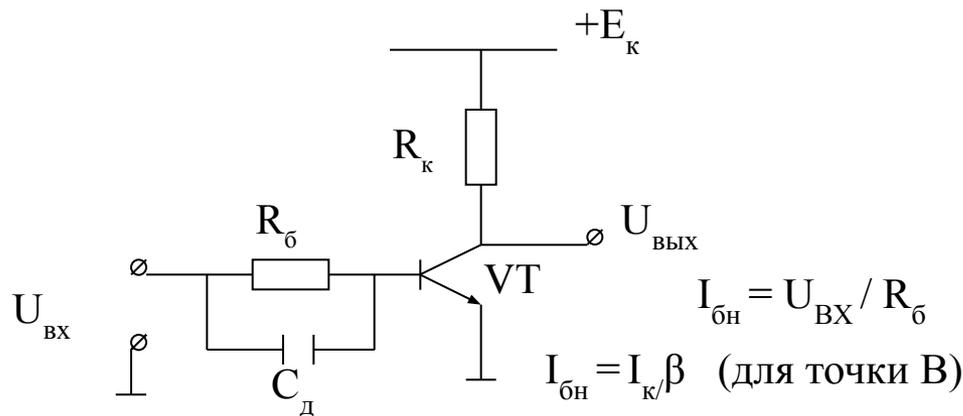
$$\tau * \ln \frac{-I_{Б2} - I_{БН}}{-I_{Б2}} = \tau * \ln \left(1 + \frac{I_{БН}}{I_{Б2}} \right)$$

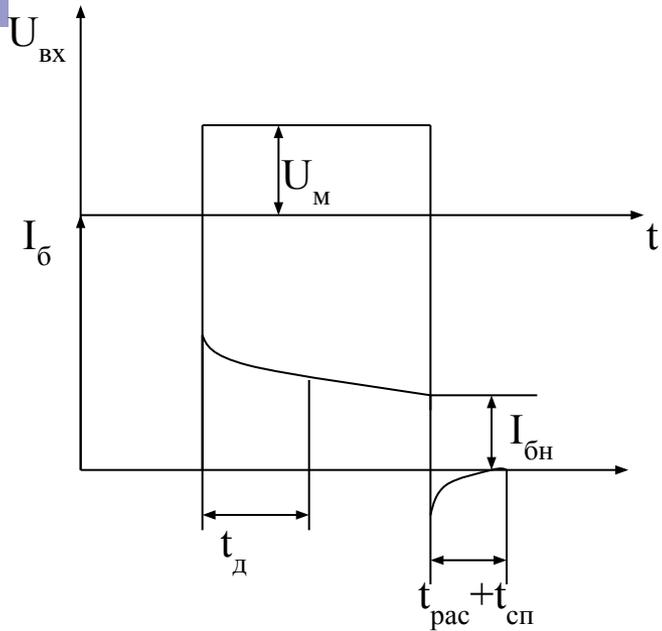
Методы повышения быстродействия транзисторных ключей

Анализ $t_{д}$, $t_{РАС}$ и $t_{СП}$ показывает противоречивость требований к $I_{б}$ и $I_{б2}$ для уменьшения $t_{д}$, $t_{РАС}$ и $t_{сп}$.

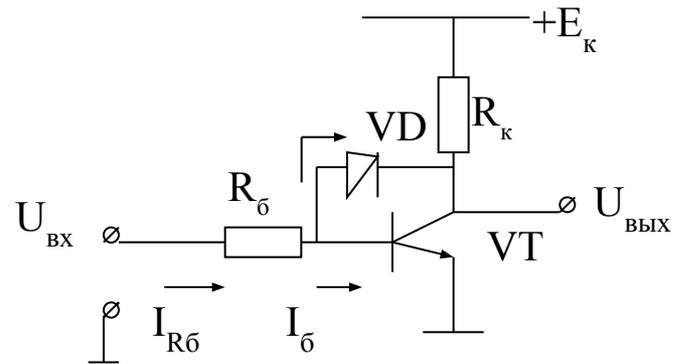
Способ 1. Ключ с форсирующей емкостью.

Схема ключа





Способ 2. Ключ с нелинейной ОС



В точке В $U_{бэ} > 0$; $U_{бк} = 0$.

Пока $U_{бк} < 0$ $I_б = I_{Рб}$ ($I_D = 0$) и VT в активном режиме.

Когда $U_{дк} > 0$ диод открыт к $I_б = I_{Рб} - I_D$. Т.е. при возрастании $I_{Рб}$ растет I_D , а $I_б$ остается постоянным и равна $I_{бН}$.

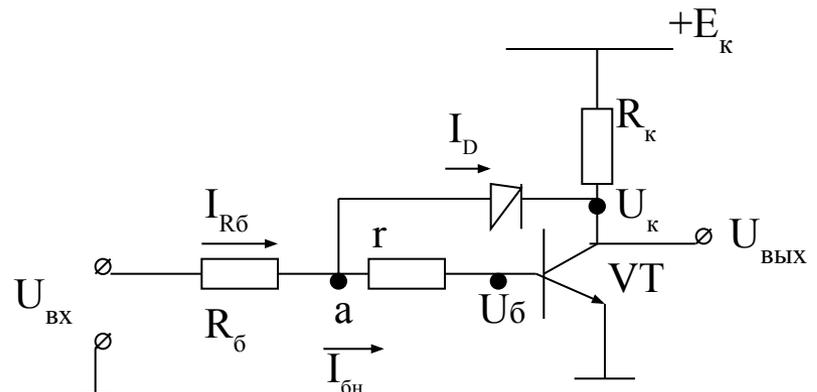
Т.к. диод не идеальный, то он открывается при $U_{бк} > 0$, что приводит к избыточному заряду в базе. Для его устранения вводится резистор r .

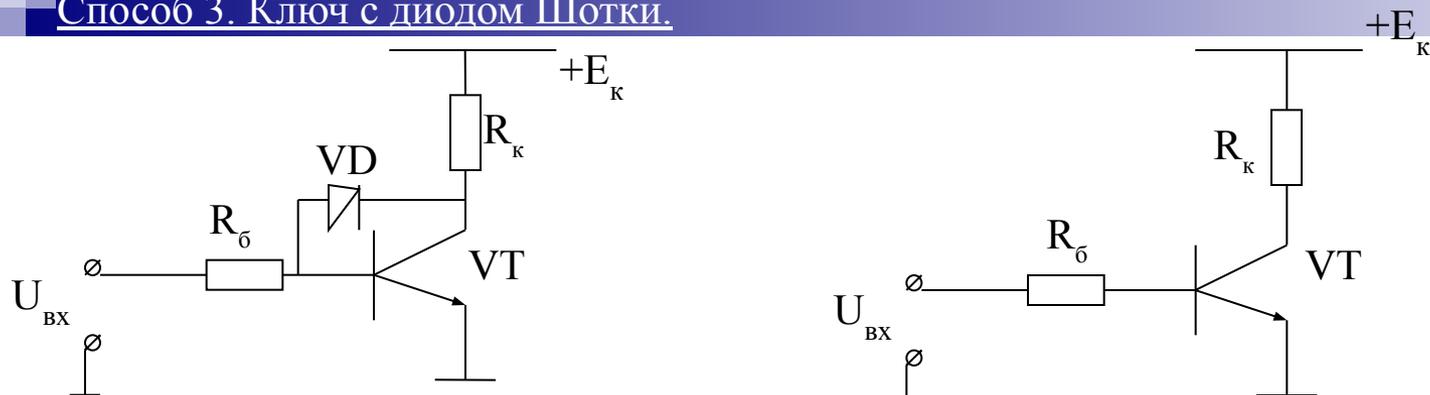
$$U_к = U_а - U_д; \quad U_б = U_а - U_r; \quad U_r = I_{бН} * r;$$

$$U_{бк} = U_б - U_к = U_D - U_z = 0; \quad U_D = I_{бН} * r$$

$$I_{бН} = I_{кН} / \beta \approx E_к / \beta R_к$$

$$r = U_D / I_{бН}$$





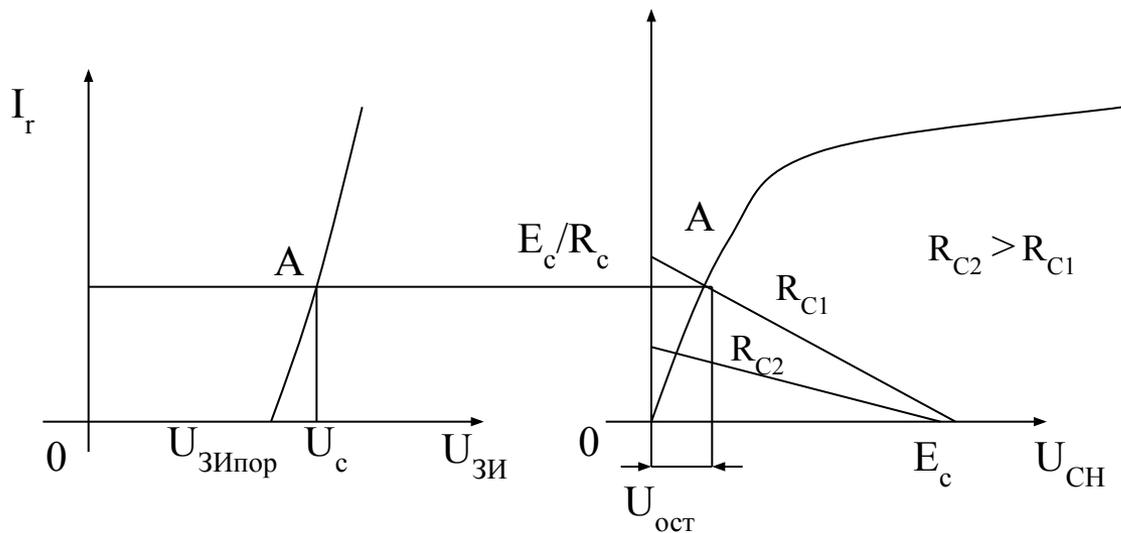
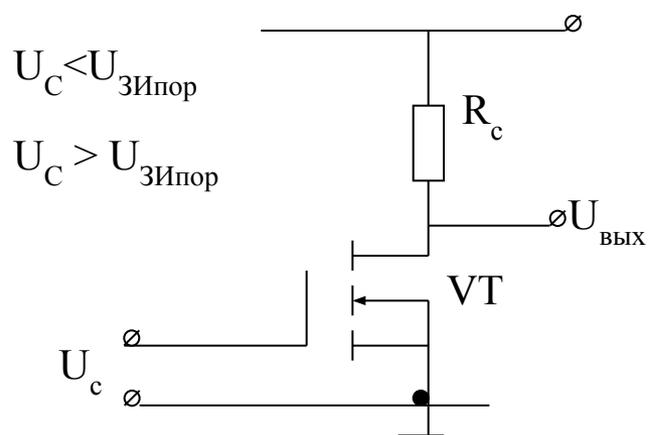
VT – транзистор Шотки. Рассмотренные ключи являются ненасыщенными.

Недостатки:

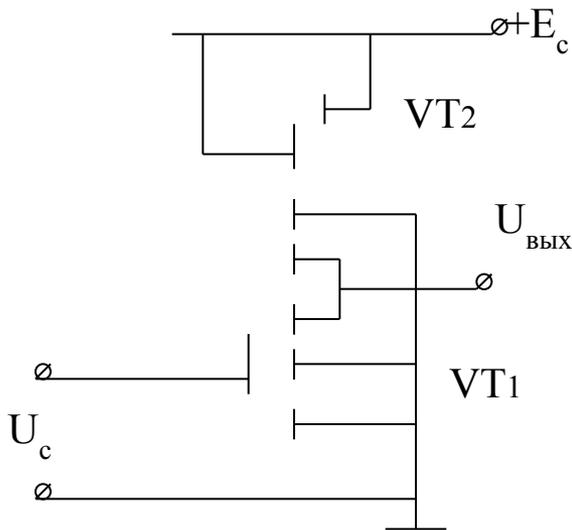
1. $U_{КЭН}$ больше (на 0,2-0,3 в), чем у насыщенных.
2. Хуже помехоустойчивость.
3. Хуже температурная стабильность.

Ключи на ПТ

1. Ключ с резисторной нагрузкой



2. Ключ с динамической нагрузкой



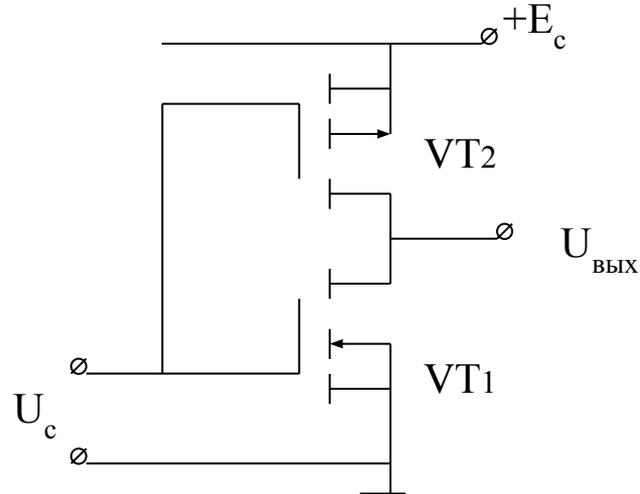
Если $U_c < U_{\text{ЗИпор}}$, то T1 – закрыт, соответственно и T2

$$U_{\text{вых}} \approx E_c$$

При $U_c > U_{\text{ЗИпор}}$, T1 – открыт,

$U_{\text{сн1}} \ll E_c$ и $U_{\text{сн2}} = E_c - U_{\text{сн1}} > U_{\text{ЗИпор}}$ – T2 так же открыт

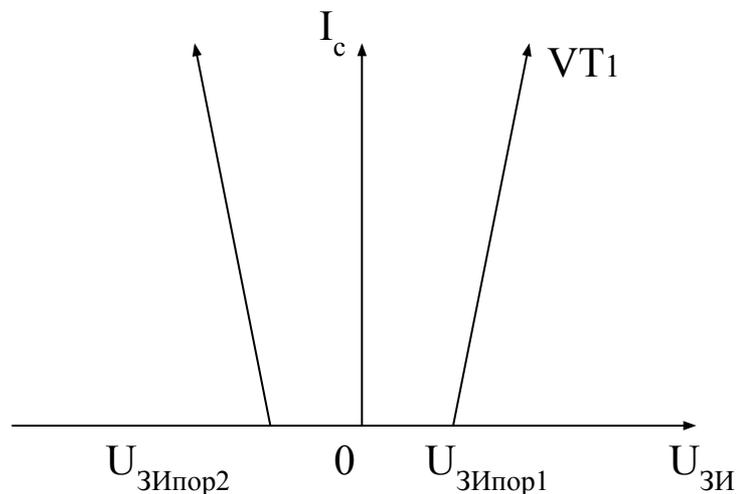
3. Комплементарный ключ



1) $U_c = 0$; $U_{\text{ЗИ1}} = 0$ $U_{\text{ЗИ2}} = -E_c > U_{\text{ЗИпор2}}$, T1- закрыт

T2 – открыт, $U_{\text{вых}} = E_c$

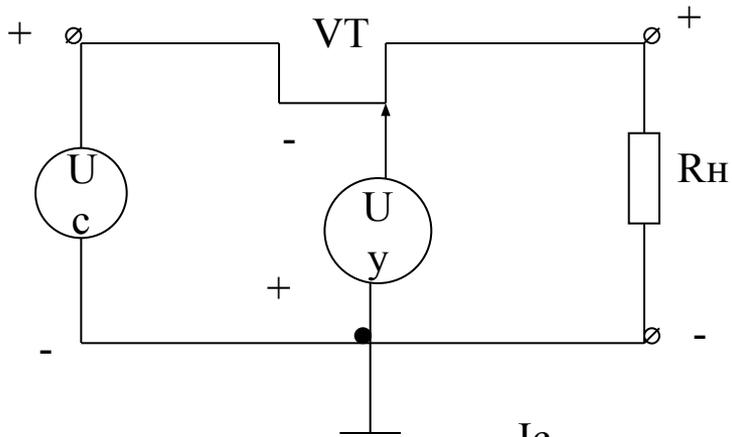
2) $U_c > U_{\text{ЗИпор1}}$ – T1 – открыт. Если $U_c > E_c - |U_{\text{ЗИпор2}}|$, то T2 – закрыт.



Аналоговые ключи

Выполнены на БТ и ПТ

1. Аналоговый ключ на ПТ

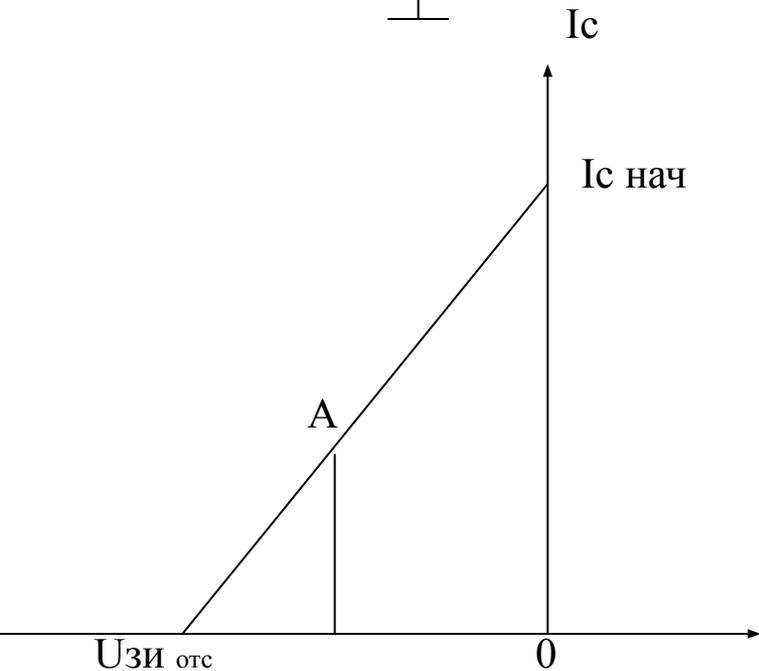
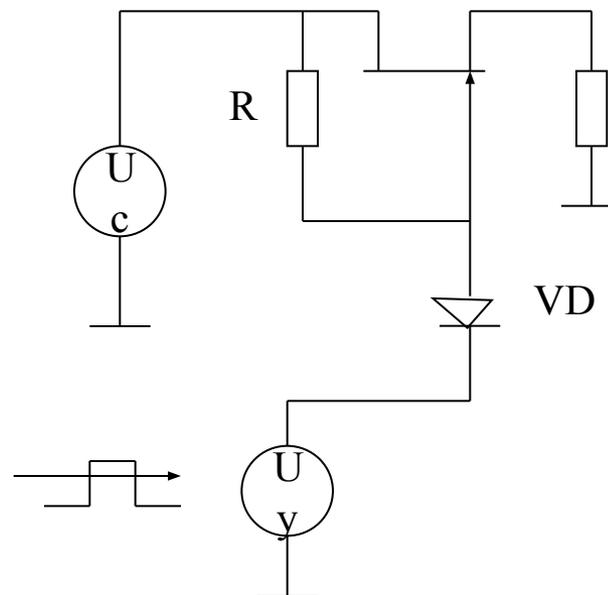


$$U_H = U_{и} = U_c; U_{зи} = U_y - U_H \rightarrow f(U_c) \rightarrow$$

$$R_{си} = f(U_c)$$

Поэтому возникает ошибка при передаче U_c на нагрузку

2. Ключ с плавающим затвором.



В таком ключе U_H и U_Z меняются синхронно с изменением U_C , а $U_{зи} = \text{const}$ ($R_{си}$ - константа).

Если $U_y < 0$ и $|U_y| > U_{зи}$ отс, то T – закрыт

Если $U_y > 0$, то VD закрыт, ток через $R \approx 0$. Поэтому $U_Z \approx U_C > 0$. Транзистор открыт и $U_H \approx U_C$ т.е.

$U_{зи} = 0$; $I_c = I_{снач}$; $R_{си}$ – минимально и постоянно

