

**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского**

**Национальный исследовательский университет**

**Учебно-научный и инновационный комплекс**

"Новые многофункциональные материалы и нанотехнологии"

**Основная образовательная программа**

210100.62 «Электроника и наноэлектроника», общий профиль, квалификация  
(степень) бакалавр

**Учебно-методический комплекс по дисциплине**

«Теоретические основы электротехники»

**Дорохин М.В., Кудрин А.В.**

**РАСЧЁТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА БИПОЛЯРНОМ  
ТРАНЗИСТОРЕ В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ**

Электронное учебно-методическое пособие

Нижний Новгород

2012

РАСЧЁТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ. Дорохин М.В., Кудрин А.В. Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 84 с.

В учебно-методическом пособии рассмотрены свойства полупроводниковых биполярных транзисторов. Показаны основные схемы включения транзисторов, описаны основные характеристики. Также рассмотрены приборы на основе биполярных транзисторов – усилители низкой частоты. Описаны физические принципы работы усилителей, детально рассмотрена схема усилителя с общим эмиттером. Даны рекомендации по выбору рабочей точки и расчёту параметров схемы усилителя с общим эмиттером. Даны методические рекомендации по выполнению экспериментальных заданий пособия с использованием платы NI ELVIS II.

Электронное учебно-методическое пособие предназначено для студентов ННГУ, обучающихся по направлению подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника», изучающих курс «Теоретические основы электротехники».

## Оглавление

Введение .....	4
1. Теоретические основы работы биполярного транзистора .....	6
1.1. Полупроводниковый р-п переход .....	6
1.2. Биполярный транзистор .....	13
1.2.1. Общие сведения .....	13
1.2.2. Статические характеристики биполярного транзистора .....	15
1.2.3 Моделирование статические характеристики биполярного транзистора .....	28
1.2.3. Транзистор как линейный четырёхполюсник .....	35
1.3. Экспериментальная часть .....	39
1.3.1. Исследование статических характеристик транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером .....	39
1.3.2. Исследование выходных характеристик транзистора .....	42
1.3.3. Определение параметров транзистора .....	44
1.4. Контрольные вопросы .....	47
2. Расчёт и исследование усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе, включённом по схеме с общим эмиттером .....	48
2.1. Схемы усилителя .....	49
2.1.1. Схема с общей базой .....	49
2.1.2 Схемы с общим эмиттером и общим коллектором .....	54
2.2. Схема усилителя низкой частоты с общим эмиттером .....	58
2.3. Частотные характеристики транзистора .....	64
2.4. Экспериментальная часть .....	68
2.4.1. Расчёт усилителя с общим эмиттером .....	68
2.4.2. Моделирование схемы усилителя низкой частоты .....	73
2.4.3. Монтаж схемы усилителя .....	75
2.4.4. Применение генератора импульсов и осциллографа .....	77
2.4.5. Исследование частотной зависимости коэффициента усиления .....	80
2.5. Контрольные вопросы .....	82
3. Список цитированной литературы .....	84

## **Введение**

Транзисторы широко используются в современной электронике и микроэлектронике. Они являются основным элементом всех аналоговых и цифровых схем. На базе транзисторов выполняются практически все радиотехнические функции: усиление, сравнение, преобразование радиотехнических сигналов, все логические операции, а также хранение информации. Отличительной особенностью теории транзисторов и транзисторных схем является незначительное развитие в течение последних 20 лет. Это объясняется тем, что базовые идеализированные элементы электроники, а также методы и подходы к решению задач электроники полностью разработаны. Развитие обусловлено появлением новых активных (туннельный диод [1], диод на гетероструктурах [2]) и пассивных (мемристор [3]) элементов, а также совершенствованием технологии изготовления самих транзисторов. В середине 20-го века транзисторы представляли собой дискретный прибор сравнительно больших размеров, они изготавливались поштучно и встраивались в электрические схемы в качестве отдельного независимого элемента. В настоящее время с применением группового метода и планарной технологии на одном чипе может одновременно изготавливаться до десятка миллиардов транзисторов, а размеры одного транзистора измеряются десятками нанометров. Такие транзисторы являются неотделимым элементом интегральных микросхем, выполняющих сложные, законченные функции [4]. И в том и в другом случае для реализации какой-либо функции электронного устройства формируются электрические схемы, работающие по законам теории цепей. С точки зрения принципов радиоэлектроники, отличие дискретных приборов от интегральных учитывается при составлении эквивалентных электрических схем. В силу этого, для изучения физических принципов работы транзистора целесообразно рассмотрение дискретного прибора, не являющегося элементом интегральной схемы.

В современной микроэлектронике активно используется два вида транзисторов: биполярные транзисторы и полевые транзисторы. В настоящем пособии рассмотрены свойства биполярных транзисторов.

В первой части пособия рассматриваются основы функционирования биполярного транзистора, его основные характеристики и режимы работы. Во второй части пособия рассматривается электрическая схема и принцип работы одного из основных устройств на базе транзистора: усилителя низкой частоты.

Пособие предназначено для студентов старших курсов, изучающих предмет «Основы радиоэлектроники» или ведущих научную работу в соответствующей области.

## 1. Теоретические основы работы биполярного транзистора

В первой главе рассмотрены теоретические основы работы биполярного транзистора. Существует большое количество вариантов технологии и конструкций транзистора, но все они имеют одинаковое построение: чередование  $p$  и  $n$ -областей полупроводника. На первом этапе рассмотрения работы биполярного транзистора целесообразно рассмотреть свойства  $p$ - $n$  переходов и полупроводниковых диодов с  $p$ - $n$  переходом.

### 1.1. Полупроводниковый $p$ - $n$ переход

Подробная теория  $p$ - $n$  перехода, включая свойства полупроводников, являющихся их основой, изложена в [5,6]. В рамках настоящего пособия достаточно рассмотреть основные принципы физики полупроводников, определяющих формирования и свойства  $p$ - $n$  перехода. С точки зрения электропроводности полупроводники можно разделить на три типа:

- изолирующие полупроводники (практически не проводящие электрический ток);
- полупроводники с **электронной** проводимостью – переносят электрический ток отрицательно-заряженными частицами – **электронами**. Такие полупроводники называются полупроводниками  **$n$ -типа**.
- полупроводники с **дырочной** проводимостью (полупроводники  **$p$ -типа**). Такие полупроводники переносят электрический ток положительно-заряженными частицами – **дырками**<sup>1</sup>.

*Чистые полупроводники, не содержащие примесь, являются, как правило, изолирующими. Для появления носителей заряда, проводящих ток, необходимо ввести примесь: донорную для электронной проводимости и акцепторную – для дырочной.*

---

<sup>1</sup> Дырка – это квазичастица, которая в полупроводниках и ряде металлов переносит положительный заряд в направлении вдоль электрического поля. Фактически дырка – это свободное заряженное состояние для электрона в валентной зоне полупроводника. Движение электронов по этим состояниям против электрического поля полностью эквивалентно движению дырок вдоль поля.

Подчеркнём, что в полупроводниках *n*-типа основным видом носителей заряда являются электроны, а в полупроводниках *p*-типа – дырки. Тем не менее, в каждом полупроводнике присутствуют в небольшой концентрации носители другого знака (электроны в дырочных полупроводниках и дырки в электронных). Существует соотношение, связывающее концентрацию электронов и дырок в полупроводнике:

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (1.1)$$

, здесь *n*-концентрация электронов, *p* – концентрация дырок,  $n_i^2$  – константа, зависящая от материала полупроводника. Из формулы (1.1) следует, что чем больше в полупроводнике электронов, тем меньше дырок и наоборот. Существует понятие «основные» и «неосновные» носители. Основными называются носители, концентрация которых выше.

#### **Контакт областей полупроводника *n* и *p*-типа проводимости.**

В технологии полупроводниковых приборов распространён случай, когда области с разным типом проводимости приводятся в контакт. Рассмотрение физических явлений, происходящих в результате контакта, выполнено в учебниках [5,6]. В рамках настоящего пособия рассмотрим основные свойства такого контакта (рисунок 1.1).

1) На границе контакта образуется встроенное электрическое поле, препятствующее движению электронов в дырочный полупроводник и дырок в электронный. Природа электрического поля – ионизованная примесь. Электрическое поле образует потенциальный барьер.

2) В результате контакта образуется некоторая область полупроводника<sup>2</sup>, в которой отсутствуют носители заряда (присутствует нескомпенсированная ионизованная примесь). Эта область называется

---

<sup>2</sup> Размеры области зависят от концентрации носителей заряда в *p*- и *n*-частях полупроводника.

областью объёмного заряда (или областью пространственного заряда – ОПЗ)<sup>3</sup>.

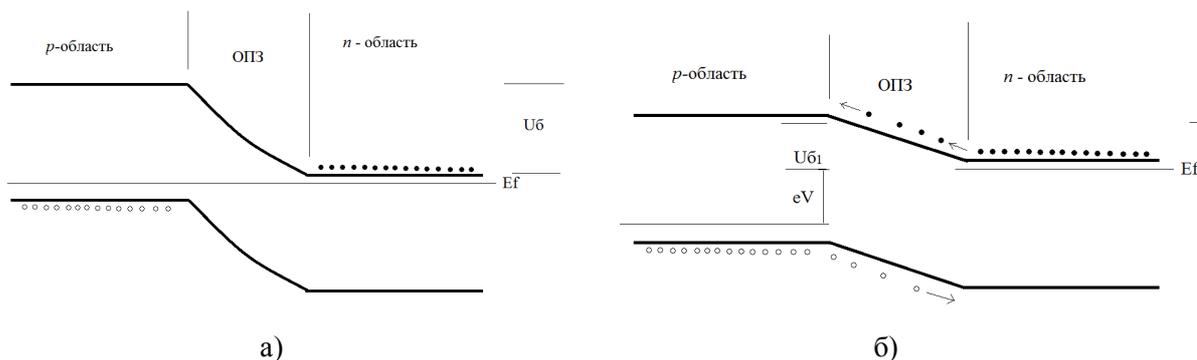


Рисунок 1.1. – Зонная диаграмма  $p$ - $n$  перехода без смещения (а) и при прямом смещении (б).  $E_f$  – уровень Ферми,  $e$  – элементарный заряд,  $U_b$  – высота потенциального барьера,  $V$  – приложенное напряжение.

3) Вне ОПЗ со стороны полупроводника  $n$ -типа сохраняются электроны, со стороны полупроводника  $p$ -типа – дырки (аналогично случаю без контакта).

На основе  $p$ - $n$  перехода разработан полупроводниковый прибор – диод. Это полупроводниковый прибор, включающий в себя  $p$ - $n$  переход и металлические омические контакты, сформированные на поверхностях полупроводника  $p$  и  $n$  типа, не являющихся поверхностью  $p$ - $n$  перехода.

Контакты необходимы для инжекции носителей заряда в  $p$  и  $n$  области от источника питания и образования замкнутой цепи для протекания тока. Геометрические варианты формирования контактов в диоде показаны на рисунке 1.2. Термин «омические» означает, что 1) сопротивление контакта много меньше сопротивления  $n$  или  $p$  областей полупроводника; 2) сопротивление контакта не зависит от полярности приложенного к нему напряжения.

<sup>3</sup> В целом полупроводник электронейтрален. Ионизованная примесь всегда скомпенсирована свободными носителями заряда. В области объёмного заряда нет свободных носителей, поэтому остаётся заряд ионизованной примеси (положительного и отрицательного знака).

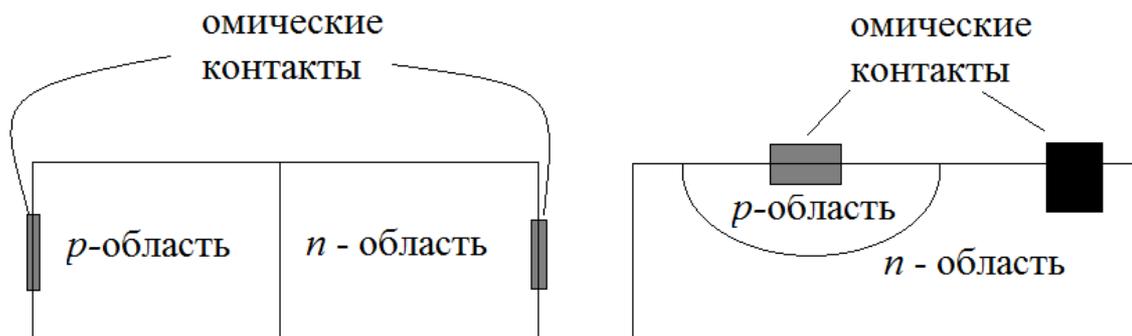


Рисунок 1.2. – Схемы диодов с  $p$ - $n$  переходом

### Вольтамперная характеристика диода с $p$ - $n$ переходом

Общее выражение для зависимости тока от напряжения диода с  $p$ - $n$  переходом даётся формулой [5]

$$I = I_S \left( \exp\left(\frac{|e|U}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1.2)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $n$  – так называемый коэффициент неидеальности,  $I_S$  – ток насыщения, зависящий от параметров полупроводника. Ток насыщения также называют тепловым током.

Точное выражение для тока насыщения может быть найдено в [5], в рамках настоящего рассмотрения достаточно считать этот параметр постоянной величиной. Рассмотрим выражение (1.2):

1) Знак  $U$  может быть положительным и отрицательным, принято считать, что  $U > 0$  соответствует **прямому смещению диода**. При **прямом смещении** на область полупроводника  $p$ -типа подаётся положительный потенциал относительно области  $n$ -типа проводимости<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Простейшее правило, позволяющее установить вид смещения на диоде: при прямом смещении знак напряжения на области полупроводника должен совпадать со знаком основных носителей заряда. Т.е., поскольку основными носителями для полупроводника  $p$ -типа являются дырки, для прямого смещения на полупроводник  $p$ -типа необходимо подать положительный потенциал.

2) В случае прямого смещения ток диода экспоненциально нарастает с увеличением напряжения. Уже при сравнительно небольшом прямом напряжении экспонента в формуле (1.2) становится много больше единицы. Формула (1.2), соответственно, преобразуется в

$$I = I_s \left( \exp \left( \frac{|eU|}{nkT} \right) \right) \quad (1.2')$$

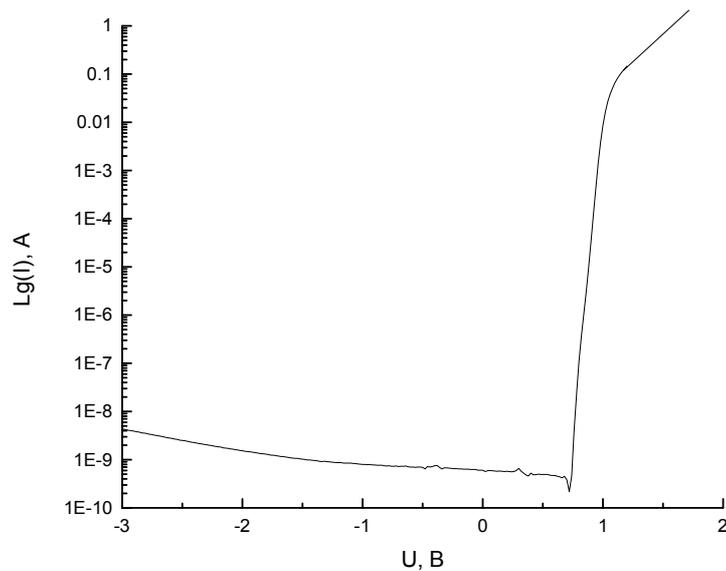


Рисунок 1.3. – Вольтамперная характеристика диода с *p-n* переходом на основе GaAs

Экспоненциальное увеличение тока обусловлено снижением потенциального барьера для электронов и дырок и экспоненциальным увеличением доли носителей, которые могут перейти через барьер за счёт термоэлектронной эмиссии (рисунок 1.1б)<sup>5</sup>.

3) Формула (1.2) и (1.2') справедливы до напряжения, при котором происходит уменьшение высоты потенциального барьера до нуля ( $U_0$ ). Выше этого напряжения происходит **спрямление** зон, вольтамперная

<sup>5</sup> Инжекция из омического контакта компенсирует потерю электронов, прошедших в область *p*-типа. Электроны, попавшие в *p*-область отводятся через омический контакт в положительному электроду источника питания. Всё сказанное может быть отнесено и к дыркам, попавшим из области *p*-типа в *n*-область.

характеристика в области прямых зон (выше 1 В на рисунке 1.3) при этом становится линейной.

4) При **обратном** смещении на диоде значение  $U < 0$ . Экспоненциальная часть выражения (1.2) стремится к нулю. В этом случае потенциальный барьер для основных носителей заряда увеличивается, ток основных носителей заряда также стремится к нулю. Перенос тока в глубоком смещении связан с неосновными носителями заряда. Согласно формуле (1.2) общий ток стремится к значению тока насыщения – это ток неосновных носителей заряда. Поскольку в обеих областях полупроводника концентрация неосновных носителей очень мала, значение тока насыщения также сравнительно невелико.

Таким образом, существует два режима работы полупроводникового диода:

- режим прямого смещения, в котором протекает большой ток основных носителей заряда (электронов из области  $n$ -типа в область  $p$ -типа и дырок в обратном направлении). **Прямой ток** – ток, протекающий через диод в режиме прямого смещения. Это сумма токов электронов из  $n$ -области и дырок из  $p$ -области.

- режим обратного смещения, в котором течёт ток неосновных носителей. **Обратный ток** – ток, протекающий при обратном смещении диода. Ток переносится неосновными носителями, его величина на несколько порядков меньше прямого тока.

Особо подчеркнём, что в диодах с  $p$ - $n$  переходом неосновные носители могут свободно перемещаться из области  $n$ -типа в область  $p$ -типа и наоборот, для неосновных носителей не существует потенциальных барьеров. Низкое значение обратного тока в диоде невелико в силу того, что мала концентрация неосновных носителей. Однако в том случае, когда в области  $p$ - $n$  перехода искусственно создаётся высокая концентрация неосновных носителей (например при облучении светом), они беспрепятственно

вытекают через омические контакты, обратный ток диода при этом повышается.

Для диода также вводятся следующие термины:

**Диод (переход) закрыт (заперт)** – состояние, соответствующее обратному смещению на диоде. В данном режиме через диод течёт небольшой обратный ток.

**Диод (переход) открыт (отперт)** – состояние, соответствующее прямому смещению на диоде. В данном режиме через диод течёт большой прямой ток.

## 1.2. Биполярный транзистор

### 1.2.1. Общие сведения

Транзистор включает в себя три соединённые области полупроводника с чередующимся типом проводимости (рисунок 1.4) и омические контакты к каждой из трёх областей. Существует всего два варианта конструкции: 1) область с электронной проводимостью (*n*-типа) – область с дырочной проводимостью (*p*-типа)-область *n* типа (*n-p-n* транзистор) 2) область *p*-типа – область *n* типа – область *p*-типа (*p-n-p* транзистор). В обоих вариантах в транзисторе соединены два *p-n* перехода. Одна из крайних областей называется эмиттером, другая – коллектором. Средняя область транзистора называется базой. Первый *p-n* переход называется **переход эмиттер-база (эмиттерный переход)**, второй переход – **база-коллектор (коллекторный переход)**.

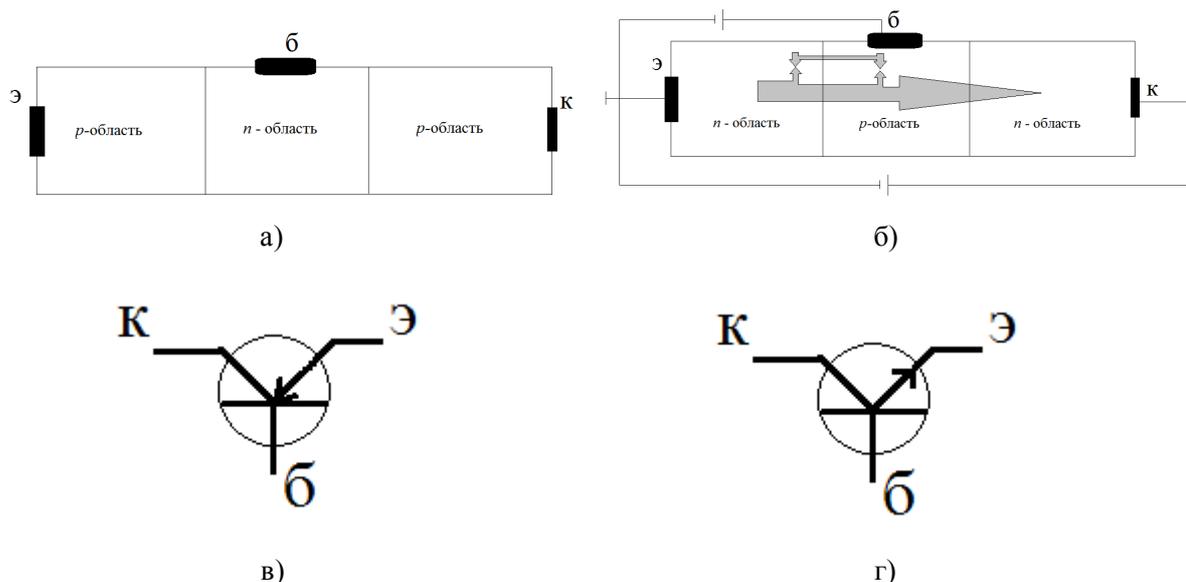


Рисунок 1.4. Схематическое изображение транзисторов а) *p-n-p*, б) *n-p-n*; в) изображение *p-n-p* транзистора на электрических схемах, г) изображение *n-p-n* транзистора на электрических схемах. Внизу база, слева – коллектор, справа – эмиттер. Эмиттер обозначается стрелкой. Стрелка из транзистора обозначает *n-p-n*, стрелка внутрь – *p-n-p*.

Для определённости далее будет рассматриваться ***n-p-n*** транзистор, все сделанные выводы могут быть по аналогии перенесены и на случай *p-n-p* транзистора.

Принцип работы биполярного транзистора заключается в инжекции электрического тока из эмиттерной области в коллекторную (рисунок 1.4). Для случая *n-p-n* транзистора из эмиттера инжектируется ток электронов. Электроны, инжектированные из эмиттера, попадают в базу. Для базы *p*-типа проводимости электроны являются неосновными носителями, они беспрепятственно переносятся в коллектор. Величина тока, протекающего из эмиттера в коллектор, управляется напряжением, подаваемым на базу. Исходя из принципа работы, конструкция транзистора должна в идеале обеспечивать условия для того, чтобы как можно больше носителей, выходящих из эмиттера, попадали в коллектор. На практике небольшая часть тока ( $I_{\text{об}}$ ) утекает из транзистора через омический контакт базовой области<sup>6</sup>. Также часть электронов расходуется на рекомбинацию с дырками в базе и эмиттере. Доля носителей, попадающих из эмиттера в коллектор, обозначается коэффициентом

$$\alpha = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}} \quad (1.3)$$

Коэффициент  $\alpha$  является важнейшим параметром транзистора. Чем ближе значение  $\alpha$  к единице, тем выше качество транзистора. С точки зрения электрической схемы транзистор симметричен относительно области базы. Однако, исходя из принципов работы транзистора, существует принципиальная разница между эмиттером и коллектором. Эмиттерной называется область, работающая в режиме инжекции, а коллекторной – область, улавливающая носители (т.е. работающая в режиме экстракции).

Требование близости коэффициента инжекции  $\alpha$  к единице может быть выполнено, только если размер эмиттера меньше размера коллектора. В случае транзистора – элемента интегральной схемы область коллектора

---

<sup>6</sup> аналогом биполярного транзистора можно считать электронную лампу. В лампе электроны испускаются с поверхности катода при подаче на него отрицательного напряжения и улавливаются анодом. Величина тока между катодом и анодом управляется с помощью третьего электрода – сетки.

охватывает область эмиттера так, что неё попадают все испускаемые носители [4].

### 1.2.2. Статические характеристики биполярного транзистора

Статическими характеристиками транзистора называют зависимости между постоянными токами и напряжениями в его входных и выходных цепях [5,7,8].

Количественный анализ процессов протекания токов в биполярном транзисторе зависит от схемы включения. В усилительных устройствах транзистор включается по схеме четырёхполюсника (рисунок 1.5). Рассмотрим именно такой способ включения. **Четырёхполюсником** называется электрическая цепь, в которой можно выделить четыре зажима (4 полюса).

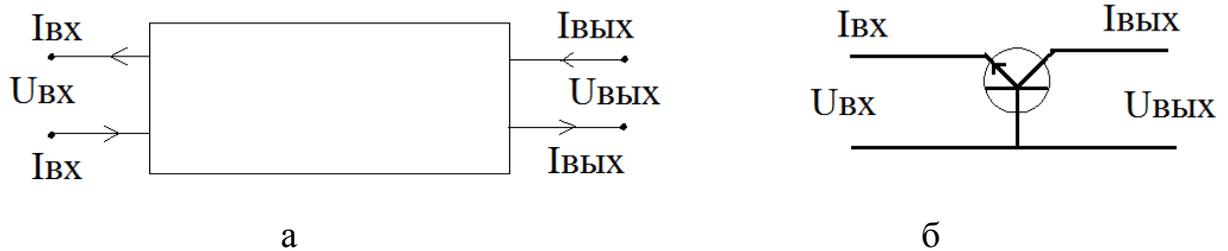


Рисунок 1.5. а) схема четырёхполюсника; б) схема транзистора, включённого как четырёхполюсник.

В транзисторе 2 зажима считаются входными, два других – выходными. Такой четырёхполюсник характеризуется четырьмя параметрами: входной ток ( $I_{вх}$ ), входное напряжение ( $U_{вх}$ ), выходной ток ( $I_{вых}$ ) и выходное напряжение ( $U_{вых}$ ). Обычно из четырёх параметров два являются независимыми – это воздействие, а два других – зависимыми или управляемыми – это реакция. Таким образом, состояние четырёхполюсника описывается двумя уравнениями, связывающими управляемые потенциалы с независимыми.

$$Y_1 = F_1(x_1, x_2) \quad (1.4)$$

$$Y_2 = F_2(x_1, x_2) \quad (1.4')$$

Эти уравнения называют по названию параметров, связывающих независимые и зависимые переменные.

Таблица 1.1. Варианты независимых и управляемых параметров четырёхполюсника

Варианты	1	2	3	4	5	6
воздействия	$I_{вх}, I_{вых}$	$U_{вх}, U_{вых}$	$U_{вых}, I_{вых}$	$U_{вх}, I_{вх}$	$I_{вх}, U_{вых}$	$U_{вх}, I_{вых}$
Реакции	$U_{вх}, U_{вых}$	$I_{вх}, I_{вых}$	$U_{вх}, I_{вх}$	$U_{вых}, I_{вых}$	$U_{вх}, I_{вых}$	$I_{вх}, U_{вых}$
параметры	z	Y	A	B	h	G

Биполярный транзистор имеет 3 контакта (эмиттер, база, коллектор), при включении в схеме четырёхполюсника один из контактов является общим для входа и выхода четырёхполюсника. В соответствии с этим существует 3 схемы включения биполярного транзистора (рисунок 1.6).

#### 1) Схема включения с общей базой (ОБ)

В этой схеме общим является потенциал базы. Входной ток в указанной схеме – ток эмиттера ( $I_э$ ), выходной ток – ток коллектора ( $I_к$ ). Входное напряжение – напряжение между эмиттером и базой ( $U_{эб}$ ), выходное напряжение – между коллектором и базой ( $U_{кб}$ ).

#### 2) Схема включения с общим эмиттером (ОЭ).

В этой схеме общим является потенциал эмиттера. Входной ток в указанной схеме – ток базы ( $I_б$ ), выходной ток – ток коллектора ( $I_к$ ). Входное напряжение – напряжение между базой и эмиттером ( $U_{бэ}$ ), выходное напряжение – между коллектором и эмиттером ( $U_{кэ}$ ).

#### 3) Схема включения с общим коллектором (ОК).

В этой схеме общим является потенциал коллектора. Входной ток в указанной схеме – ток базы ( $I_б$ ), выходной ток – ток эмиттера ( $I_э$ ). Входное напряжение – напряжение между базой и коллектором ( $U_{бк}$ ), выходное напряжение – между эмиттером и коллектором ( $U_{эк}$ ).

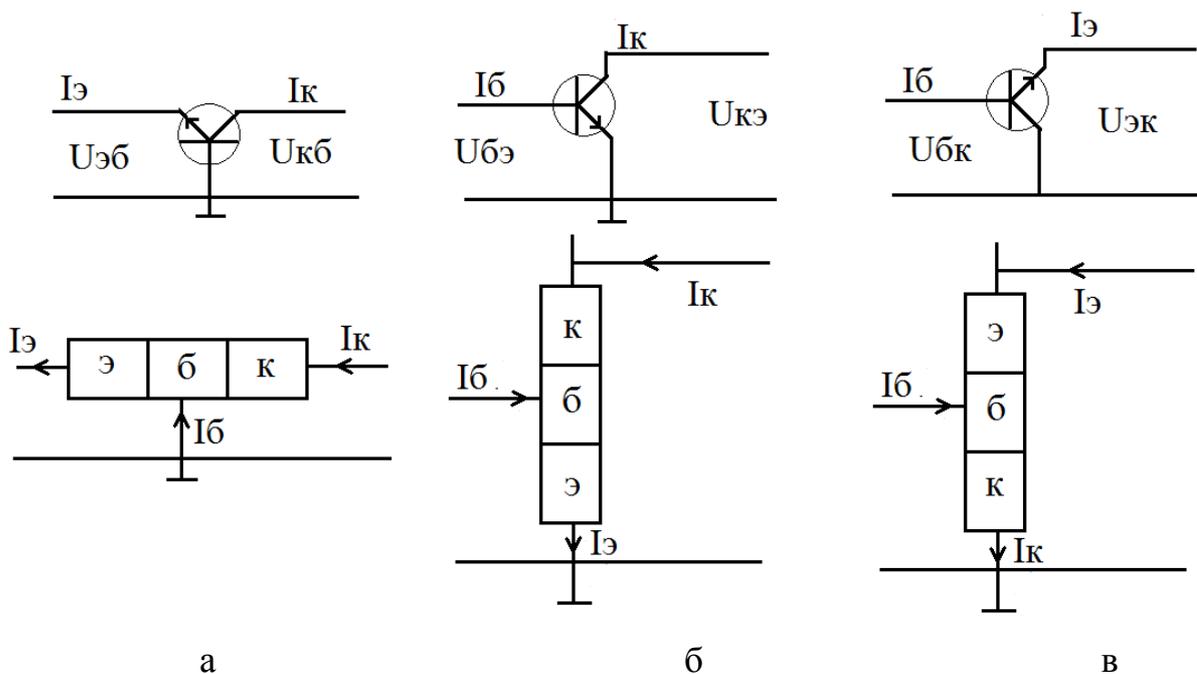


Рисунок 1.6. – Схемы включения транзистора с общей базой (а), общим эмиттером (б) и общим коллектором (в). Специфическая схема усилителя с ОК отличается от приведённой выше.

Наиболее распространёнными являются схемы с общей базой и с общим эмиттером. Схема включения транзистора с общим коллектором используется в повторителях для согласования каскадов по сопротивлению [8,9].

В биполярном транзисторе в качестве независимых параметров выбирается **входной ток** и **выходное напряжение**. В силу низкого входного сопротивления в основных схемах включения транзистора входной ток легче поддаётся регулированию и измерению, поэтому и выбирается в качестве независимой переменной. Аналогичным образом, высокое выходное сопротивление транзистора обуславливает выбор более легко регулируемого выходного напряжения в качестве независимого параметра. Таким образом, статическая входная характеристика биполярного транзистора – это зависимость  $U_{ex} = f(I_{ex}; U_{вых})$ .

Для графического построения входной характеристики значение  $U_{вых}$  фиксируется и строится зависимость  $U_{ex} = f(I_{ex})U_{вых} = \text{const}$ . Величина, поддерживаемая постоянной, называется **параметром** характеристики.

Набор характеристик при различных значениях параметра называется **семейством характеристик**. Отметим, что на графиках входных характеристик принято по оси абсцисс откладывается напряжение, а по оси ординат ток, но именно входной ток является независимой величиной.

Статической выходной характеристикой транзистора является зависимость  $I_{вых} = f(I_{вх}; U_{вых})$  при постоянном значении входного тока. Параметром характеристики в этом случае является входной ток.

Рассмотрение статических характеристик целесообразно начинать с анализа схемы с общей базой (рисунок 1.6а). Для количественного описания характеристик рассмотрим простейшую эквивалентную схему, называемую моделью Эберса-Молла (рисунок 1.7). На схеме выделены три контакта: к эмиттерной, базовой и коллекторной областям. Два  $p-n$  перехода транзистора моделируются двумя диодами, включёнными навстречу друг другу. Часть тока, протекающая из эмиттера в коллектор учитывается источником тока  $\alpha I_2$ , часть тока, протекающая из коллектора в эмиттер учитывается источником тока  $\alpha I_1$ . Здесь  $\alpha_i$  – это инверсный коэффициент передачи, определяющий долю коллекторного тока, прошедшего в эмиттер.

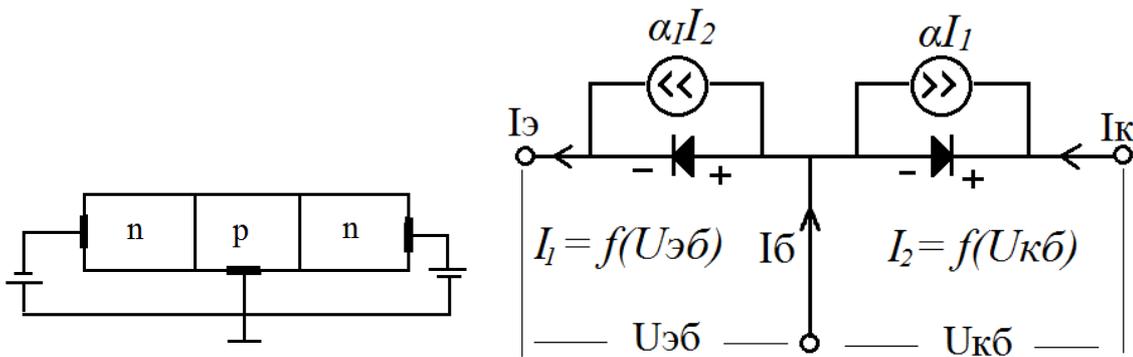


Рисунок 1.7. Эквивалентная схема идеализированного транзистора, включённого по схеме с общей базой.

Положим  $n = 1$ . Согласно схеме, показанной на рисунке, ток через эмиттерный переход равен:

$$I_э = I_1 - \alpha I_2 \quad (1.5)$$

Ток через коллекторный переход:

$$I_K = \alpha I_1 - I_2 \quad (1.6)$$

Здесь токи  $I_1$  и  $I_2$  – это токи, протекающие через  $p$ - $n$  переход эмиттер-база и база-коллектор, соответственно. Согласно теории протекания токов в  $p$ - $n$  переходах аналогично (1.2):

$$I_1 = I'_{S1} \left( \exp \left( \frac{|e|U_{БЭ}}{kT} \right) - 1 \right) \quad (1.7)$$

$$I_2 = I'_{S2} \left( \exp \left( \frac{|e|U_{БК}}{kT} \right) - 1 \right) \quad (1.8)$$

Здесь токи насыщения для эмиттерного и коллекторного переходов отличаются от значений токов для изолированных диодов в силу того, что на тепловые токи эмиттера влияет коллектор и наоборот. Для того чтобы установить связь между токами  $I'_{S1}$  ( $I'_{S2}$ ) и тепловыми токами  $p$ - $n$  перехода  $I_{S1}$  ( $I_{S2}$ ) необходимо изолировать один из переходов транзистора от другого. Физически это выполняется путём разрыва цепи на одном из переходов (например, коллекторного). Разрыв цепи коллекторного перехода означает, что  $I_K = 0$ . Из соотношения (1.6) следует, что  $I_2 = \alpha I_1$ . Считаем, что на эмиттерный переход подано глубокое обратное смещение, тогда из (1.7)  $I_1 = -I'_{S1}$ . Ток через эмиттерный переход, в случае разрыва коллекторной цепи и глубокого обратного смещения  $I_{\mathcal{E}} = -I_{S1}$ , как в случае изолированного диода. Тогда из соотношения (1.5) следует, что

$$I_{\mathcal{E}} = -I_{S1} = I_1(1 - \alpha_I \alpha) = -I'_{S1}(1 - \alpha_I \alpha) \quad (1.9)$$

Следовательно, связь между обратными токами в изолированном  $p$ - $n$  переходе и транзисторе записывается как:

$$I'_{S1} = \frac{I_{S1}}{(1 - \alpha_I \alpha)} \quad (1.10)$$

Проделав аналогичную цепочку рассуждений с размыканием эмиттерного перехода, нетрудно показать, что:

$$I'_{S2} = \frac{I_{S2}}{(1 - \alpha_i \alpha)} \quad (1.10')$$

Таким образом, в схеме с общей базой входная характеристика транзистора может быть представлена формулой:

$$I_{\mathcal{E}} = I'_{S1} \left( \exp\left(\frac{|e|U_{БЭ}}{kT}\right) - 1 \right) - \alpha_i I'_{S2} \left( \exp\left(\frac{|e|U_{БК}}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.11)$$

Выходная характеристика представляется формулой:

$$I_K = \alpha I'_{S1} \left( \exp\left(\frac{|e|U_{БЭ}}{kT}\right) - 1 \right) - I'_{S2} \left( \exp\left(\frac{|e|U_{БК}}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.12)$$

Отметим, что в случае короткого замыкания коллекторной цепи ( $U_{КБ} = 0$ ), входная характеристика имеет вид аналогичный обычному диоду (1.2). То же самое и для выходной характеристики при коротком замыкании цепи эмиттера.

Отсюда можно определить физический смысл коэффициентов  $I_{S1}$  ( $I_{S2}$ ) – это обратный ток эмиттерного (коллекторного) перехода при коротком замыкании коллекторного (эмиттерного) перехода.

Формула 1.12 обычно переписывается с учётом соотношений (1.5 - 1.11):

$$I_K = \alpha I_{\mathcal{E}} - (1 - \alpha \alpha_i) I'_{S2} \left( \exp\left(\frac{|e|U_{БК}}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.12')$$

Входные и выходные статические характеристики схемы с общей базой показаны на рисунке 1.8 а, б. При нулевом напряжении на коллекторе входная характеристика аналогична характеристике диода. При подаче положительного напряжения на коллектор (и обратного смещения коллекторного перехода) характеристика смещается вверх. Из всей выходной

характеристики обычно строится квадрант, соответствующий обратному смещению коллекторного перехода. Характеристика аналогична обратной ветви диода. Увеличение тока эмиттера, согласно (1.12') смещает характеристику вверх, пропорционально увеличивая ток коллектора.

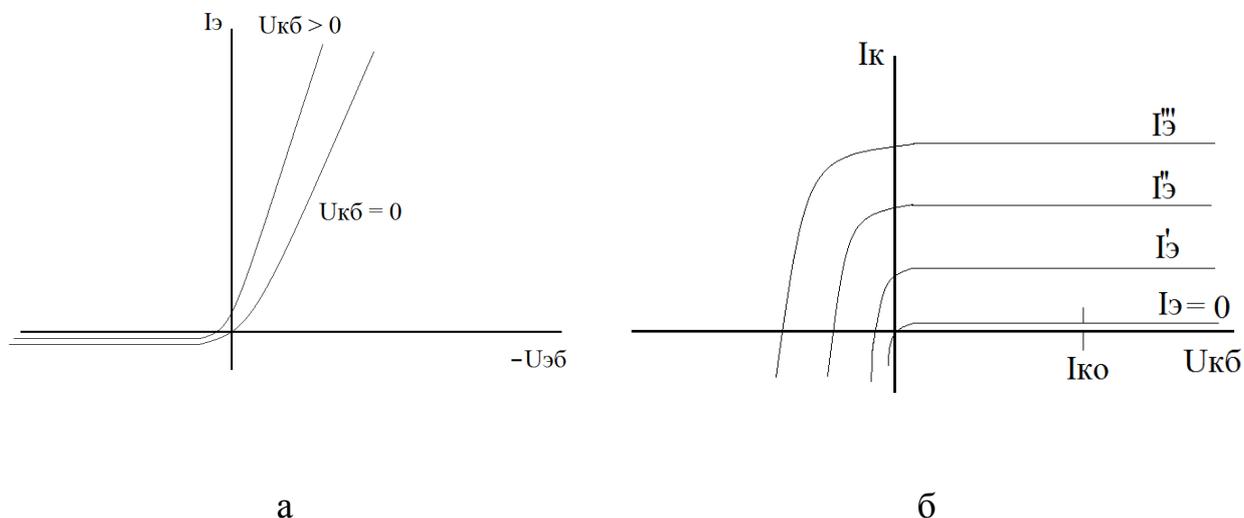


Рисунок 1.8. Семейства входных (а) и выходных (б) характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером

В зависимости от смещений  $p-n$  переходов различают 4 режима работы биполярного транзистора:

1) Активный (нормальный) режим: прямое смещение перехода эмиттер/база и обратное смещение перехода база/коллектор. В этом режиме транзистор работает согласно описанному выше принципу, электроны инжектируются из эмиттера в базу и попадают в коллектор, проходя через базу. На коллектор подан положительный потенциал, что способствует увеличению тока электронов в коллектор.

2) Режим насыщения (режим двойной инжекции): прямое смещение обоих переходов. В режиме насыщения через транзистор протекают большие токи. Транзистор, находящийся в режиме насыщения называют **открытым**.

3) Режим отсечки: обратное смещение обоих переходов. Транзистор в режиме отсечки называется **запертым**, т.к. через него практически не протекает ток.

4) Инверсный режим, соответствующий прямому смещению коллекторного перехода и обратному смещению эмиттерного перехода. Данный режим является обратным к активному, коллектор выполняет роль эмиттера. В силу особенностей конструкции коэффициент передачи эмиттерного тока в инверсном режиме  $\alpha_1$  меньше коэффициента  $\alpha$  в активном режиме.

Рассмотрим схему с общим эмиттером (рисунок 1.6б), т.е. схему, в которой общая точка входной и выходной цепи соединена с эмиттерным электродом. В этом случае входным током является ток базы  $I_B$ , а входным напряжением –  $U_{БЭ}$  – напряжение на базе относительно заземлённого общего эмиттера. Выходной ток – это ток коллектора  $I_K$ , а выходное напряжение – напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{КЭ}$ .

Проанализируем входные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером. Входная характеристика в этом случае – зависимость напряжения между базой и эмиттером от тока базы при постоянном напряжении между коллектором и эмиттером. Исходя из направлений протекания тока в транзисторе (рисунок 1.7) видно, что:

$$I_{Э} = I_B + I_K \quad (1.13),$$

следовательно, с учётом (1.11) и (1.12), а также  $U_{КЭ} = U_{КБ} + U_{БЭ}$ :

$$\begin{aligned} I_B = I_{Э} - I_K &= (1 - \alpha)I'_{S1} \left( \exp\left(\frac{|e|U_{БЭ}}{kT}\right) - 1 \right) + (1 - \alpha_i)I'_{S2} \left( \exp\left(\frac{|e|U_{БК}}{kT}\right) - 1 \right) = \\ &= (1 - \alpha)I'_{S1} \left( \exp\left(\frac{|e|U_{БЭ}}{kT}\right) - 1 \right) + (1 - \alpha_i)I'_{S2} \left( \exp\left(-\frac{|e|(U_{КЭ} - U_{БЭ})}{kT}\right) - 1 \right) \end{aligned} \quad (1.14)$$

Семейство входных характеристик в схеме включения с общим эмиттером показано на рисунке 1.9. Проанализируем показанные зависимости.

1) Случай  $U_{КЭ} = 0$ . Из формулы (1.14) и из характеристики, представленной на рисунке 1.9, видно, что в том случае, когда напряжение между коллектором и эмиттером равно нулю, транзистор работает как

обычный диод, особенность заключается в наличии двух  $p-n$  переходов. Характеристика подобна ВАХ диода<sup>7</sup>. В случае замкнутых эмиттера и коллектора все инжектированные носители из эмиттерного и коллекторного переходов попадают в базу, ток базы, при этом, сравнительно высок.

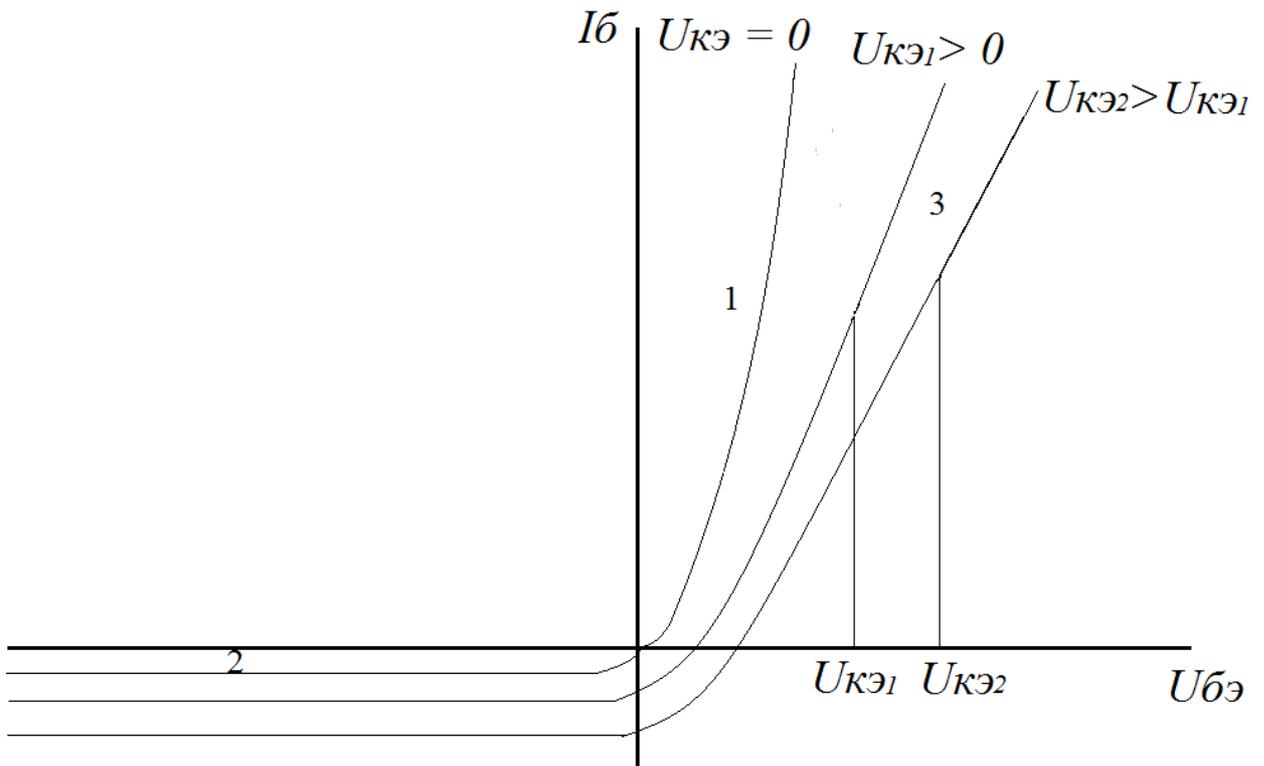


Рисунок 1.9. Семейство входных статических характеристик биполярного транзистора. Область 1 соответствует активному режиму, область 2 – режиму отсечки, область 3 – режиму насыщения.

2) Прямое смещение эмиттерного и коллекторного переходов (режим насыщения). Для прямого смещения перехода эмиттер-база, на базовый контакт подаётся положительный потенциал относительно заземлённого нейтрального эмиттера. Прямое смещение коллекторного перехода достигается путём подачи на коллектор отрицательного напряжения, либо положительного, но меньшей величины, чем напряжение на базе ( $|U_{кэ}| < |U_{бэ}|$ ). В случае  $U_{кэ} < 0$  ток базы значительно возрастает за счёт

<sup>7</sup> В технологии микроэлектроники именно таким способом формируются диоды: накоротко замыкаются контакты к коллектору и эмиттеру, таким образом формируется  $p-n$  переход [а1].

инжекции электронов из сильно прямосмещённого коллектора. Рассмотрим практически важный случай положительного напряжения на коллекторе (при этом  $0 < U_{КЭ} < U_{БЭ}$ ). Исходя из формулы (1.14) положительное напряжение на коллекторе уменьшает ток базы при тех же напряжениях на базе. Чем выше положительный потенциал на коллекторе, тем меньше общий ток базы. С точки зрения протекания токов, снижение тока базы по сравнению с первым случаем связано с тем, что часть носителей начинает утекать из эмиттера в коллектор, минуя базу, а само прямое смещение коллектора не такое глубокое по сравнению со случаем  $U_{КЭ} < 0$ .

3) Прямое смещение эмиттерного перехода, обратное смещение базового перехода (активный режим). Для выполнения названного режима на базу подаётся положительный потенциал относительно заземлённого эмиттера. Для обратного смещения перехода база коллектор на коллекторный контакт подаётся также положительный потенциал, по величине превышающий потенциал базы ( $|U_{КЭ}| > |U_{БЭ}|$ ). Этот режим выполняется в начальной части характеристики, показанной на рисунке 1.9, при сравнительно небольших напряжениях на базе. В этом случае второе слагаемое в выражении (1.14) минимально (т.к. показатель экспоненты меньше нуля). В активном режиме в базу утекает наименьшее количество носителей, основная часть электронов из эмиттера попадает в коллектор, за счёт его высокого положительного потенциала. Границей активного режима является линия  $U_{КЭ} = U_{БЭ}$ .

4) Обратное смещение эмиттерного и коллекторного переходов (режим отсечки). Для обратного смещения перехода эмиттер-база, на базовый контакт подаётся отрицательный потенциал относительно заземлённого нейтрального эмиттера. Обратное смещение коллекторного перехода достигается путём подачи на коллектор положительного напряжения, либо отрицательного, но меньшей по модулю величины, чем напряжение на базе

( $|U_{КЭ}| < |U_{БЭ}|$ ). В режиме отсечки через переходы текут небольшие тепловые токи.

5) Прямое смещение коллекторного перехода, обратное смещение эмиттерного перехода (инверсный режим). Области характеристик, соответствующие инверсному режиму находятся в третьем квадранте. Входные характеристики в инверсном режиме подобны выходным характеристикам в активном режиме, они будут рассмотрены ниже.

Рассмотрим семейство выходных характеристик транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, показанное на рисунке 1.10.

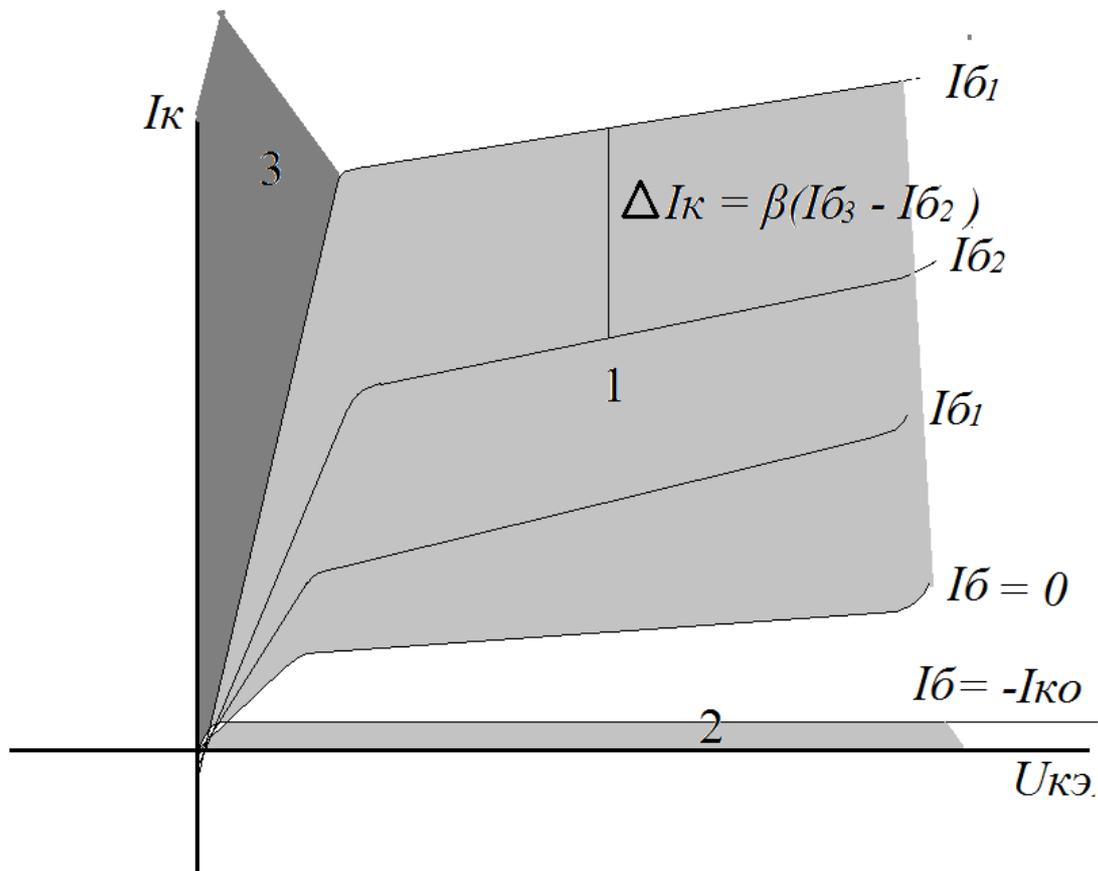


Рисунок 1.10. Семейство выходных статических характеристик биполярного транзистора. Область 1 соответствует активному режиму, область 2 – режиму отсечки, область 3 – режиму насыщения. Разные кривые соответствуют разным токам базы  $I_{б1} < I_{б2} < I_{б3}$ .

Выходные характеристики в этом случае – это зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером. Для описания характеристики рассмотрим формулу (1.12'). В активном режиме при

глубоком обратном смещении перехода база-коллектор вторая часть выражения (1.12') преобразуется в  $-(1 - \alpha\alpha_i)I'_{S2} = I_{S2}$ , с учётом (1.10'). Тогда выражение (1.12') имеет вид:

$$I_K = \alpha I_{\mathcal{E}} + I_{S2} \quad (1.15)$$

Напомним, что  $I_{S2}$  - это тепловой ток изолированного коллекторного перехода. С учётом выражения (1.13) получим:

$$I_K = \alpha(I_K + I_B) + I_{S2} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{1}{1 - \alpha} I_{S2} \quad (1.16)$$

Введём обозначение  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ , тогда

$$I_K = \beta I_B + (\beta + 1)I_{S2} \quad (1.16')$$

Параметр  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$  является второй важнейшей характеристикой транзистора. Он носит название коэффициент передачи базового тока.

Проведём анализ семейства выходных характеристик.

1) Режим отсечки (обратное смещение обоих переходов). В том случае, когда оба перехода закрыты, в транзисторе текут небольшие обратные токи. Можно считать, что обратный ток базы  $I_B(\text{обр}) = -I'_{S1} \approx -I_{S2}$ , тогда, согласно (1.16'):

$$I_K \approx I_{S2} \quad (1.17)$$

это минимальный ток коллектора. При токе базы, равном нулю (в случае небольшого прямого смещения базового перехода) ток коллектора равен  $(\beta + 1)I_{S2}$ .

2) Активный (нормальный) режим (прямое смещение перехода эмиттер-база, обратное смещение перехода база-коллектор). При сравнительно большом напряжении на коллекторе ток коллектора слабо зависит от  $U_{K\mathcal{E}}$ . Это связано с тем, что при обратном смещении

коллекторного перехода, ток между базой и коллектором практически не изменяется. Ток, протекающий из эмиттера в коллектор, определяется напряжением на базе и также слабо зависит от напряжения на коллекторе. Этот режим хорошо иллюстрируется формулой (1.16), из которой видно, что ток коллектора определяется, в основном, током базы. Увеличение тока базы на  $\Delta I_B$  приводит к увеличению тока коллектора в  $\beta$  раз большему ( $\beta \Delta I_B$ ). С точки зрения механизмов протекания тока в транзисторе соотношение (1.16) можно объяснить тем, что ток базы – это один из независимых, задаваемых потенциалов биполярного транзистора. Однако конструкция транзистора обеспечивает условия, при которых большая часть тока электронов, инжектированных в базу из эмиттера, попадает в коллектор. Лишь небольшая часть носителей (а именно  $(1-\alpha)I_E$ ) вытекают через омический контакт к области базы. Следовательно, для поддержания требуемого значения тока базы необходимо, чтобы из эмиттера в коллектор вытек в  $\beta$  раз больший ток. Активный режим работы транзистора используется для усиления тока в схеме с общим эмиттером. Изменение входного тока на величину  $\Delta I_B$  приводит к изменению тока на выходе на  $\beta \Delta I_B$ . Отметим, что значение  $\beta$  остаётся постоянным, оно зависит от тока эмиттера. Для каждого значения  $I_B$  коэффициент передачи несколько отличается. Это означает, что при сравнительно больших пропорциональных изменениях тока базы ток коллектора меняется не пропорционально. Коэффициент  $\beta$  можно считать постоянным при сравнительно небольших изменениях тока базы относительно постоянного значения.

3) Режим насыщения (прямое смещение обоих переходов). В этом случае допущение, связанное с приравниванием второго слагаемого в выражении (1.12') к значению тока насыщения, недопустимо. Коллекторный ток, соответственно, зависит от напряжения между коллектором и эмиттером. Для пояснения работы режима насыщения рассмотрим переход из активного режима. При уменьшении напряжения  $U_{КЭ}$  коллекторный

переход выходит из режима обратного смещения. При напряжении на коллекторе, не превышающем напряжения на базе, коллекторный переход смещается в прямом направлении. Это приводит к значительному увеличению базового тока. Для поддержания базового тока постоянным (как этого требуют измерения семейства выходных характеристик), требуется уменьшать напряжение на базе (чтобы вывести переход коллектор-база в режим обратного смещения). Однако уменьшение напряжения на базе  $U_{БЭ}$  приводит к существенному уменьшению эмиттерного тока  $i_e$ , в соответствии с (1.16') и коллекторного тока тоже. Это объясняет резкое падение тока при уменьшении коллекторного напряжения. Режим насыщения, таким образом, на семействе характеристик расположен по левой стороне от кривых (рисунок 1.10).

4) При инверсном режиме включения выходные характеристики схемы эквивалентны входным характеристикам в активном режиме.

Таким образом, измерение статических характеристик транзистора позволяет определить режимы его работы, а также установить важнейшие параметры, включая коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ . Для вычисления ряда важных параметров транзистора используется представление его в виде линейного четырёхполюсника.

### **1.2.3 Моделирование статические характеристики биполярного транзистора**

Для наглядного представления особенностей статических характеристик транзистора возможно проведение моделирования входных и выходных характеристик транзистора в программной среде National Instruments (NI) Multism. NI Multism представляет собой среду для проектирования и симуляции радиоэлектронных цепей различной степени сложности, а также отдельных пассивных и активных электронных компонентов (источников сигналов, диодов, транзисторов и т.д.).

Использование среды NI Multism позволят наглядно увидеть функционирование радиоэлектронной цепи, реакцию цепи на воздействие различных сигналов и на изменение типов и номиналов ее компонентов. Моделирование работы изучаемой радиоэлектронной цепи или ее компонентов способствует пониманию физических основ функционирования схемы и облегчает дальнейшую ее реализацию с помощью реальных компонентов в ходе лабораторной работы. На рисунке 1.11 представлен общий вид рабочего окна программы NI Multism.

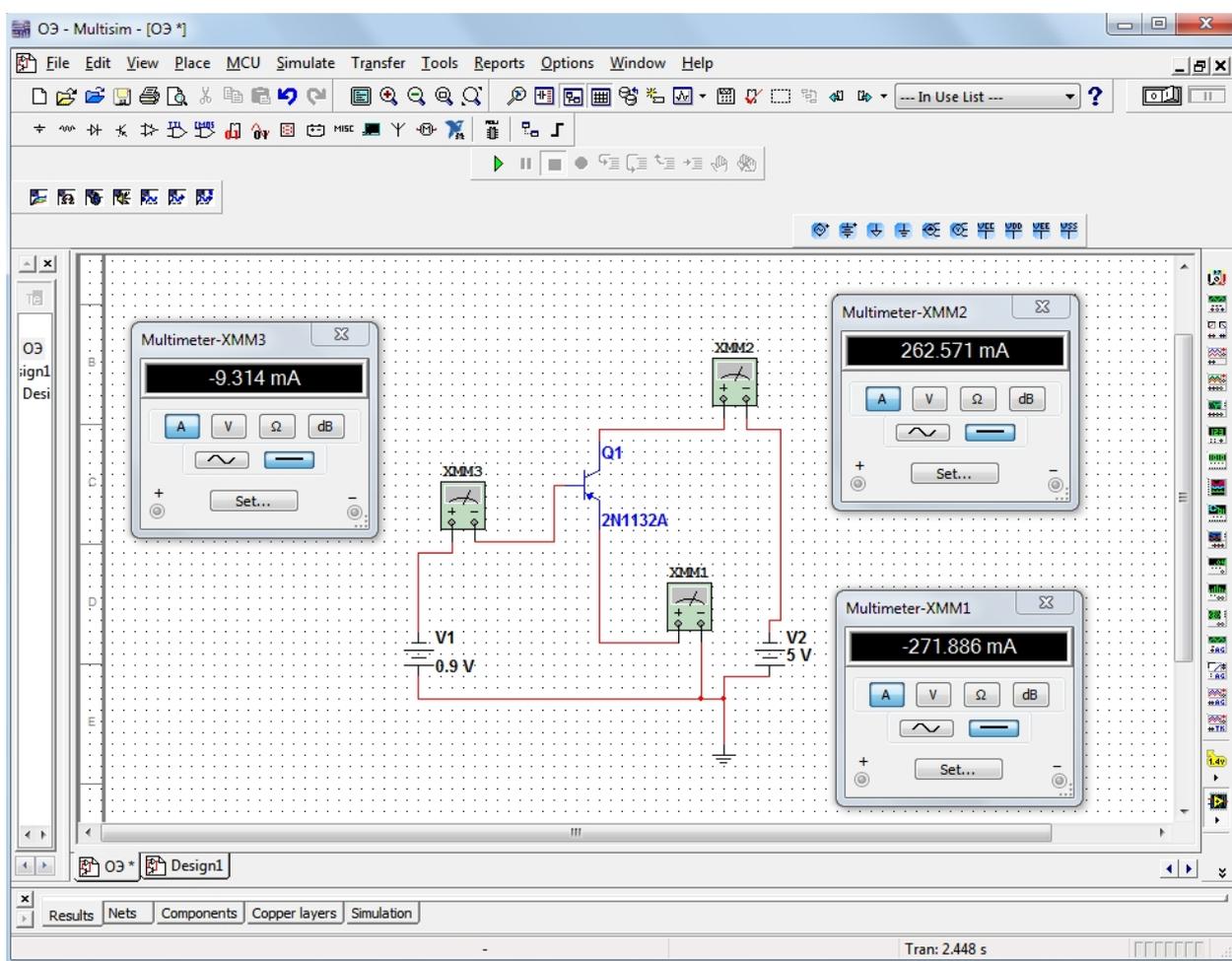


Рисунок 1.11. Общий вид рабочего окна программы NI Multism.

Основную часть рабочего окна занимает область размещения элементов моделируемой цепи. Справа от области размещения элементов располагается панель виртуальных приборов, таких как мультиметр,

осциллограф, генератор сигналов и др. Данные приборы, помещенные, на область размещения элементов цепи используются для возбуждения и диагностики цепи.

Рассмотрим моделирование входных характеристик биполярного транзистора, подключенного по схеме с общим эмиттером (рисунок 1.6). Поместим в области размещения элементов биполярный транзистор. Для этого нажав правую кнопку мыши в области размещения компонентов выберем пункт Place Component (разместить компонент). В появившемся окне выбора компонентов схемы в выпадающем меню Group (группа) выберем группу элементов транзисторы (Transistors). В окне Family (семейство) выберем BJT\_PNP (биполярные *p-n-p* транзисторы). В окне Components (компоненты) появится список реально существующих транзисторов, математическая модель которого будет использована в качестве виртуального транзистора. Выберем, например, транзистор 2N1132A. Подтвердив выбор нажатием кнопки ОК, поместим транзистор в область выбора компонентов.

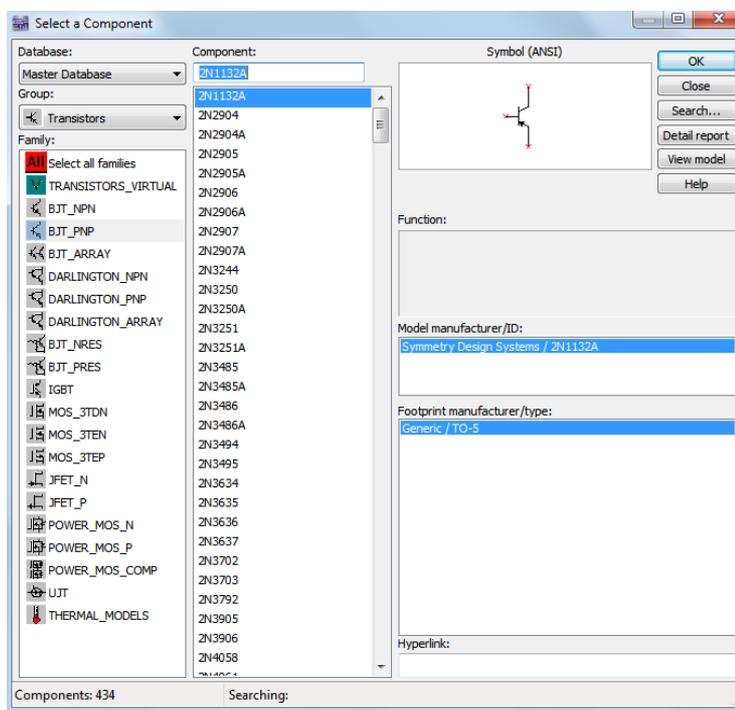


Рисунок 1.12. Окно выбора компонентов схемы .

Далее в пункте Place Component выберем группу Sources (источники). В окне Family выберем Power Sources (источники энергии). В окне Components выберем два раза источник постоянного напряжения (DC\_POWER) и элемент заземление (GROUND). В области виртуальных приборов три раза выберем и разместим элемент Multimeter (мультиметр) для измерения величины тока эмиттера, базы и коллектора.

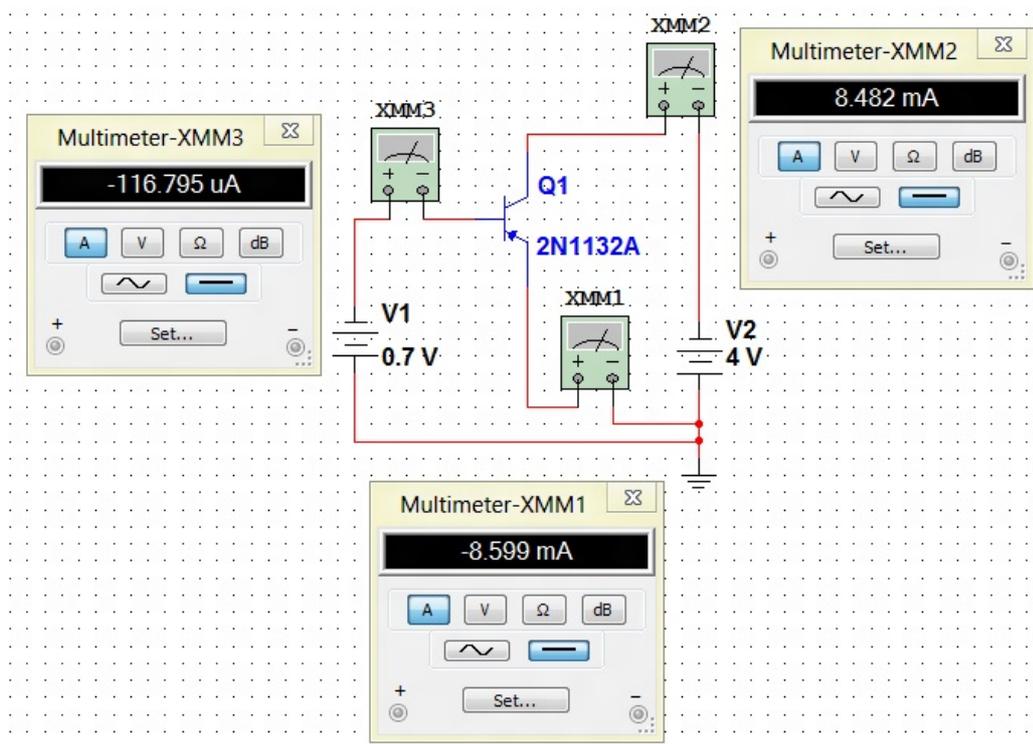


Рисунок 1.13. Виртуальный биполярный транзистор, подключенный по схеме с общим эмиттером.

После размещения элементов схемы, соединим их проводниками с помощью мыши. Полученная схема представлена на рисунке 1.13.

Выбрав величину и полярность напряжения, генерируемого источниками напряжения, возможно моделирование работы транзистора в различных режимах, таких как активный режим, режим насыщения, режим отсечки или инверсный режим. Величина генерируемого источником напряжения выбирается после двойного нажатия на символ источника. Для

запуска моделирования работы схемы нужно в пункте Simulate (симулирование) основного меню программы выбрать пункт Run (запуск). После запуска схемы мультиметры, работающие в режиме амперметра, будут показывать величину тока, протекающего в различных участках цепи (ток эмиттера, базы и коллектора). На рисунке 1.13 представлена схема включения транзистора, работающего в активном режиме.

Программа позволяет получить семейство входных характеристик транзистора. Для этого в пункте Simulate основного меню программы выбрать пункт Analyses (анализ), далее выбрать пункт DC Sweep (развертка постоянного тока). После этого появиться окно выбора параметров, которые будут изменяться для получения входных характеристик транзистора (рисунок 1.14).

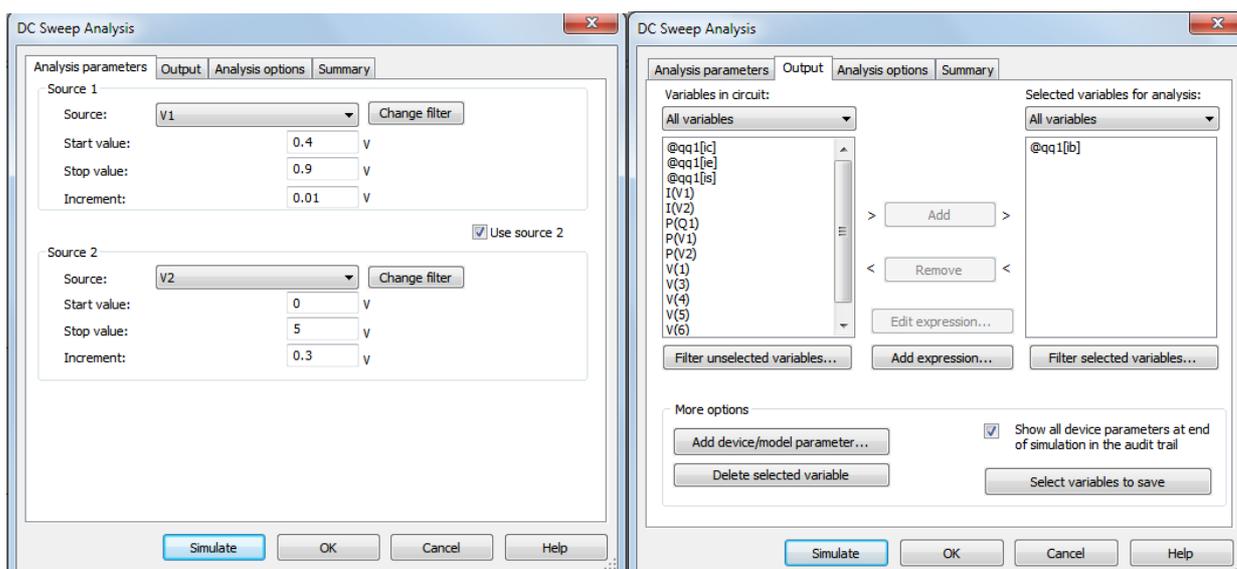


Рисунок 1.14. Меню выбора параметров для получения входных и выходных характеристик транзистора.

Во вкладке Analysis parameters (параметры анализа) необходимо задать диапазон (Start value и Stop value) и шаг (Increment) изменения напряжения эмиттер-база (Source V1) и напряжения на коллекторе (Source V2). Во вкладке Outputs (выходы) нужно выбрать регистрируемые величины. Для

получения входных характеристик транзистора нужно регистрировать величину тока базы, для этого в окне Variables in circuit (переменные в цепи) нужно выбрать переменную «ток в базе транзистора» (@qq1[Ib]) и переместить в окно Selected variables for analysis (выбранные переменные для анализа). Далее для построения входных характеристик транзистора нужно нажать кнопку Simulate (симуляция), полученные результаты будут представлены в отдельном окне.

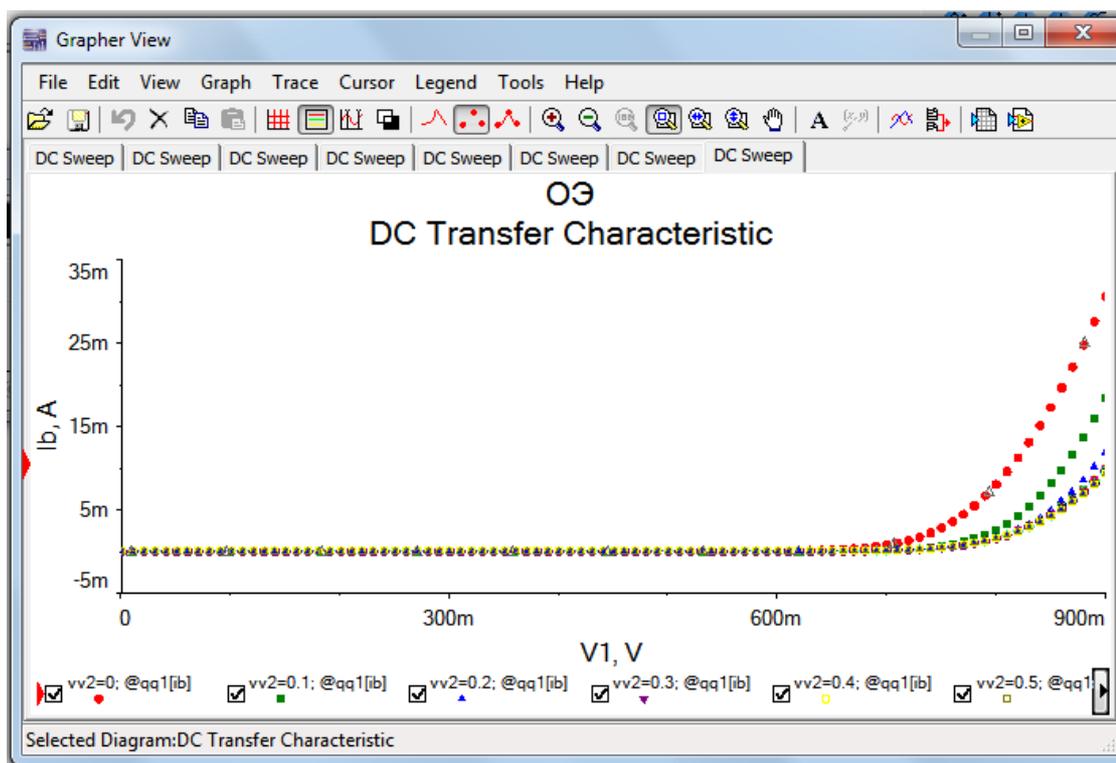


Рисунок 1.15. Рассчитанное семейство входных характеристик транзистора.

На рисунке 1.15 представлено рассчитанное семейство входных характеристик транзистора. Полученные зависимости могут быть сохранены в виде текстового файла, путем выбора соответствующего пункта в меню File.

Аналогично могут быть рассчитаны выходные характеристики транзистора. В этом случае нужно регистрировать величину тока коллектора, для этого в окне Variables in circuit (переменные в цепи) нужно выбрать

переменную «ток в коллекторе транзистора» (@qq1[Ic]) и переместить в окно Selected variables for analysis (выбранные переменные для анализа). В качестве первого источника напряжения во вкладке Analysis parameters нужно выбрать источник (Source 1) V2, т.е. будет проведено построение величины тока в коллекторе в зависимости от напряжения эмиттер-коллектор. В качестве второго источника напряжения во вкладке Analysis parameters нужно выбрать источник (Source 2) V1. Таким образом будет получено семейство зависимостей тока в коллекторе от напряжения эмиттер-коллектор при различных значениях напряжения на переходе эмиттер-база. Следовательно, будет получено семейство выходных характеристик транзистора (рисунок 1.16).

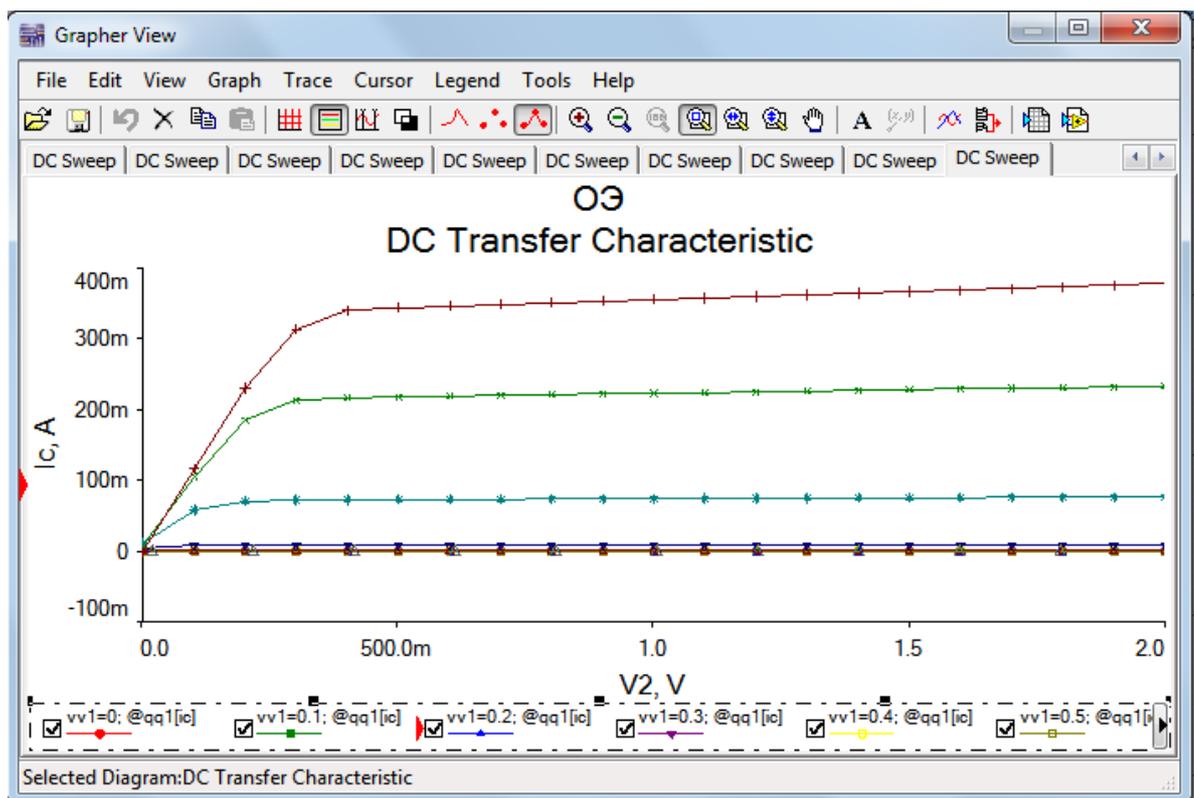


Рисунок 1.16. Рассчитанное семейство выходных характеристик транзистора.

### 1.2.3. Транзистор как линейный четырёхполюсник

Как было сказано выше, для описания работы четырёхполюсника используется 4 параметра, два из которых выбираются независимыми, а два других являются функциями независимых параметров (1.4). Рассмотрение схемы четырёхполюсника удобно тем, что при этом не анализируются процессы, протекающие внутри самого прибора (которые могут быть достаточно сложными). Анализируются лишь токи и напряжения на входе и выходе. Наиболее простым является случай линейных четырёхполюсников, когда уравнения (1.4) и (1.4') представляют собой линейные функции. В зависимости от того, какие потенциалы выбраны независимыми, а какие управляемыми существует шесть вариантов уравнений.

Постоянные коэффициенты, связывающие независимые и управляемые токи и напряжения называются параметрами. В зависимости от того, какие два из четырёх потенциалов выбраны независимыми, эти параметры обозначаются разными буквами. Существует система  $z$  – параметров,  $g$  – параметров и др. Для биполярного транзистора независимыми переменными считается входной ток и выходное напряжение. Для такого случая используется система  $h$ -параметров, с четырьмя постоянными коэффициентами  $h_{ij}$ .

$$U_{BX} = h_{11}I_{BX} + h_{12}U_{BЫX} \quad (1.18)$$

$$I_{BЫX} = h_{21}I_{BX} + h_{22}U_{BЫX} \quad (1.19)$$

Анализ линейных четырёхполюсников сводится к анализу линейных уравнений (1.18), (1.19), что является существенным упрощением. Однако четырёхполюсники на основе биполярного транзистора не являются линейными. Для применения довольно простого математического аппарата к анализу биполярных транзисторов используют метод линеаризации (метод малого сигнала).

Запишем общие уравнения для биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером:

$$U_{БЭ} = F_1(I_B; U_{КЭ}) \quad (1.20)$$

$$I_K = F_2(I_B; U_{КЭ}) \quad (1.21)$$

Разложим выражения (1.20) и (1.21) в ряд относительно некоторых постоянных смещений  $I_{Б0}$ ,  $U_{К0}$ :

$$U_{БЭ} = F_1(I_{Б0}; U_{К0}) + \left. \frac{\partial F_1}{\partial I_{Б0}} \right|_{U_{КЭ}=U_{К0}} * (I_B - I_{Б0}) + \left. \frac{\partial F_1}{\partial U_{К0}} \right|_{I_B=I_{Б0}} * (U_{КЭ} - U_{К0}) + \\ + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 F_1}{\partial I_{Б0}^2} * (I_B - I_{Б0})^2 + \frac{\partial^2 F_1}{\partial I_{Б0} \partial U_{К0}} * (I_B - I_{Б0})(U_{КЭ} - U_{К0}) + \frac{\partial^2 F_1}{\partial U_{К0}^2} * (U_{КЭ} - U_{К0})^2 \right) + \dots \quad (1.22)$$

Производные берутся в точке  $I_{Б0}$ ,  $U_{К0}$ . Допустим, приращения  $(I_B - I_{Б0}) = \Delta I_B$  и  $(U_{КЭ} - U_{К0}) = \Delta U_{КЭ}$  малы настолько, что вторым и всеми остальными членами разложения можно пренебречь. Тогда критерий малости – это то, что вторая производная много меньше первой:

$$\frac{\partial F_1}{\partial I_{Б0}} * \Delta I_B \gg \frac{\partial^2 F_1}{\partial I_{Б0}^2} * \Delta I_B^2 \quad (1.23)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial U_{К0}} * \Delta U_{КЭ} \gg \frac{\partial^2 F_1}{\partial U_{К0}^2} * \Delta U_{КЭ}^2 \quad (1.24)$$

Тогда получим условия малости приращения:

$$\Delta I_B \ll \frac{\frac{\partial F_1}{\partial I_{Б0}}}{\frac{\partial^2 F_1}{\partial I_{Б0}^2}} \quad (1.25')$$

$$\Delta U_{КЭ} \ll \frac{\frac{\partial F_1}{\partial U_{К0}}}{\frac{\partial^2 F_1}{\partial U_{К0}^2}} \quad (1.26')$$

Это и есть критерии малости приращений. Аналогичные рассуждения могут быть сделаны и по отношению к (1.21):

$$\Delta I_B \ll \frac{\frac{\partial F_2}{\partial I_{Б0}}}{\frac{\partial^2 F_2}{\partial I_{Б0}^2}} \quad (1.25)$$

$$\Delta U_{KЭ} \ll \frac{\frac{\partial F_2}{\partial U_{K0}}}{\frac{\partial^2 F_2}{\partial U_{K0}^2}} \quad (1.26)$$

В том случае, если на вход транзистора поступает переменный сигнал, причём его амплитуда удовлетворяет условиям (1.25(')) и (1.26(')) для заданных входных и выходных токов и напряжений, то транзистор можно считать **линейным четырёхполюсником**. Все нелинейные слагаемые в ряде Тейлора будут пренебрежимо малы по сравнению с линейным слагаемым. Уравнения (1.20) и (1.21) с учётом (1.22), а также  $F_1(I_{B0}; U_{K0}) = U_{B0}$ ,  $F_2(I_{B0}; U_{K0}) = I_{K0}$ , переписутся в виде:

$$U_{BЭ} = U_{B0} + h_{11} * (I_B - I_{B0}) + h_{12} * (U_{KЭ} - U_{K0}); \quad I_K = I_{K0} + h_{21} * (I_B - I_{B0}) + h_{22} * (U_{KЭ} - U_{K0}).$$

Если перенести  $U_{B0}$  и  $I_{K0}$  влево и записать  $(U_{BЭ} - U_{B0}) = \Delta U_{BЭ}$ ;  $(I_K - I_{K0}) = \Delta I_K$ , тогда:

$$\Delta U_{BЭ} = h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta U_{KЭ} \quad (1.27)$$

$$\Delta I_K = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{KЭ} \quad (1.28)$$

т.е. при условии малого сигнала в транзисторе сохраняется линейная связь между приращениями входного и выходного сигнала.

Коэффициенты  $h_{ij}$  являются важнейшими параметрами биполярного транзистора. Разумеется, исходя из формулы (1.22) значения  $h$ -параметров зависят от постоянных напряжений и токов на транзисторе. Они определяются из статических характеристик транзистора.

Из входных характеристик определяются параметры  $h_{11}$  и  $h_{12}$ . Согласно (1.27)

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{BЭ}}{\Delta I_B} \right|_{U_{KЭ} = const} \quad (1.29)$$

Условие  $U_{KЭ} = const$  соответствует условию  $\Delta U_{KЭ} = 0$ . Физический смысл коэффициента:  $h_{11}$  – это входное сопротивление при постоянном напряжении на выходе (коллекторе).

На одной из кривых семейства (соответствующих  $U_{KЭ} = \text{const}$ ) выбираются две ближайшие точки  $U_{БЭ1}$  и  $U_{БЭ2}$ ;  $I_{Б1}$  и  $I_{Б2}$ . По формуле (1.29) рассчитывается параметр.

Для второго параметра:

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}} \quad (1.30)$$

Это величина, обратная коэффициенту усиления по напряжению при постоянном токе базы.

Коэффициент  $h_{12}$  рассчитывается из двух соседних кривых семейства. При постоянном токе базы измеряются значения  $U_{БЭ1}$  и  $U_{БЭ2}$ , лежащие на разных кривых семейства. Значения  $U_{КЭ1}$  и  $U_{КЭ2}$  – это значения выходного напряжения, соответствующие тем кривым, для которых измерено напряжение базы.

Из выходных характеристик определяются параметры  $h_{21}$  и  $h_{22}$ . Согласно (1.27)

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}} \quad (1.31)$$

Это коэффициент передачи базового тока при постоянном напряжении на коллекторе.

Коэффициент  $h_{21}$  рассчитывается из двух соседних кривых семейства. При постоянном напряжении на коллекторе измеряются значения  $I_{К1}$  и  $I_{К2}$ , лежащие на разных кривых семейства. Значения  $I_{Б1}$  и  $I_{Б2}$  – это значения входного тока, соответствующие тем кривым, для которых измерен ток коллектора.

Коэффициент  $h_{22}$  определяется соотношением:

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}} \quad (1.32)$$

Физический смысл: выходная проводимость при постоянном входном токе.

На одной их кривых семейства (соответствующих  $I_B = \text{const}$ ) выбираются две ближайшие точки  $U_{KЭ1}$  и  $U_{KЭ2}$ ;  $I_{K1}$  и  $I_{K2}$ . По формуле (1.32) рассчитывается параметр.

Отметим, что  $h$  – параметры введены для случая сравнительно низких рабочих частот. При повышении частоты эквивалентная схема усилителя усложняется, существенную роль играют ёмкости  $p$ - $n$  переходов.

### 1.3. Экспериментальная часть

В рамках экспериментальной части проводится исследование статических характеристик биполярного транзистора – элемента усилителя. Определяются режимы работы транзистора, устанавливаются рабочие варианты выбора рабочих точек. По измеренным характеристикам рассчитываются  $h$ -параметры биполярного транзистора, которые также используются при расчёте схемы усилителя.

#### 1.3.1. Исследование статических характеристик транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером

Исследование статических характеристик транзистора осуществляется с помощью учебной лабораторной станции NI-Elvis II (рисунок 1.17).

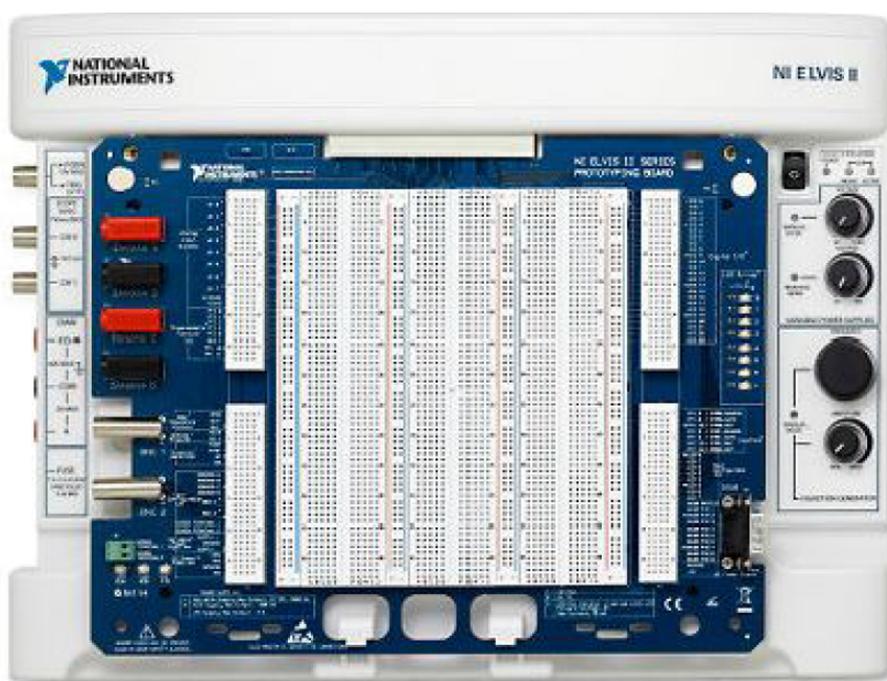


Рисунок 1.17. Общий вид лабораторной станции NI-Elvis II.

NI-Elvis II – это универсальная система для измерения характеристик широкого набора дискретных приборов, электрических цепей и микросхем [4]. Станция включает в себя ряд приборов, а также соединительные пазы. Все пазы, проходящие вдоль горизонтальной линии, электрически соединены. Входы приборов выведены с левой стороны платы. Для обеспечения функционирования и анализа схемы усилителя используются следующие приборы платы NI-Elvis II:

- 1) Источник постоянного напряжения DC Power Supplies (+15 В);
- 2) Генератор синусоидального напряжения FGEN;
- 3) Многоканальный осциллограф-измеритель сигнала Analog Input Signals (AI);
- 4) Цифровой мультиметр DMM;
- 5) Источники варьируемого напряжения (Analog Outputs (AO) и Variable Power Supplies).

Для исследования входных характеристик транзистора в схеме включения с общим эмиттером, необходимо соединить эмиттер транзистора с гнездом заземления (ground) на монтажной плате. Коллектор транзистора соединяется с источником варьируемого напряжения Variable Power Supplies, определяющим величину напряжения  $U_{КЭ}$ . При исследовании входных характеристик  $p-n-p$  транзистора для получения входных характеристик в активном режиме необходимо использовать источник напряжения отрицательной полярности (supply –). Для  $n-p-n$  транзистора используется источник напряжения положительной полярности (supply +). База транзистора соединяется с источником варьируемого напряжения Analog Outputs (AO 0), определяющим величину  $U_{БЭ}$ . Для регистрации тока, протекающего в цепи базы, между источником AO 0 и базой транзистора последовательно включается резистор известного номинала, по величине падения напряжения на котором определяется ток базы. Для определения

величины падения напряжения на резисторе, он соединяется с нулевым каналом измеритель сигнала Analog Input Signals, с AI 0 + и AI 0–. На рисунке 1.18 изображён общий вид лабораторной станции NI-Elvis II.

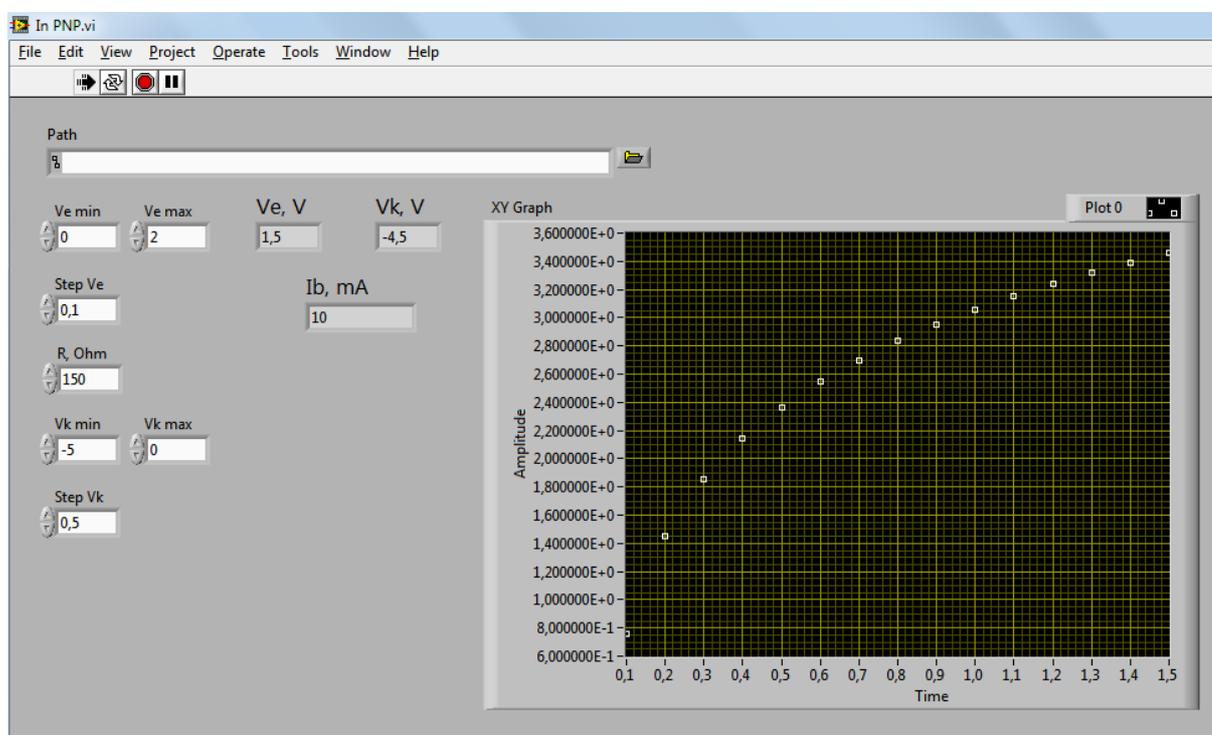


Рисунок 1.18. Общий вид лабораторной станции NI-Elvis II.

Для автоматизированного получения семейства входных характеристик *p-n-p* транзистора используется программа In PNP, для *n-p-n* транзистора программа In NPN. Интерфейс программы состоит из следующих элементов:

- Path – указывается путь сохранения файла, содержащего результаты измерений;
- Ve min, Ve max, Ve step – задается минимальная, максимальная величина напряжения с источника Analog Outputs (AO 0), определяющим величину напряжения  $U_{БЭ}$ , а также шаг изменения напряжения;
- Vk min, Vk max, Vk step – задается минимальная, максимальная величина напряжения с источника Variable Power Supplies, определяющим величину напряжения  $U_{КЭ}$ , а также шаг изменения напряжения;

- $R$  – задается номинал резистора (в омах), используемого для определения величины тока базы;
- $V_e$  – индикатор текущего значения напряжения  $U_{БЭ}$ ;
- $V_k$  – индикатор текущего значения напряжения  $U_{КЭ}$ ;
- $I_b$  – индикатор текущего значения тока базы;

Также на лицевой панели программы присутствует область отображения измеряемых входных характеристик транзистора.

Для получения входных характеристик транзистора необходимо после запуска программы указать путь к сохраняемому файлу, задать диапазон и шаг измерения подаваемых на транзистор напряжений и номинал резистора, используемого для вычисления тока базы. После запуска процесса измерения в области отображения зависимостей тока базы от  $U_{БЭ}$  будет построено семейство входных характеристик исследуемого транзистора. Результаты в виде текстового файла будут сохранены по указанному пути.

### **1.3.2. Исследование выходных характеристик транзистора**

Для исследования выходных характеристик используется встроенная программа платы NI Elvis II. Для этого включается программа NI-Elvis Instrument Launcher. В этой программе выбирается подпрограмма 3-wire (рисунок 1.19). На левой панели отображается измеряемое семейство характеристик. Справа в верхней части панели изображён блок выбора типа транзистора ( $n-p-n$ ;  $p-n-p$ ). В зависимости от типа транзистора существуют разные варианты его соединения. Вариант соединения  $n-p-n$  транзистора изображен в нижней части левой панели. Для  $n-p-n$  транзистора коллектор соединяется с контактом DUT+, эмиттер – с DUT-. База транзистора с контактом BASE.

Ниже окна выбора транзистора на правой панели расположены окна выбора режимов измерения:

- 1) Начальное напряжение на коллекторе (по умолчанию 0 В);
- 2) Конечное напряжение на коллекторе (поскольку коллектор находится в режиме прямого смещения, конечное напряжение на коллекторе можно выбирать как можно больше до 10 В);
- 3) Шаг по напряжению на коллекторе (по умолчанию 0,1 В);
- 4) Пороговый ток коллектора (максимальное значение – 40 мА). Существуют транзисторы с гораздо более высокими значениями тока коллектора. Полное измерение таких транзисторов с использованием данной схемы невозможно;
- 5) Начальное значение поддерживаемого постоянным током базы (по умолчанию 15 мкА, точное значение зависит от типа исследуемого транзистора);

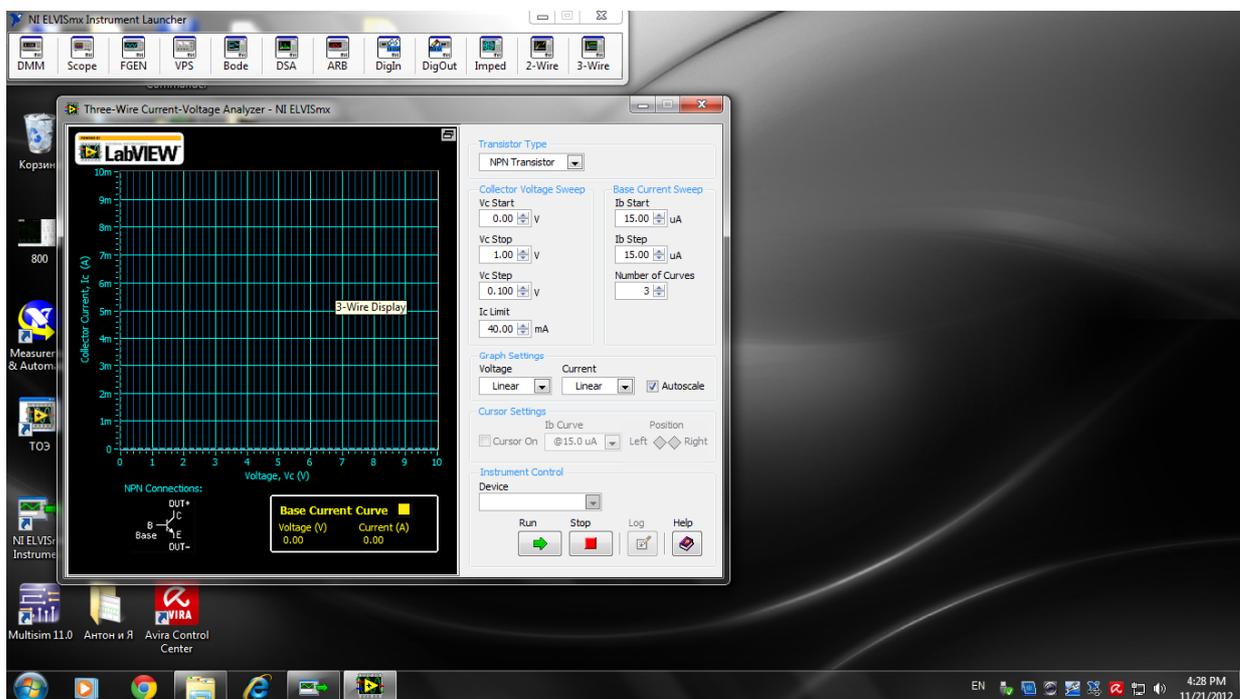


Рисунок 1.19. Панель 3wire

- 6) Шаг по току базы (на какую величину увеличивается ток базы при измерении следующей кривой семейства);
- 7) Количество измеряемых кривых семейства. Если начальное значение 15 мкА, шаг по току базы 15 мкА, а число кривых равно 3, то будет измерено 3

кривые семейства с фиксированным параметром ток базы равным 15, 30 и 45 мкА;

Ниже расположены панели выбора масштабирования (линейное или логарифмическое).

Для исследования выходных характеристик выполняются следующие операции:

- 1) Выбор транзистора. Подключение в соответствии со схемой.
- 2) Выбор режимов измерения.
- 3) Измерение характеристик (запускается нажатием кнопки «Run»).
- 4) В случае сбоя изменяются параметры измерения. При превышении порогового тока уменьшается конечное напряжение. В том случае, если не задаётся ток базы, его минимальное значение необходимо увеличить. После этого проводится повторное измерение.
- 5) Результаты сохраняются на ПК нажатием кнопки Log.

### 1.3.3. Определение параметров транзистора

По измеренным характеристикам определить область активного режима. В центре активного режима выбрать рабочую точку. Рабочей точкой называют значения постоянных токов и напряжений на транзисторе, обеспечивающих работу транзистора в активном режиме. Состояние транзистора описывается четырьмя параметрами, соответственно, рабочая точка – это токи  $I_{B0}$  и  $I_{K0}$  и напряжения  $U_{KЭ0}$  и  $U_{БЭ0}$ .

Значения  $I_{B0}$ ,  $I_{K0}$  и  $U_{KЭ0}$  выбираются из выходных характеристик. На кривой с параметром семейства  $I_{B0}$  выбирается точка  $I_{K0}$ ;  $U_{KЭ0}$ , соответствующая активному режиму работы транзистора. На входных характеристиках для кривой с параметром  $U_{KЭ0}$  отмечается значение тока базы  $I_{B0}$ , таким образом находится значение  $U_{БЭ0}$ .

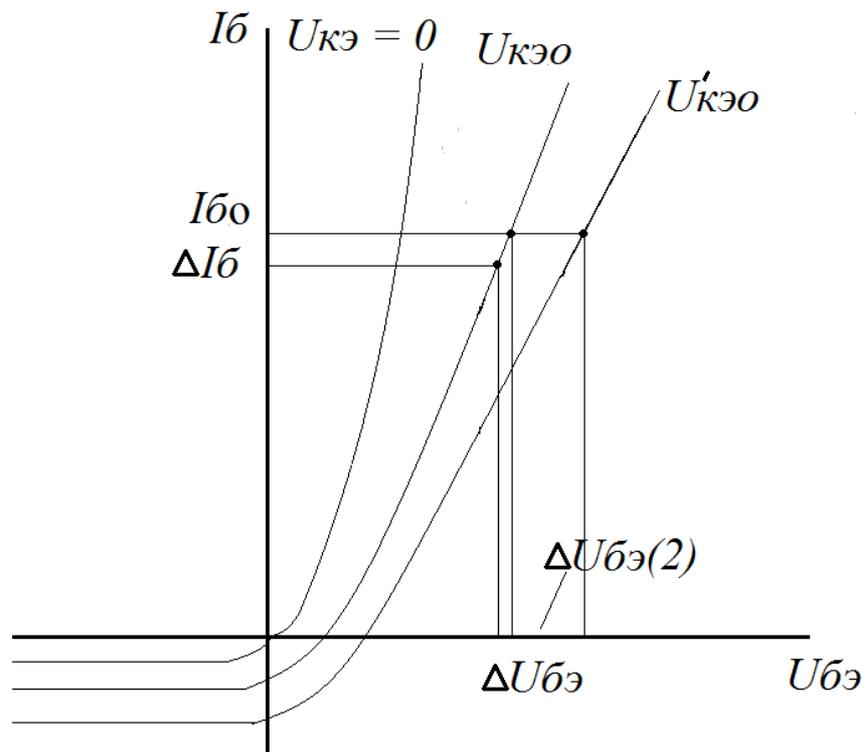
Для окрестностей выбранной рабочей точки рассчитываются значения  $h$ -параметров по формулам (1.29-1.32).

Результаты заносятся в таблицу.

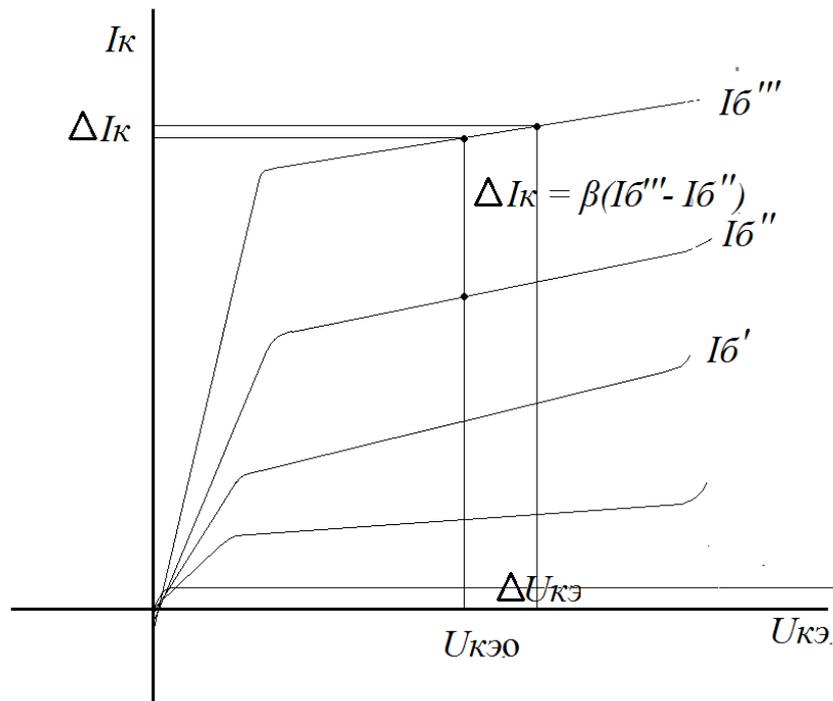
Для расчёта  $h$ -параметров используются входными характеристикам, показанными на рисунке 1.20 а,б.

Параметр  $h_{11}$  рассчитывают из входных характеристик. Для заданного значения  $U_{кэ}$  на кривой выбирают точку  $I_{Б0}$ , соответствующую активному режиму работы транзистора. Для указанной токи вычисляют приращение  $\Delta I_B = I'_{Б0} - I_{Б0}$  и  $\Delta U_{БЭ} = U'_{БЭ0} - U_{БЭ0}$ . По формуле (1.29) вычисляют параметр  $h_{11}$ .

Для расчёта параметра  $h_{22}$  выбирают 2 кривые, соответствующие близким значениям напряжения на коллекторе:  $U_{кэ0}$  и  $U'_{кэ0}$ . Для этих значений при фиксированном токе базы измеряют значения  $U_{БЭ0}$  и  $U'_{БЭ0}$ . По формуле (1.30) вычисляют параметр  $h_{22}$ .



а



б

Рисунок 1.20. Графический метод расчёта  $h$ -параметров биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

Параметр  $h_{22}$  рассчитывают из выходных характеристик. Выбирают кривую, соответствующую току базы  $I_{Б0}$ , на этой кривой выбирается точка в области активного режима  $I_{К0}$  и  $U_{КЭ0}$ . Для этой точки измеряются приращения  $\Delta I_K = I'_{К0} - I_{К0}$  и  $\Delta U_{КЭ} = U'_{КЭ0} - U_{КЭ0}$ . По формуле (1.32) вычисляют параметр  $h_{22}$ .

Для расчёта параметра  $h_{21}$  выбирают 2 кривые, соответствующие близким значениям тока базы  $I'_{Б0}, I_{Б0}$ . При фиксированном напряжении на коллекторе  $U_{КЭ0}$  измеряются значения тока коллектора, соответствующие этим двум кривым семейства. По формуле (1.31) рассчитывается параметр  $h_{21}$ .

#### 1.4. Контрольные вопросы

1. Определение  $p-n$  перехода, вольтамперная характеристика  $p-n$  перехода.
2. Определение биполярного транзистора. Схемы включения транзистора.
3. Применение транзисторов. Электрические схемы, использующие биполярные транзисторы.
4. Принцип работы транзистора. Модель Эберса-Молла.
5. Анализ статических характеристик транзистора в схеме с общей базой.
6. Анализ статических характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером.
7. Назовите основные параметры транзистора, их определение и физический смысл.
8. Режимы работы транзистора. Распределение потенциалов на контактах транзистора для различных режимов работы в схеме с общим эмиттером.
9. Физический смысл и методы вычисления  $h$ -параметров биполярного транзистора.

## 2. Расчёт и исследование усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе, включённом по схеме с общим эмиттером

Усилитель – это одно из основных устройств аналоговой схемотехники. По определению усилитель – это устройство, преобразующее входной электрический сигнал низкой мощности в сигнал более высокой мощности на выходе. Увеличение мощности сигнала достигается за счёт энергии источника питания, являющегося обязательным элементом усилителя. С точки зрения физики усиление сигнала происходит за счёт свойств активных элементов, также являющихся неотъемлемым элементом.

Отметим, что в общем случае усилительные устройства представляют собой сложную схему, состоящую из нескольких каскадов усиления. Каскадом усиления называется элементарная схема, обеспечивающая усиление. При удалении активного элемента из каскада он перестаёт усиливать сигнал. Основными параметрами усилителя являются:

### 1) Коэффициент усиления

Коэффициентом усиления по напряжению называют отношение установившегося значения напряжения сигнала на выходе усилителя к напряжению сигнала на его входе [7]:

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вход}}} = \frac{U_{\text{вых}} e^{j\varphi_2}}{U_{\text{вход}} e^{j\varphi_1}} = K_U e^{j\varphi} \quad (2.1)$$

де  $K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вход}}}$  - изменение амплитуды, а  $\varphi(\omega) = \varphi_2 - \varphi_1$  – изменение фазы входного сигнала.

Аналогично вводятся коэффициенты усиления по току и по мощности:

$$\dot{K}_I = \frac{\dot{I}_{\text{вых}}}{\dot{I}_{\text{вход}}}; \quad \dot{K}_P = \frac{\dot{P}_{\text{вых}}}{\dot{P}_{\text{вход}}}. \quad (2.2)$$

2) Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики. Это зависимость коэффициента усиления и изменения фазы от частоты.

3) Входное сопротивление усилителя - сопротивление между его входными зажимами при воздействии усиливаемого сигнала, т.е.  $R_{вх} = \frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{I}_{вх}}$ ,

4) выходное сопротивление  $R_{вых} = \frac{\dot{U}_{вых.х.х.}}{\dot{I}_{вых.к.з.}}$ .

Все параметры определяют работу усилителя как элемента более сложной схемы. Коэффициенты усиления определяют способность усилителя повысить амплитуду сигнала до определённого уровня, частотные характеристики определяют диапазон рабочих частот, сопротивления служат для согласования с другими каскадами цепи.

## 2.1. Схемы усилителя

В схемах на основе биполярных транзисторов существует три основных каскада: с общим эмиттером, с общей базой и общим коллектором. Указанные схемы показаны на рисунке 2.1.

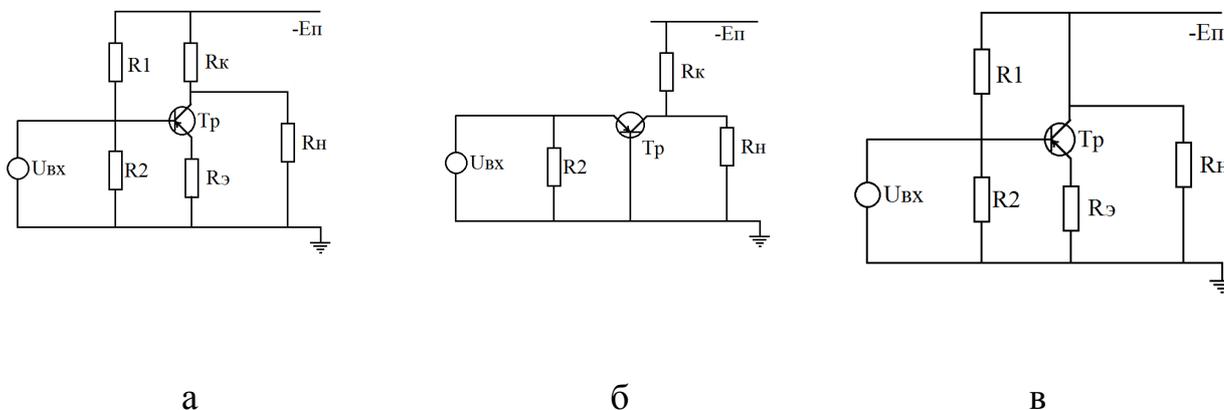


Рисунок 2.1. – Схемы усилителя с общим эмиттером (а), общей базой (б) и общим коллектором (в).

### 2.1.1. Схема с общей базой

В схеме с общей базой транзистор работает в активном режиме. Электроны инжектируются через прямосмещённый переход эмиттер-база и переносятся к коллектору. В силу прямого смещения эмиттерного перехода входной ток структуры сравнительно высок. Выходным током схемы

является ток коллектора. Согласно соотношению (1.3, 1.12') ток коллектора в биполярном транзисторе практически равен току эмиттера:

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Поскольку коэффициент  $\alpha$  близок к единице, ток в схеме с общим эмиттером не усиливается. Выходной ток примерно равен входному. Схема с общим эмиттером может являться усилителем напряжения, т.к. входное сопротивление схемы сравнительно низкое. Следовательно, напряжение на входе также сравнительно невелико. Напряжение на выходе зависит от сопротивления нагрузки. Выбор сравнительно высокого сопротивления нагрузки позволяет получить достаточно высокий коэффициент усиления. Следовательно, транзистор в схеме с общей базой усиливает напряжение и мощность. Рассмотрим эквивалентную схему усилителя ОБ, показанную на рисунке 2.2а,б. Все эквивалентные схемы, приведённые ниже, введены для переменного сигнала.

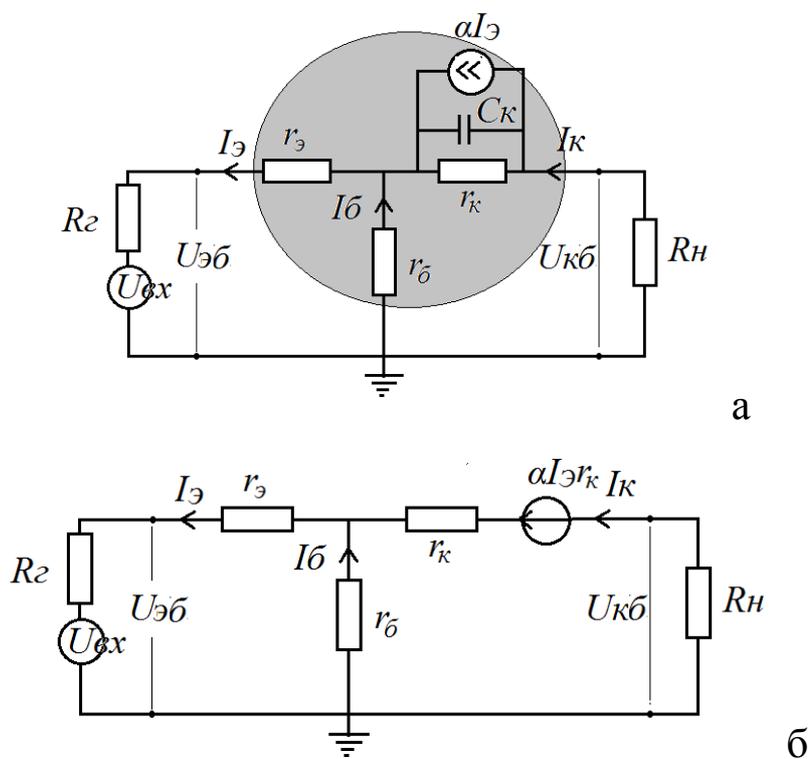


Рисунок 2.2. – Эквивалентные схемы усилителя с общей базой для переменного сигнала. Серым выделена эквивалентная схема *n-p-n* транзистора.

Эквивалентная схема включает в себя эквивалентную схему транзистора, выделенную на рисунке 2.2а,б. Здесь  $r_э$ ,  $r_б$ ,  $r_к$  – сопротивления эмиттера, базы и коллектора соответственно. При работе в качестве усилителя транзистор находится в активном режиме, т.е. эмиттерный переход смещён прямо, а коллекторный обратно. Это учитывается в номиналах резисторов, а также в эквивалентном источнике тока  $\alpha I_э$ , который отображает ток эмиттера, переносимый в коллектор. Эквивалентный источник для коллекторного тока отсутствует, т.к. обратный ток коллектора пренебрежимо мал.

В эквивалентной схеме источник тока с сопротивлением  $r_к$  преобразуется в источник ЭДС номиналом  $\alpha I_э r_к$ , в соответствии с правилами преобразования эквивалентных источников энергии [10]. Резистор  $R_2$  и  $R_к$  преобразуются в эквивалентные  $R_э$  и  $R_н$ . Сопротивление  $R_э$ , включённое последовательно с  $r_э$ , можно заменить на эквивалентное сопротивление  $r'_э$ , равное сумме этих сопротивлений. Влиянием ёмкости  $C_к$  для низких и средних частот пренебрегаем. Схема, показанная на рисунке 2.2б, может быть рассчитана исходя из простейших соотношений, определяемых первым и вторым законами Кирхгоффа. Из первого закона Кирхгоффа следует, что

$$I_э = I_б + I_к \quad (2.4)$$

Из второго закона Кирхгоффа следует, что

$$I_к r_к + I_к R_н - I_б r_б = \alpha I_э r_к \quad (2.5)$$

Подставляя уравнение (2.4) в (2.5) получим:

$$I_к r_к + I_к R_н - I_э r_б + I_к r_б = \alpha I_э r_к \quad (2.6)$$

Тогда связь между коллекторным и эмиттерным током:

$$\frac{I_K}{I_{\text{Э}}} = \frac{\alpha r_K + r_B}{R_H + r_K + r_B} = \frac{\alpha + \frac{r_B}{r_K}}{1 + \frac{(R_H + r_B)}{r_K}} \quad (2.7)$$

Полученное выражение упрощается, т.к., как правило,  $r_K \gg R_H, r_B, R_H + r_B$ , в этом случае получается соотношение (2.3) как в

изолированном биполярном транзисторе. Сопротивление нагрузки может быть достаточно большим, в этом случае выполняется неравенство  $r_K \gg r_B$

и формула (2.7) преобразуется в

$$\frac{I_K}{I_{\text{Э}}} = \frac{\alpha}{1 + \frac{(R_H + r_B)}{r_K}} \quad (2.7')$$

Для упрощения анализа вводят эффективный коэффициент передачи

$$\alpha_0 = \frac{\alpha + \frac{r_B}{r_K}}{1 + \frac{(R_H + r_B)}{r_K}} \quad (2.8)$$

эмиттерного тока

Важно отметить, что коэффициент передачи эмиттерного тока зависит от сопротивления нагрузки. Чем выше сопротивление, тем меньше коэффициент передачи. Из (2.4) нетрудно получить, что

$$I_B = I_{\text{Э}}(1 - \alpha_0) \quad (2.9)$$

Закон Кирхгофа для входной цепи можно записать как:

$$U_{\text{ЭБ}} = I_{\text{Э}}r_{\text{Э}} + I_B r_B \quad (2.10),$$

Что, с учётом (2.8) преобразуется в

$$U_{ЭБ} = I_{Э}(r_{Э} + (1 - \alpha_0)r_B) \quad (2.10'),$$

Тогда входное сопротивление схемы

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ЭБ}}{I_{Э}} = r_{Э} + (1 - \alpha_0)r_B = r_{Э} + \frac{r_B}{\beta_0 + 1} \quad (2.11)$$

Где  $\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}$  – эффективный коэффициент передачи базового тока.

Выходное сопротивление со стороны коллектора:

$$\begin{aligned} R_{ВЫХ} &= \frac{U_{ВЫХ}}{I_K} = \frac{-I_K r_K + I_B r_B + \alpha I_{Э} r_K}{I_K} = \frac{-I_K r_K + \alpha \frac{I_K}{\alpha_0} r_K + \frac{I_K}{\beta_0} r_B}{I_K} = \\ &= r_K \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} - 1 \right) + \frac{r_B}{\beta_0} \approx R_H \end{aligned} \quad (2.12)$$

Здесь, как правило, сопротивление базы мало, и, в некоторых случаях, им пренебрегают. Подставив (2.8) и представив сопротивление базы малым получим, что выходное сопротивление приблизительно равно сопротивлению нагрузки.

Коэффициент усиления по току:

$$K_i = \frac{I_K}{I_{Э}} = \alpha_0 \quad (2.13)$$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{I_K R_H}{I_{Э} R_{ВХ}} = K_i \frac{R_H}{R_{ВХ}} = \frac{\alpha_0 R_H}{r_{Э} + (1 - \alpha_0)r_B} \quad (2.14)$$

*Отметим, что в качестве выходной нагрузки может фигурировать следующий каскад схемы. В случае, если входное сопротивление этого каскада (оно и играет роль сопротивления нагрузки) невелико, то коэффициент усиления по напряжению в схеме с общей базой может быть ниже 1 – т.е. схема не усиливает по напряжению. Для обеспечения усиления*

на выходе схемы ОБ ставится каскад согласования (например, схема с общим коллектором), имеющая высокое входное сопротивление.

### 2.1.2 Схемы с общим эмиттером и общим коллектором

Рассмотрим схему включения транзистора с общим эмиттером (рисунок 2.1а). В данной схеме входным током является ток базы. Для поддержания заданного значения тока базы из эмиттера в коллектор протекает значительно более высокий ток. Выходным током является ток коллектора, значение которого в  $\beta$  раз выше тока базы. Таким образом, схема с общим эмиттером является усилителем тока.

В силу сравнительно высокого выходного сопротивления в схеме ОЭ, напряжение также усиливается.

Рассмотрим эквивалентную схему усилителя, показанную на рисунке 2.3.

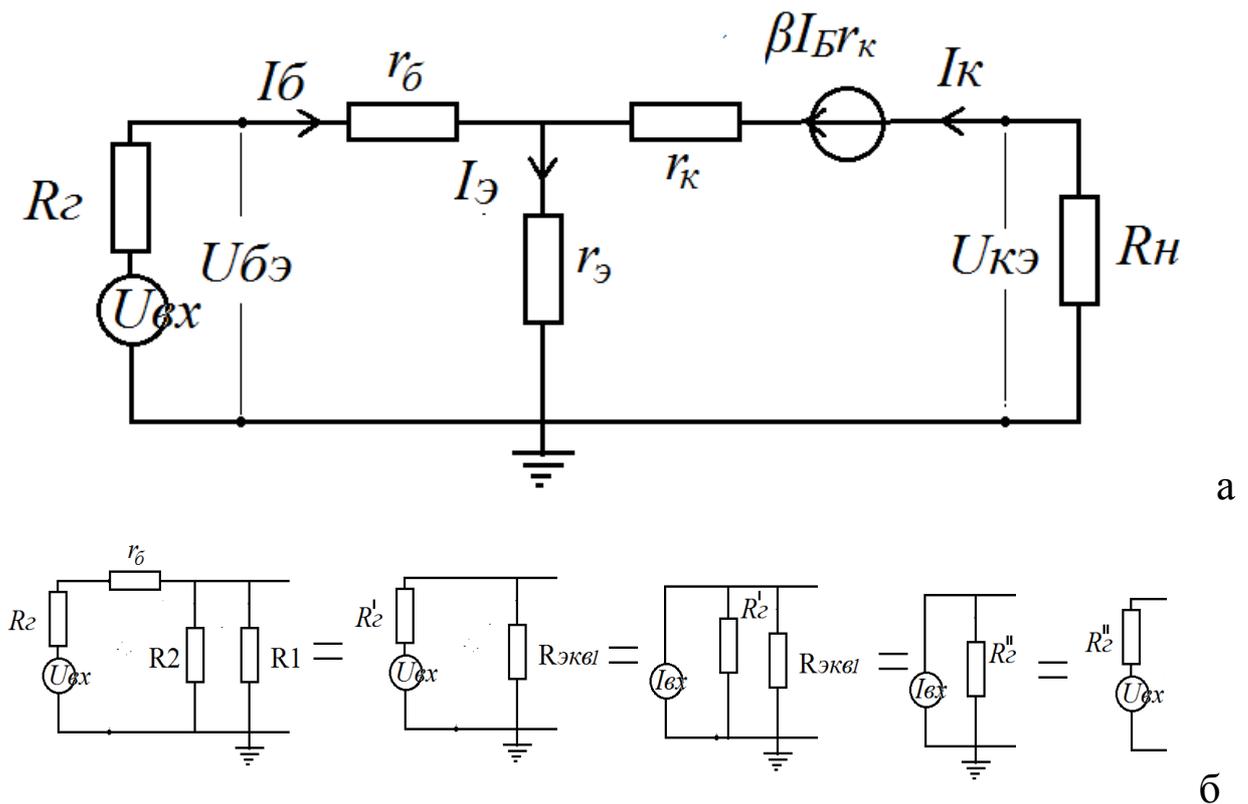


Рисунок 2.3. – Эквивалентная схема усилителя с общей эмиттером для переменного сигнала (а); схема эквивалентного преобразования сопротивления в схеме на рисунке 2.1а в сопротивление генератора.

Схема подобна схеме с общей базой, в которой  $r_B$  и  $r_{\mathcal{E}}$  поменялись местами. Вместо источника тока  $\alpha I_{\mathcal{E}}$  введён источник тока  $\beta I_B$ . Этот источник преобразуется в источник ЭДС  $\beta I_B r_K$ . В схеме выполнены те же самые эквивалентные преобразования, как и в случае схемы с общей базой, в том числе и преобразования эквивалентного источника (рисунок 2.3б).

Для схемы ОЭ также выполняется соотношение (2.4).

Второй закон Кирхгоффа записывается как:

$$I_K r_K + I_K R_H + I_{\mathcal{E}} r_{\mathcal{E}} = \beta I_B r_K \quad (2.15)$$

Подставляя уравнение (2.4) в (2.15) получим:

$$I_K r_K + I_K R_H + I_B r_{\mathcal{E}} + I_K r_{\mathcal{E}} = \beta I_B r_K \quad (2.16)$$

Тогда связь между коллекторным и базовым током:

$$\frac{I_K}{I_B} = \frac{\beta r_K - r_{\mathcal{E}}}{R_H + r_K + r_{\mathcal{E}}} = \frac{\beta - \frac{r_{\mathcal{E}}}{r_K}}{1 + \frac{(R_H - r_{\mathcal{E}})}{r_K}} \quad (2.17)$$

Полученное выражение упрощается, т.к., как правило, сопротивление

$$r_K \gg R_H, r_{\mathcal{E}}, R_H + r_{\mathcal{E}}$$

эмиттера очень мало. Если , то соотношение между

токами равно коэффициенту  $\beta$ . Как правило, в транзисторах справедливо

$$r_K \gg r_{\mathcal{E}}$$

только неравенство и формула (2.15) преобразуется в

$$\frac{I_K}{I_B} = \frac{\beta}{1 + \frac{R_H}{r_K}} \quad (2.17')$$

Аналогично предыдущему случаю вводят эффективный коэффициент

$$\beta_0 = \frac{\beta + r_{\text{э}}/r_K}{1 + \frac{(R_H + r_{\text{э}})}{r_K}}$$

передачи базового тока

, либо упрощённый вариант,

определяемый соотношением (2.17).

Аналогичным образом можно ввести коэффициент передачи эмиттерного

тока, который нетрудно получить из соотношения (2.4):  $\alpha_0 = \frac{\beta_0}{1 + \beta_0}$ .

$$I_{\text{э}} = \frac{I_B}{(1 - \alpha_0)} \quad (2.18)$$

Закон Кирхгофа для входной цепи:

$$U_{\text{эБ}} = I_{\text{э}} r_{\text{э}} + I_B r_B \quad (2.19),$$

Т.е.

$$U_{\text{эБ}} = I_B \left( r_B + \frac{r_{\text{э}}}{(1 - \alpha_0)} \right) \quad (2.20)$$

Тогда входное сопротивление схемы

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{эБ}}}{I_{\text{э}}} = r_B + \frac{r_{\text{э}}}{(1 - \alpha_0)} = r_B + r_{\text{э}}(\beta_0 + 1) \quad (2.21)$$

Выходное сопротивление со стороны коллектора:

$$\begin{aligned} R_{\text{ВЫХ}} &= \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_K} = \frac{-I_K r_K - I_{\text{э}} r_{\text{э}} + \beta I_B r_K}{I_K} = \frac{-I_K r_K - \frac{I_K r_{\text{э}}}{\alpha_0} + \beta \frac{I_K r_K}{\beta_0}}{I_K} = \\ &= r_K \left( \frac{\beta}{\beta_0} - 1 \right) - \frac{r_{\text{э}}}{\alpha_0} \approx R_H \end{aligned} \quad (2.22)$$

В силу малости сопротивления эмиттера, в некоторых случаях, им можно также пренебречь. В этом случае выходное сопротивление также равно  $R_H$ .

Коэффициент усиления по току:

$$K_i = \frac{I_K}{I_B} = -\beta_0 \quad (2.23)$$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = -K_i \frac{R_H}{R_{ВХ}} = \frac{-\beta_0 R_H}{r_B + (\beta_0 + 1)r_E} \quad (2.24)$$

Таким образом, в схеме с общим эмиттером по сравнению со схемой ОБ коэффициент усиления по току и по напряжению выше примерно в  $\beta$  раз при равных значениях входного сопротивления и сопротивления нагрузки. Отрицательный знак коэффициента усиления появляется вследствие того, что токи базы и коллектора текут в противоположном направлении. С точки зрения работы усилителя означает, что напряжение на входе и на выходе находятся в противофазе, иными словами схема меняет фазу выходного напряжения на  $\pi$ .

Схема с общим коллектором (коллекторный повторитель) показана на рисунке 2.1в. Эта схема не усиливает напряжение, но усиливает ток. Поэтому такую схему называют также повторителем напряжения. Фазы напряжений на входе и выходе совпадают. Особенностью работы схемы является высокое входное сопротивление и низкое выходное. Эта схема полезна для согласования по мощности. У схемы малое выходное и большое входное сопротивления. На выходе усилительного каскада, например, с ОЭ, большое выходное сопротивление. Если нагрузка низкоомная, то схема будет работать неправильно.

Подводя итог типовым схемам усилителя, рассмотрим таблицу 2.1:

Таблица 2.1. Параметры схем усилителя

	$R_{вх}$	$R_{вых}$	$K_i$	$K_u$
ОЭ	$r_{\bar{o}} + (\beta + 1) \cdot r_{\bar{c}}$ - среднее	$R_H$	$-\beta$	$\frac{-\beta_0 R_H}{r_B + (\beta_0 + 1)r_{\bar{c}}}$
ОБ	$r_{\bar{c}} + \frac{r_{\bar{o}}}{1 + \beta}$ - низкое	$R_H$	$\alpha$ - не усиливает ток	$\frac{\alpha_0 R_H}{r_{\bar{c}} + (1 - \alpha_0)r_B}$
ОК	$(1 + \beta)R_{\bar{c}}$ - высокое	$\frac{r_{\bar{o}}}{1 + \beta}$ низкое	$1 + \beta$	1

Далее будет подробно рассмотрена схема с общим эмиттером, поскольку она является наиболее распространённой.

## 2.2. Схема усилителя низкой частоты с общим эмиттером

Схема простейшей усилительной ячейки с общим эмиттером, обеспечивающая усиление, показана на рисунке 2.4 [8]. Для обеспечения активного режима на базу необходимо подать положительный относительно эмиттера потенциал (*n-p-n* транзистор).

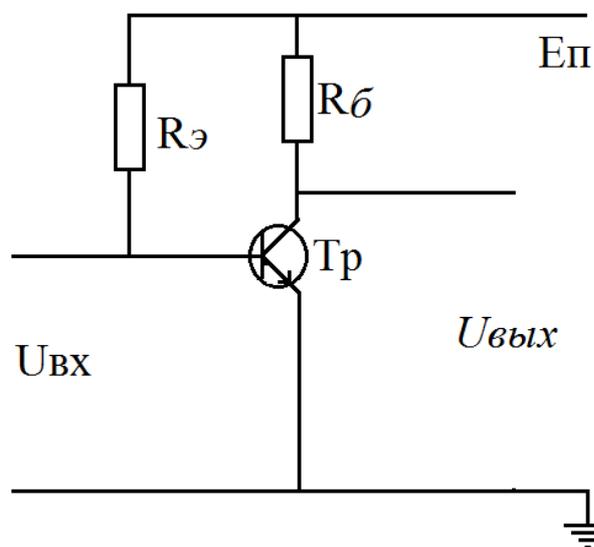


Рисунок 2.4. – Схема простейшей усилительной ячейки с общим эмиттером.

На коллектор должен быть также подан положительный потенциал, величина которого должна быть выше потенциала базы:

$$U_{KЭ} > U_{БЭ} \quad (2.25)$$

, для обеспечения обратного смещения коллектора. Это реализуется путём подбора сопротивлений  $R_B$  и  $R_K$ :

$$U_{БЭ} = E_K - I_B R_B \quad (2.26)$$

$$U_{KЭ} = E_K - I_K R_K \quad (2.27)$$

Для выполнения условия (2.23):

$$E_K - I_K R_K > E_K - I_B R_B \quad (2.28)$$

$$\beta I_B R_K < I_B R_B \quad (2.28')$$

Получено с учётом (1.16') и (2.17). Сокращая ток базы, получим:

$$R_B > \beta R_K \quad (2.29)$$

При выполнении условия (2.29) обеспечивается активный режим работы и усиление.

Недостатком схемы является нестабильность работы при изменении температуры. Одним из свойств любого полупроводника является существенное изменение проводимости при изменении температуры [6]. С ростом температуры, сопротивление областей полупроводника уменьшается, с уменьшением температуры – растёт. Это оказывает существенное влияние на выбор рабочей точки. Например, с изменением температуры меняется ток базы, при этом, в формуле (2.26) меняется напряжение на базе. В ряде случаев это выводит транзистор из активного режима. Наиболее вероятным является смещение рабочей точки, что изменяет основные параметры транзистора. Это, в свою очередь, изменяет коэффициент усиления схемы. В том случае, если требуется высокая стабильность коэффициента усиления, необходимо усложнение схемы.

Существует несколько вариантов стабилизации рабочей точки усилителя [8]. Рассмотрим один из них, показанный на рисунке 2.5. Здесь

вместо сопротивления  $R_B$  вводится делитель  $R_1, R_2$ , задающий напряжение и ток на переходе база-эмиттер.

Рассмотрим участок входной цепи усилителя. Согласно законам Кирхгофа:

$$U_{R1} + U_{R2} = E_K \quad (2.30)$$

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = E_K \quad (2.31)$$

$$I_1 = I_2 + I_B \quad (2.32)$$

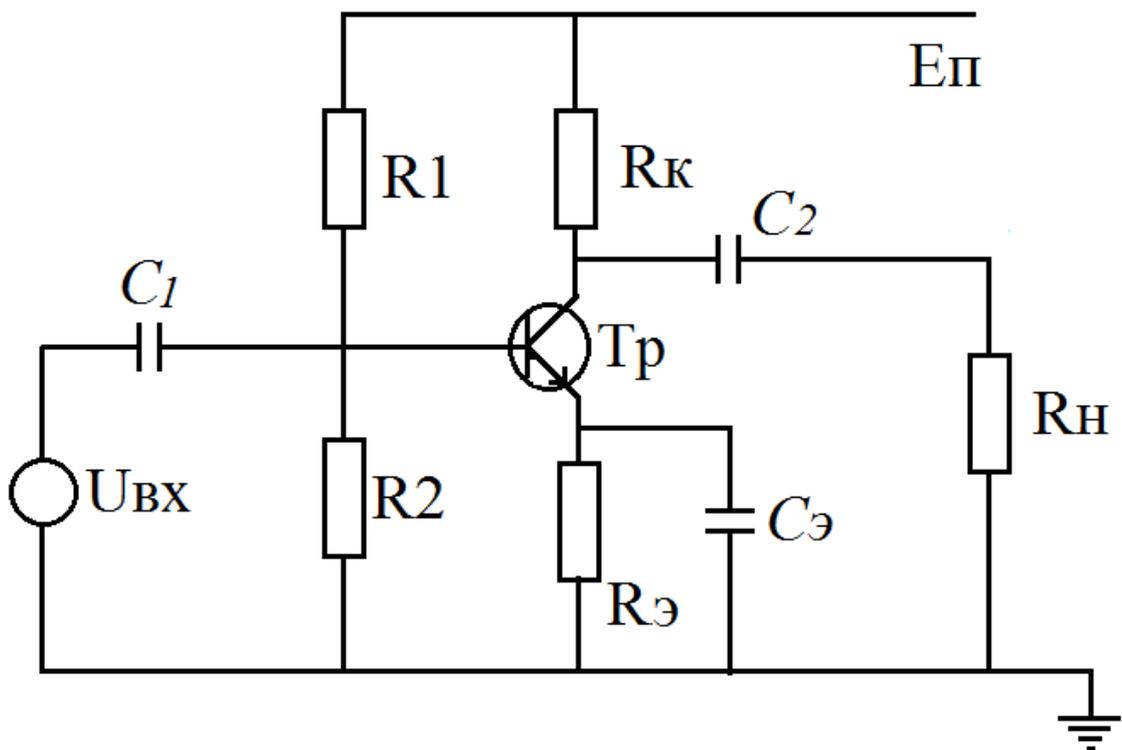


Рисунок 2.5. Схема усилителя с общим эмиттером при температурной стабилизации рабочей точки

Очевидно, что в данной схеме ток базы в меньшей степени оказывает влияние стабильность рабочей точки. В том случае, когда в схему не введёны  $R_э$  и  $C_э$ , потенциал базы задаётся сопротивлением  $R_2$  и током  $I_2$ :

$$U_{R2} = U_{БЭ} = I_2 R_2 \quad (2.33)$$

В то же время распределение токов между сопротивлением  $R_2$  и базой транзистора (а следовательно и ток  $I_2$ ) зависит от свойств базы. Таким образом, в общем виде схема делителя не позволяет полностью исключить влияние температурной нестабильности транзистора на параметры рабочей точки. Для того чтобы исключить влияние транзистора на потенциал базы, сопротивление  $R_2$  должно быть таково, чтобы выполнялось:

$$I_B \ll I_2; \quad I_2 \approx I_1 \quad (2.34)$$

В этом случае напряжение

$$U_{R_2} = U_{BЭ} = I_2 R_2 \approx \frac{E_K R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.35)$$

т.е. входное напряжение задаётся полностью сопротивлениями  $R_1; R_2$ .

Введём количественное условие для выполнения соотношения (2.35).

Для полного анализа необходимо построение нагрузочной характеристики с нелинейным элементом и двумя линейными сопротивлениями. Для упрощённого анализа построим часть эквивалентной схемы, соответствующую входной ячейке. В активном режиме на входе транзистора имеется малое входное сопротивление  $R_{BX} = r_B + r_э(\beta_0 + 1)$ , согласно (2.21).

Токи между сопротивлениями распределены как:

$$I_2 R_2 = I_B R_{BX} \quad (2.36)$$

Тогда можно записать:

$$I_B = \frac{I_2 R_2}{R_{BX}} \quad (2.37)$$

Тогда условие (2.32) переписется как:

$$\frac{I_2 R_2}{R_{BX}} \ll I_2 \Rightarrow \frac{R_2}{R_{BX}} \ll 1 \quad (2.38)$$

Т.е. при условии, что сопротивление  $R_2$  значительно ниже входного сопротивления транзистора, потенциал базы не зависит от параметров самого транзистора.

На практике такое условие трудно выполнимо, т.к. входное сопротивление транзистора в схеме с общим эмиттером сравнительно низкое ( $\sim$  кОм). Уменьшение сопротивления  $R_2$  ниже этого значения затруднительно, т.к. при этом во входной цепи будет протекать большой ток  $I_1$ , который увеличит энергопотребление схемы.

Входное сопротивление может быть увеличено путём введения в цепь эмиттера резистора  $R_Э$ . Указанный резистор выполняет несколько функций, одна из них – это изменение входного сопротивления:

$$R_{BX} = r_B + (r_Э + R_Э)(\beta_0 + 1) \quad (2.39)$$

Это существенно увеличивает возможные значения  $R_2$ , удовлетворяющие условию (2.36). Увеличение значения  $R_2$ , в свою очередь, снизит пассивный с точки зрения работы усилителя ток  $I_1$ .

Другое назначение резистора  $R_Э$  - это стабилизация выходной цепи схемы. При увеличении температуры возрастает постоянный ток коллектора [9]. Это приводит к возрастанию тока эмиттера. Возрастание тока эмиттера приведёт к увеличению падения напряжения на сопротивлении  $R_Э$ . Поскольку потенциал базы жёстко фиксирован сопротивлениями  $R_1; R_2$ , увеличение напряжения на  $R_Э$  приведёт к снижению напряжения между базой и эмиттером. При этом уменьшится прямосмещённый ток базы и, соответственно, ток коллектора. Уменьшение тока коллектора компенсирует увеличение тока коллектора за счёт нагрева.

Потенциал коллектора в схеме задаётся сопротивлениями  $R_Э$  и  $R_К$ . Параллельно  $R_Э$  в цепь включён конденсатор  $C_Э$ , который нужен для шунтирования переменной составляющей эмиттерного тока. Действительно, увеличение общего сопротивления эмиттера приведёт к уменьшению тока через эмиттер и снижению коэффициента усиления. Для того, чтобы этого избежать в цепь включается конденсатор  $C_Э$ , ёмкость которого должна быть как можно больше, для того, чтобы сопротивление переменному току было минимальным. Ёмкость не влияет на работу транзистора в режиме постоянных токов, а переменный ток протекает в цепи эмиттера через ёмкость, таким образом, общее сопротивление эмиттерной цепи для переменного тока снижается.

Во входную цепь схемы введён конденсатор  $C_1$ , его назначение - изоляция входной цепи от постоянных составляющих входных сигналов. В общем виде входной сигнал представляет собой сумму переменной и постоянной составляющей:

$$U_{BX} = U_{const} + u(t) \quad (2.40)$$

По смыслу, постоянная составляющая является средним по периоду значением входного напряжения. В частном случае, среднее значение сигнала равно нулю. Действие постоянной составляющей на вход схемы изменяет параметры входного напряжения, т.е. выбранную рабочую точку, что может изменить коэффициенты усиления либо вывести транзистор из активного режима. Поэтому на входе схемы постоянная составляющая блокируется конденсатором  $C_1$ . Входная ячейка, таким образом, представляет собой простейший RC фильтр низких частот. На переменный сигнал ёмкость  $C_1$  не оказывает влияния. Ёмкость  $C_2$  служит для изоляции выхода от действия напряжения  $E_К$ . В случае отсутствия ёмкости, на

выходном сопротивлении всегда будет постоянное напряжение от источника питания, зависящее от тока в коллекторной цепи.

### 2.3. Частотные характеристики транзистора

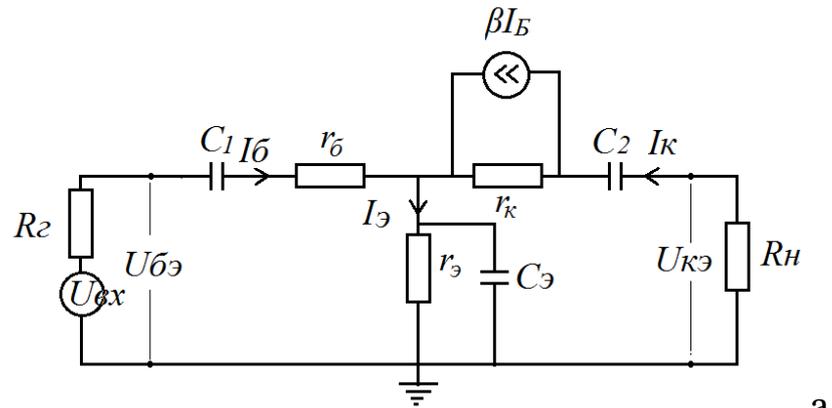
На рисунке 2.6 показаны эквивалентные схемы усилительного каскада с общим эмиттером в области низких, средних и высоких частот.

Сопротивление  $R_K$  соединено с источником питания  $E_K$ . Однако в эквивалентной схеме для переменного сигнала источник питания отсутствует, его влияние учтено в источнике тока  $\beta I_B$ . Потенциал точки  $E_K$  зануляется. При этом сопротивление коллектора становится включённым параллельно сопротивлению  $R_H$ . Аналогичным образом, сопротивление  $R_1$  соединяется параллельно  $R_2$ .

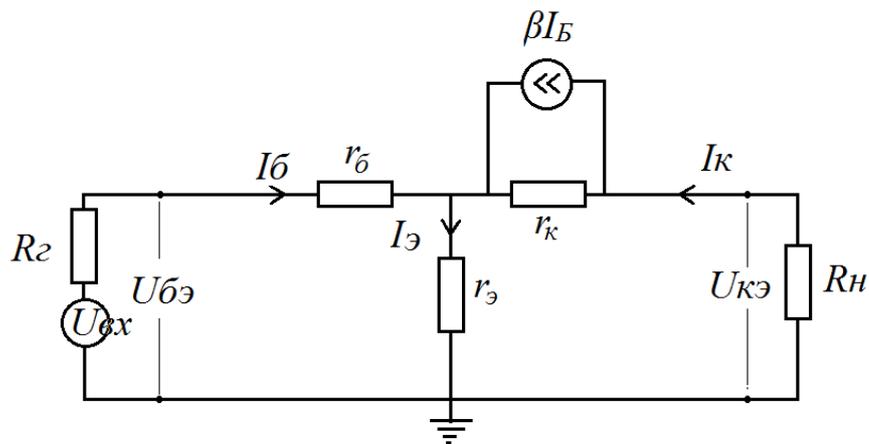
Путём эквивалентных преобразований, показанных на рисунке 2.3б, сопротивления  $R_1, R_2$  заменяются на эквивалентное сопротивление  $R_2$ . Аналогичным образом, сопротивления  $R_H$  и  $R_K$  заменяются на эквивалентное сопротивление  $R_H$ .

На низких частотах влияние ёмкостей на работу схемы велико, т.к. значения импеданса для ёмкостей сравнимы со значениями сопротивлений. Входная ёмкость уменьшает амплитуду входного сигнала. Ёмкость  $C_Э$  уменьшает коэффициент усиления.

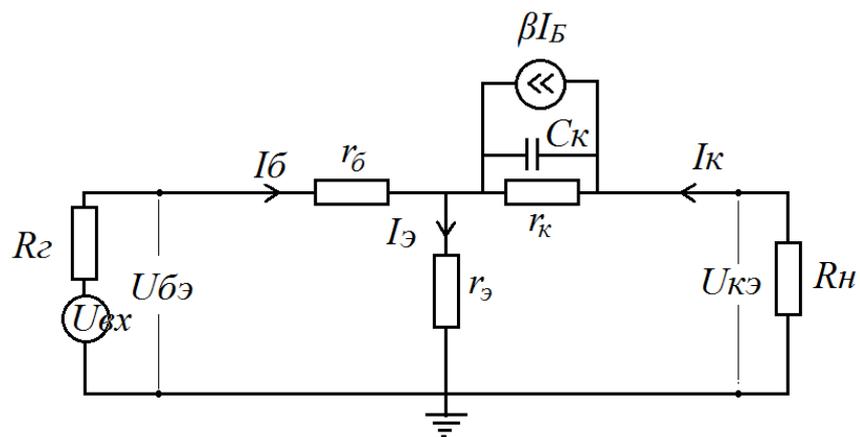
На средних частотах схема работает наиболее оптимально. Значения импеданса ёмкостей становятся значительно ниже сопротивлений резисторов в схеме. Поэтому в эквивалентной схеме ими пренебрегают. Ёмкость  $C_Э$  шунтирует сопротивление эмиттера, поэтому на схеме оно также не отображено. Таким образом, для средних частот характерно наибольшее значение коэффициента усиления.



а



б



в

Рисунок 2.6. – Эквивалентные схемы усилителя с общим эмиттером в области низких (а), средних (б) и высоких (в) частот.

На высоких частотах начинает оказывать влияние ёмкость  $C_{к}^*$ . С точки зрения физики – это ёмкость обратнo-смещённого коллекторного перехода. Обратное смещение препятствует протеканию тока из коллектора,

таким образом, обеспечивается максимальный коэффициент усиления. На высоких частотах ёмкость  $C_K^*$  шунтирует коллекторный переход, через неё из коллектора начинают утекать носители. Это уменьшает общий ток коллектора и, таким образом, снижает коэффициент усиления. Чем выше частота, тем выше паразитный эффект коллекторной ёмкости, тем ниже коэффициент усиления.

Таким образом, из анализа эквивалентных схем может быть представлена качественная зависимость коэффициента усиления схемы с общим эмиттером от частоты (амплитудно-частотная характеристика – АЧХ). Такая зависимость представлена на рисунке 2.7.

Спад коэффициента усиления в области нижних частот обусловлен влиянием входных и выходных ёмкостей. На средних частотах коэффициент усиления практически не зависит от частоты. Это стандартный диапазон частот для усилителя с ОЭ. На высоких частотах коэффициент усиления снижается. Это связано с влиянием коллекторной ёмкости. Снижение коэффициента усиления на высоких частотах обусловлено также свойствами самого транзистора. Например, коэффициент усиления снижается, когда период гармонического сигнала становится сравним со временем пролёта неосновных носителей через базу. Для снижения этого времени формируют транзисторы с тонкой базой.

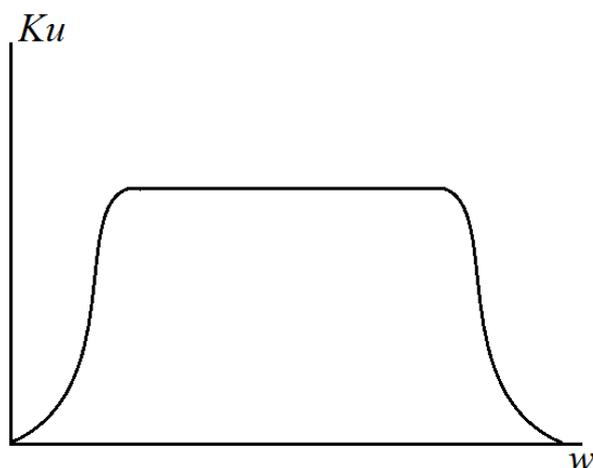


Рисунок 2.7. – Вид зависимости коэффициента усиления от частоты.

Для количественной оценки диапазона частот, на которых осуществляется усиление, вводят понятие верхней и нижней граничной частоты усилителя. Граничной частотой называется частота, на которой амплитуда выходного сигнала (соответственно, и коэффициент усиления) снижается в  $\sqrt{2}$  раз<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Существуют другие определения граничной частоты, например, граничная частота по уровню 0,9 – когда коэффициент усиления принимает значение 0,9 от максимального. Наиболее часто встречается критерий  $\sqrt{2}$  от максимального коэффициента усиления.

## 2.4. Экспериментальная часть

В рамках экспериментальной части предлагается провести расчёт схемы усилителя с общим эмиттером. На основании расчёта необходимо собрать схему усилителя и измерить её параметры (коэффициент усиления, частотную зависимость, граничные частоты).

### 2.4.1. Расчёт усилителя с общим эмиттером

При монтаже и эксплуатации схемы усилителя основной задачей является обеспечение усиления переменного сигнала. Требования к коэффициенту усиления могут отличаться в зависимости от задачи. Возможна задача получения максимального усиления, либо возможно требование определённого значения коэффициента усиления.

Для решения указанной задачи производится расчёт схемы усилителя для выбранного конкретного транзистора. Расчёт состоит из следующих этапов:

1) **Выбор рабочей точки.** В схеме усилителя транзистор вводится в активный режим работы. В этом режиме требуется прямое смещение эмиттерного перехода и обратное смещение коллекторного перехода. Для задания смещений анализируются статические характеристики транзистора. На характеристиках выделяется область активного режима (рисунок 1.9, 1.10). Затем на выходной и входной характеристиках выбираются значения токов и напряжений, лежащих в области активного режима. Указанный набор значений:  $U_{БЭ}$ ,  $U_{КЭ}$ ,  $I_B$ ,  $I_Э$  – называется **рабочей точкой**. Выбор рабочей точки зависит от конкретной задачи, для которой используется усилитель. В общем случае рабочая точка выбирается в центре активного режима, таким образом, амплитуда входного переменного сигнала не выводит транзистор из активного режима<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Существуют варианты выбора рабочей точки вблизи режима отсечки либо режима насыщения. В первом случае не усиливается нижняя полуволна входного гармонического сигнала, во втором – верхняя.

На рисунке 2.8 показаны выходные характеристики транзистора с выбранной рабочей точкой.

**2) Расчёт схемы усилителя.** Теоретический расчёт работы усилителя известен из учебной и справочной литературы. В настоящем пособии упрощённый расчёт был проведён выше. Для практических применений большее значение имеет расчёт параметров схемы, обеспечивающих требуемое усиление. Ниже приведён порядок расчёта[11]:

Дано: тип транзистора, рабочая точка транзистора (это 4 значения  $U_{БЭ}$ ,  $U_{КЭ}$ ,  $I_B$ ,  $I_K$ ), напряжение источника питания. Параметры транзистора, а также рабочая точка определяются в рамках 1-й части пособия.

Задача: подобрать параметры схемы (сопротивления и ёмкости), обеспечивающие усиление в нужном диапазоне частот. В рамках данного пособия поставлена принципиальная задача усиления сигнала, к коэффициентам не предъявляется высоких требований.

Для решения поставленной задачи выбираются номиналы резисторов, исходя из известных соотношений для транзистора, а также выбранной рабочей точки.

Значения  $U_{КЭ}$ ,  $I_B$ ,  $I_K$  выбираются по выходным характеристикам. В центре активного режима для заданного значения тока базы выбирается ток коллектора и напряжение на коллекторе.

Из входных характеристик рассчитывается значение  $U_{БЭ} = f(I_B)$  при заданном напряжении на коллекторе. Важно, чтобы мощность рассеяния на коллекторном переходе  $P_K = U_{КЭ} * I_K$  не превышала предельно допустимой для данного вида транзистора.

Для выбранных значений рабочей точки рассчитываются  $h$ -параметры транзистора, в том числе коэффициент усиления по току  $\beta$  и входное сопротивление.

Для выбора сопротивлений коллекторной и эмиттерной цепей строится нагрузочная характеристика, как показано на рисунке 2.8

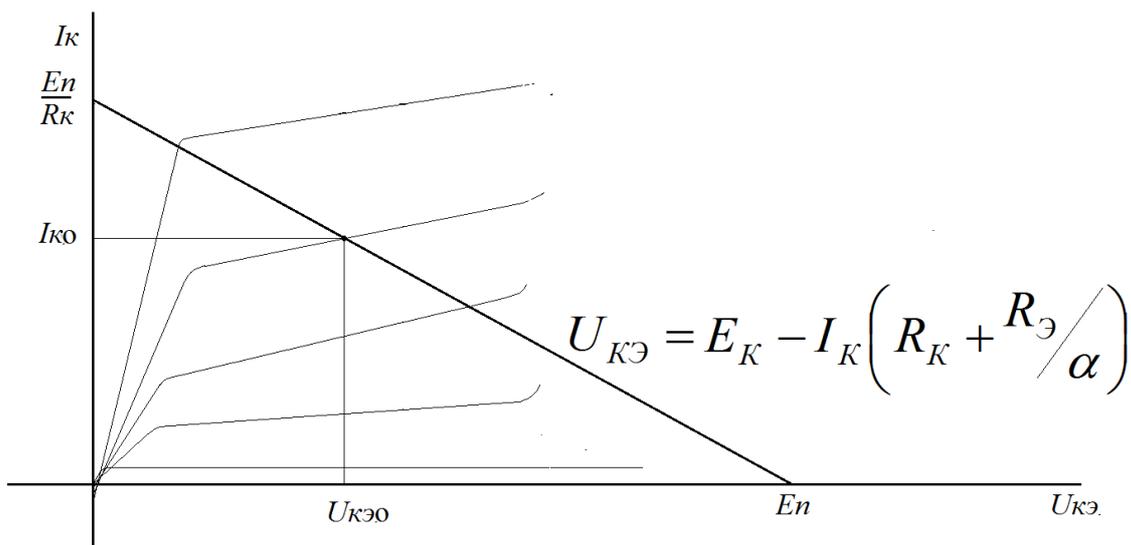


Рисунок 2.8. – Графический расчёт сопротивлений коллектора и эмиттера из выходных характеристик транзистора

На одном графике строится семейство выходных характеристик и уравнение для тока через  $R_K$  и  $R_{Э}$ . Можно записать, что

$$U_{кэ} = E_K - I_K R_K - I_{Э} R_{Э} = E_K - I_K \left( R_K + \frac{R_{Э}}{\alpha} \right) \quad (2.41)$$

Если нанести зависимость, определяемую формулой (2.41) на график семейства выходных ВАХ, она пересекает кривые семейства при разных значениях напряжения коллектора. Кривую, соответствующую выбранному значению тока базы, эта прямая пересекает в рабочей точке. Таким образом рассчитываются сопротивления:

$$R_K + \frac{R_{Э}}{\alpha} = \frac{E_K - U_{кэ}}{I_K} \quad (2.42)$$

Все значения токов и напряжений здесь известны, коэффициент  $\alpha$  может быть рассчитан из коэффициента  $\beta$ . Для приближённых расчётов его можно принять равным 1. Для  $R_K$  должно выполняться условие обратного смещения коллекторного перехода:

$$E_K - I_K R_K > E_K - I_1 R_1 \quad (2.43)$$

где  $I_1 \approx \frac{E_K}{R_1 + R_2}$ , тогда неравенство (2.43) переписывается как:

$$\frac{R_1}{(R_1 + R_2)R_K} > \frac{I_K}{E_K} \quad (2.43')$$

Рассмотрим входную цепь. В рамках настоящего пособия выбран режим температурной стабилизации потенциала базы, для такого режима выполняются условия (2.36, 2.37).

В этом случае, согласно (2.33):

$$U_{R2} \approx \frac{E_K R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.44)$$

Или

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx \frac{U_{R2}}{E_K} \quad (2.44')$$

Таким образом, напряжение на базе относительно эмиттера задаётся выбором сопротивлений  $R_1, R_2$ , эти сопротивления могут быть любыми, подходящими для выполнения условия (2.41). Однако на сопротивление  $R_2$  накладывается дополнительное ограничение в связи с условием (2.38, 2.39), которое можно записать как:

$$R_2 \ll R_3(\beta + 1) \quad (2.45)$$

Таким образом, для расчёта сопротивлений  $R_1, R_2$  необходимо найти напряжение  $U_{R2}$  и  $R_3$ . Эти значения могут быть найдены из известного напряжения на базе:

В том случае, если напряжение на  $R_2$  определяется формулой (2.44), для входной ячейки может быть записан второй закон Кирхгоффа как:

$$U_{R2} = \frac{E_K R_2}{R_1 + R_2} = U_{BЭ} + I_3 R_3 = U_{BЭ} + (\beta + 1) I_B R_3 \quad (2.46)$$

или

$$\frac{E_K R_2}{R_1 + R_2} - (\beta + 1) I_B R_3 = U_{БЭ} \quad (2.46')$$

Таким образом, существует четыре известных соотношения, определяющий выбор сопротивлений:

$$(1) R_2 \ll R_3 (\beta + 1)$$

$$(2) \frac{E_K R_2}{R_1 + R_2} - (\beta + 1) I_B R_3 = U_{БЭ}$$

$$(3) R_K + \frac{R_3}{\alpha} = \frac{E_K - U_{КЭ}}{I_K}$$

$$(4) \frac{R_1}{(R_1 + R_2) R_K} > \frac{I_K}{E_K}$$

Из этих соотношений находятся четыре сопротивления схемы. В силу того, что в некоторых соотношениях стоит знак неравенства, выбор сопротивлений не является единственным. Существует множество наборов сопротивлений, удовлетворяющих названным четырём условиям. В том случае, если целью монтажа схемы является принципиальное получение усиления (как в данном пособии), разницы между различными наборами нет. Однако для определённости можно ввести некоторые критерии.

1) При расчёте много меньше означает примерно два порядка. Для определённости возьмём

$$R_2 = \frac{R_3 (\beta + 1)}{100} \quad (2.47)$$

2) Знак «больше» подразумевает широкий выбор значений, однако для определённости остановимся на

$$\frac{R_1}{(R_1 + R_2) R_K} = 5 \frac{I_K}{E_K} \quad (2.48)$$

При таком выборе получаем 4 уравнения для 4-х неизвестных значений сопротивления. Решив эти уравнения, получим значения сопротивлений, которые необходимо ввести в цепь для обеспечения заданной рабочей точки.

Выбор ёмкостей диктуется интересующим нас диапазоном частот. Ёмкость  $C_3$  должна быть как можно большей, поскольку её основное назначение – это шунтирование переменного сигнала. Ёмкости  $C_1$  и  $C_2$  определяются интересующей нас граничной частотой для входного и выходного CR-фильтра. В зависимости от сопротивлений  $R_1$  и  $R_H$  значения ёмкостей могут варьироваться. Обычно ёмкости выбираются  $C_1 = 0.05 - 50$  мкФ и  $C_2 = 1 - 200$  мкФ.

#### **2.4.2. Моделирование схемы усилителя низкой частоты**

Для наглядного представления особенностей расчета и работы усилителя возможно проведение моделирования схемы усилителя низкой частоты в программной среде NI Multism. На рисунке 2.9 представлена схема усилителя низкой частоты на основе биполярного транзистора 2N1132A, включенного по схеме с общим эмиттером. Для размещения необходимых элементов схемы, нужно, как было рассмотрено выше, в меню Place Component выбрать необходимую группу элементов и выбрать нужные элементы, такие как резисторы (resistor) и конденсаторы (capacitor). Также в область размещения элементов необходимо поместить генератор сигналов (Functional Generator) и осциллограф (Oscilloscope).

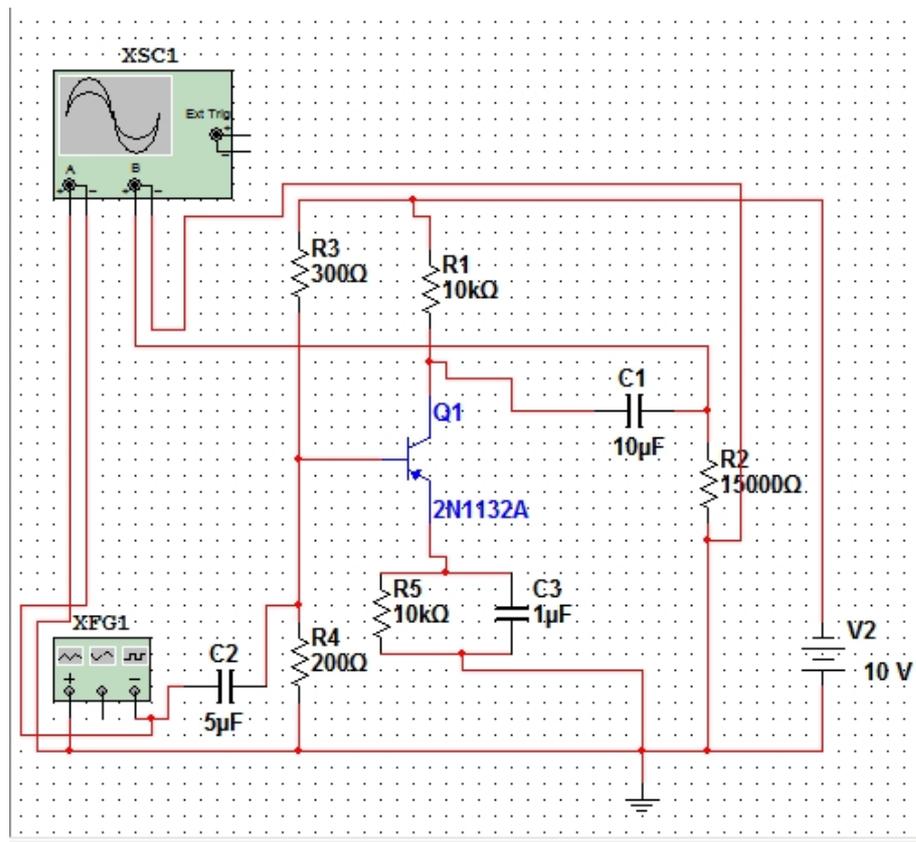


Рисунок 2.9. Схема виртуального усилителя низкой частоты.

На рисунке 2.9 представлена схема виртуального усилителя низкой частоты на основе транзистора 2N1132A. Используя смоделированные входные и выходные характеристики транзистора возможен расчет элементов транзистора по методике, рассмотренной выше. После соединения компонентов схемы двойным нажатием на символ генератора сигналов возможно задание типа сигнала, его амплитуды и частоты. Двойным нажатием на символ осциллографа открывается окно осциллографа. После запуска схемы с помощью осциллографа возможно наблюдение входного сигнала (сигнал с генератора) и усиленного сигнала (рисунок 2.10). При правильном расчете компонентов будет наблюдаться усиление выходного сигнала.

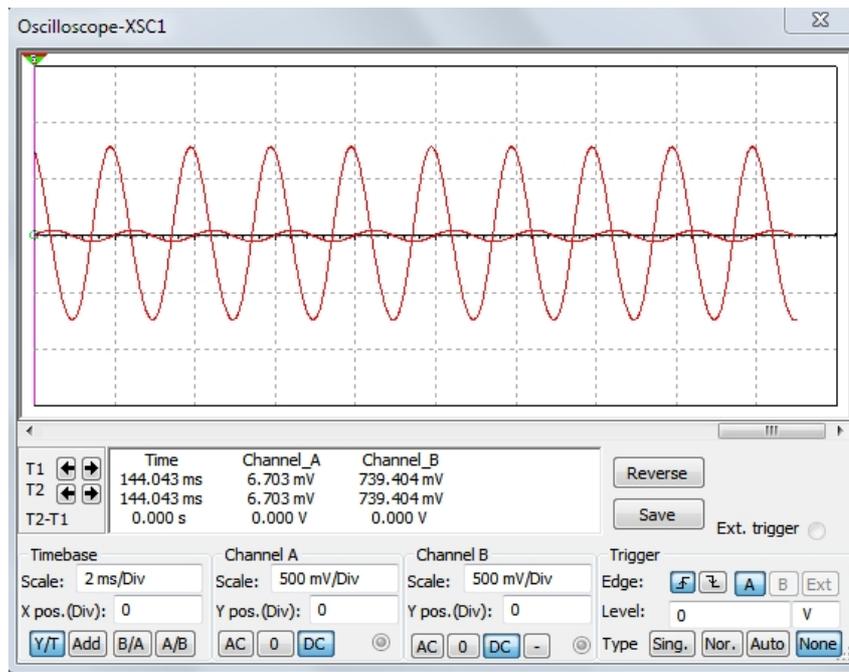


Рисунок 2.10. Окно виртуального осциллографа, отображающего входной и усиленный сигнал.

### 2.4.3. Монтаж схемы усилителя

Монтаж схемы усилителя осуществляется с помощью учебной лабораторной станции NI-Elvis II.

Источник постоянного напряжения (+15 V) подключается к  $R_I$  и  $R_K$ . На вход схемы подключается генератор импульсов (FGen). Нижняя точка эмиттерной цепи заземляется (Ground). Также ко входу схемы подключается один из каналов многоканального осциллографа (AI-0). Другой канал многоканального осциллографа (AI-1) подключается к выходу схемы. Отрицательный контакт входов осциллографа (AI-0-; AI-1-) также заземляется.

Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{\text{Э}}$ ,  $R_K$  подбираются в соответствии с расчётом, проведённым в предыдущем параграфе. Входная и выходная ёмкости выбираются равными, номиналы ёмкостей должны лежать в

названном выше диапазоне. Ёмкость  $C_3$  выбирается максимальной. Сопротивление нагрузки выбирается равным 1 кОм.

Значения сопротивлений и ёмкостей измеряются цифровым мультиметром (DMM). Цифровой мультиметр входит в стандартный набор приборов платы NI-Elvis II. Эти приборы управляются с помощью персонального компьютера, соединённого с платой. Управление осуществляется с помощью программы NI-Elvis Instrument Launcher. Для включения приборов необходимо запустить эту программу. Затем, на открывшейся панели выбрать программу DMM (рисунок 2.11).

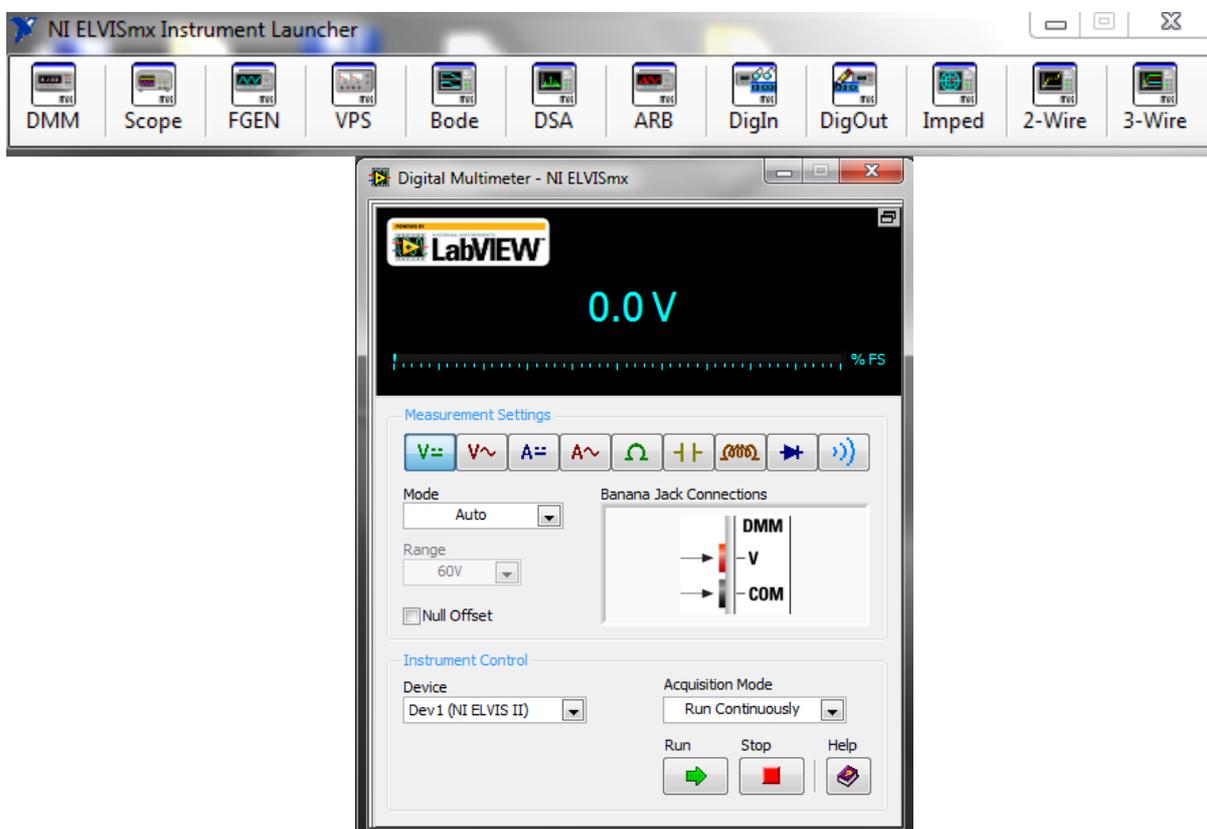


Рисунок 2.11. Главное окно программы NI-Elvis Instrument Launcher и окно программы цифрового мультиметра.

Для измерения сопротивления выбирается значок «Ом». При этом на виртуальной панели прибора отображается схема соединения контактов резистора для измерения сопротивления. Для измерения ёмкости необходимо нажать значок конденсатора. На виртуальной панели прибора также отображается схема соединений для измерения ёмкости. Непосредственно

измерение осуществляется после присоединения контактов и нажатия кнопки «Run».

В схеме усилителя используется *n-p-n* транзистор, исследованный в первой части работы. Перед выполнением второй части должны быть известны входные и выходные характеристики транзистора, также его *h*-параметры. Перед монтажом схемы усилителя необходимо измерить номиналы всех используемых сопротивлений.

#### **2.4.4. Применение генератора импульсов и осциллографа**

Для питания схемы усилителя на коллектор подаётся питание +15 В. Первым экспериментальным заданием является **исследование работы усилителя**. Для этого включается программа NI-Elvis Instrument Launcher. В этой программе выбираются подпрограммы генератора сигналов (FGEN) и осциллографа (Scope).

Программа FGEN подаёт периодический сигнал на выход FGEN на плате (рисунок 2.12). Вид сигнала определяется на панели программы. Для исследования транзистора выбирается синусоидальный сигнал. Для этого на панели нажимается кнопка с волнистой линией. Другие варианты сигнала – это треугольный импульс и прямоугольный. С помощью ручки «frequency» задаётся частота сигнала в Гц. Частоту можно задавать рукой либо вводить значение частоты в поле, расположенное под ручкой. Амплитуда сигнала задаётся с помощью ручки «amplitude» либо путём введения значения амплитуды в поле под этой ручкой. С помощью ручки «DC offset» задаётся величина постоянного смещения. Нажатие кнопки «Run» включает генератор периодического сигнала.

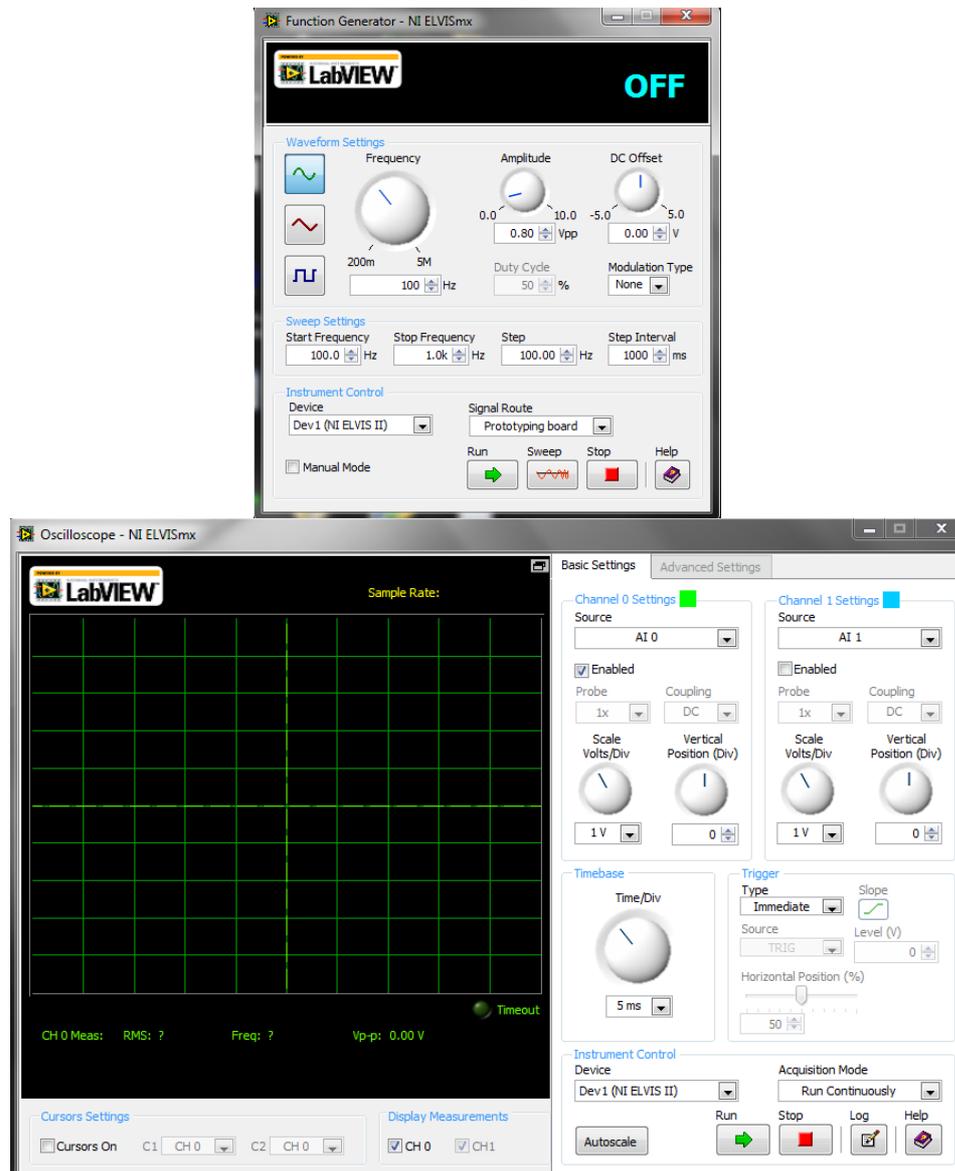


Рисунок 2.12. Окно программы генератора сигналов и осциллографа.

Для измерения периодического сигнала используется многоканальный осциллограф (рисунок 2.12). Каждый канал на плате обозначается значком AI- (AI-0, AI-1 и т.д.). Обязательным условием является заземление отрицательного контакта каждого используемого канала. Панель управления осциллографом выводит на экран сигнал с двух любых каналов. Выбранный канал устанавливается в окне «Source» в настройках 1-го и 2-го входов осциллографа. Под окошками «Source» расположены ручки управления ценой деления осциллографа. Цена деления меняется дискретно в диапазоне от 0,2 до 5 В. На экране отображается зависимость амплитуды сигнала от времени. Цена деления шкалы времени устанавливается ручкой «Time/Div».

Амплитуда сигнала для каждого из каналов отображается разным цветом (синим и зелёным). Амплитуда может быть измерена по числу делений, умноженному на цену наименьшего деления. Также значение амплитуды отображается в нижнем правом углу экрана осциллографа. Кнопка «autoscale» автоматически выставляет цену деления по амплитуде напряжения для того, чтобы сигнал целиком отображался в окне осциллографа.

Для исследования работы схемы усилителя выполняются следующие операции:

1) Подключить собранную схему, установить сопротивление  $R_H = 1$  кОм. Включить программы осциллографа и генератора сигналов.

2) На осциллографе выбрать каналы, соединённые с входом и выходом усилителя.

3) На генераторе установить синусоидальное напряжение. Установить частоту 1 кГц, амплитуду входного сигнала – 0.1 В. Смещение должно быть равно нулю.

4) Включить генератор – подать синусоидальное напряжение на образец. Включить осциллограф, проверить отсутствие искажений на выходе усилителя. В случае, если искажения присутствуют, уменьшить амплитуду входного сигнала на с помощью генератора.

5) Вычислить коэффициент усиления схемы, разделив выходное напряжение на входное. В том случае, если коэффициент усиления меньше единицы – увеличить частоту входного сигнала.

6) В том случае, если искажений нет, увеличивать амплитуду входного сигнала до появления искажений. Записать амплитуду, при которой появляются искажения.

7) Записать входной и выходной сигналы осциллографа с помощью функции Print Screen компьютера, либо нажав кнопку «Stop», затем кнопку

«Log» на осциллографе. В первом случае изображение сохраняется в виде картинки, во втором – в виде текстового файла.

8) Вычислить и записать коэффициент усиления схемы для данной частоты. Выставить частоту сигнала в 10 раз меньше и в 10 раз больше начальной. Записать коэффициенты усиления.

9) Заменить нагрузочный резистор на резистор с номиналом 10 кОм, 100 кОм, 100 Ом. На частоте, соответствующей максимальному усилению, измерить коэффициент усиления для каждого нагрузочного резистора. **При смене резистора питание платы отключается.**

Результаты измерений коэффициента усиления занести в таблицу.

10) Вычислить коэффициент усиления по формуле:

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\beta I_B \frac{R_K R_H}{(R_K + R_H)}}{I_B R_{BX}} = \frac{\beta R_K R_H}{(R_K + R_H) R_{BX}} \quad (2.49)$$

Входное сопротивление и коэффициент  $\beta$  вычисляется из  $h$ -параметров транзистора.

#### 2.4.5. Исследование частотной зависимости коэффициента усиления

Вторым экспериментальным заданием является исследование частотной характеристики усилителя. Для этого используется программа «Bode» на панели NI-Elvis Instrument Launcher. Программа предназначена для измерения зависимости коэффициента пропускания любой схемы от частоты (рисунок 2.13). В левом окне программы отображаются зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала от частоты. Входное напряжение поддерживается постоянным, поэтому в окне отображаются зависимости для коэффициента усиления. В правой части окна, вверху отображаются входной и выходной каналы («stimulus channel» и «response channel» соответственно). В качестве входного следует выбрать канал осциллографа, подключённый ко входу схемы, в качестве выходного – канал, подключённый к выходу.



Рисунок 2.13. Окно программы измерения коэффициента пропускания схемы от частоты.

Ниже задаётся начальная частота, ещё ниже – конечная частота. Под панелями частоты расположена панель задания шага. Задаётся число шагов на 1 степень изменения частоты. Ниже расположены окна задания амплитуды и полярности входного сигнала.

Ниже задаётся шкала отображения. В случае выбора логарифмической шкалы отображается логарифм коэффициента усиления от частоты. В случае линейной – непосредственно коэффициент усиления.

Нажатие кнопки «Run» запускает измерение зависимости коэффициента усиления и изменения фазы от частоты. Измерение проводится от начального значения до конечного.

Измеренные зависимости записываются на компьютер либо с помощью функции Print Screen, либо нажатием кнопки «Log» на осциллографе. В

первом случае изображение сохраняется в виде картинка, во втором – в виде текстового файла.

Для исследования частотных характеристик усилителя выполняются следующие операции:

1) Схема подключается аналогично предыдущему случаю. Включить программу «Vode». Выставить нужные каналы. Начальную частоту взять минимальной, конечную – максимальной.

2) Амплитуду входного сигнала поставить такую же, как и в предыдущем случае.

3) Измерить частотную зависимость коэффициента усиления. Результаты сохранить.

4) Проанализировать полученную зависимость. Найти нижнюю и верхнюю граничную частоту.

5) Сравнить измеренное значение нижней граничной частоты со значением, рассчитанным из формулы:

$$f_{НЧ} = \frac{1}{2\pi C_2 (R_K + R_H)} \quad (2.50)$$

6) Изменить выходной конденсатор на конденсатор с ёмкостью в 10 раз большей и 10 раз меньшей. Прodelать операции 3-5.

7) Результаты измерений занести в таблицу.

## 2.5. Контрольные вопросы

1) Основные схемы включения транзисторов. Механизм усиления по току в схеме с ОЭ.

2) Основные параметры схем с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором. Применение этих схем.

3) Изобразить принципиальную схему усилителя низкой частоты с общим эмиттером. Объяснить назначение всех элементов схемы.

4) От каких параметров транзистора и элементов схемы зависит коэффициент усиления?

5) Изобразить эквивалентные схемы усилителя в области высоких, средних и малых частот. Назвать паразитные элементы схемы.

6) Изложить и дать обоснование порядка расчёта усилителя низкой частоты с общим эмиттером.

7) Что изменится в работе усилителя, если рабочая точка выбрана не в центре активного режима, а вблизи режима насыщения или вблизи режима отсечки?

8) Чем определяется амплитудно-частотная характеристика усилителя?

### 3. Список цитированной литературы

- [1] Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи // М.:Мир. 1984. - Кн.1. - 456 С.
- [2] Щука, А.А. Нанoeлектроника / А.А. Щука // М.:Физматкнига - 2007. - 464 С.
- [3] Нечай, О. Мемристор: «недостающий элемент» / О. Нечай // <http://www.computerra.ru/vision/591537/>
- [4] Ефимов, И.Е. Основы микроэлектроники. Учебник для студентов /И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь // М.: Высш.шк. - 1983. - 384 С.
- [5] Ю, П. Основы физики полупроводников / П. Ю, М. Кардона. М.: Физматлит. - 2002. – 560 С.
- [6] Шалимова, К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова // М.: Энергия. - 1976. - 416 С.
- [7] Демидова, Л.И. Исследование статических характеристик транзистора / Л.И. Демидова, Е.П. Богданов, Н.В. Федосеева // Описание лабораторной работы. Горький. 1983. 20 С.
- [8] Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко // М. Энергия. - 1967. - 615 С.
- [9] Планкина, С.М. Расчёт и исследование усилителя низкой частоты с общим эмиттером / Планкина С.М., Горшков А.П. // Практикум. Нижний Новгород. - 2008. - 15 С.
- [10] Каяцкас, А.А. Основы радиоэлектроники / А.А. Каяцкас // М. Высшая школа. - 1988. - 463 С.
- [11] Шабанов, В.Н. Однокаскадный усилитель на биполярном транзисторе с резистивной нагрузкой / В.Н. Шабанов, С.В. Хазанова // Практикум. Нижний Новгород. - 2008. - 17 С.