

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 10.02.2022 15:45:00

Уникальный программный ключ:

0b817c911e6668abb17e5d436d79e5f1e11eabb573e947df6e495161e564089

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
О.Г. Локтионова  
« 30 » 04 2019 г.



## **СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА**

Методические указания  
к лабораторной работе по дисциплинам  
«Электротехника электроника и схемотехника» и  
«Основы электроники»  
для студентов специальностей 09.03.01 и 09.03.04

**Курск 2019**

Составитель М.В. Бобырь

УДК 681.3

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры Информационных систем и технологий *С.В. Дегтярев*

Статические характеристики и параметры биполярного транзистора: Методические указания к лабораторной работе по дисциплинам «Электротехника электроника и схемотехника» и «Основы электроники» для студентов специальностей 09.03.01 и 09.03.04 / Юго-Зап. гос. ун-т; Сост. М.В. Бобырь. Курск, 2019. 15 с.

Описывается методика построения статических характеристик и определения статических и дифференциальных параметров биполярного транзистора; приведены рекомендации по применению программы моделирования электронных схем **Electronics Workbench 5.0** для исследования характеристик транзистора.

Предназначены для студентов специальностей 09.03.01 и 09.03.04.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 30.04.19. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 0,7 Уч.-изд. л. 0,6 Тираж 50 экз. Заказ 441.

Юго-Западный государственный университета.  
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

# СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

## 1. Цель работы

Исследование статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) биполярного транзистора; определение статических и дифференциальных параметров транзистора.

## 2. Объект и средства исследования

Биполярный транзистор представляет собой кристалл полупроводника, состоящий из трех слоев с чередующейся проводимостью (р-п-р или н-р-п) и снабженный тремя выводами (электродами) для подключения к внешней цепи. Крайние слои называют **эмиттером** и **коллектором**, между ними находится **база**. В трехслойной структуре образуются два электронно-дырочных перехода: **эмиттерный** переход между эмиттером и базой и **коллекторный** переход между коллектором и базой. В качестве исходного материала транзисторов используют германий или кремний.

При изготовлении транзистора обязательно должны быть выполнены два условия:

- 1) толщина базы (расстояние между эмиттерным и коллекторным переходами) должна быть малой по сравнению с длиной свободного пробега носителей заряда;
- 2) концентрация примесей (и основных носителей) заряда в эмиттере должна быть значительно больше, чем в базе.

В **нормальном активном** режиме к эмиттерному переходу должно быть приложено прямое, а к коллекторному – обратное напряжение. В этом режиме происходит диффузия (инжекция) из эмиттера в базу неосновных для нее носителей заряда. Вследствие несимметрии эмиттерного перехода ток эмиттера  $I_e$  обусловлен в основном этой диффузией зарядов. В результате перепада концентрации вдоль базы неосновные носители продвигаются от эмиттера к коллектору. Поскольку база в транзисторе выполняется тонкой, основная часть носителей зарядов, инжектированных эмиттером, достигает

коллекторного перехода, не попадая в центры рекомбинации. Эти носители захватываются полем коллекторного перехода, смещенного в обратном направлении, и образуют ток коллектора  $I_k$ . Вследствие малой вероятности рекомбинации в тонкой базе основная часть эмиттерного тока попадает в цепь коллектора:

$$I_k \approx \alpha I_э, \quad (1)$$

где  $\alpha = 0,95 \div 0,99$  – коэффициент передачи тока эмиттера.

Остальная часть эмиттерного тока составляет ток базы:

$$I_б \approx (1 - \alpha) I_э. \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) справедливы для схемы включения транзистора с общей базой (ОБ): источники напряжений эмиттер-база  $U_{эб}$  и коллектор-база  $U_{кб}$  подключены одним полюсом к базе. Выражения для токов коллектора и базы показывают, что токи в транзисторе связаны линейными соотношениями.

В схеме с ОБ отсутствует усиление по току. Поэтому чаще применяется схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ). Питание и базовой (напряжение база-эмиттер  $U_{бэ}$ ), и коллекторной (напряжение коллектор-эмиттер  $U_{кэ}$ ) цепей осуществляется относительно эмиттера. При этом должны соблюдаться условия нормального активного режима.

В схеме с ОЭ входным является ток базы. Из (1) и (2) можно получить:

$$I_k \approx \beta I_б, \quad (3)$$

где  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$  – коэффициент передачи тока базы. Его величина составляет  $20 \div 200$  и более.

Выражение (3), как и (1), является приближенным. Более точное уравнение тока коллектора имеет вид

$$I_k \approx \beta I_б + (\beta + 1) I_{кб0} + U_{кэ} / r_{кэ}, \quad (4)$$

где  $I_{кб0}$  – обратный ток коллекторного перехода в схеме с ОБ;  $r_{кэ}$  – дифференциальное сопротивление цепи коллектора в схеме с ОЭ.

Работа проводится на персональном компьютере с помощью программы схемотехнического моделирования **Electronics Workbench 5.0c**.

Из набора компонентов "**Transistors**" выбрать биполярный транзистор *n-p-n* типа и через меню "Свойства компонента" (**Component Properties...**) выбрать заданную модель транзистора фирмы *nationl2* и установить коэффициент передачи тока базы (**Edit** → **Sheet1** → **Forward current gain coefficient ( $\beta F$ )**) согласно табл. 1.

Таблица 1

Вариант	Модель	$\beta$	Вариант	Модель	$\beta$
1	2N 2712	60	8	2N 3392	70
2	2N 2714	50	9	2N 3393	65
3	2N 2923	70	10	2N 3394	55
4	2N 2924	65	11	2N 3414	50
5	2N 2925	55	12	2N 3415	60
6	2N 3390	50	13	2N 3416	70
7	2N 3391	60	14	2N 3417	55

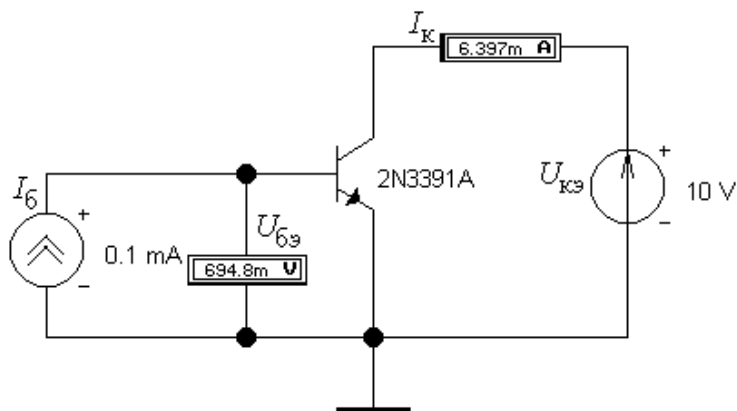


Рис. 1. Схема для исследования статических ВАХ биполярного транзистора

Собрать схему с общим эмиттером (рис. 1), содержащую источник постоянного тока (**DC Current Source**) в базовой цепи и источник постоянного напряжения (**Battery**) в цепи коллектора, а также вольтметр для измерения напряжения база–эмиттер и миллиамперметр для измерения тока коллектора.

### 3. Программа исследований

#### 1) Построение семейства входных характеристик транзистора

$$I_6 = f(U_{63}) \text{ при } U_{к3} = \text{const.}$$

Произвести измерения зависимости тока базы от прямого напряжения база-эмиттер при двух фиксированных значениях напряжения коллектор-эмиттер:  $U_{к3} = 1,0 \text{ В}; 10 \text{ В}$ .

Учитывая нелинейный характер входных характеристик транзистора, их построение удобно производить, задавая значения тока базы и измеряя соответствующие значения напряжения база-эмиттер, однако при построении графиков в качестве независимой величины (аргумента) следует брать входное напряжение. Результаты измерений свести в табл. 2.

Таблица 2

$U_{к3},$ В	$I_6,$ мА	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
1,0	$U_{63},$									
10	В									

Построить графики входных ВАХ.

Определить в нескольких точках входной характеристики значения входного дифференциального сопротивления транзистора (параметр  $h_{11э}$ ) по формуле

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{63}}{\Delta I_6}$$

при  $I_6 = 0,05 \text{ мА}; 0,2 \text{ мА}; 0,4 \text{ мА}$  и напряжении  $U_{к3} = 10 \text{ В}$ .

## 2) Построение семейства выходных характеристик транзистора

$$I_k = f(U_{кэ}) \text{ при } I_б = \text{const.}$$

Произвести измерения зависимости тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при четырех фиксированных значениях тока базы.

При построении выходных характеристик фиксированные значения тока базы следует устанавливать через равные интервалы, например, 0,1 мА; 0,2 мА; 0,3 мА; 0,4 мА.

На начальном, крутом участке выходной характеристики напряжение  $U_{кэ}$  следует изменять через малые интервалы, а на пологом участке насыщения давать большие приращения (табл.3).

Таблица 3

$I_б,$ мА	$U_{кэ},$ В	0	0,1	0,2	0,5	1	2	4	6	10
0,1	$I_k,$ мА	0								
0,2		0								
0,3		0								
0,4		0								

Построить графики выходных ВАХ.

Определить в нескольких точках значения статического ( $\beta$ ) и дифференциального ( $h_{21э}$ ) коэффициентов передачи тока базы при  $U_{кэ} = 2 \text{ В}; 6 \text{ В}; 10 \text{ В}$ , а также выходной проводимости  $h_{22э}$ .

**Статический** коэффициент передачи тока базы определяется в начальной точке пологого участка выходной характеристики по формуле:

$$\beta = \frac{I_k}{I_б},$$

а **дифференциальный** коэффициент – на пологих участках:

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \quad \text{при } U_{кЭ} = \text{const.}$$

Выходная проводимость определяется на пологом участке выходной характеристики по формуле:

$$h_{22Э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{кЭ}} \quad \text{при } I_B = \text{const.}$$

### 3) Построение семейства передаточных характеристик транзистора

$$I_K = f(I_B) \quad \text{при } U_{кЭ} = \text{const.}$$

Произвести измерения зависимости тока коллектора от тока базы при трех фиксированных значениях напряжения коллектор-эмиттер: 2 В; 6 В; 10 В. Результаты измерений свести в табл. 4.

Таблица 4

$U_{кЭ},$ В	$I_B,$ мА	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
2	$I_K,$ мА									
6										
10										

Построить графики передаточных характеристик.

### 4. Методические указания

Статические вольт-амперные характеристики можно строить как по точкам (таблицы 2 – 4), так и в “автоматическом” режиме с помощью осциллографа.

#### 1) Входные характеристики

Для построения входных ВАХ нужно собрать схему рис. 2.



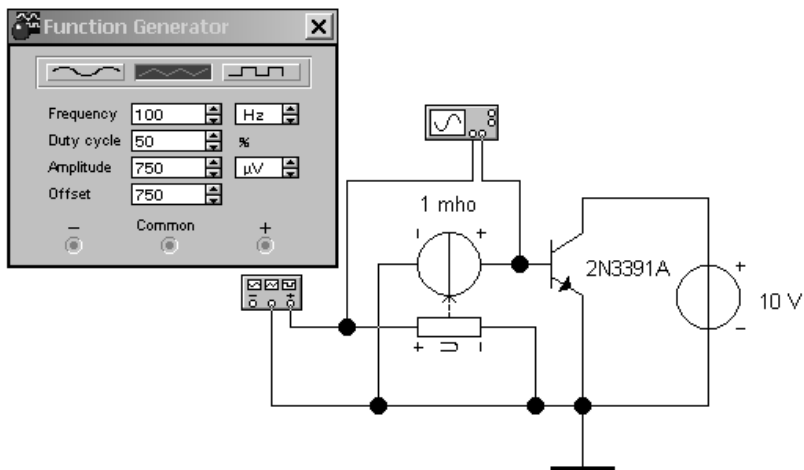


Рис. 2. Схема для построения входной характеристики

Функциональный генератор вырабатывает линейно изменяющееся напряжение в пределах от нуля до удвоенного амплитудного значения. Преобразователь “напряжение–ток” (**Voltage-Controlled Current Source**) создает линейно изменяющийся ток базы. Напряжению в 1 мВ соответствует значение тока 1 мА. В рассматриваемом примере ток базы изменяется в пределах от 0 до 1,5 мА.

Для получения на экране осциллографа графика ВАХ используется режим развертки А/В. Напряжение на переходе база–эмиттер  $U_{бэ}$  подается на вход канала В осциллографа для горизонтального отклонения луча, а для регистрации величины тока базы  $I_b$  напряжение генератора подается на вход А осциллографа (вертикальное отклонение). Масштаб по оси напряжения  $U_{бэ}$  задается непосредственно в канале В, а масштаб по оси тока  $I_b$  определяется коэффициентом преобразования напряжение–ток. В частности, при установке по умолчанию 1 Ohm одному милливольту по вертикальной оси соответствует один миллиампер тока. Начало отсчета – точка (0; 0) в системе координат  $U_{бэ}$ ;  $I_b$ , – находится в центре экрана.

На рис. 3 показан график одной из входных характеристик транзистора в масштабах 200 мВ/деление по оси

напряжения база–эмиттер  $U_{бэ}$  и  $0,5$  мА/деление – по оси тока базы  $I_б$ .

При построении графиков ВАХ можно сочетать оба способа:

- 1) наблюдения ВАХ на экране осциллографа – для ориентировочной оценки вида ВАХ и пределов значений напряжений и токов;
- 2) непосредственного измерения напряжения и тока – для получения точных значений этих величин и построения ВАХ.

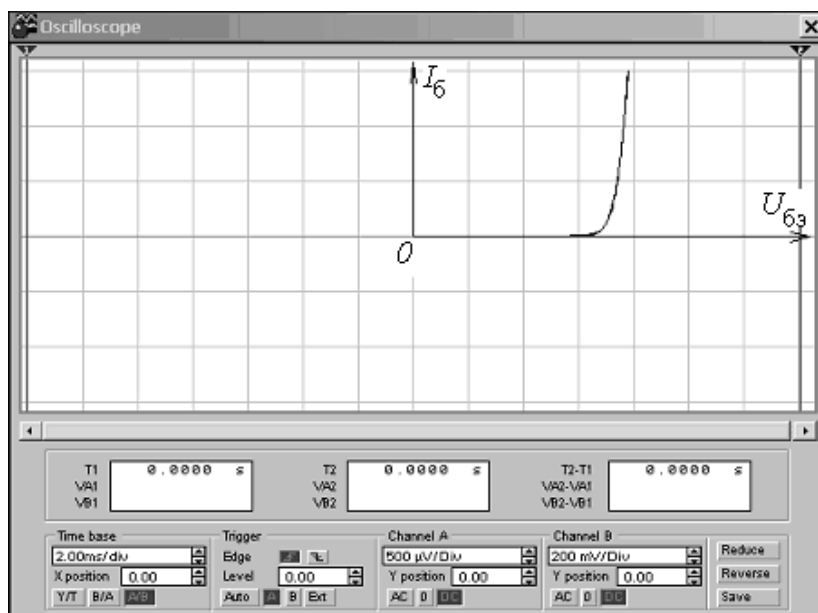


Рис. 3. График входной характеристики

## 2) Выходные характеристики

Для построения выходных ВАХ нужно собрать схему рис. 4.

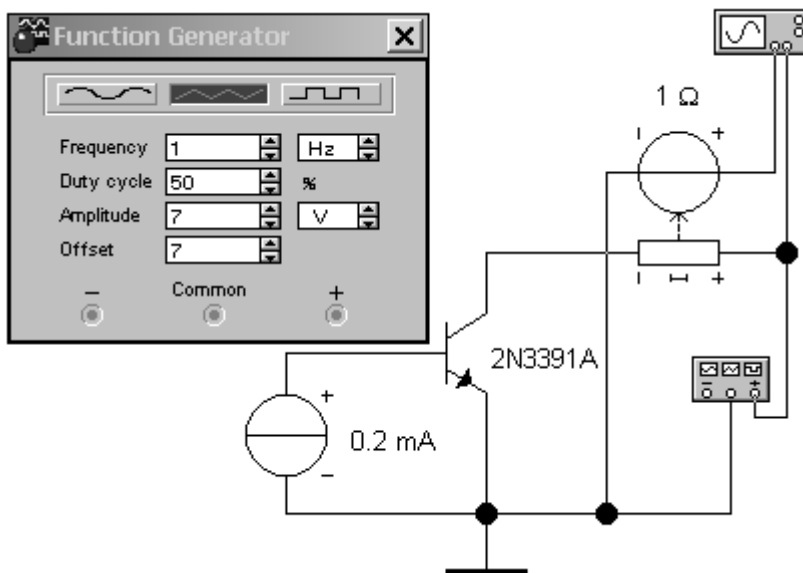


Рис. 4. Схема для построения выходной характеристики

Напряжение коллектор–эмиттер  $U_{КЭ}$  с выхода функционального генератора подается на вход канала В осциллографа, а для регистрации величины тока коллектора  $I_K$  в его цепь включен преобразователь тока в напряжение (**Current Controlled Voltage Source**), которое затем подается на вход А осциллографа. Для получения на экране осциллографа графика ВАХ используется режим развертки А/В.

На рис. 5 приведен вид одной из выходных характеристик при определенном значении тока базы  $I_B = 0,2$  мА. В этом примере масштаб по оси напряжения  $U_{КЭ}$  составляет 2 В/деление, а по оси тока коллектора  $I_K$  – 5 мА/деление.

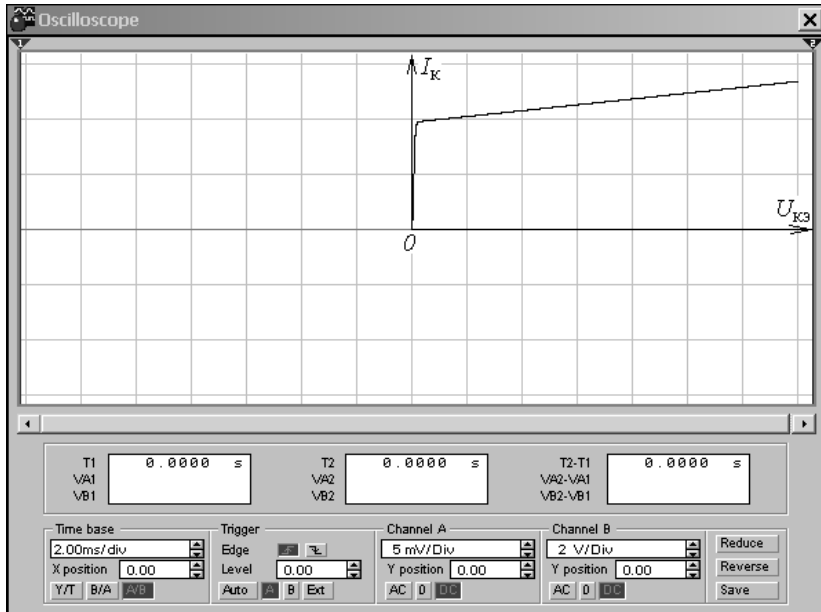


Рис. 5. График выходной характеристики

### 3) Передаточные характеристики

Построение передаточных ВАХ можно «автоматизировать» с помощью схемы рис. 6.

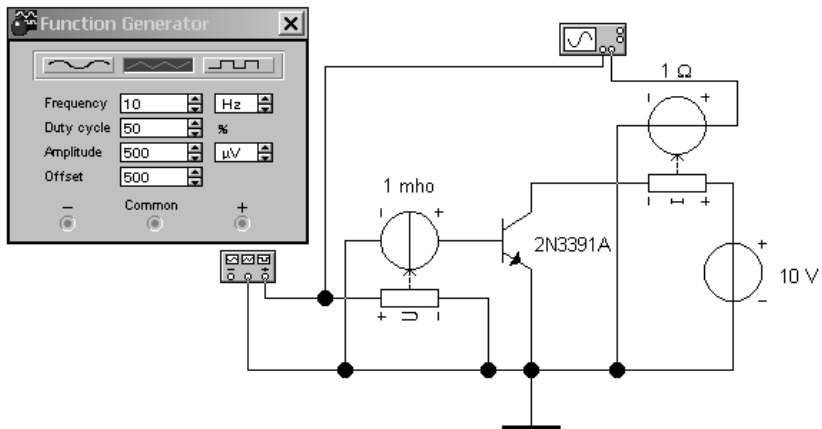


Рис. 6. Схема для построения передаточной характеристики

В этой схеме используются два преобразователя: преобразователь “напряжение-ток” – для генерирования линейно изменяющегося тока базы, и преобразователь “ток-напряжение” – для регистрации величины тока на экране осциллографа. Для получения на экране осциллографа графика ВАХ используется режим развертки В/А.

На рис. 7 приведен вид одной из передаточных характеристик при определенном значении напряжения коллектор–эмиттер  $U_{кэ} = 10$  В. Масштаб по оси тока базы 200 мкВ (или 0,2 мА) на деление, по оси тока коллектора – 20 мА/деление.

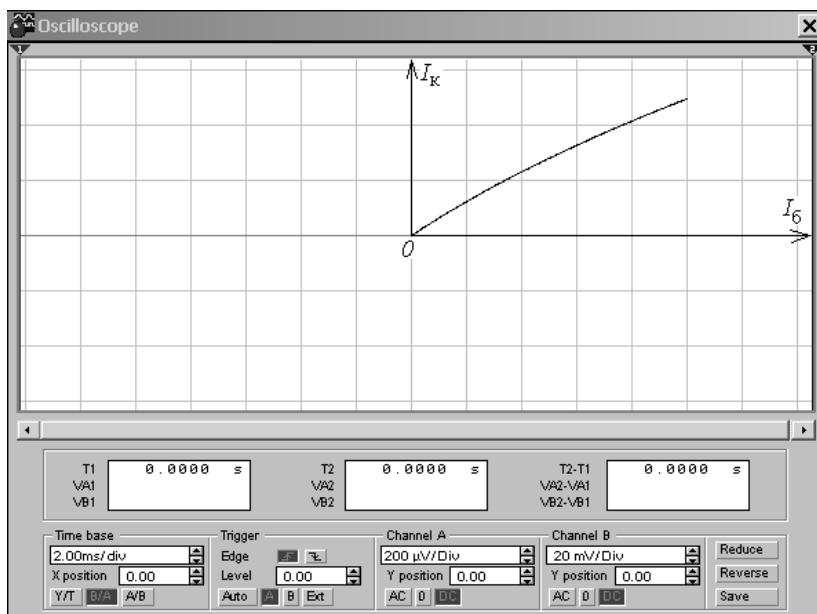


Рис. 7. График передаточной характеристики

## 5. Контрольные вопросы

1. Объясните назначение эмиттерного и коллекторного переходов биполярного транзистора.
2. В каких режимах работают эмиттерный и коллекторный переходы в нормальной активной области транзистора?

Какое напряжение (прямое или обратное) необходимо подать на каждый переход?

3. Как должны включаться источники питания в цепях входного и выходного электродов для транзисторов типа  $p-n-p$  и  $n-p-n$  в схемах с общей базой и с общим эмиттером?
4. Напишите уравнения тока коллектора биполярного транзистора для схем с ОБ и с ОЭ. Укажите связь между коэффициентами передачи тока  $\alpha$  и  $\beta$  и примерные значения этих параметров.
5. Почему биполярный транзистор можно рассматривать как источник тока, управляемый током? Как это свойство транзистора отображается на его эквивалентной схеме?
6. Каково соотношение между значениями неуправляемой составляющей тока коллектора ("сквозного" тока) в схемах с ОБ и с ОЭ? Как эта составляющая отображается на эквивалентной схеме транзистора?
7. В чем смысл дифференциального сопротивления коллекторной цепи? По каким характеристикам транзистора можно найти это сопротивление?
8. Какие соотношения между электрическими величинами (сигналами) отражает малосигнальная эквивалентная схема транзистора?
9. Каков физический смысл каждого из четырех  $h$ -параметров биполярного транзистора? По каким статическим ВАХ и каким образом можно определить эти параметры?
10. Укажите связь между  $h$ -параметрами и параметрами физической малосигнальной эквивалентной схемы транзистора для схемы с ОЭ.

## 6. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель исследований;
- 3) схему установки для проведения измерений;
- 4) таблицы результатов измерений входных, выходных и передаточных характеристик;
- 5) графики вольт-амперных характеристик;
- 6) значения основных параметров транзистора.

## Литература

1. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника Проектирование аналоговых и цифровых устройств: Учебное пособие / Титов В.С., Иванов В.И., Бобырь М.В. Москва: Инфра-М. – 2014. 143 с.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие / М.В. Бобырь, В.И. Иванов, В.С. Титов, А.С. Ястребов. В 2 кн. – Курск: Курск. гос. тех. ун-т. – 2009. Кн. 2. – Электроника. – 240 с.
3. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов. / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. Изд. 3-е. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.