

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы: изучить принцип действия и характеристики биполярных транзисторов. Ознакомиться с методикой снятия вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов.

Основные теоретические сведения

Биполярными транзисторами называют полупроводниковые приборы с двумя или более взаимодействующими электрическими $p-n$ переходами и тремя или более выводами. Усилительные свойства биполярных транзисторов обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда обеих полярностей.

Инжекция – нагнетание носителей заряда через $p-n$ переход, смещенный в прямом направлении, в область, где они являются неосновными.

Экстракция – извлечение неосновных носителей заряда через $p-n$ переход при его обратном смещении.

1. Принцип действия биполярного транзистора

В зависимости от порядка чередования электропроводности областей различают транзисторы $p-n-p$ и $n-p-n$ типа. Условные обозначения биполярных транзисторов показаны на рис.4.1.



Рисунок 4.1 – Схематическое изображение транзисторов

При подключении напряжения к транзистору один $p-n$ переход включают в прямом смещении, другой – в обратном. Переход, смещенный в прямом направлении, называют эмиттерным, а соответствующий наружный слой полупроводника и вывод из него – *эмиттером*. Переход, смещенный в обратном направлении, назы-

вают коллекторным, а соответствующий наружный слой полупроводника и вывод из него – *коллектором*. Средний слой полупроводника называют *базой*.

Для рассмотрения принципа работы биполярного транзистора на рис.4.2 приведена функциональная схема транзистора *p-n-p* типа.

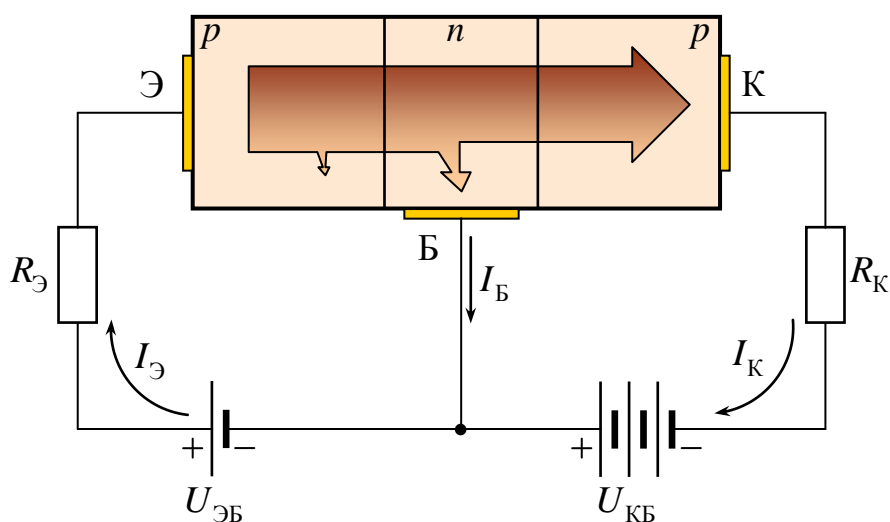


Рисунок 4.2 – Функциональная схема биполярного транзистора

При подключении к транзистору напряжений $U_{ЭБ}$ и $U_{КБ}$, причем, как правило $U_{ЭБ} \ll U_{КБ}$, через эмиттерный переход будет осуществляться инжекция дырок из эмиттера в область базы. Одновременно электроны базы будут проходить в область эмиттера. В эмиттерной цепи потечет ток $I_Э$ по пути $+U_{ЭБ} \rightarrow R_Э \rightarrow Э \rightarrow Б \rightarrow -U_{ЭБ}$.

Поскольку концентрация носителей заряда в базе значительно меньше, чем в эмиттере число дырок, инжектированных из эмиттера в базу, во много раз превышает число электронов, движущихся в противоположном направлении, поэтому ток через эмиттерный переход в основном обусловлен дырками.

Инжектированные через эмиттерный переход дырки проникают вглубь базы, некоторые дырки рекомбинируют с электронами, однако, из-за малой концентрации свободных электронов в базе и малой ширины базы абсолютное большинство дырок достигает коллекторного *p-n* перехода.

Вблизи коллектора дырки начинают взаимодействовать с электрическим полем коллекторного перехода. Это поле для дырок является ускоряющим, поэтому они в результате экстракции быстро

втягиваются в коллектор и участвуют в создании тока коллектора $+U_{КБ} \rightarrow -U_{ЭБ} \rightarrow +U_{ЭБ} \rightarrow R_{Э} \rightarrow Э \rightarrow Б \rightarrow К \rightarrow R_{К} \rightarrow -U_{КБ}$. Те дырки, которые все же рекомбинируют с электронами в области базы, участвуют в создании тока базы, проходящего по цепи $+U_{ЭБ} \rightarrow R_{Э} \rightarrow Э \rightarrow Б \rightarrow -U_{ЭБ}$. Таким образом, $I_{Э} = I_{Б} + I_{К}$.

Связь между приращением эмиттерного (входного) и коллекторного (выходного) токов характеризуется *коэффициентом передачи тока эмиттера*

$$\alpha = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Э}} \quad (\text{обычно } \alpha = 0,95 \dots 0,99).$$

В рассмотренном случае база является общим электродом для эмиттерной и коллекторной цепей. Такая схема включения транзисторов называется схемой с общей базой (ОБ). Однако схему ОБ применяют редко из-за низкого коэффициента передачи тока.

Наиболее распространенной схемой включения транзистора является схема с общим эмиттером (ОЭ) (рис.4.3), в которой входным током является ток базы, а выходным – ток коллектора.

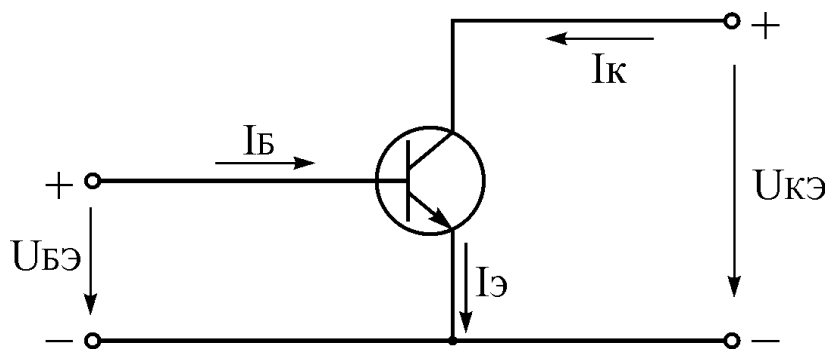


Рисунок 4.3 – Включение биполярного транзистора по схеме с ОЭ

Коэффициент передачи тока для этой схемы

$$\beta = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \quad (\text{обычно } \beta = 10 \dots 1000).$$

Основные параметры транзистора определяются по его вольт-

амперным характеристикам. Зависимость $I_B = f(U_{БЭ})$ при постоянном напряжении $U_{КЭ}$ называют *входной* характеристикой, а зависимость тока $I_K = f(U_{КЭ})$ при постоянном токе I_B называют *выходной* характеристикой (рис.4.4).

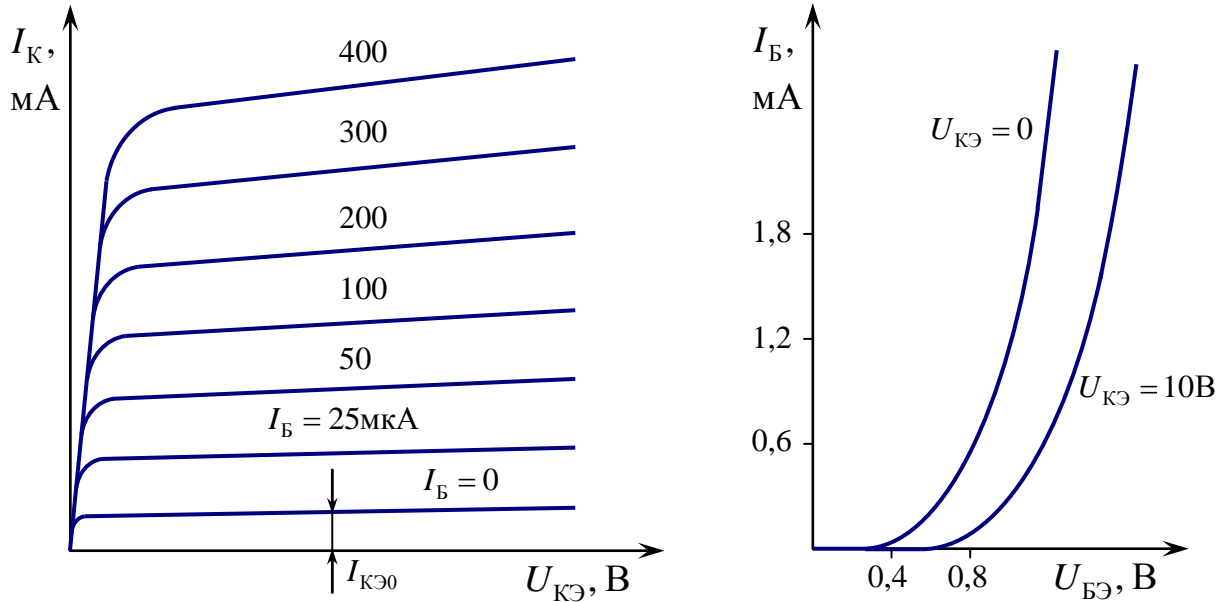


Рисунок 4.4 – ВАХ транзистора для схемы включения с ОЭ

2. Транзистор, как активный линейный четырехполюсник

Транзистор можно представить в виде активного линейного четырёхполюсника, на входе которого действует напряжение U_1 и ток I_1 , а на выходе – напряжение U_2 и ток I_2 (рис.4.5).

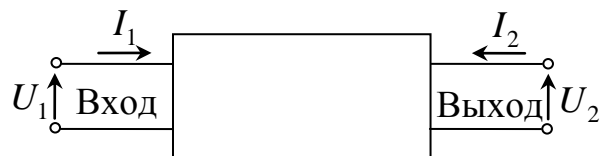


Рисунок 4.5 – Транзистор, как активный четырехполюсник

Если в качестве независимых переменных принять I_1 и U_2 , а в качестве зависимых I_2 и U_1 , то можно записать

$$\begin{cases} U_1 = f(I_1, U_2) ; \\ I_2 = f(I_1, U_2) . \end{cases}$$

После дифференцирования выражения для I_1 и U_2 по переменным I_2 и U_1 и введения обозначений $h_{11} = \frac{\partial U_1}{\partial I_1}$; $h_{12} = \frac{\partial U_1}{\partial U_2}$; $h_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial I_1}$;

$h_{22} = \frac{\partial I_2}{\partial U_2}$ система примет вид

$$\begin{cases} u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2; \\ i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2. \end{cases}$$

Коэффициенты h_{11} , h_{12} , h_{21} и h_{22} называются h -параметрами транзистора, каждый из которых имеет определенный физический смысл:

$h_{11} = \frac{u_1}{i_1}$ – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе для переменной составляющей тока (т.е. при $U_2 = \text{const}$);

$h_{12} = \frac{u_1}{u_2}$ – коэффициент обратной связи по напряжению при разомкнутом входе для переменной составляющей тока (т.е. при $I_1 = \text{const}$);

$h_{21} = \frac{i_2}{i_1}$ – коэффициент передачи тока при коротком замыкании выхода по переменному току (т.е. при $U_2 = \text{const}$);

$h_{22} = \frac{i_2}{u_2}$ – выходная проводимость при разомкнутом входе для переменной составляющей тока (т.е. при $I_1 = \text{const}$).

h -параметры можно определить по статическим характеристикам транзистора. Определение параметра h_{11} осуществляется по входной характеристике (рис.4.6)

$$h_{11} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{U_{БЭ}^B - U_{БЭ}^A}{I_{БЭ}^B - I_{БЭ}^A} + \frac{U_{БЭ}^A - U_{БЭ}^C}{I_{БЭ}^A - I_{БЭ}^C} \right), \text{ при } U_{КЭ} = \text{const}.$$

Для определения коэффициента обратной связи по напряжению h_{12} необходимо иметь несколько входных характеристик (рис.4.7).

$$h_{12} = \frac{U_{БЭ}^B - U_{БЭ}^A}{U_{КЭ}^B - U_{КЭ}^A}, \text{ при } I_B = \text{const.}$$

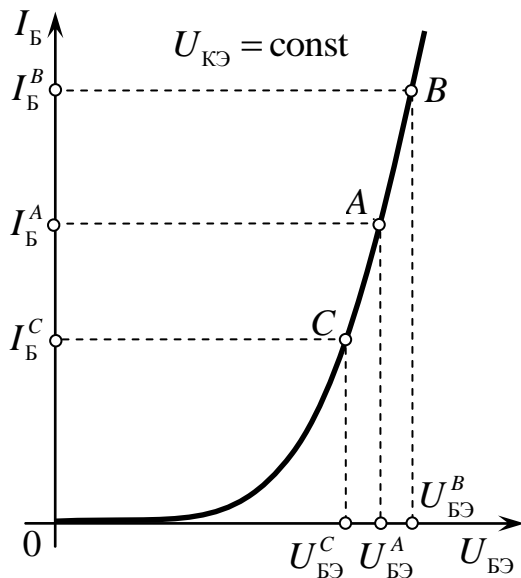


Рисунок 4.6 – Определение параметра h_{11}

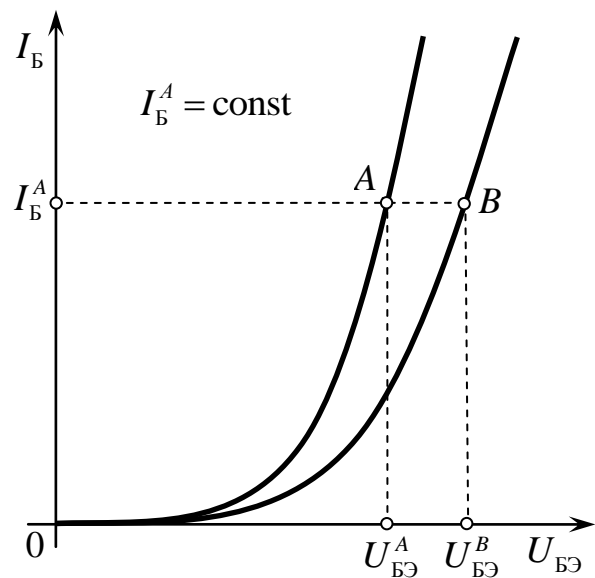


Рисунок 4.7 – Определение параметра h_{12}

Для определения h_{21} и h_{22} используют выходные характеристиками транзистора $I_K = f(U_{КЭ})$.

Для определения коэффициента передачи тока базы h_{21} задают положительное и отрицательное смещение тока базы при постоянном значении $U_{КЭ}$ (рис.4.8), таким образом

$$h_{21} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{I_K^B - I_K^A}{I_B^B - I_B^A} + \frac{I_K^A - I_K^C}{I_B^A - I_B^C} \right), \text{ при } U_{КЭ} = \text{const.}$$

Для определения выходной проводимости h_{22} в схеме с общим эмиттером задают положительное и отрицательное приращения коллекторного напряжения при постоянном значении I_B (рис.4.9). Параметр h_{22} может быть получен из выражения

$$h_{22} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{I_K^B - I_K^A}{U_{КЭ}^B - U_{КЭ}^A} + \frac{I_K^A - I_K^C}{U_{КЭ}^A - U_{КЭ}^C} \right), \text{ при } I_B = \text{const.}$$

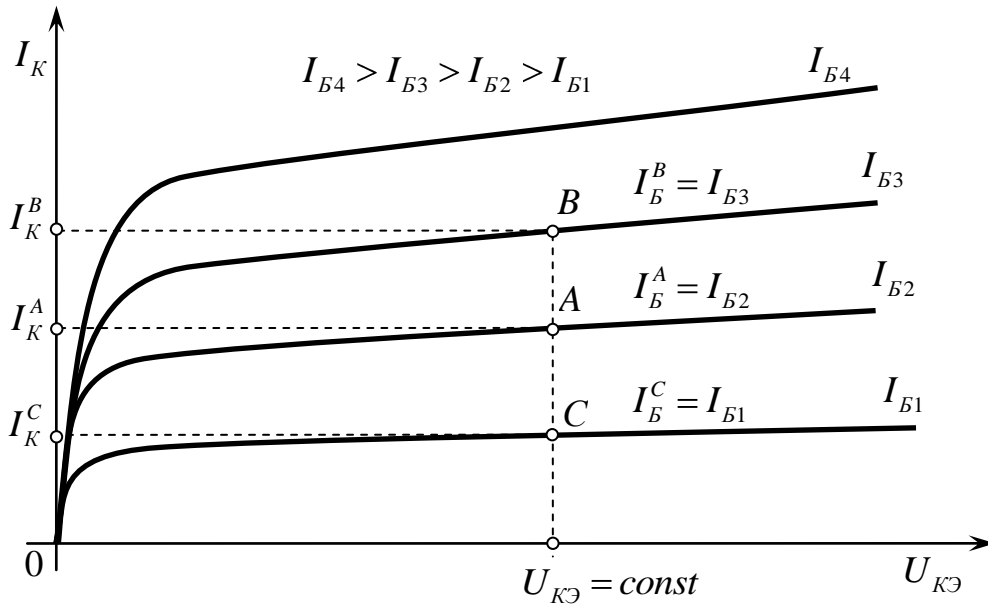


Рисунок 4.8 – Определение параметра h_{21}

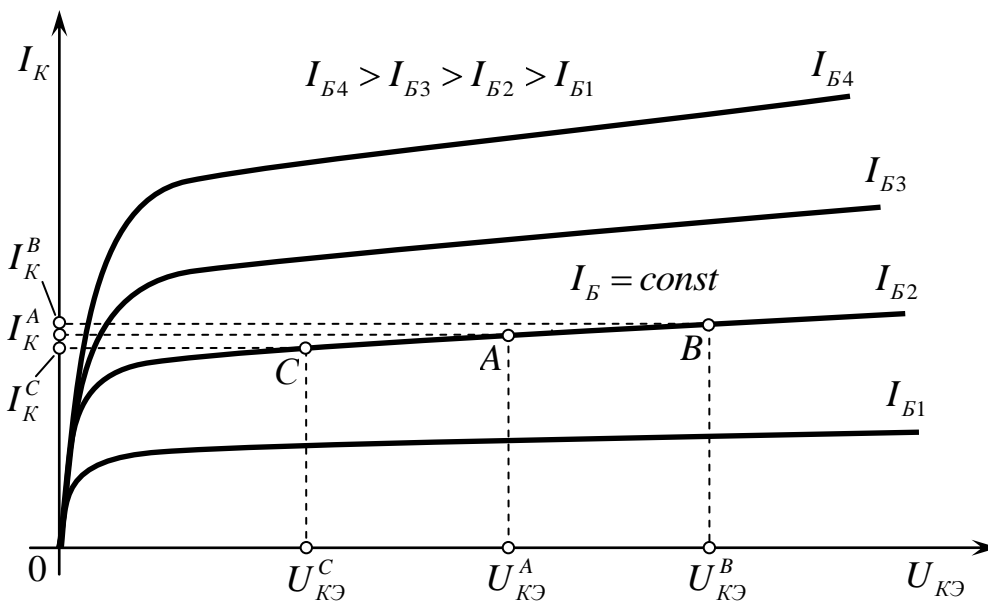


Рисунок 4.9 – Определение параметра h_{22}

Точки B и C выбираются в каждом конкретном случае с учетом имеющихся в наличии статических характеристик данного транзистора исходя из удобства построений и расчетов.

Порядок выполнения работы

Перечень приборов:

- модуль для исследования характеристик транзисторов;
- модуль делителя напряжения;
- универсальный источник питания;
- комбинированный измерительный прибор – 2 шт.

1. Исследование входных характеристик транзистора

1.1 Подготовить источник питания к работе:

- ручки регуляторов напряжения и тока 1 и 2 канала повернуть против часовой стрелки до упора;
- кнопки «СИНХРОНИЗАЦИЯ» установить в режим «НЕЗАВИСИМО»;
- включить источник питания (кнопка «POWER»);
- настроить ограничитель тока 1 канала источника питания:
 - соединить клеммы «+» и «-» 1-го канала проводником;
 - повернуть ручку «НАПРЯЖЕНИЕ» по часовой стрелке приблизительно на 90° ;
 - переключатель индикатора установить в положение «АМР»;
 - ручкой «ТОК» выставить ограничение тока 0,1 А;
 - снять проводник и вернуть переключатель индикатора в положение «VOLT»;
- ручкой «НАПРЯЖЕНИЕ» установить напряжение 1-го канала источника питания 3 В.
- аналогичным образом настроить ограничитель тока 2 канала источника питания на значение 0,25 А.
- ручкой «НАПРЯЖЕНИЕ» установить напряжение 2-го канала источника питания 0 В.

1.2 Собрать схему, согласно рис.4.10. При этом ручка потенциометра $R_{д2}$ в исходном состоянии должна быть выкручена против часовой стрелки до упора.

1.3 Плавно вращая ручку потенциометра $R_{д2}$, фиксировать напряжение $U_{БЭ}$ (V_1), согласно таблицы 4.1. Соответствующие значения тока базы I_B занести в таблицу 4.1.

1.4 Вернуть ручку потенциометра $R_{д2}$ в исходное положение. Ручкой «НАПРЯЖЕНИЕ» установить напряжение 2-го канала ис-

точника питания 5 В.

1.5 Повторить опыт для $U_{КЭ} = 5 В$, согласно пункта 1.3.

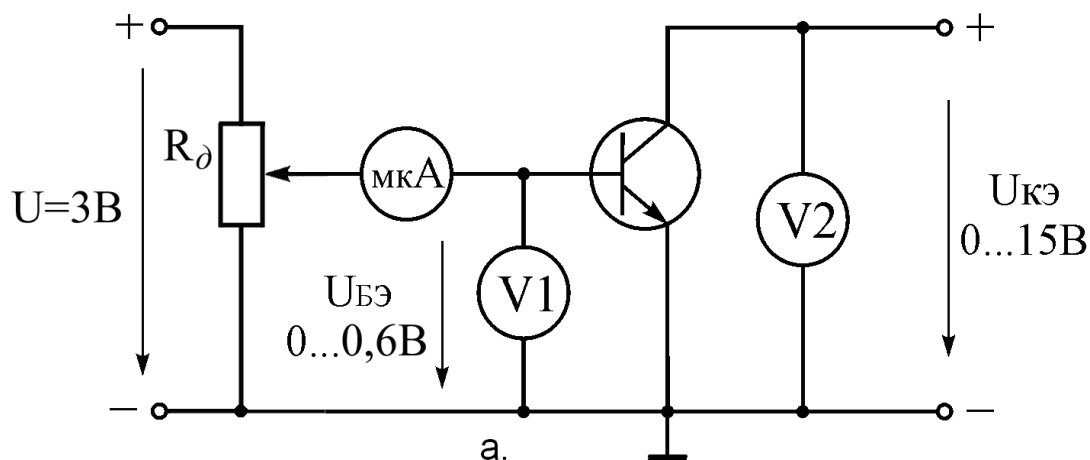


Рисунок 4.10 – Схема для снятия входных характеристик биполярного транзистора

Таблица 4.1

Результаты измерений входных характеристик транзистора

| $U_{БЭ}, В$ | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | $U_{КЭ}, В$ |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
| $I_{Б1}, мкА$ | | | | | | | 0 |
| $I_{Б2}, мкА$ | | | | | | | 5В |

1.6 Вернуть ручку потенциометра $R_{д2}$ в исходное положение. Ручкой «НАПРЯЖЕНИЕ» установить напряжение 2-го канала источника питания 0 В.

2. Исследование выходных характеристик транзистора

2.1 Собрать схему, согласно рис.4.11. При этом ручка потенциометра $R_{д2}$ в исходном состоянии должна быть выкручена против часовой стрелки до упора.

2.2 Плавно вращая ручку потенциометра $R_{д2}$, установить ток базы $I_B = 200 мкА$.

2.3 Плавно вращая ручку «НАПРЯЖЕНИЕ» 2-го канала источника питания, фиксировать напряжение $U_{КЭ} (V)$ согласно таблицы 4.2., при этом каждый раз необходимо поддерживать ток I_B в заданном значении при помощи потенциометра $R_{д2}$. Соответствующие значения тока коллектора I_K занести в таблицу 4.2.

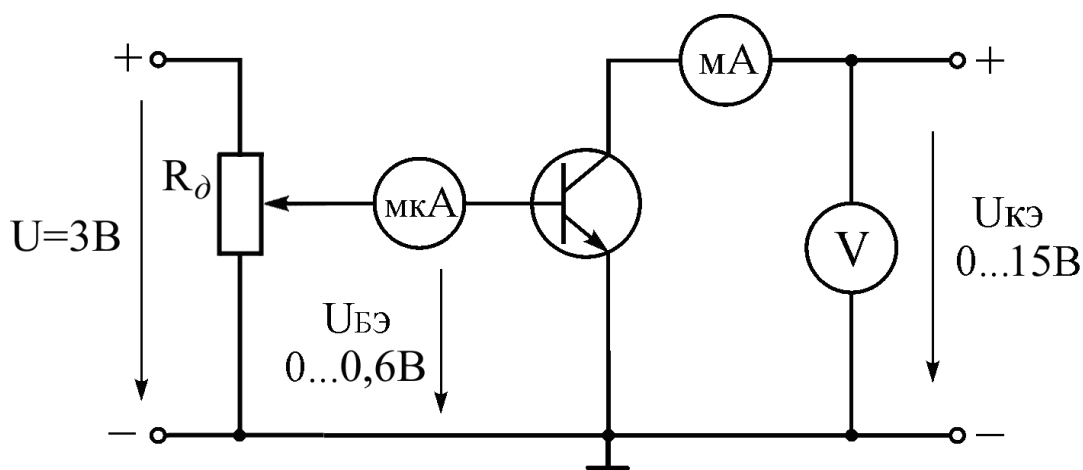


Рисунок 4.11 – Схема для снятия выходных характеристик биполярного транзистора

- 2.4 Ручкой «НАПРЯЖЕНИЕ» сбросить напряжение 2-го канала источника питания в 0.
- 2.5 Повторить опыт для тока базы 300 мкА и 400 мкА согласно пунктов 2.2-2.3.

Таблица 4.2

Результаты измерений выходных характеристик транзистора

| $U_{кэ}, В$ | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 1 | 3 | 5 | 10 | $I_{б}, мкА$ |
|--------------|-----|-----|-----|-----|---|---|---|----|--------------|
| $I_{к1}, мА$ | | | | | | | | | 200 |
| $I_{к2}, мА$ | | | | | | | | | 300 |
| $I_{к3}, мА$ | | | | | | | | | 400 |

3. Определение h -параметров биполярного транзистора

- 3.1 Используя данные таблицы 4.1 и таблицы 4.2, построить входные $I_{б} = f(U_{бэ})$ и выходные $I_{к} = f(U_{кэ})$ характеристики исследуемого транзистора.
- 3.2 Для полученной ВАХ определить параметры h_{11} , h_{12} , h_{21} и h_{22} , используя расчетные зависимости, приведенные в теоретических сведениях. Положение рабочей точки А выбирать на середине линейного участка характеристики.

Контрольные вопросы к работе

1. Объяснить принцип действия биполярного транзистора.
2. Что такое инжекция?
2. Что такое экстракция?
4. Сколько областей полупроводника и сколько $p-n$ переходов содержит биполярный транзистор и как они называются?
5. Какие существуют основные схемы включения биполярного транзистора. Их достоинства и недостатки?
6. Какой физический смысл h -параметров транзистора?
7. Что характеризуют коэффициенты α и β , какая между ними взаимосвязь?