

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа  
**«Исследование характеристик  
биполярного транзистора»**

Москва, 2006 г.

В биполярном транзисторе физические процессы определяются движением носителей заряда обоих знаков, что и отражено в его названии. На рисунке 1 приведены сечение (а), схематическое (б) и схемотехническое изображение биполярного транзистора.

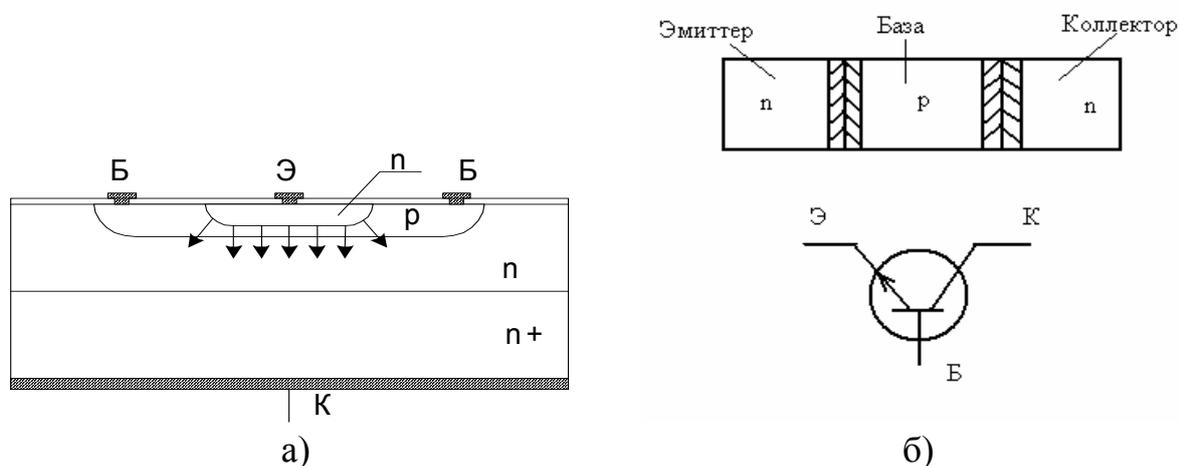


Рисунок 1. Структура (а), схематическое (б) и схемотехническое изображение (в) биполярного транзистора.

Биполярный транзистор содержит три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости ( $p - n - p$  или  $n - p - n$ ), которые называются соответственно эмиттером, базой и коллектором. Эти области разделены двумя взаимодействующими между собой  $p-n$  переходами: эмиттерным и коллекторным. Взаимодействие между переходами обеспечивается благодаря тому, что расстояние между ними (толщина базы) много меньше диффузионной длины неосновных носителей в базе. К полупроводниковым областям созданы омические контакты и внешние выводы. Принцип действия транзисторов типа  $p - n - p$  и  $n - p - n$  одинаков. В работе рассматривают только транзисторы типа  $n - p - n$ , исследования транзисторов  $p - n - p$  типа проводятся аналогично, за исключением того, что полярность рабочих напряжений и направления токов противоположны.

Возможны три схемы подключения транзистора: с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором. В работе исследуются статиче-

ские характеристики транзистора в схемах с общим эмиттером и общей базой.

Схема с общим эмиттером представлена на рисунке 2.

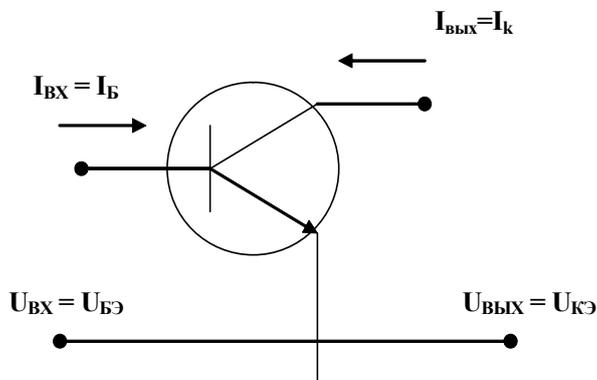


Рисунок 2. Схема включения транзистора с общим эмиттером.

При данной схеме включения входным током является ток базы, а входным напряжением – напряжение между базой и эмиттером. Выходными являются ток коллектора и напряжение между коллектором и эмиттером.

$$I_{вх} = I_{б}; \quad U_{вх} = U_{бэ};$$

$$I_{вых} = I_{к}; \quad U_{вых} = U_{кэ}.$$

Входная характеристика – это зависимость входного тока (в данном случае тока базы) от входного напряжения при постоянном напряжении на выходе, т.е. на коллекторе:

$$I_{вх} = f(U_{вх}), \text{ или } I_{б} = f(U_{бэ}) \quad \text{при } U_{кэ} = \text{const.}$$

Выходная характеристика – зависимость выходного тока (тока коллектора) от выходного напряжения при постоянном токе базы.

$$I_{вых} = f(U_{вых}), \text{ или } I_{к} = f(U_{кэ}) \quad \text{при } I_{б} = \text{const}$$

Схема с общей базой представлена на рисунке 3.

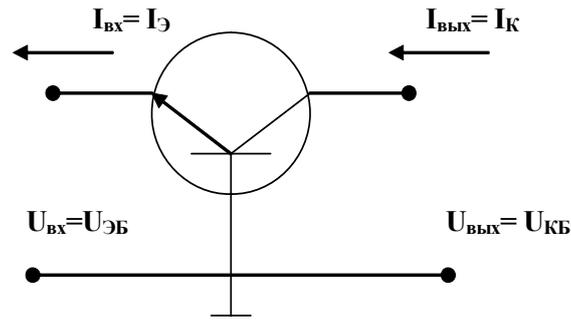


Рисунок 3. Схема включения транзистора с общей базой.

При данной схеме включения входным током является ток эмиттера, а входным напряжением – напряжение между эмиттером и базой. Выходными являются ток коллектора и напряжение между коллектором и базой.

$$I_{вх} = I_{э}; \quad U_{вх} = U_{эб};$$

$$I_{вых} = I_{к}; \quad U_{вых} = U_{кб}.$$

Входная характеристика – это зависимость входного тока (в данном случае тока эмиттера) от входного напряжения при постоянном напряжении на выходе, т.е. на коллекторе:

$$I_{вх} = f(U_{вх}), \text{ или } I_{э} = f(U_{эб}) \quad \text{при } U_{кб} = \text{const}$$

Выходная характеристика – зависимость выходного тока (тока коллектора) от выходного напряжения при постоянном токе эмиттера.

$$I_{вых} = f(U_{вых}), \text{ или } I_{к} = f(U_{кб}) \quad \text{при } I_{э} = \text{const}.$$

### Описание установки.

Исследование характеристик БП транзистора осуществляется с помощью характериоскопа, позволяющего получить на экране семейства ВАХ п/п транзисторов. В состав лабораторной установки входят также транзистор и разъем с тремя проводами. Транзистор припаян к плате с тремя выводами. К среднему выводу присоединена база транзистора. К выводу, окрашенному в красный цвет, присоединён коллектор. Плата с транзистором вставляется в разъем с тремя проводами. Рекомендуется вставлять плату таким образом, чтобы красный вывод коллектора соответ-

ствовал красному (розовому) проводу. Белый провод при этом будет соответствовать базе, а чёрный – эмиттеру транзистора.

Штекеры проводов подсоединяются к различным гнездам характеристоскопа, в зависимости от схемы включения и снимаемой характеристики.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снимите семейства входных и выходных ВАХ в схеме с общим эмиттером.

Для снятия семейства **выходных ВАХ** в схеме с общим эмиттером поставьте переключатель "**OFF**" в нейтральное положение (рисунок П1-2 приложения 1) и подключите транзистор в соответствии с рисунком 4.

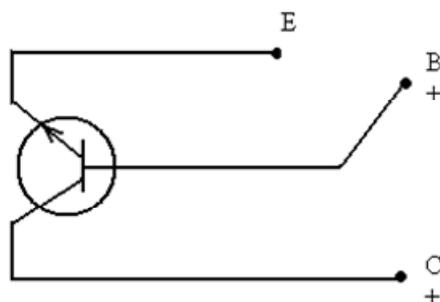


Рисунок 4. Схема подключения транзистора при снятии семейства выходных ВАХ в схеме с общим эмиттером.

На приборе *CHARACTERISCOPE* установите ручки управления в следующие положения:

- переключатель "**HOR. VOLTS**" в положение (0,5 – 1,0) В/дел;
- переключатель "**VERT. CURRENT**" в положение – 1 мА/дел.;
- переключатель "**BASE STEPS**" в положение "6";
- тумблер "**STEP POL**" в положение "+";
- кнопка "**ONE CURVE**" отжата;
- переключатель "**STEP AMPLITUDE**" в положение (50 – 100) мкА;
- переключатель "**COLLECTOR SUPPLY**" в положение – "+AC".

Включите питание прибора ручкой *"SCALE ILLUM"* и установите удобный уровень освещенности шкалы. Время прогрева прибора не менее 5 минут.

После того, как будут выставлены необходимые чувствительности, полярности и количество шагов, можно включить изображение, переведя переключатель *"OFF"* в соответствующее положение  $\leftarrow$  или  $\rightarrow$ . В результате на экране должно появиться семейство ВАХ. Каждая кривая семейства соответствует постоянному значению входного тока на гнезде *"B"*.

После этого необходимо произвести балансировку. Балансировка осуществляется вращением ручки *"OFFSET"*. При вращении ручки *"OFFSET"* семейство кривых синхронно перемещается по экрану. Для балансировки нужно добиться такого положения, когда нижняя кривая при движении семейства ВАХ сверху вниз остановится (при этом она будет соответствовать  $I_b=0$ ); начало этой кривой (яркая точка) является началом координат при построении графика ВАХ. После балансировки откорректируйте чувствительность вертикального отклонения так, чтобы семейство ВАХ занимало как можно большую часть экрана характериоскопа, и перерисуйте семейство выходных ВАХ на миллиметровку в масштабе достаточно крупном для дальнейших вычислений (1 клетка на экране осциллографа  $\leq 1$  см).

Для снятия семейства **входных ВАХ** в схеме с общим эмиттером поставьте переключатель *"OFF"* в нейтральное положение и подключите транзистор в соответствии с рисунком 5.

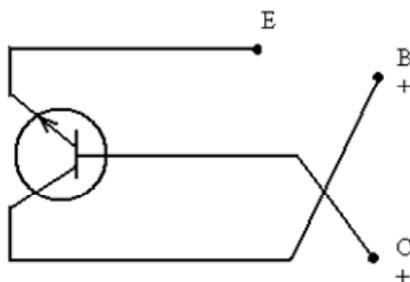


Рисунок 5. Схема подключения транзистора для получения семейства входных характеристик в схеме с общим эмиттером.

На приборе *CHARACTERISCOPE* установите ручки управления в следующие положения:

- переключатель "*HOR. VOLTS*" в положение 0,1 В/дел;
- переключатель "*VERT. CURRENT*" в положение – (20 – 50) мкА/дел.;
- переключатель "*BASE STEPS*" в положение "6";
- тумблер "*STEP POL*" в положение "+";
- кнопка "*ONE CURVE*" отжата;
- переключатель "*STEP AMPLITUDE*" в положение 1 В;
- переключатель "*COLLECTOR SUPPLY*" в положение – "+AC".

После того, как будут выставлены необходимые чувствительность, полярность и количество шагов, можно включить изображение, переведя переключатель "*OFF*" в соответствующее положение ← или →. В результате на экране должно появиться семейство ВАХ. Каждая кривая семейства соответствует постоянному значению выходного напряжения на гнезде "В".

Перерисуйте семейство ВАХ на миллиметровку в масштабе достаточно крупном для дальнейших вычислений (1 клетка на экране осциллографа  $\leq 1$  см).

2. Снимите семейства входных и выходных ВАХ в схеме с общей базой.

Для снятия семейства **выходных ВАХ** в схеме с общей базой поставьте переключатель "*OFF*" в нейтральное положение и подключите транзистор в соответствии с рисунком 6.

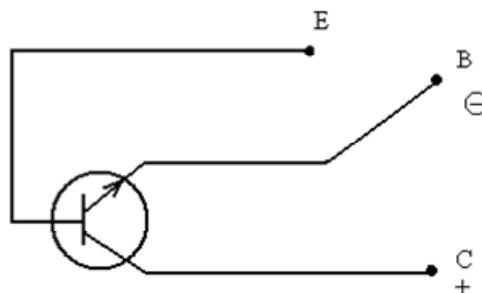


Рисунок 6. Схема подключения транзистора для получения семейства выходных ВАХ в схеме с общей базой.

На приборе *CHARACTERISCOPE* установите ручки управления в следующие положения:

- переключатель *"HOR. VOLTS"* в положение (0,5 – 1,0) В/дел;
- переключатель *"VERT. CURRENT"* в положение – 1 мА/дел.;
- переключатель *"BASE STEPS"* в положение "6";
- тумблер *"STEP POL"* в положение "-";
- кнопка *"ONE CURVE"* отжата;
- переключатель *"STEP AMPLITUDE"* в положение 1 мА;
- переключатель *"COLLECTOR SUPPLY"* в положение – "+AC".

Переведите переключатель *"OFF"* в соответствующее положение ← или →. В результате на экране должно появиться семейство ВАХ. Каждая кривая семейства соответствует постоянному значению входного тока на гнезде "В".

Произведите балансировку. После балансировки откорректируйте чувствительность вертикального отклонения так, чтобы семейство ВАХ занимало как можно большую часть экрана характериоскопа, и перерисуйте семейство ВАХ на миллиметровку в масштабе достаточно крупном для дальнейших вычислений (1 клетка на экране осциллографа  $\leq 1$  см).

Для снятия семейства **входных ВАХ** в схеме с общей базой поставьте переключатель *"OFF"* в нейтральное положение и подключите транзистор в соответствии с рисунком 7.

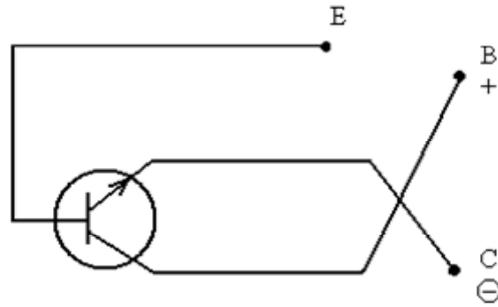


Рисунок 7. Схема подключения транзистора для получения семейства входных характеристик в схеме с общей базой.

На приборе *CHARACTERISCOPE* установите ручки управления в следующие положения:

- переключатель **"HOR. VOLTS"** в положение 0,1 В/дел;
- переключатель **"VERT. CURRENT"** в положение – 1 мА/дел.;
- переключатель **"BASE STEPS"** в положение "6";
- тумблер **"STEP POL"** в положение "+";
- кнопка **"ONE CURVE"** отжата;
- переключатель **"STEP AMPLITUDE"** в положение 1 В;
- переключатель **"COLLECTOR SUPPLY"** в положение – "-AC".

После того, как будут выставлены необходимые чувствительность, полярность и количество шагов, можно включить изображение, переведя переключатель **"OFF"** в соответствующее положение  $\leftarrow$  или  $\rightarrow$ . В результате на экране должно появиться семейство ВАХ. Каждая кривая семейства соответствует постоянному значению выходного напряжения на гнезде "В".

Перерисуйте семейство ВАХ на миллиметровку в масштабе достаточно крупном для дальнейших вычислений (1 клетка на экране осциллографа  $\leq 1$  см).

3. Рассчитайте графически  $h$ -параметры по формулам :

$$h_{11} = \Delta U_{ex} / \Delta I_{ex} \quad \text{при } \Delta U_{вых} = 0.$$

$$h_{12} = \Delta U_{ex} / \Delta U_{вых} \quad \text{при } \Delta I_{ex} = 0.$$

$$h_{21} = \Delta I_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вх}} \quad \text{при } \Delta U_{\text{вых}} = 0.$$

$$h_{22} = \Delta I_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вых}} \quad \text{при } \Delta I_{\text{вх}} = 0.$$

4. Результаты расчетов занесите в таблицу:

$h_{11} = r_{\text{вх}}$  - дифференциальное входное сопротивление.

$h_{12}$  = КОС - коэффициент обратной связи по напряжению.

$h_{21}$  - коэффициент передачи по току ( $\beta$  - в схеме с общим эмиттером,  $\alpha$  - в схеме с общей базой).

$r_i = 1 / h_{22}$  - дифференциальное внутреннее сопротивление.

Параметр	$r_{\text{вх}}$ , Ом	КОС	$\beta$ (ОЭ) $\alpha$ (ОБ)	$r_i$ , кОм
ОЭ				
ОБ				

## Приложение 1

### Описание характериоскопа.

Внешний вид характериоскопа приведен на рисунке П1-1.

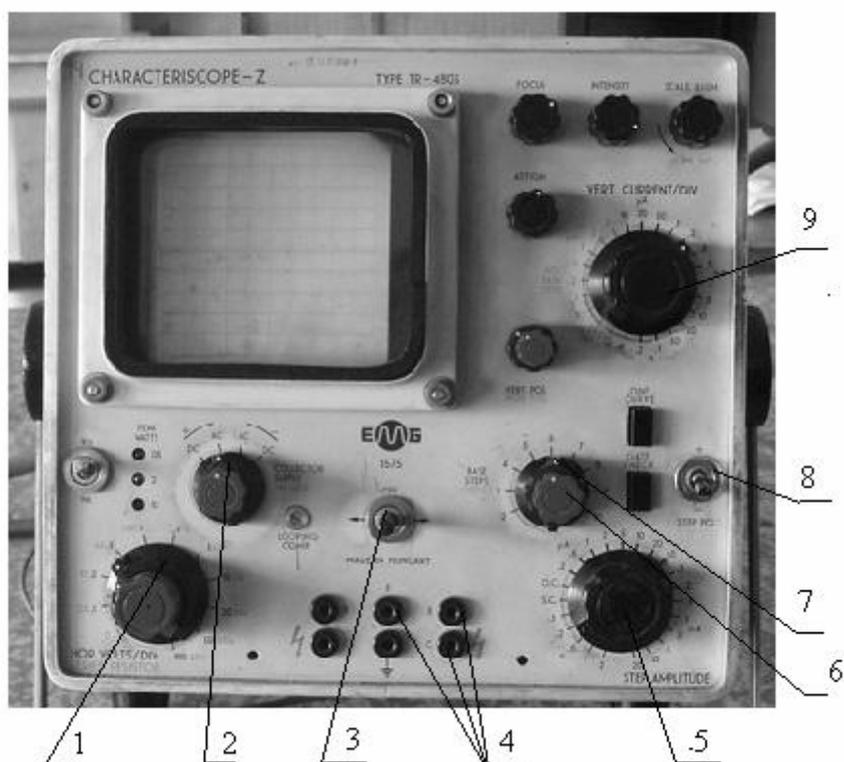


Рисунок П1-1. Внешний вид характериоскопа.

На передней панели характериоскопа кроме экрана находятся следующие органы управления:

1 – ручка **"HOR. VOLTS"** - регулировка чувствительности напряжения на гнезде "С" (чувствительность по горизонтальной оси, В/дел);

2 – переключатель **"COLLECTOR SUPPLY"** - полярность напряжения на клемме "С" (следует выставлять переменное напряжение – *AC*);

3 – трехпозиционный переключатель **"OFF"** - подключает исследуемый прибор к характериоскопу;

4 – клеммы для подключения исследуемых приборов к характериоскопу;

5 – переключатель **"STEP AMPLITUDE"** - регулировка шага изменения тока или напряжения, подаваемого на входную клемму "В";

6 – ручка **"OFFSET"** - установка начального тока или напряжения, подаваемого на входную клемму "В";

7 – переключатель **"STEP AMPLITUDE"** - количество шагов тока (или напряжения) на клемме "В" (соответствуют получаемому количеству кривых в семействе характеристик);

8 – тумблер **"STEP POL"** – полярность напряжения на клемме "В";

9–переключатель **"VERT. CURRENT"** - регулировка чувствительности по вертикальной оси (мА/дел или мкА/дел).

Кроме вышеуказанных элементов управления на передней панели характернографа расположено 6 гнезд, обозначенных "С", "В", "Е" (смотри рисунок П1-2).

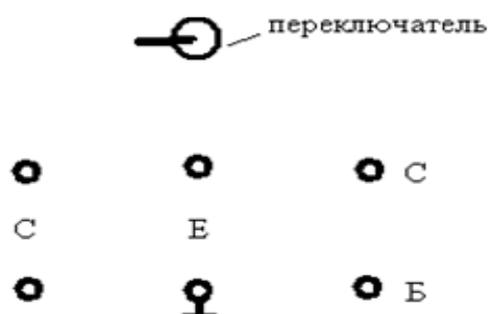


Рисунок П1-2. Схема входных гнезд характерноскопа.

Над гнездами расположен трёхпозиционный переключатель. При подсоединении транзистора переключатель должен находиться в среднем положении. Перевод переключателя в рабочее (правое или левое) положение можно производить после подсоединения транзистора и установки чувствительности. Для правильного подключения необходимо соответствующий штекер разъёма включить в верхнее гнездо "Е", а два других штекера либо в правые гнезда "С" и "В", либо в левые. Соответственно и переключатель при работе должен находиться в правом или левом положении.

Полярность на гнезде “С” выставляется ручкой (2), расположенной под экраном. Полярность на гнезде “В” выставляется тумблером (8).

На гнездо “С” подаётся пилообразное напряжение, это же напряжение вызывает горизонтальное отклонение луча на экране. Величина отклонения регулируется двойной ручкой (1). При переключении обе ручки необходимо вращать синхронно, так, чтобы метки на них совпадали.

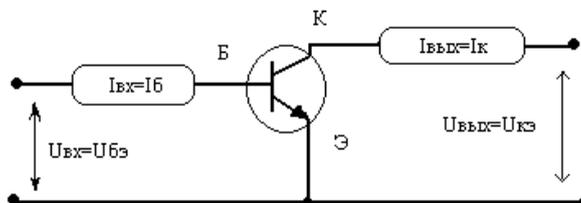
Ток через транзистор определяется по величине вертикального отклонения луча. Чувствительность отклонения регулируется ручкой (9). Шкала ручки обозначена чёрными (mA-миллиамперы) и красными ( $\mu$ A-микроамперы) цифрами. Обратите внимание на точку перед числом, если она есть; **.1V/div** – означает 0,1 Вольт на деление.

На гнездо “В” подаётся ток (правое положение ручки 5) или напряжение (левое положение ручки 5). Эти ток или напряжение остается постоянным при отклонении луча от крайнего левого до крайнего правого положения на экране. Затем оно изменяется на величину шага, определяемого ручкой (5). Количество шагов определяется ручкой (7).

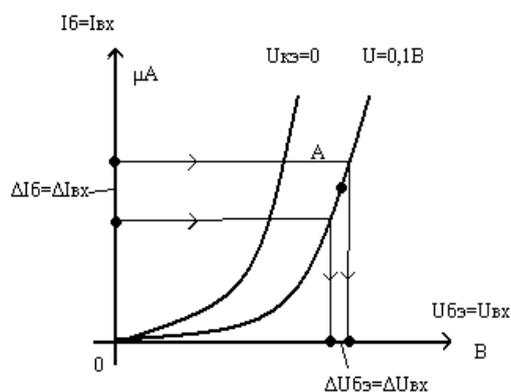
## Приложение 2

**Методика расчёта  $h$  - параметров транзистора по его статическим характеристикам.**

### *Схема с общим эмиттером*



Определение  $h_{11э}$ :

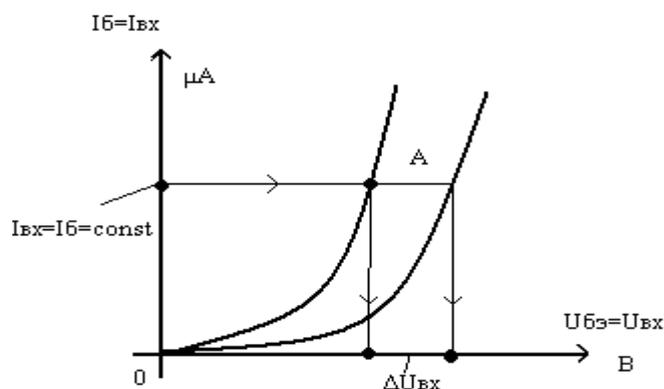


Кривая  $U_{кэ} = 0,1$  В соответствует условию  $\Delta U_{бвх} = 0$ .

$$h_{11э} = \Delta U_{бвх} / \Delta I_{бвх} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_{б} = r_{бэ}$$

$r_{бэ}$  - дифференциальное входное сопротивление.

Определение  $h_{12э}$ :

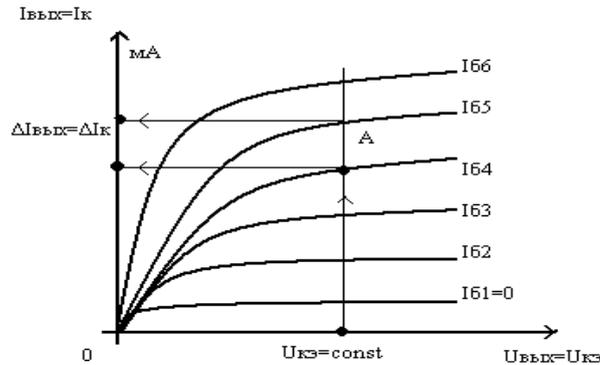


$$h_{12э} = \Delta U_{бвх} / \Delta U_{бвх} = \Delta U_{бэ} / \Delta U_{кэ} = KOC;$$

$$\Delta U_{кэ} = U_{кэ \text{ раб.точке}} - U_{кэ}(0).$$

КОС - коэффициент обратной связи по напряжению.

Определение  $h_{21Э}$ :



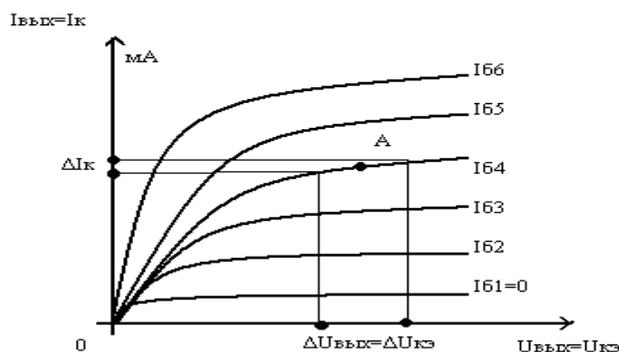
Выбираем ВАХ, соответствующую току базы, при котором определялись параметры  $h_{11}$  и  $h_{12}$ . Выбираем на ней рабочую точку А. Двигаясь по прямой  $\Delta U_{вых} = \text{const}$ , находим  $\Delta I_{вых}$  и  $\Delta I_{вх}$ .

$$h_{21Э} = \Delta I_{вых} / \Delta I_{вх} = \Delta I_{к} / \Delta I_{б} = \beta$$

$$\Delta I_{б} = I_{б5} - I_{б4}$$

$\beta$  - коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером.

Определение  $h_{22Э}$ :

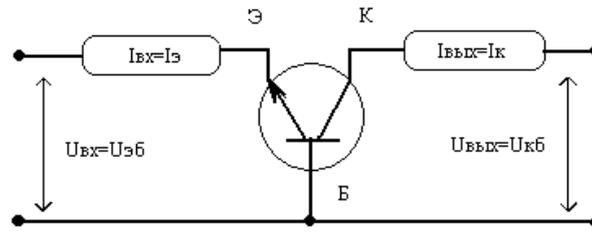


Рабочая точка А берется также, что и при определении  $h_{21}$ . На характеристике  $I_{б} = \text{const}$ , проходящей через точку А, берем некоторый отрезок и определяем  $\Delta I_{вых}$  и  $\Delta U_{вых}$ .

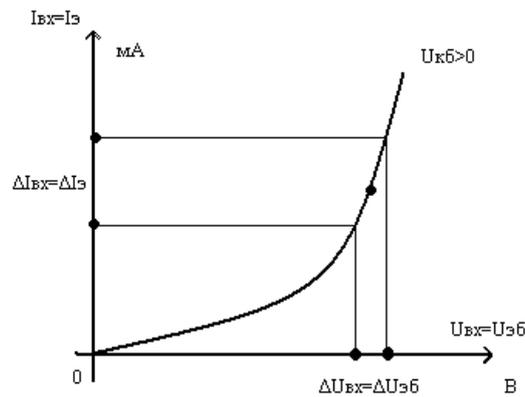
$$h_{22Э} = \Delta I_{вых} / \Delta U_{вых} = \Delta I_{к} / \Delta U_{кэ} = 1/r_i$$

$r_i$  - дифференциальное внутреннее сопротивление.

## Схема с общей базой



Определение  $h_{11Б}$ :

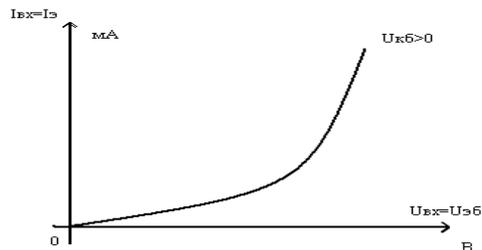


Выберем рабочую точку А на прямолинейной части входной характеристике. На характеристике  $U_{кб} = \text{const}$ , проходящей через точку А, берем некоторый отрезок и определяем  $\Delta I_{вх}$  и  $\Delta U_{вх}$ .

$$h_{11Б} = \Delta U_{вх} / \Delta I_{вх} = \Delta U_{эб} / \Delta I_{э} = r_{вх}$$

$r_{вх}$ -дифференциальное входное сопротивление.

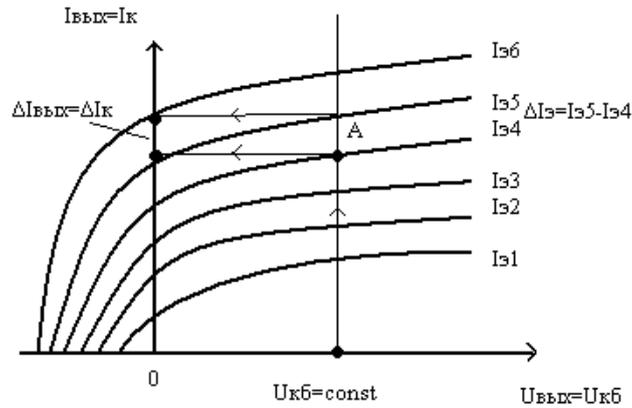
Определение  $h_{12Б}$ :



$$h_{12Б} = \Delta U_{вх} / \Delta U_{вых} = \Delta U_{эб} / \Delta U_{кб} = \text{КОС}$$

Из-за недостатка экспериментальной информации - получена всего одна кривая - найти  $h_{12}$  нельзя.

### Определение $h_{21Б}$ :

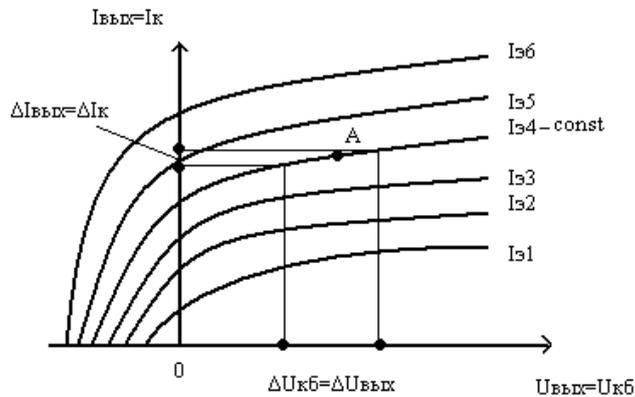


Выбираем ВАХ, соответствующую току эмиттера, при котором определялся параметр  $h_{11}$ . Выбираем на ней рабочую точку А. Двигаясь по прямой  $U_{кб} = \text{const}$ , находим  $\Delta I_{вых}$  и  $\Delta I_{кв}$ .

$$h_{21Б} = \Delta I_{вых} / \Delta I_{кв} = \Delta I_{к} / \Delta I_{э} = \alpha;$$

$\alpha$ -коэффициент передачи по току в схеме с общей базой.

### Определение $h_{22Б}$ :



Рабочая точка А берется таже, что и при определении  $h_{21Б}$ . На характеристике  $I_{э} = \text{const}$ , проходящей через точку А, берем некоторый отрезок и определяем  $\Delta I_{вых}$  и  $\Delta U_{кб}$ .

$$h_{22Б} = \Delta I_{вых} / \Delta U_{кб} = \Delta I_{к} / \Delta U_{кб} = 1/r_i$$

$r_i = 1/h_{22Б}$  - дифференциальное внутреннее сопротивление.