

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИНК

\_\_\_\_\_ В.Н. Бориков  
« \_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА**

Методические указания к выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Электроника 1.1», «Электроника 1.2», «Электроника 1.3»  
для студентов направлений 12.03.01 «Приборостроение» и  
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» и др.

*Авторы-составители* **В.В. Гребенников, Ю.В. Мутовин**

Издательство  
Томского политехнического университета  
2016

УДК 681.2(076.5)

ББК 34.9я7

Г79

**Гребенников В.В.**

Г79 Исследование биполярных транзисторов : методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Электроника 1.1», «Электроника 1.2», «Электроника 1.3» для студентов II курса, обучающихся по направлениям 12.03.01 «Приборостроение», 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» и др. / авторы-сост. В.В. Гребенников, Ю.В. Мутовин ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 22 с.

УДК 681.2(076.5)

ББК 34.9я7

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром кафедры  
промышленной и медицинской электроники ИНК  
«\_\_»\_\_\_\_\_ 2016 г.

Зав. кафедрой ПМЭ, кандидат физико-  
математических наук \_\_\_\_\_

*Ф.А. Губарев*

Председатель учебно-методической  
комиссии \_\_\_\_\_

*Ф.А. Губарев*

*Рецензент*

доцент кафедры ПМЭ ТПУ

*Д.Н. Огородников*

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

© Гребенников В.В., Мутовин Ю.В.,

Составление, 2016

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение характеристик и параметров биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

## 2. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*Предварительное домашнее задание:*

- а) изучить тему курса «Биполярные транзисторы» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;
- б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе.

## 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор, является управляемым элементом, который нашел широкое применение в схемах усиления, а также в импульсных схемах. Биполярный транзистор представляет собой трехслойную полупроводниковую структуру с чередующимся типом электропроводности слоев и содержит два р–п-перехода. В зависимости от чередования слоев существуют транзисторы типов р–п–р и п–р–п. Упрощенные структуры транзисторов и их условные графические изображения представлены на рис. 3.1, а, б.

Название прибора "транзистор" составлено из двух английских слов: transfer – переносить, преобразовывать и resistor – сопротивление. Термин "биполярный" отражает тот факт, что ток через транзисторную структуру и усиление сигнала обусловлены движением носителей заряда обоих типов – электронов и дырок.

Трехслойная транзисторная структура создается по сплавной или диффузионной технологии. Транзисторная структура типа р–п–р, выполненная по сплавной технологии, показана на рис. 3.2. Пластина полупроводника п-типа является основанием конструкции и поэтому называется базой. Один внешний слой называется эмиттером, другой – коллектором. Так же называются и р–п-переходы, создаваемые этими слоями со слоем базы и внешние выводы от этих слоев.

Функция эмиттерного перехода – инжектирование носителей заряда в базу, функция коллекторного перехода – сбор носителей заряда, прошедших через базовый слой. Чтобы носители заряда, инжектируемые эмиттером и проходящие через базу, полнее собирались коллектором, площадь коллекторного перехода делают больше площади эмиттерного перехода.

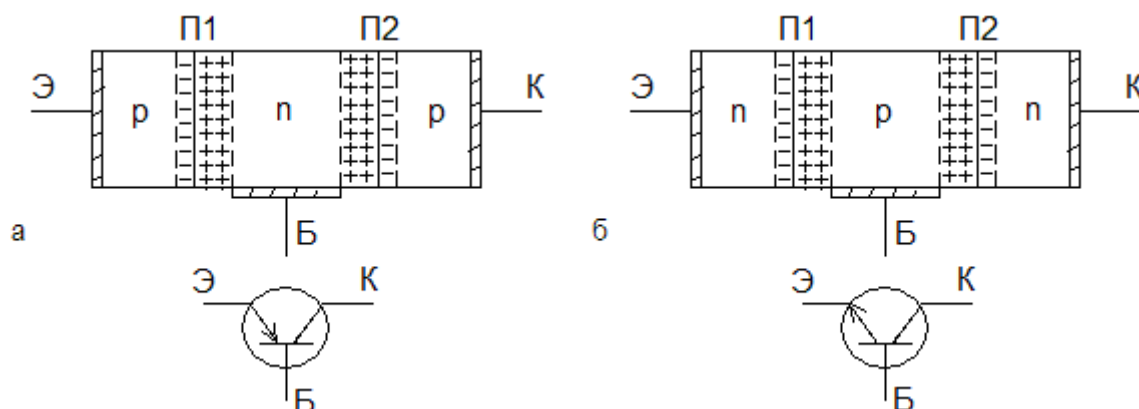


Рис. 3.1

В транзисторах типа  $n-p-n$  функции всех трех слоев и их названия аналогичны, изменяется лишь тип носителей заряда, проходящих через базу: в приборах типа  $p-n-p$  – это дырки, в приборах типа  $n-p-n$  – электроны. Основные свойства транзистора определяются процессами в базе. Если база однородна (т.е. примесь в базе распределена равномерно), то движение носителей в ней чисто диффузионное.

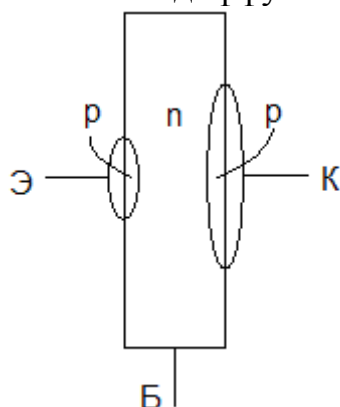


Рис. 3.2

Если база неоднородная, то появляется внутреннее электрическое поле (оно ускоряет носители заряда, инжектированные эмиттером), и тогда движение носителей будет комбинированным: диффузия сочетается с дрейфом. Транзисторы с однородной базой называют бездрейфовыми (или диффузионными), а с неоднородной базой дрейфовыми. В настоящее время дрейфовые транзисторы получили наибольшее распространение.

В зависимости от сочетания полярностей напряжений на  $p-n$  переходах различают четыре режима работы транзистора:

1) нормальный режим (или просто активный), при котором на эмиттерном переходе действует прямое смещение, на коллекторном обратное;

2) режим насыщения, в котором оба перехода смещены в прямом направлении;

3) режим отсечки, при котором оба перехода смещены в обратном направлении;

4) инверсный режим, это когда на эмиттерный переход подается обратное смещение, а на коллекторный переход прямое. Этот режим отличается от нормального режима тем, что эмиттер и коллектор меняются ролями.

В зависимости от того, какой внешний вывод транзистора является общим для входной или выходной цепи, существуют три способа включения биполярного транзистора:

1) с общей базой (ОБ) рис. 3.3, а;

2) с общим эмиттером (ОЭ) рис. 3.3, б;

3) с общим коллектором (ОК) рис. 3.3, в.

В схеме с ОБ входным напряжением является напряжение между эмиттером и базой, выходным напряжение между коллектором и базой; входным является ток эмиттера, выходным ток коллектора.

В схеме с ОЭ входным является напряжение между базой и эмиттером, а выходным напряжение между коллектором и эмиттером; входным током является ток базы, а выходным ток коллектора.

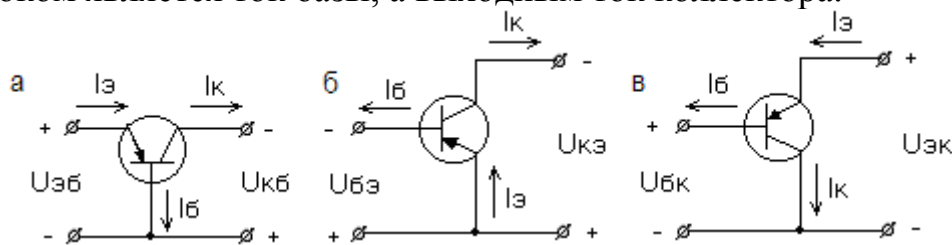


Рис. 3.3

В схеме с ОК входным является напряжение между базой и коллектором, а выходным напряжение между эмиттером и коллектором; входным током является ток базы, а выходным ток эмиттера.

### Принцип действия биполярного транзистора

Транзисторы представляют собой трехмерные структуры, но многие физические процессы можно качественно и количественно правильно описать, применив одномерное приближение, когда учитывается движение потоков носителей заряда только в направлении оси  $x$ , перпендикулярной плоскостям  $p$ - $n$ -переходов. Поэтому примем одномер-

ную модель структуры и рассмотрим принцип действия биполярного транзистора на примере структуры типа  $p-n-p$ .

Распределение концентрации носителей заряда в слоях транзисторной структуры и разности потенциалов, создаваемой объемными зарядами переходов, в отсутствие внешних напряжений показано на рис. 3.4.

Соотношение концентраций основных носителей заряда в эмиттерном и коллекторном слоях транзистора несущественно, и на рис. 3.4, б они приняты одинаковыми. Отличие же в концентрациях основных носителей заряда эмиттерного и базового слоев весьма важно, так как оно влияет на параметры транзистора, в частности на коэффициент передачи тока. Концентрация основных носителей заряда в базе должна быть много меньше концентрации основных носителей заряда в эмиттере,

т.е.  $P_p \gg N_n$ . Таким образом, для транзистора базовый слой должен быть более высокоомным, чем эмиттерный.

Картина распределения концентраций основных и неосновных носителей заряда в слоях структуры будет иметь вид, показанный на рис. 3.4, б. В отсутствие внешних напряжений на границах раздела трех слоев образуются объемные заряды, создается внутреннее электрическое поле и между слоями действует внутренняя разность потенциалов.

Потенциальный барьер в каждом из переходов устанавливается такой величины, чтобы обеспечивалось равновесие диффузионного и дрейфового потоков носителей заряда, движущихся через переходы в противоположных направлениях, т.е. равенство нулю протекающего через них тока.

Поскольку концентрации основных носителей заряда в эмиттерном и коллекторном слоях приняты одинаковыми, потенциальные барьеры в обоих  $p-n$ -переходах будут равны. Если за нулевой уровень отсчета принять потенциал базы, то распределение разности потенциалов в транзисторе в отсутствие внешних напряжений будет иметь вид, показанный на рис. 3.4, в.

При активном режиме работы транзистора внешние напряжения подключают таким образом, чтобы обеспечивалось смещение эмиттерного перехода в прямом направлении, а коллекторного перехода в обратном направлении. Это достигается с помощью двух источников напряжения  $U_э$  и  $U_к$ . На рис. 3.5, а показано подключение источников к переходам транзистора, включенного по схеме с ОБ.

Поскольку на эмиттерном переходе внешнее напряжение действует в прямом направлении, потенциальный барьер для дырок – основных носителей зарядов эмиттерного слоя – уменьшается, и дырки из эмитте-

ра под действием диффузии будут в большем количестве переходить (инжектировать) в область базы.

Аналогичным образом увеличится диффузионный поток электронов (основных носителей заряда области базы) в эмиттер. В результате ширина области объемного заряда (ООЗ) эмиттерного перехода и ее сопротивление уменьшаются.

С учетом достаточно малой для смещенного в прямом направлении перехода составляющей дрейфового тока, создаваемой неосновными носителями заряда областей, ток эмиттерного перехода и соответственно цепи эмиттера можно записать в виде:

$$I_{\varepsilon} = I_{\varepsilon p} + I_{\varepsilon n} \quad (3.1)$$

Дырочная составляющая тока создается потоком дырок, переходящих из эмиттера в базу. Большинство дырок в последующем достигает коллектора и вызывает коллекторный ток транзистора.

Электронная составляющая тока обусловлена движением электронов из базы в эмиттер. Она замыкается по входной цепи через источник  $U_{\varepsilon}$  и не используется для создания тока в коллекторной цепи. Таким образом, функция эмиттерного перехода и процессы в эмиттерном переходе сводятся к инжекции носителей заряда в базу.

Одним из важнейших показателей эмиттерного перехода является коэффициент инжекции  $\gamma$ , показывающий, какую часть от полного эмиттерного тока составляет его дырочная составляющая:

$$\gamma = \frac{I_{\varepsilon p}}{I_{\varepsilon}}. \quad (3.2)$$

С точки зрения качества эмиттерного перехода необходимо, чтобы электронная составляющая эмиттерного тока была существенно меньше его дырочной составляющей.

Это достигается значительным превышением концентрации основных носителей заряда в эмиттере над концентрацией основных носителей заряда в базе. Для выпускаемых промышленностью транзисторов коэффициент инжекции составляет 0,97–0,995.

Процессы в базовом слое определяются в основном поведением дырок, перешедших в базу через эмиттерный переход. Инжектируемые дырки, попадая в базовый слой, повышают концентрацию дырок в базе вблизи эмиттера по сравнению с равновесной концентрацией (рис. 3.5,б). На границе с эмиттерным переходом создается граничная концентрация дырок  $P_n(0)$ .

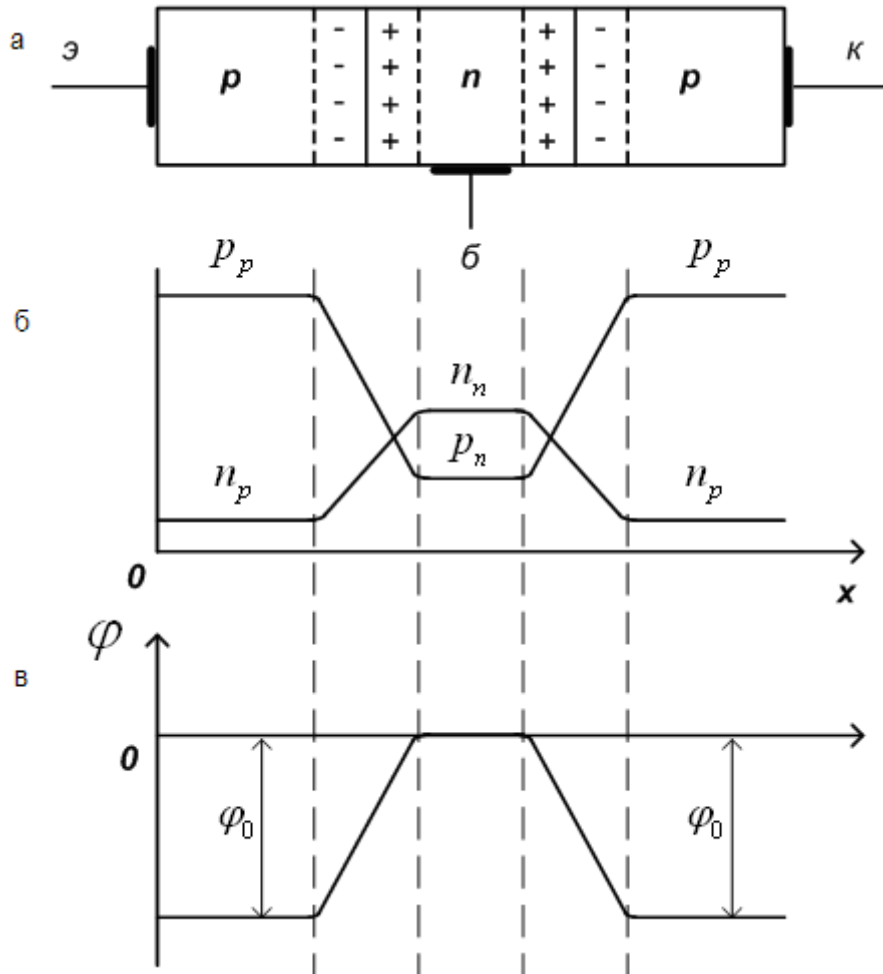


Рис. 2.4

Величину этой концентрации находят из соотношения, аналогичного для диода:

$$P_n(0) = P_{n0} \cdot e^{\frac{U_{\text{Э}}}{\varphi T}}. \quad (3.3)$$

Под действием концентрации  $P_n(0)$  развивается диффузионное движение дырок в базе в сторону коллектора, т. е. в направлении меньшей концентрации. Концентрация дырок в базе на границе с коллекторным переходом устанавливается близкой к нулю, так как дошедшие до коллекторного перехода под действием диффузии дырки ускоряются полем перехода и перебрасываются в коллектор. Установившееся при определенном напряжении  $U_{\text{Э}}$  (определенном токе эмиттера и соответствующей величине  $P_n(0)$ ) распределение концентрации дырок в базе показано на рис. 3.5,б.

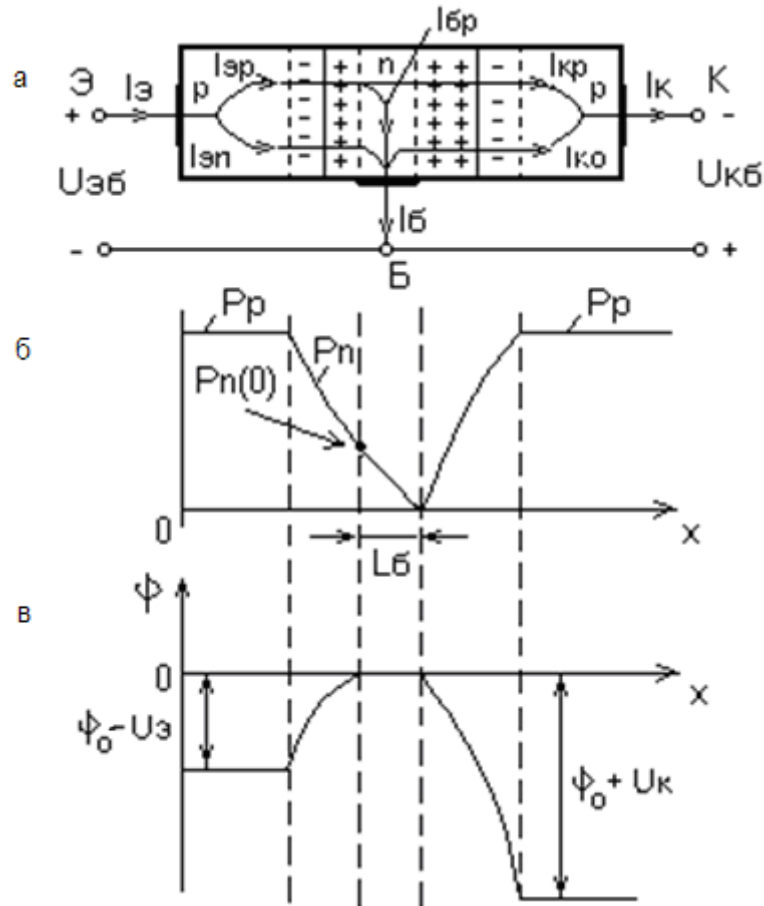


Рис. 3.5

Ввиду относительно малой толщины базового слоя  $\omega_b$  (значительно меньшей диффузионной длины неосновных носителей в базе  $L_p$ ) распределение концентрации дырок в базе при диффузии  $P_n(x)$  близко к линейному закону. Градиент концентрации дырок в базе в соответствии с выражением (3.3) определяет диффузионный ток дырок в ней в направлении коллекторного перехода. При движении в базе часть дырок рекомбинируют с электронами. Поскольку база остается в целом электрически нейтральной, убыль числа электронов в ней при рекомбинации с инжектированными дырками компенсируется притоком электронов по цепи базы. При этом распределение электронов в базе должно быть, очевидно, таким же, как и распределение дырок, так как только при этом условии каждая микро-область базы будет оставаться электрически нейтральной, т.е. суммарный заряд электронов, дырок и доноров в базе будет равен нулю. В результате актов рекомбинации количество дырок, дошедших до коллектора, не будет равно количеству дырок, по-

ступивших из эмиттера. Следовательно, дырочная составляющая коллекторного тока  $I_{кр}$  будет меньше дырочной составляющей эмиттерного тока  $I_{эп}$ . Разность между дырочными составляющими эмиттерного и коллекторного токов представляет собой ток базы, обусловленный рекомбинацией в ней дырок. В соответствии с этим запишем соотношение для дырочных составляющих токов транзистора:

$$I_{эп} = I_{кр} + I_{бп}. \quad (3.4)$$

Для определения части дырок, прошедших из эмиттера в коллектор, вводят коэффициент переноса дырок в базе  $\delta$ , который равен отношению дырочной составляющей коллекторного тока к дырочной составляющей эмиттерного тока:

$$\delta = \frac{I_{кр}}{I_{эп}}. \quad (3.5)$$

Необходимо, чтобы величина коэффициента переноса как можно меньше отличалась от единицы. Способы приближения к единице коэффициента направлены на сокращение потерь дырок (электронов в приборах типа  $n-p-n$ ) в базе за счет актов рекомбинации. Это достигается увеличением времени жизни дырок в базе и сокращением времени их нахождения в базе. Сокращение времени нахождения дырок в базе связано с уменьшением толщины базового слоя и увеличением скорости их прохождения через базу. Последнее используется в так называемых дрейфовых транзисторах путем создания в слое базы ускоряющего поля. Типовые значения коэффициента переноса для транзисторов лежат в пределах 0,96–0,996. Коллекторный ток транзистора  $I_{к}$ , обусловленный дырочной составляющей  $I_{кр}$ , связан с током эмиттера  $I_{э}$  коэффициентом передачи тока  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{I_{кр}}{I_{э}}. \quad (3.6)$$

Умножив числитель и знаменатель равенства (3.6) на значение тока  $I_{эп}$ , получим:

$$\alpha = \left( \frac{I_{эп}}{I_{э}} \right) \cdot \left( \frac{I_{кр}}{I_{эп}} \right) = \gamma \cdot \delta \quad (3.7)$$

Следовательно, коэффициент передачи тока тем ближе к 1, чем меньше отличаются от единицы коэффициенты  $\gamma$  и  $\delta$ .

Таким образом, способы приближения к единице коэффициента передачи тока связаны со способами увеличения этих коэффициентов (т.е. увеличение разности концентраций основных носителей заряда в слоях эмиттера и базы, увеличение времени жизни дырок в базе, уменьшение ширины базового слоя, создание ускоряющего поля в слое базы).

Наличие коллекторного перехода, включенного в обратном направлении, приводит к появлению дополнительной неуправляемой составляющей тока коллектора, обусловленной протеканием обратного тока коллекторного перехода  $I_{ко}$ . Обратный ток создается дрейфом неосновных носителей заряда из близлежащих областей обратно включенного перехода. Поскольку концентрации неосновных носителей заряда зависят от температуры, величина обратного тока также зависит от нее, поэтому этот ток часто называют тепловым. От величины тока эмиттера ток  $I_{ко}$  не зависит.

В соответствии с изложенными выше процессами ток эмиттера равен сумме дырочной и электронной составляющих:

$$I_{\varepsilon} = I_{\varepsilon p} + I_{\varepsilon n}. \quad (3.8)$$

Ток коллектора состоит из дырочной составляющей и теплового тока:

$$I_{\kappa} = I_{\kappa p} + I_{ко}. \quad (3.9)$$

Ток базы равен алгебраической сумме электронной составляющей тока эмиттера, рекомбинационной дырочной составляющей и теплового тока:

$$I_{\delta} = I_{\varepsilon n} + I_{p\delta} - I_{ко}. \quad (3.10)$$

Таким образом, принцип действия биполярного транзистора основан на создании транзитного (проходящего) потока носителей заряда из эмиттера в коллектор через базу и управлении коллекторным (выходным) током за счет изменения эмиттерного (входного) тока. Следовательно, биполярный транзистор управляется током. Основные соотношения для токов транзистора составляются по первому закону Кирхгофа:

$$I_{\varepsilon} = I_{\kappa} + I_{\delta}. \quad (3.11)$$

С учетом теплового тока и соотношения (3.6) ток коллектора и ток базы можно выразить через ток эмиттера:

$$I_K = \alpha I_E + I_{KO}, \quad (3.12)$$

$$I_{\bar{O}} = (1 - \alpha) I_E - I_{KO}. \quad (3.13)$$

### Статические вольтамперные характеристики биполярного транзистора

Основное применение на практике имеют входные и выходные вольтамперные характеристики. Эти характеристики могут быть записаны аналитически или построены графически. Последний способ прост и нагляден, поэтому нашел более широкое применение. Вольтамперные характеристики снимают при относительно медленных изменениях тока и напряжения (по постоянному току), в связи, с чем их называют статическими. Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.

#### Схема с общей базой

Выходные характеристика транзистора в схеме ОБ (рис. 3.3,а) отражают зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе относительно базы при фиксированном токе эмиттера (рис. 3.6,а).

Вольт - амперные характеристики имеют три характерные области:

I – сильная зависимость  $I_K$  от  $U_{K\bar{O}}$  (нелинейная начальная область),

II – слабая зависимость  $I_K$  от  $U_{K\bar{O}}$ , III – пробой коллекторного перехода. Для схемы ОБ характерно расположение начальной области I левее оси ординат. Это обусловлено тем, что напряжение на коллекторном переходе транзистора в схеме ОБ определяется суммой внутренней разности потенциалов  $\varphi_0$  и внешнего напряжения  $U_{K\bar{O}}$ .

При  $U_{K\bar{O}} = 0$  и заданном токе эмиттера дырки перебрасываются в коллектор из базы под действием внутренней разности потенциалов. Чтобы уменьшить ток коллектора, нужно создать встречный поток дырок через переход, т. е. перевести коллекторный переход путем изменения полярности напряжения  $U_{K\bar{O}}$  в режим инжекции носителей заряда. При достижении некоторого напряжения положительной полярности  $U_{K\bar{O}}$  потоки дырок через коллекторный переход будут взаимно скомпенсированы и ток  $I_K = 0$ .

Естественно, что с увеличением тока эмиттера для этого необходимо подать напряжение  $U_{K\bar{O}}$  большей величины. Этим объясняется сме-

щение влево начальных участков характеристик при большем токе  $I_э$ . Область I на ВАХ соответствует режиму насыщения транзистора.

Особенностью ВАХ в области II является их небольшой подъем при увеличении напряжения  $U_{кб}$  (Область активного режима работы транзистора). Некоторое увеличение тока коллектора обусловливается увеличением коэффициента передачи тока  $\alpha$  транзистора вследствие эффекта модуляции базы, а также роста обратного тока коллекторного перехода  $I_{ко}$ . Эффект модуляции базы связан с расширением коллекторного перехода  $L_k$  за счет увеличения объемного заряда в нем, вызванного повышением напряжения  $U_{кб}$  (рис. 3.6,б). Поскольку расширение перехода происходит главным образом за счет базового слоя, как более высокоомного, повышение напряжения  $U_{кб}$  приводит к уменьшению толщины базового слоя  $L_b$ , а, следовательно, к уменьшению числа актов рекомбинаций дырок с электронами в ней и соответственно к увеличению коэффициента передачи и тока коллектора. Эффект модуляции базы иллюстрируется рис. 3.6,б, на котором обозначения с индексом (1) относятся к напряжению  $U_{кб1}$ , а с индексом (2) к напряжению  $U_{кб2}$  ( $|U_{кб2}| > |U_{кб1}|$ ). Постоянство задаваемого тока  $I_э$  при снятии коллекторных характеристик обуславливает постоянство градиента концентрации дырок  $dp/dx$  на границе перехода П1 с базой. В связи с этим кривые распределения концентраций в базе  $P_{n2}(x)$  и  $P_{n1}(x)$  идут параллельно друг другу. Начальные уровни концентраций дырок на границе эмиттерного перехода с базой получаются неодинаковыми, в частности  $P_{n1}(0) > P_{n2}(0)$ . Это может быть, как следует из выражения (2.3), только в случае уменьшения напряжения на переходе П1.

Таким образом, изменение тока  $I_k$  с изменением напряжения  $U_{кб}$  при  $I_э = \text{const}$ , связанное с изменением коэффициента  $\alpha$  из-за эффекта модуляции базы, сопровождается также изменением напряжения на эмиттерном переходе. Иными словами, модуляция базы создает внутреннюю обратную связь по напряжению в транзисторе.

Возрастание тока коллектора на ВАХ в области II при повышении напряжения  $U_{кб}$  характеризуется дифференциальным сопротивлением коллекторного перехода  $r_{k(б)} = dU / dI_k$ , которое может быть найдено из коллекторных характеристик как отношение приращений напряжения и тока.

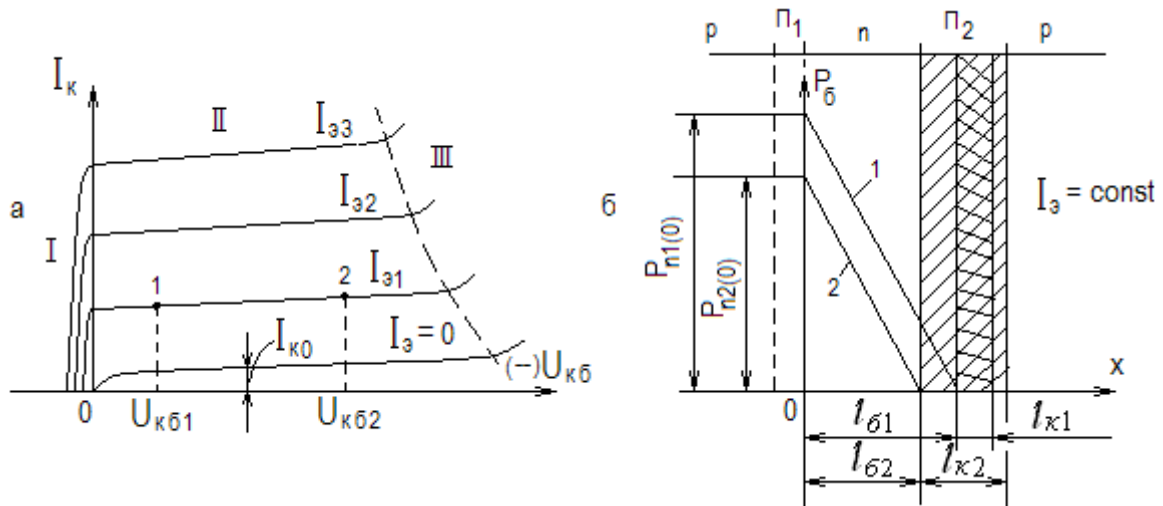


Рис. 3.6

Выходная характеристика при токе  $I_э = 0$  представляет собой обратную ветвь ВАХ коллекторного перехода, когда через переход течет только ток  $I_{к0}$  и подобна обратной ветви ВАХ диода. Эта ВАХ соответствует режиму отсечки транзистора. В области II выходные характеристики практически линейны, и сопротивление  $r_{к(б)}$  можно принять неизменным. Тогда для этой области зависимость  $I_к = F(U_{кб})$  можно представить в аналитической форме с учетом эффекта модуляции базы:

$$I_к = \alpha \cdot I_э + \frac{U_{кб}}{r_{к(б)}} + I_{к0}. \quad (3.14)$$

Наличие составляющей  $I_{к0}$  в выражении (3.14) является одной из главных причин температурной зависимости выходных характеристик транзистора. Влияние температуры приводит к изменению тока  $I_{к0}$  и смещению характеристик вверх при повышении температуры и вниз при ее снижении. Такое же воздействие на коллекторные характеристики (в меньшей степени) оказывает и зависимость от температуры коэффициента передачи тока. Это обусловлено тем, что в рабочем диапазоне температур наблюдается некоторое увеличение коэффициента передачи с ростом температуры. Коэффициент передачи тока зависит также от величины тока эмиттера. Увеличение коэффициента передачи тока и достижения им максимального значения с возрастанием эмиттерного тока объясняется относительным уменьшением числа актов рекомбинации дырок в базе с ростом количества входящих в нее дырок, т.е. повышением коэффициента переноса при увеличении тока эмиттера. После

достижения максимума последующее уменьшение коэффициента передачи тока связано с уменьшением коэффициента инжекции с ростом тока эмиттера. Область III на ВАХ соответствует электрическому пробое коллекторного перехода, который может перейти в тепловой пробой и в конечном итоге привести к выходу транзистора из строя.

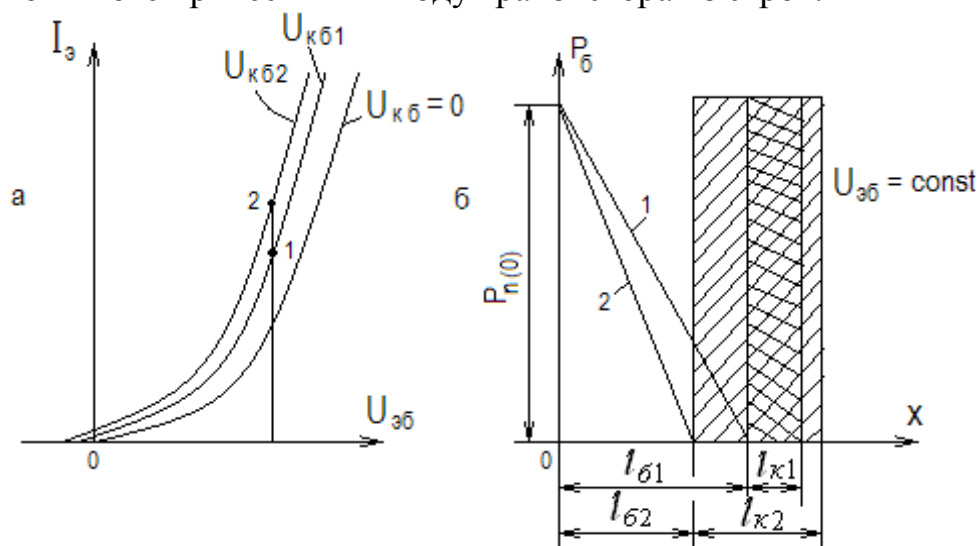


Рис. 3.7

Входные характеристики транзистора (рис. 3.7,а) в схеме ОБ представляют собой зависимость тока эмиттера от напряжения на эмиттере относительно базы при фиксированном напряжении  $U_кб$  и по виду близки к прямой ветви ВАХ диода.

Входная характеристика, снятая при большем обратном напряжении на коллекторном переходе  $U_кб$ , располагается левее и выше. Это обусловливается эффектом модуляции базы, приводящим к повышению градиента концентрации дырок в базе и увеличению тока эмиттера. Для пояснения этого на рис. 3.7,б показано распределение дырок в базе при двух значениях напряжения  $U_кб$  и фиксированной величине напряжения  $U_эб$ .

При напряжении  $U_кб1$  распределение концентрации дырок в базе соответствует линии 1. В случае увеличения обратного напряжения ( $U_кб2$ ) область объемного заряда расширяется, а база за счет этого сужается. Распределение концентрации дырок в этом случае соответствует линии 2. Градиент концентрации дырок в базе растет при переходе от линии 1 к линии 2 и поэтому возрастает ток эмиттера, что и объясняет смещение входных характеристик вверх с увеличением обратного напряжения  $U_кб$ .

### Схема с общим эмиттером

Выходные характеристики транзистора (рис. 3.8, а) в схеме с ОЭ (рис. 3.8, б) определяют зависимость коллекторного тока  $I_K$  от напряжения на коллекторе относительно эмиттера ( $U_{кэ}$ ) при фиксированном токе базы  $I_б$ . Как и для схемы ОБ, здесь можно выделить три характерные области: I – начальная область (соответствует режиму насыщения транзистора), II – относительно слабая зависимость тока коллектора от напряжения  $U_{кэ}$  (область активного режима работы транзистора), III – пробой коллекторного перехода. Выходные характеристики в схеме с ОЭ отличаются от соответствующих характеристик в схеме с ОБ. В частности, они начинаются из начала координат и участок I располагается в первом квадранте. При  $U_{кэ} = 0$  напряжение на коллекторном переходе равно  $U_{бэ}$  (т.к.  $U_{кб} = U_{кэ} - U_{бэ}$ ), соответственно коллекторный переход включается в прямом направлении и инжектирует дырки в базу.

Потоки дырок от коллектора в базу и от эмиттера в коллектор взаимно уравниваются и ток коллектора равен нулю. По мере повышения напряжения  $U_{кэ}$  в области I прямое напряжение на коллекторном переходе снижается, его инжекция уменьшается и ток  $I_K$  возрастает. На границе с областью II прямое напряжение снимается с коллекторного перехода и дальше, в области II на переходе будет действовать обратное напряжение. Для получения выходных характеристик в аналитической форме в области II, выразим в (3.14) ток эмиттера и ток базы в соответствии с формулой (3.11). После замены  $U_{кб}$  на  $U_{кэ}$  получим:

$$\begin{aligned} I_K &= \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot I_б + \frac{U_{кэ}}{r_{к(б)} \cdot (1-\alpha)} + \frac{1}{1-\alpha} \cdot I_{ко} = \\ &= \beta \cdot I_б + \frac{U_{кэ}}{r_{к(б)} / (1+\beta)} + (1+\beta) \cdot I_{ко}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

где  $\beta = \frac{I_K}{I_б} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$  – коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ.

Транзистор в схеме с ОЭ дает усиление по току (так как  $I_K > I_б$ ), и это является важнейшим преимуществом включения транзистора по сравнению с ОБ. Выражение (3.15) можно записать в виде:

$$I_K = \beta \cdot I_{\bar{O}} + \frac{U_{KЭ}}{r_{K(Э)}} + I_{KO(Э)}, \quad (3.16)$$

где  $r_{K(Э)} = r_{K(\bar{O})} / (1 + \beta)$ ,  $I_{KO(Э)} = (1 + \beta)I_{KO}$ .

Так же как и в схеме с ОБ, коллекторные характеристики имеют некоторый наклон к оси абсцисс в области II, вызванный эффектом модуляции базы. Однако этот наклон в схеме с ОЭ больше, чем в схеме с ОБ, так как малые изменения коэффициента  $\alpha$  под действием изменения напряжения на коллекторном переходе дают значительные изменения коэффициента  $\beta$ . Указанное явление учитывается вторым слагаемым в правой части уравнения (3.16).

Через вывод базы протекают во встречном направлении две составляющие тока. Это обратный ток коллекторного перехода  $-I_{KO}$  и часть тока эмиттера  $-(1 - \alpha)I_{\bar{Э}}$ . При токе базы равным нулю эти составляющие тока равны. Т.е.  $(1 - \alpha)I_{\bar{Э}} = I_{KO}$  и тогда, согласно выражению (3.13), ток эмиттера  $I_{\bar{Э}} = I_{KO} / (1 - \alpha)$ . В результате с учетом (3.12) получим:

$$I_K = \alpha I_{KO} / (1 - \alpha) + I_{KO} = (1 + \beta)I_{KO}. \quad (3.17)$$

Этот ток называют начальным или сквозным током  $I_{KO(Э)}$ . Таким образом, ток коллектора при входном токе, равным нулю, в схеме с ОЭ в  $(1 + \beta)$  раз больше, чем в схеме ОБ. Если же эмиттерный переход перевести в непроводящее состояние, (т.е. подать обратное напряжение на переход), то ток коллектора снизится до значения  $I_{KO}$  (рис. 3.8, а). Тогда ток коллектора будет определяться обратным током перехода, протекающим по цепи база–коллектор. Область характеристик, лежащая ниже характеристики, соответствующей  $I_{\bar{O}} = -I_{KO}$ , называют областью отсечки.

Выходные характеристики в схеме с ОЭ, так же как и в схеме с ОБ, подвержены температурному влиянию. Однако температурные воздействия здесь проявляются сильнее, чем в схеме с ОБ. Это обусловлено наличием множителя  $(1 + \beta)$  перед  $I_{KO}$  в формуле (3.15) и более сильными температурными изменениями коэффициента передачи тока базы  $\beta$  при относительно малых температурных изменениях коэффициента передачи тока эмиттера ( $\alpha$ ). Необходимо отметить также, что в схеме с

ОЭ пробой коллекторного перехода наступает при напряжении в 1,5–2 раза меньшем, чем в схеме с ОБ.

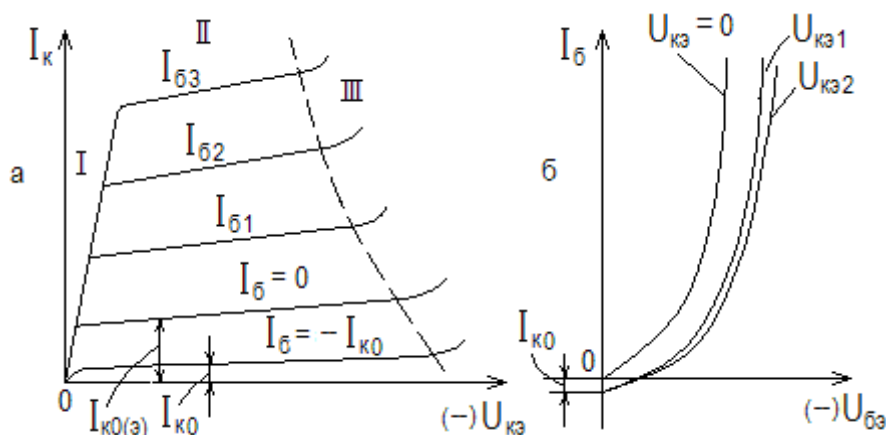


Рис. 2.8

Входные характеристики транзистора с ОЭ отражают зависимость тока базы от напряжения база–эмиттер при фиксированном напряжении коллектор–эмиттер (рис. 3.8, б).

При напряжении  $U_{кэ} = 0$  входная характеристика соответствует прямой ветви вольтамперной характеристики двух р–п-переходов, включенных параллельно.

Ток базы при этом равен сумме токов эмиттера и коллектора, работающего в режиме эмиттера.

При напряжении  $U_{кэ} < 0$  характеристики смещаются вниз относительно кривой со значением  $U_{кэ} = 0$ , что связано с уменьшением тока базы из-за эффекта модуляции базы.

Чем тоньше база, тем меньше актов рекомбинации носителей заряда в ней и, следовательно, будет меньшим ток базы транзистора.

В режиме отсечки оба перехода включаются в обратном направлении (третий квадрант ВАХ, рис. 3.8,б) и в цепи базы течет ток  $I_б = -I_{к0}$ . Поэтому при  $U_{кэ} < 0$  входные характеристики исходят из точки с отрицательным значением тока базы, равным  $I_{к0}$ .

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

а) собрать схему для снятия характеристик прямой передачи по току биполярного транзистора (рис. 4.1). Для измерения тока базы подключить миллиамперметр  $PA1$  (до 1 мА), а для измерения тока коллектора подключить  $PA2$  (до 100 мА). Для измерения напряжения на коллекторе использовать вольтметр  $PV1$ ; в качестве резистора в цепи коллектора использовать резистор  $RP3$  (по указанию преподавателя);

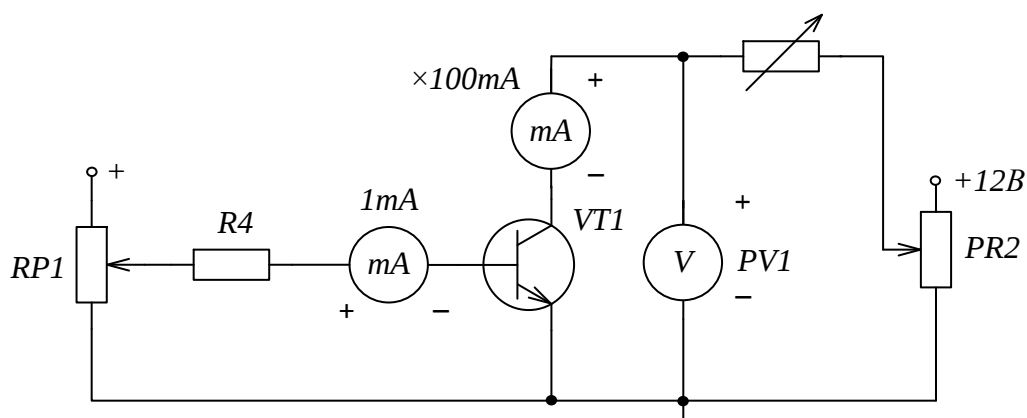


Рис. 4.1

б) снять статическую характеристику прямой передачи по току  $I_k = f(I_o)$  при  $U_k$ , равном заданному значению  $E_k$  и  $R_k = 0$ . Экспериментальные точки здесь и далее записывать в таблицу и наносить на график. При снятии характеристик следить за постоянством напряжения  $U_k$  по вольтметру;

в) снять характеристику прямой передачи по току при наличии заданного сопротивления нагрузки  $R_k$  (рис. 4.1). С помощью потенциометра  $RP1$  установите ток базы, равный нулю, а с помощью потенциометра  $RP2$  установите заданное значение  $E_k$ . В дальнейшем ручку регулировки  $RP2$  не трогать. В области вблизи насыщения точки снимать чаще;

г) по построенной в п.4, в характеристике определить область активного усиления, отсечки и насыщения. Определить ток базы насыщения  $I_{он}$  – максимальный ток, при котором еще обеспечивается линейное усиление (активный режим);

д) снять выходные статические ВАХ с помощью осциллографа. Собрать схему в соответствии с рис. 4.2. Вход Y (CH2) осциллографа подключить к шунту  $R_{ш}$  ( $RS1$ ), а корпус осциллографа ( $\perp$ ) соединить с общим проводом ( $\perp$ ). Вход X (CH1) осциллографа подключить к кол-

лектору. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть приведен в положение X/Y. Установить потенциометр  $RP1$  в крайнее левое положение, соответствующее минимальному сопротивлению. Включить питание. Изменять ток базы от 0 до максимума (но не более 1 мА), пронаблюдать семейство выходных характеристик; зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений для тока базы:  $I_{\delta 1}=0,1 I_{\delta n}$ ;  $I_{\delta 2}=0,5 I_{\delta n}$ ;  $I_{\delta 3}= I_{\delta n}$ . Записать масштабы по напряжению току. Выключить питание модуля.

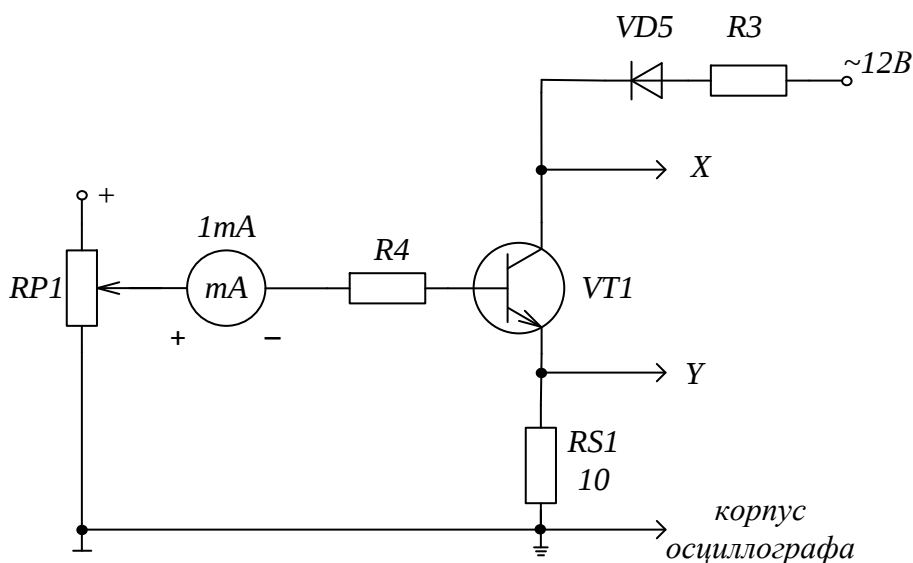


Рис. 4.2

е) полученные в предыдущем пункте характеристики изобразить на рисунке в виде семейства ВАХ. На статических вольт-амперных характеристиках построить нагрузочную прямую по постоянному току ( $R3 = 1\text{кОм}$ ), обозначить области работы транзистора, определить коэффициент передачи тока базы  $\beta$  и дифференциальное сопротивление коллекторного перехода  $r_{к(э)}$  транзистора при максимальном токе базы  $I_{\delta n}$ .

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен содержать:

- наименование и цель работы;
- схемы соединений для выполненных экспериментов;
- результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- экспериментально снятые и построенные характеристики;
- обработанные осциллограммы.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Каковы структуры биполярных транзисторов и их условные графические обозначения?

6.2. Каковы функции эмиттерного и коллекторного перехода транзистора?

6.3. В каких режимах может работать транзистор и какова полярность включения переходов для разных режимов?

6.4. Какие схемы включения транзистора вы знаете? В чем заключаются основные отличия данных схем?

6.5. Как работает транзистор в нормальном активном режиме?

6.6. Как связаны между собой ток коллектора, ток эмиттера и ток базы?

6.7. В чем заключается управляющее свойство транзистора?

6.8. Как влияет температура транзисторной структуры на ВАХ и почему?

6.9. Что представляет собой эффект модуляции базы и как влияет на ход статических ВАХ транзистора?

6.10. Что такое дифференциальное сопротивление коллекторного перехода и как его можно определить по выходным характеристикам транзистора?

6.11. Как записываются выходные характеристики транзистора в аналитической форме для области активного режима (ОЭ)?

6.12. Как выглядят входные и выходные статические характеристики в схеме с общим эмиттером?

6.13. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как ее построить? Как она видоизменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?

6.14. Как определить статический коэффициент передачи транзистора по току  $\beta$ ?

6.15. Как снять статические выходные характеристики?

6.16. Как построить линию нагрузки по постоянному току?

6.17. Что такое область активного режима, насыщения, отсечки?

Учебное издание

ГРЕБЕННИКОВ Виталий Владимирович  
МУТОВИН Юрий Васильевич

## ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Методические указания к выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Электроника 1.1», «Электроника 1.2», «Электроника 1.3»  
для студентов направлений 12.03.01 «Приборостроение» и  
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» и др.

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати \_\_\_\_\_.2016. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл.печ.л. 2,26. Уч.-изд.л. 2,05.  
Заказ \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**



ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)