

## Биполярные транзисторы

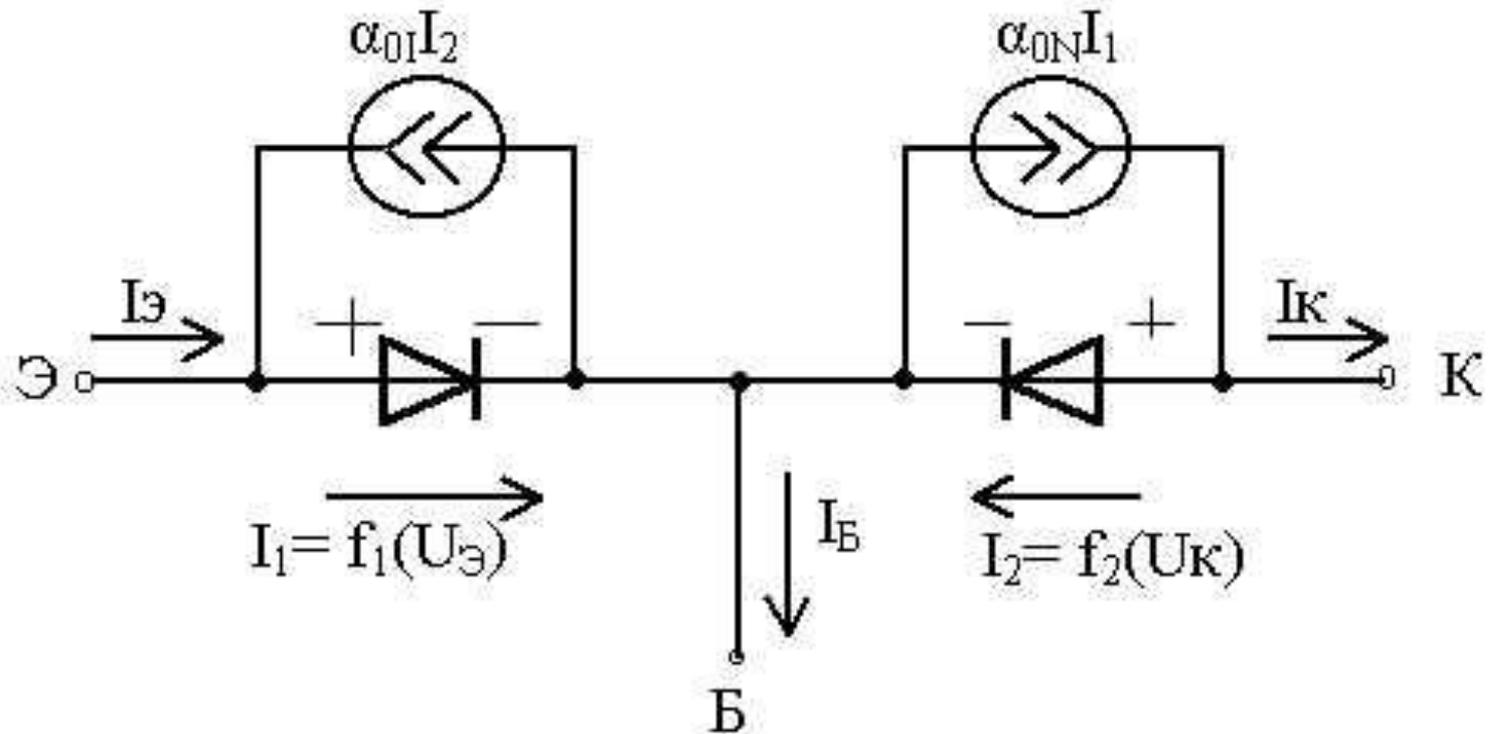
1. Эквивалентная схема транзистора
2. Система  $h$ -параметров
3. Система  $Y$ -параметров
4. Основные параметры биполярных транзисторов

**Познание начинается с удивления**

*-Аристотель-*



# Эквивалентная схема транзистора модель Эберса-Молла (p-n-p)



## Эквивалентная схема транзистора модель Эберса-Молла (p-n-p)

$$I_{\text{Э}} = I_1 - \alpha_{0I} I_2 \qquad I_{\text{К}} = \alpha_{0N} I_1 - I_2$$

$$I_1 = I'_{\text{ЭБ0}} \left( e^{U_{\text{Э}} / \varphi_{\text{T}}} - 1 \right)$$

$$I_2 = I'_{\text{КБ0}} \left( e^{U_{\text{К}} / \varphi_{\text{T}}} - 1 \right)$$



## Эквивалентная схема транзистора модель Эберса-Молла (p-n-p)

$$I_{\text{Э}} = I'_{\text{ЭБ0}} \left( e^{U_{\text{Э}} / \varphi_{\text{T}}} - 1 \right) - \alpha_{0I} I'_{\text{КБ0}} \left( e^{U_{\text{К}} / \varphi_{\text{T}}} - 1 \right)$$

$$I_{\text{К}} = \alpha_{0N} I'_{\text{ЭБ0}} \left( e^{U_{\text{Э}} / \varphi_{\text{T}}} - 1 \right) - I'_{\text{КБ0}} \left( e^{U_{\text{К}} / \varphi_{\text{T}}} - 1 \right)$$



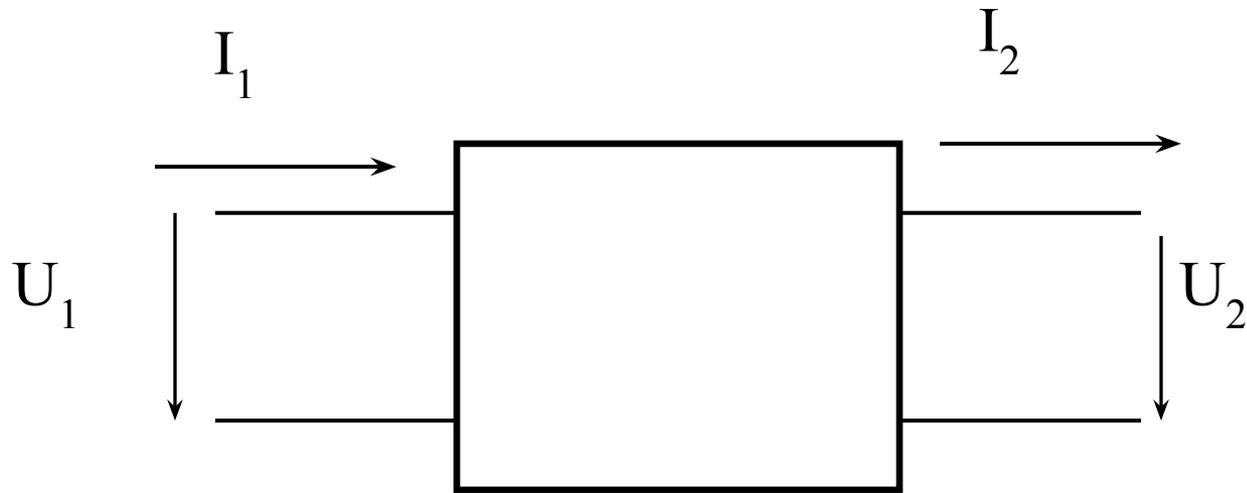
# Эквивалентная схема транзистора модель Эберса-Молла (p-n-p)

Разность токов  $I_{\text{Э}}$  и  $I_{\text{К}}$  составляет ток базы:

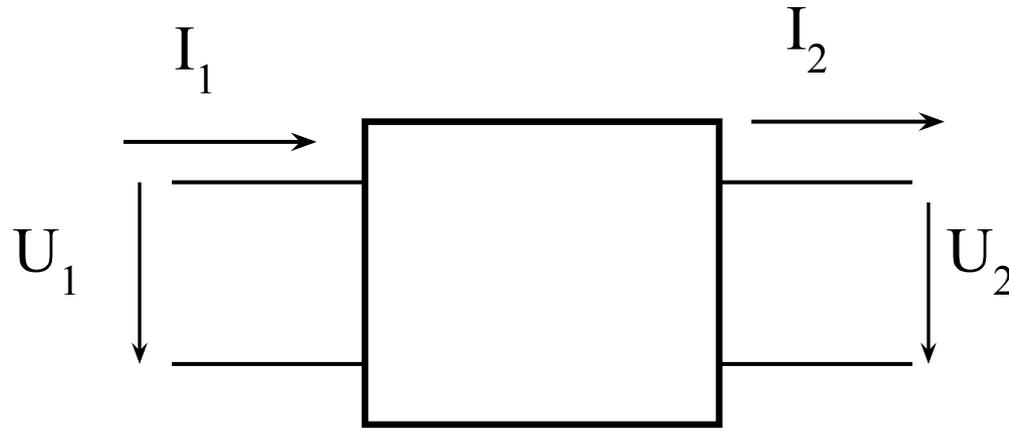
$$I_{\text{Б}} = (1 - \alpha_{0N}) I'_{\text{ЭБ0}} (e^{U_{\text{Э}} / \varphi_{\text{T}}} - 1) + (1 - \alpha_{0I}) I'_{\text{КБ0}} (e^{U_{\text{К}} / \varphi_{\text{T}}} - 1)$$



# Транзистор как активный четырёхполюсник



# Система h-параметров



$$\Delta U_1 = h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2$$

$$\Delta I_2 = h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2$$



## Система h-параметров

$$h_{11} = \Delta U_1 / \Delta I_1 \quad \text{при } U_2 = \text{const}$$

$$h_{12} = \Delta U_1 / \Delta U_2 \quad \text{при } I_1 = \text{const}$$

$$h_{21} = \Delta I_2 / \Delta I_1 \quad \text{при } U_2 = \text{const}$$

$$h_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2 \quad \text{при } I_1 = \text{const}$$



# Система h-параметров

Для схемы с ОЭ

$$I_1 = I_B \quad I_2 = I_K \quad U_1 = U_{БЭ} \quad U_2 = U_{КЭ}$$

$$\Delta U_{БЭ} = h_{11Э} \Delta I_B + h_{12Э} \Delta U_{КЭ}$$

$$\Delta I_K = h_{21Э} \Delta I_B + h_{22Э} \Delta U_{КЭ}$$



# Система h-параметров для схемы с ОЭ

## Входное сопротивление

$$h_{11Э} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_{Б} \quad \text{при } U_{КЭ} = \text{const}$$

## Коэффициент обратной связи по напряжению

$$h_{12Э} = \Delta U_{БЭ} / \Delta U_{КЭ} \quad \text{при } I_{Б} = \text{const}$$



# Система h-параметров для схемы с ОЭ

Коэффициент передачи тока

$$h_{21Э} = \Delta I_K / \Delta I_B = \beta \quad \text{при } U_{КЭ} = \text{const}$$

Выходная проводимость

$$h_{22Э} = \Delta I_K / \Delta U_{КЭ} \quad \text{при } I_B = \text{const}$$



## Связь h-параметров с собственными параметрами транзистора

$$h_{11Э} = r_B + r_Э / (1 - \alpha)$$

$$h_{12Э} = r_Э / (r_K (1 - \alpha))$$

$$h_{21Э} = \alpha / (1 - \alpha) = \beta$$

$$h_{22Э} = 1 / (r_K (1 - \alpha))$$



# Система h-параметров

Для схемы с ОБ

$$I_1 = I_{\text{Э}} \quad I_2 = I_{\text{К}} \quad U_1 = U_{\text{ЭБ}} \quad U_2 = U_{\text{КБ}}$$

$$\Delta U_{\text{ЭБ}} = h_{11\text{Б}} \Delta I_{\text{Э}} + h_{12\text{Б}} \Delta U_{\text{КБ}}$$

$$\Delta I_{\text{К}} = h_{21\text{Б}} \Delta I_{\text{Э}} + h_{22\text{Б}} \Delta U_{\text{КБ}}$$



# Система h-параметров для схемы с ОБ

## Входное сопротивление

$$h_{11Б} = \Delta U_{ЭБ} / \Delta I_{Э} \quad \text{при } U_{КБ} = \text{const}$$

## Коэффициент обратной связи по напряжению

$$h_{12Б} = \Delta U_{ЭБ} / \Delta U_{КБ} \quad \text{при } I_{Э} = \text{const}$$



# Система h-параметров для схемы с ОБ

Коэффициент передачи тока

$$h_{21Б} = \Delta I_K / \Delta I_{Э} = -\alpha \quad \text{при } U_{КБ} = \text{const}$$

Выходная проводимость

$$h_{22Б} = \Delta I_K / \Delta U_{КБ} \quad \text{при } I_{Э} = \text{const}$$



## Связь h-параметров с собственными параметрами транзистора

$$h_{11Б} = r_{Э} + r_{Б} / (1 - \alpha)$$

$$h_{12Б} = r_{Б} / r_{К}$$

$$h_{21Б} = -\alpha$$

$$h_{22Б} = 1 / r_{К}$$



## H-параметры для различных схем включения транзисторов

$$h_{11Б} \approx h_{11Э} / (1 + h_{21Э}) \quad h_{11К} \approx h_{11Э}$$

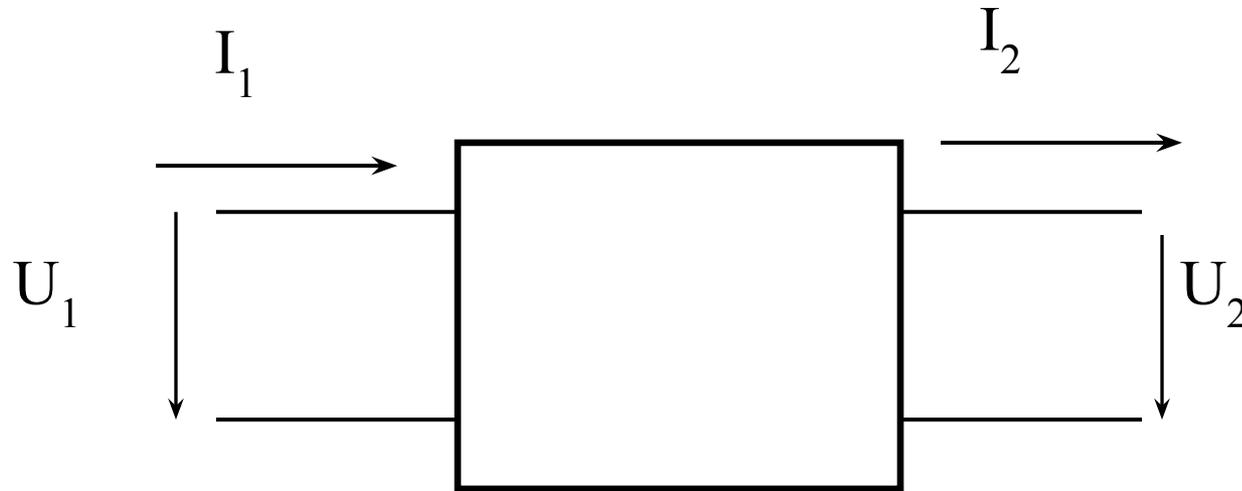
$$h_{12Б} \approx h_{11Э} h_{22Э} / (1 + h_{21Э}) \quad h_{12К} \approx 1 / (1 + h_{12Э})$$

$$h_{21Б} \approx -h_{21Э} / (1 + h_{21Э}) \quad h_{21К} \approx -(1 + h_{21Э})$$

$$h_{22Б} \approx h_{22Э} / (1 + h_{21Э}) \quad h_{22К} \approx h_{22Э}$$



# Система Y-параметров



$$\Delta I_1 = y_{11} \Delta U_1 + y_{12} \Delta U_2$$

$$\Delta I_2 = y_{21} \Delta U_1 + y_{22} \Delta U_2$$



# Система Y-параметров

Входная проводимость

$$y_{11} = \Delta I_1 / \Delta U_1 \quad \text{при} \quad U_2 = \text{const}$$

Обратная взаимная проводимость

$$y_{12} = \Delta I_1 / \Delta U_2 \quad \text{при} \quad U_1 = \text{const}$$

Прямая взаимная проводимость

$$y_{21} = \Delta I_2 / \Delta U_1 \quad \text{при} \quad U_2 = \text{const}$$

Выходная проводимость

$$y_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2 \quad \text{при} \quad U_1 = \text{const}$$



# Система Y-параметров для схемы с ОЭ (транзистор n-p-n типа)

$$I_1 = I_B \quad I_2 = I_K \quad U_1 = U_{БЭ} \quad U_2 = U_{КЭ}$$

$$\Delta I_B = y_{11Э} \Delta U_{БЭ} + y_{12Э} \Delta U_{КЭ}$$

$$\Delta I_K = y_{21Э} \Delta U_{БЭ} + y_{22Э} \Delta U_{КЭ}$$



# Система Y-параметров для схемы с ОЭ

## Входная проводимость

$$y_{11Э} = \Delta I_B / \Delta U_{БЭ} \quad \text{при} \quad U_{КЭ} = \text{const}$$

## Обратная взаимная проводимость

$$y_{12Э} = \Delta I_B / \Delta U_{КЭ} \quad \text{при} \quad U_{БЭ} = \text{const}$$

## Прямая взаимная проводимость

$$y_{21Э} = \Delta I_K / \Delta U_{БЭ} \quad \text{при} \quad U_{КЭ} = \text{const}$$

## Выходная проводимость

$$y_{22Э} = \Delta I_K / \Delta U_{КЭ} \quad \text{при} \quad U_{БЭ} = \text{const}$$



## Связь между h- и y- параметрами

$$h_{11} = 1/y_{11} \quad y_{11} = 1/h_{11}$$

$$h_{12} = -y_{12}/y_{11} \quad y_{12} = -h_{12}/h_{11}$$

$$h_{21} = y_{21}/y_{11} \quad y_{21} = h_{21}/h_{11}$$

$$h_{22} = y_{22} - y_{12}y_{21}/y_{11} \quad y_{22} = h_{22} - h_{12}h_{21}/h_{11}$$



# Переход от h-параметров схемы с ОБ к Y-параметрам схемы с ОЭ

$$y_{11Э} = (1 - h_{21Б}) / h_{11Б} \quad y_{12Э} = h_{22Б} - h_{12Б} (1 - h_{21Б}) / h_{11Б}$$

$$y_{21Э} = h_{21Б} / h_{11Б} \quad y_{22Э} = h_{22Б} + h_{12Б} h_{21Б} / h_{11Б}$$



# Основные параметры биполярных транзисторов

Обратный ток коллектора  $I_{КБО}$  - ток через коллекторный переход при заданном напряжении коллектор-база и разомкнутом выводе эмиттера

Обратный ток эмиттера  $I_{ЭБО}$  - ток через эмиттерный переход при заданном напряжении база-эмиттер и разомкнутом выводе коллектора



# Основные параметры биполярных транзисторов

Входное сопротивление  $h_{11Б}$

Коэффициент передачи тока  $h_{21Б}$

Коэффициент обратной связи  $h_{12Б}$

Выходная полная проводимость  $h_{22Б}$

Предельная частота коэффициента передачи

$f h_{21Б}$



# Основные параметры биполярных транзисторов

Емкость коллекторного перехода  $C_k$

Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода  $r_{\text{эdif}}$

Объемное сопротивление базы  $r_b$



# Максимально допустимые параметры

постоянное напряжение коллектор-база

$U_{кб\max}$

постоянное напряжение коллектор-эмиттер

$U_{кэ\max}$

постоянный ток коллектора  $I_{к\max}$

импульсный ток коллектора  $I_{к.и.\max}$

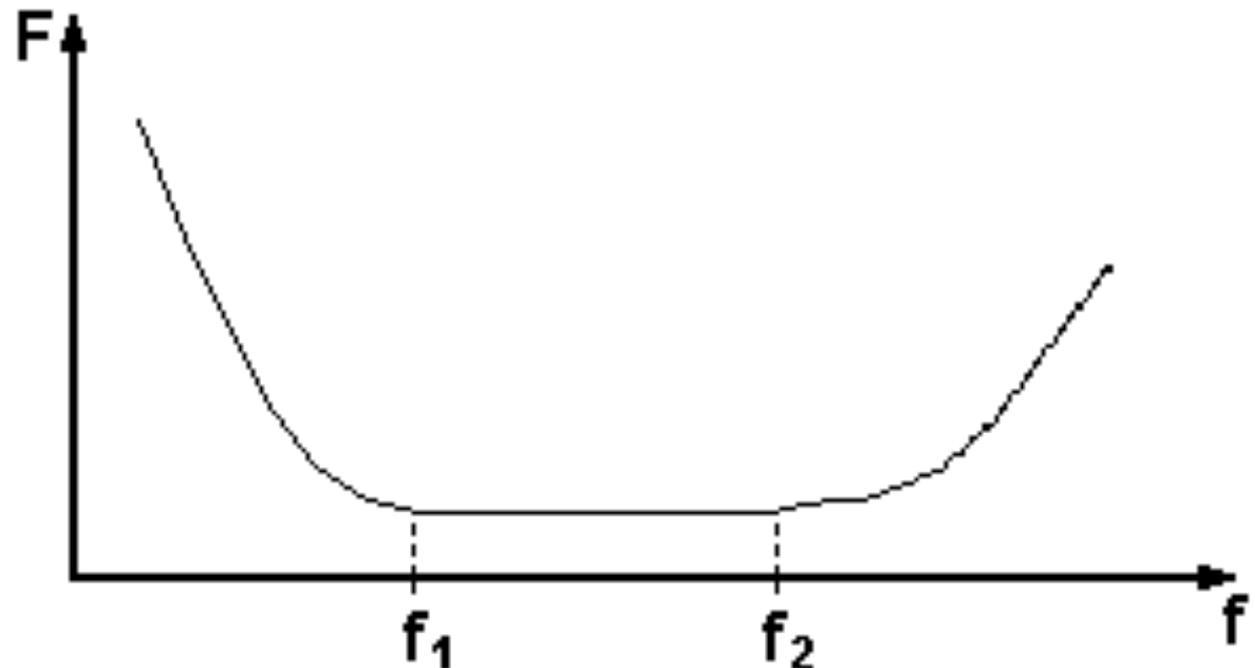
рассеиваемая мощность без теплоотвода

$P_{\max}$



# Шумы транзистора

1. Тепловой шум
2. Дробовой шум
3. Избыточные шумы



# Классификация транзисторов

## По величине мощности, рассеиваемой коллектором

1. Малой мощности  $P_k < 0.3$  Вт
2. Средней мощности  $0.3 < P_k < 1.5$  Вт
3. Большой мощности  $P_k > 1.5$  Вт



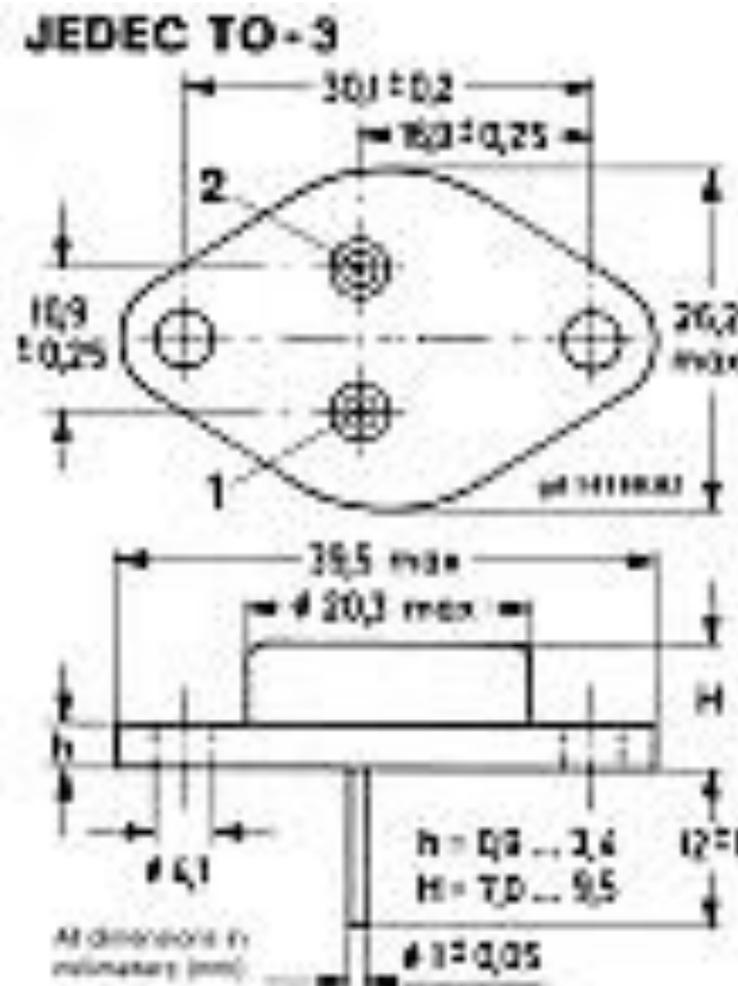
# Классификация транзисторов

## По максимальной рабочей частоте

1. Низкочастотные  $f_{\alpha} < 3$  МГц
2. Среднечастотные  $3 \text{ МГц} < f_{\alpha} < 30$  МГц
3. Высокочастотные  $30 \text{ МГц} < f_{\alpha} < 300$  МГц
4. Сверхвысокочастотные  $f_{\alpha} > 300$  МГц



# Типы корпусов транзисторов



# Типы корпусов транзисторов

SOT 23



SOT 89



SO 8



DPAK



# Типы корпусов транзисторов

TO 92



SPAK



DIP 4



# Типы корпусов транзисторов

TO 18



TO 126



TO 220FP



TO 220AB



# Типы корпусов транзисторов

TO 220-5



TO 218



TO 247AC



# Типы корпусов транзисторов



**Металлопластмассовый корпус ( прототип корпуса Toshiba)**



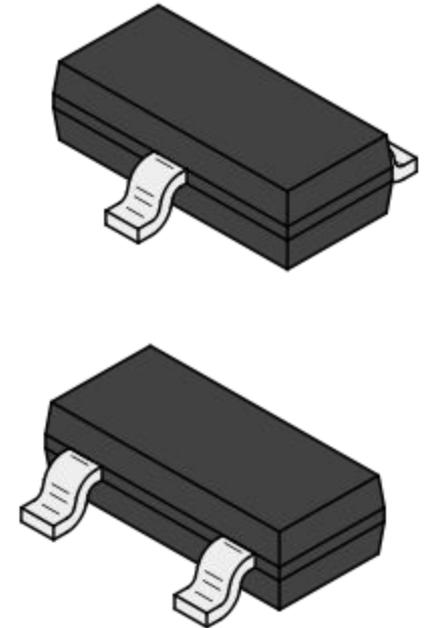
# Типы корпусов транзисторов



**Корпус Semikron**



# Типы корпусов транзисторов



**SOT-23**



## Контрольное задание

Вывести формулы связи  $Y$ -параметров транзистора с его собственными параметрами



## Задание для самостоятельной работы

1. Примеры реальных транзисторов в соответствии с классификацией

**Мудр** — кто знает нужное, а не многое.  
*Эсхил*

