



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Приборостроение и биомедицинская инженерия»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«Узлы и элементы биотехнических систем»**

Ростов-на-Дону

ДГТУ

2018

УДК 621.38

Составители: Р.Х. Хубиев, В.М. Морозов.

Методические указания для выполнения практических лабораторных занятий по дисциплине «Узлы и элементы биотехнических систем» – Ростов-на-Дону : Донской гос. техн. ун-т, 2018. – 69 с.

Рассматриваются лабораторные работы по исследованию узлов и характеристик элементов биотехнических систем.

УДК 621.38

Методические указания содержат методику выполнения лабораторных работ, списки контрольных вопросов.

Предназначены для студентов по направлению 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» очной формы обучения.

УДК 621.38

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донского государственного технического университета

Научный редактор к-т тех. наук, профессор А.В. Литвин

Ответственный за выпуск зав. кафедрой «Приборостроение и биомедицинская инженерия» к-т техн. наук, профессор Цыбрий И.К.

В печать _____.____.20____ г.

Формат 60×84/16. Объем ____ усл. п. л.

Тираж ____ экз. Заказ № ____.

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный
технический университет, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Работа № 1. «Исследование полупроводникового диода и стабилитрона»..	4
Пояснения.....	4
Модуль «Полупроводниковые диод и стабилитрон».....	8
Порядок работы.....	9
Контрольные вопросы.....	13
Работа № 2. «Исследование биполярного транзистора».....	14
Пояснения.....	14
Модуль «Биполярный транзистор».....	21
Порядок работы.....	21
Контрольные вопросы.....	25
Работа № 3. «Исследование полевых транзисторов».....	26
Пояснения.....	26
Модуль «Полевые транзисторы»	34
Порядок работы.....	35
Контрольные вопросы.....	40
Работа № 4. «Исследование тиристора»	41
Пояснения.....	41
Модуль «Тиристор»	45
Порядок работы.....	46
Контрольные вопросы.....	49
Работа № 5. «Исследование усилительного каскада на транзисторе»....	50
Пояснения.....	50
Модуль «Усилительный каскад на транзисторе»	60
Порядок работы.....	61
Контрольные вопросы.....	68
Список используемой литературы.....	69

РАБОТА № 1. «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА И СТАБИЛИТРОНА»

Цель работы - снятие вольт-амперных характеристик и определение параметров кремниевого диода и стабилитрона.

ПОЯСНЕНИЯ

Полупроводниковые диоды

Диод представляет собой пассивный нелинейный элемент. Он содержит один р-п-переход и имеет два вывода от р и п областей. На условном обозначении (рис. 1.1, а) направление стрелки диода совпадает с направлением прямого тока.

Работа полупроводникового диода в электрической схеме определяется его вольт-амперной характеристикой (ВАХ). ВАХ диода показана на рис. 1.1,б.

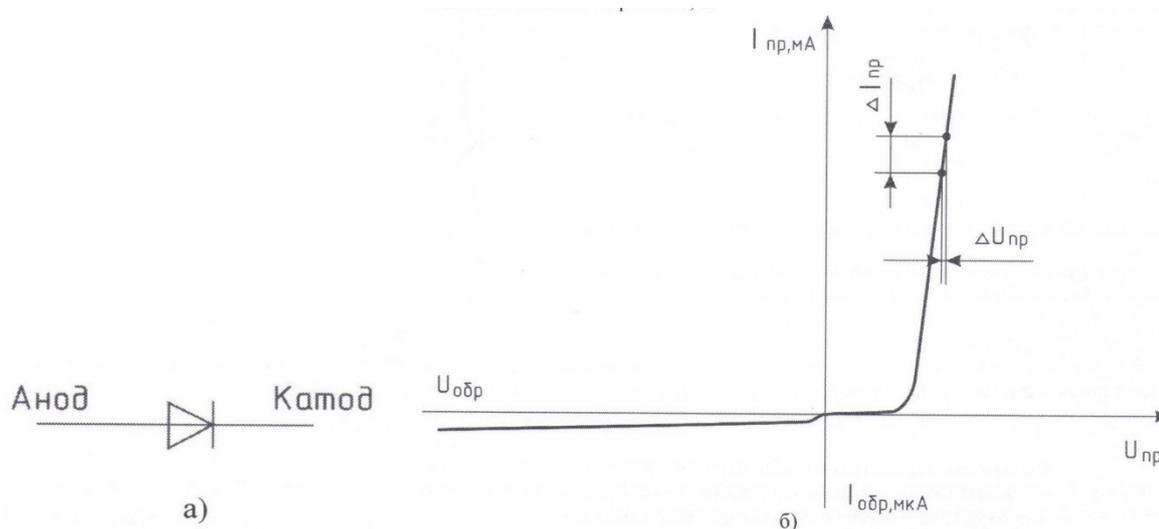


Рисунок 1.1 Условные обозначение **а)** и вольт-амперная характеристика **б)** полупроводникового диода

Если, например, через диод в направлении от анода к катоду протекает прямой ток величиной 10 мА, то анод более положителен, чем катод. Эта разница напряжений называется *прямым напряжением* диода. Чаще всего падение напряжения на диоде, обусловленное прямым током через него, составляет от 0,5 до 0,8 В. Таким падением напряжения можно пренебречь, и тогда диод можно рассматривать как проводник, пропускающий ток только в одном направлении.

Обратный ток для диодов общего назначения измеряется в наноамперах (обратите внимание на разный масштаб измерений по оси абсцисс для прямого

и обратного тока), и его, как правило, можно не принимать во внимание до тех пор, пока напряжение на диоде не достигнет значения напряжения пробоя. Обычно, на диод подают такое напряжение, которое не может вызвать пробой. Исключение составляют только стабилитроны.

Таким образом, основными параметрами диодов являются:

постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ при определенном для каждого диода постоянном прямом токе;

постоянный обратный ток $I_{обр}$ при определенном постоянном обратном напряжении;

максимально допустимое постоянное обратное напряжение $U_{обр.макс}$;

максимально допустимый постоянный $I_{пр.макс}$ или *средний* $I_{пр.ср.макс}$ *прямой ток.*

Основные электрические параметры диода КД521А

Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$
при $I_{пр} = 50\text{мА}$ не более 1В

Постоянный обратный ток $I_{обр}$
при $U_{обр} = U_{обр.макс.}$ не более 1 мкА

Максимально допустимое постоянное обратное
напряжение $U_{обр.макс}$ 75 В

Максимально допустимый постоянный $I_{пр.макс}$
или *средний* $I_{пр.ср.макс}$ *прямой ток* 50мА

Стабилитроны

Стабилитроны - это полупроводниковые приборы, на которых напряжение сохраняется с определенной точностью при изменении протекающего через них тока в заданном диапазоне. Эти приборы предназначены для стабилизации напряжения. Участки **ВАХ**, соответствующие электрическим режимам стабилитронов в режиме стабилизации, называют рабочими (участки *аб* и *вг* на рис. 1.2, б). Рабочий участок стабилитрона расположен на обратной ветви **ВАХ**, т. е. прибор работает в режиме пробоя.

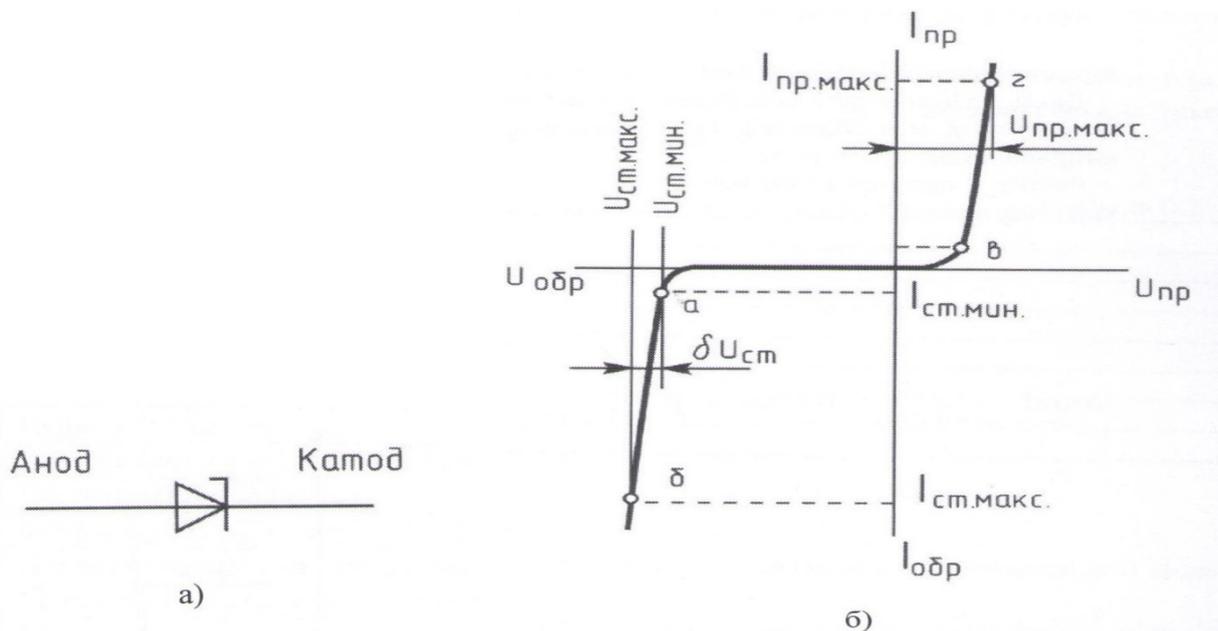


Рисунок 1.2 Условные обозначение **а)** и вольт-амперная характеристика **б)** стабилитрона

Основными параметрами стабилитронов являются:

номинальное напряжение стабилизации $U_{ст.ном}$ - среднее напряжение стабилизации стабилитрона при температуре 298 К и определенном токе стабилизации;

разброс напряжений стабилизации $\Delta U_{ст}$ - интервал напряжений, в пределах которого находятся напряжения стабилизации прибора данного типа;

постоянное прямое напряжение $\Delta U_{ст}$ при определенном для каждого стабилитрона постоянном прямом токе;

температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha_{U_{ст}}$, показывающий, на сколько процентов изменяется напряжение стабилизации $U_{ст}$ при изменении температуры окружающей среды на 1 К;

дифференциальное сопротивление $r_{ст}$, определяющее стабилизирующие свойства прибора и показывающее, как напряжение стабилизации зависит от тока.

$$r_{ст} = (U_{ст.макс} - U_{ст.мин}) / (I_{ст.макс} - I_{ст.мин}) \quad (1.1)$$

минимально допустимый ток стабилизации $I_{ст.мин}$ — минимальный ток через стабилитрон, при котором сохраняются его стабилизирующие свойства;

максимально допустимый ток стабилизации $I_{ст.макс}$ - максимальный ток, при котором прибор сохраняет работоспособность длительное время.

Основные электрические параметры стабилитрона КС156А

Номинальное напряжение стабилизации U_{cm} при $I_{cm} = 10$ мА	5.6 В
Разброс напряжений стабилизации ΔU_{cm}	5.04...6.16 В
Постоянное прямое напряжение U_{np} при $I_{np} = 50$ мА	не более 1 В
Температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha_{U_{cm}}$, в диапазоне температур -60...+125 °С	±0.05% / °С
Дифференциальное сопротивление r_{cm} при $I_{cm} = 10$ мА	не более 46 Ом
Минимально допустимый ток стабилизации $I_{cm.мин}$	3 мА
Максимально допустимый ток стабилизации $I_{cm.макс}$	55 мА

Рассмотрим подробнее вольт-амперную характеристику (ВАХ) диода, изображенную на рис. 1.1,б. Зависимость тока от напряжения имеет вид

$$I = I_{обр} [\exp (U / U_m) - 1] \quad (1.2)$$

где I — ток диода; U - приложенное напряжение; $U_m = kT/q = 25,3$ мВ при комнатной температуре (20 °С); q – заряд электрона ($1,60 \times 10^{-19}$ Кл); k - постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К); T - температура перехода в кельвинах ($K = ^\circ C + 273,16$).

При большом отрицательном значении прикладываемого напряжения U

$$\exp (U / U_m) \rightarrow 0 \quad (1.3)$$

и $I = I_{обр}$, откуда следует физический смысл константы $I_{обр}$ в (1.2): $I_{обр}$ является тепловым током утечки, который при постоянной температуре и при смещении в обратном направлении не зависит от приложенного напряжения, когда оно больше 0.1 В. Обычно $I_{обр}$ называют **обратным током насыщения** или **тепловым**.

Если к диоду приложено прямое напряжение смещения большее 0,1 В, то $\exp(U / U_m) \gg 1$, так что

$$I \approx I_{обр} [\exp (U / U_m)] \quad (1.4)$$

Можно подставить значения q и k и принять, что T - комнатная температура (20 °С или 293 К). Тогда константа $U_m = kT/q$ оказывается равной приблизительно $(40 В)^{-1}$, так что связь между током и напряжением имеет вид:

$$I \approx I_{обр} [\exp (40 U_{np})] \quad (1.5)$$

ВАХ диода нелинейна, и его статическое сопротивление при смещении в прямом направлении $R = U_{np} / I_{np}$ сильно изменяется при изменении тока.

Поэтому используется *динамическое* или *дифференциальное* сопротивление, определяемое как

$$r = dU_{np} / dI_{np} \quad (1.6)$$

Дифференцируя (1.5), получим

$$dU_{np} / dI_{np} = 40 \times I_{обр} [\exp(40 U_{np})] = 40 I_{np} \quad (1.7)$$

поэтому динамическое сопротивление равно

$$r = dU_{np} / dI_{np} = 1/40 I_{np} \quad (1.8)$$

если ток I_{np} выражен в мА, то

$$r = 25 / I_{np} , \text{ Ом} \quad (1.9)$$

Следовательно, динамическое сопротивление диода обратно пропорционально прямому току. Прямой ток величиной 1 мА дает динамическое сопротивление около 25 Ом.

Выражение (1.9) является достаточно точным для большинства практических целей. В частности, для перехода база-эмиттер открытого транзистора отклонение величины его динамического сопротивления от теоретической величины меньше, чем для отдельного диода.

Модуль «Полупроводниковые диод и стабилитрон»

Схема модуля «Полупроводниковые диод и стабилитрон» приведена на рис. 1.3. Элементы усилителя на сменном модуле №1 имеют следующие параметры:

VD1, VD4 - диоды **КД521А**;

VD2, VD3 - стабилитроны **КС156А**.

Прямую ветвь **ВАХ** диода снимают, включив испытуемый диод в схему, показанную на рис. 1.4, а. Прямой ток через диод задается источником тока **ИТ**, характерной особенностью которого является слабая зависимость выходного тока от сопротивления нагрузки. Плавно увеличивая от нуля выходной ток источника тока **ИТ**, измеряют прямое напряжение U_{np} диода для ряда значений прямого тока I_{np} .

Обратную ветвь **ВАХ** диода снимают, включив испытуемый диод в схему, показанную на рис. 1.4, б. Плавно увеличивая от нуля выходное напряжение источников напряжения **ИН1** и **ИН2**, измеряют обратный ток $I_{обр}$ диода для ряда значений обратного напряжения $U_{обр}$.

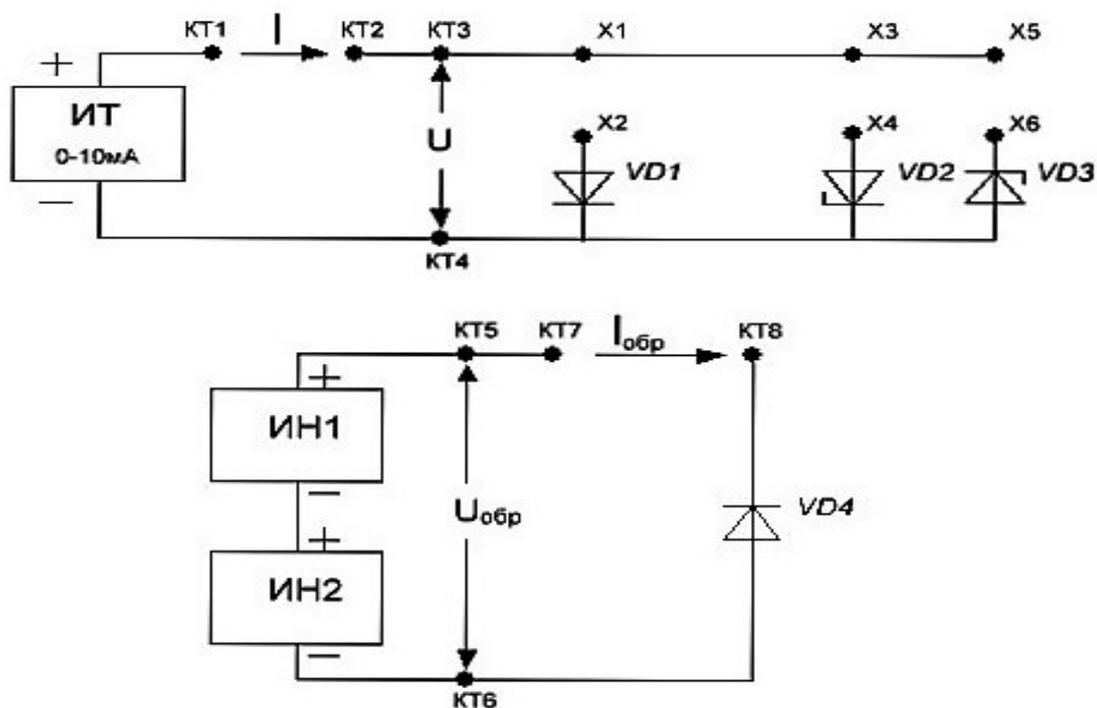


Рисунок 1.3 Схема модуля «Полупроводниковые диод и стабилитрон»

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Подготовка к работе

- 1.1 Зарисуйте схемы для получения **ВАХ** диода и стабилитрона (см. рис. 1.4, а, б и рис. 1.5, а, б).
- 1.2 Вычертите табл. 1.1 ... 1.4 для снятия прямых и обратных ветвей **ВАХ** диода и стабилитрона.
- 1.3 Установите выключатель СЕТЬ, выключатели всех источников сигналов и измерительных приборов в положение ВЫКЛ, регуляторы потенциометров всех источников в крайнее левое положение, переключатель диапазонов источника тока **ИТ** - в положение 0 - 10 мА.
- 1.4 Подключите сменный модуль №1 к разъему базового блока.
- 1.5 Подсоедините шнур питания к разъему на задней стенке стенда и включите вилку шнура питания в розетку электросети напряжением 220В.

Внимание!

Если показания на дисплее измерительного прибора не изменяются при изменении измеряемой величины, то выключите и снова включите его тумблером **ВКЛ / ВЫКЛ**.

Если при включении амперметра на его дисплее отображается символ АС (режим измерения переменного напряжения), то выключите и снова включите амперметр тумблером **ВКЛ / ВЫКЛ** для измерения постоянного по роду тока (при этом на его дисплее должен отобразиться символ DC).

2. Снятие прямой ветви **ВАХ** полупроводникового диода

- 2.1 Подключите встроенные в стенд амперметр для измерения прямого тока

I_{np} и вольтметр для измерения прямого напряжения U_{np} диода. Установите переключатель диапазонов измерения амперметра в положение **мА**. Подключите перемычкой диод **VD1** (см. рис. 1.4, а).

- 2.2 После проверки правильности подключения приборов преподавателем включите питание стенда выключателем СЕТЬ.
- 2.3 Включите источник тока **ИТ** и подключенные к схеме измерительные приборы.
- 2.4 Регуляторами **ГРУБО** и **ТОЧНО** источника тока **ИТ** устанавливайте значения прямого тока I_{np} согласно табл. 1.1. Для каждого значения тока снимайте соответствующие значения прямого напряжения U_{np} и заносите их в табл. 1.1.
- 2.5 Выключите источник тока **ИТ** и подключенные к схеме измерительные приборы..

Таблица 1.1

Прямой ток I_{np} , мА	0,1	0,2	0,5	1	5	10
Прямое напряжение U_{np} , В						

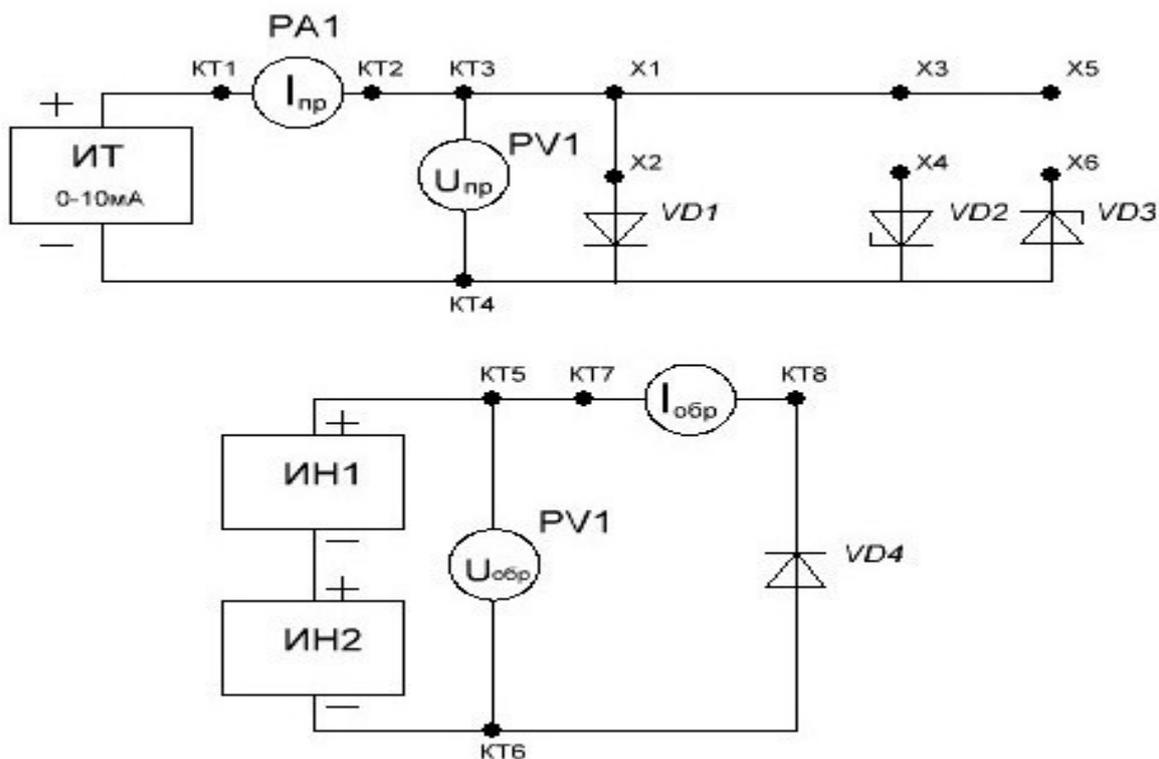


Рисунок 1.4 Схемы для снятия прямой 1 и обратной 2 ветвей ВАХ полупроводникового диода

3. Снятие обратной ветви ВАХ полупроводникового диода

- 3.1 Подключите встроенные в стенд амперметр для измерения обратного тока

- $I_{обр}$ и вольтметр для измерения обратного напряжения $U_{обр}$ диода (см. рис. 1.4, б). Установите переключатель амперметра в положение мкА.
- 3.2 Включите источники напряжения **ИН1** и **ИН2** и подключенные к схеме измерительные приборы..
 - 3.3 Регуляторами **ГРУБО** и **ТОЧНО** источников напряжения **ИН1** и **ИН2** устанавливайте значения обратного напряжения $U_{обр}$ согласно табл. 1.2. Для каждого значения напряжения снимайте соответствующие значения обратного тока $I_{обр}$ и заносите их в табл. 1.2. Если амперметр показывает нулевое значение обратного тока, то запишите в табл. 1.2, что $I_{обр} < 0,1$ мкА.
 - 3.4 Выключите источники напряжения **ИН1** и **ИН2** и подключенные к схеме измерительные приборы.

Таблица 1.2

Обратное напряжение $U_{обр}$, В	1	5	10	20	30
Обратный ток $I_{обр}$, мкА					

4. Обработка результатов эксперимента

- 4.1 Используя данные табл. 1.1 и табл. 1.2 постройте графики прямой и обратной ветвей **ВАХ** полупроводникового диода. Они имеют вид, представленный на рис. 1.1,б.
- 4.2 Сравните полученные значения прямого напряжения $U_{пр}$ и обратного тока $I_{обр}$ со справочными.
- 4.3 Определите динамическое сопротивление диода на одном из участков прямой ветви **ВАХ** полупроводникового диода, используя выражение (1.6) и рис. 1.1.
- 4.4 Рассчитайте теоретическую величину динамического сопротивления на этом же участке **ВАХ**, используя выражение (1.9). Сравните теоретическое и реальное значения динамического сопротивления диода.

5. Снятие прямой ветви **ВАХ** стабилитрона

- 5.1 Подключите встроенные в стенд амперметр для измерения прямого тока $I_{пр}$ и вольтметр для измерения прямого напряжения $U_{пр}$ стабилитрона. Установите переключатель амперметра в положение мА. Подключите перемычкой стабилитрон **VD2** (см. рис. 1.5, а).
- 5.2 Снимите прямую ветвь **ВАХ** стабилитрона так же, как она была снята для диода (п. п. 2.3 ... 2.5). Результаты измерений занесите в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Прямой ток I_{np} , мА	0,1	0,2	0,5	1	5	10
Прямое напряжение U_{np} , В						

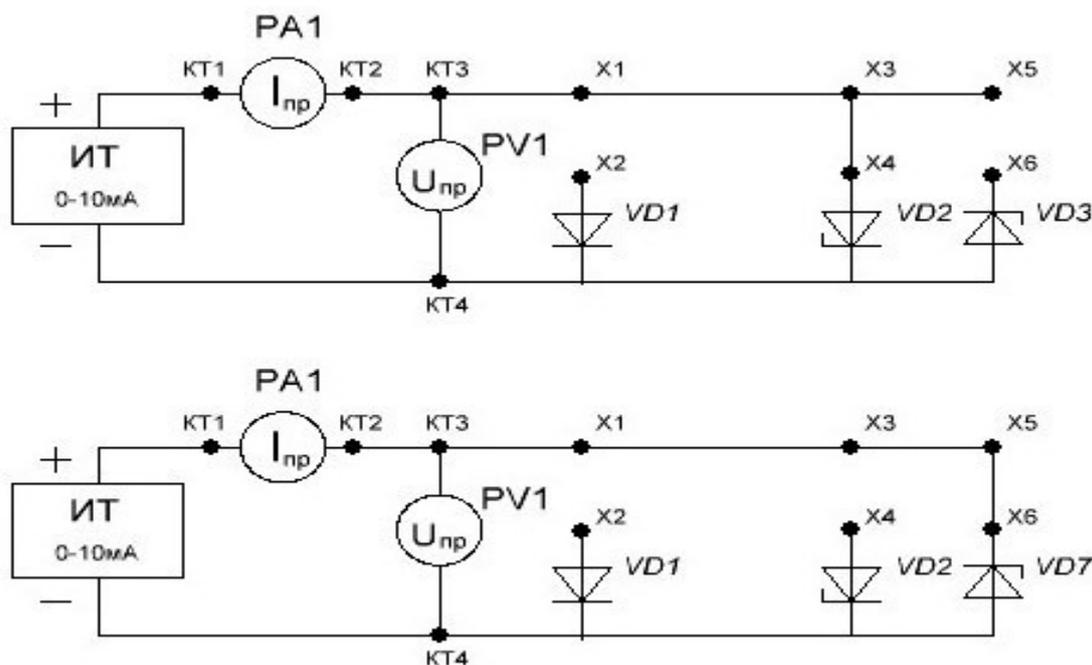


Рисунок 1.5 Схемы для снятия прямой 1 и обратной 2 ветвей ВАХ стабилитрона

6. Снятие обратной ветви ВАХ стабилитрона

- 6.1 Подключите встроенные в стенд амперметр для измерения тока стабилизации $I_{ст}$ и вольтметр для измерения напряжения стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона. Установите переключатель амперметра в положение мА. Подключите переключкой стабилитрон **VD3** (см. рис. 1.5, б).
- 6.2 Снимите обратную ветвь **ВАХ** стабилитрона так же, как была снята прямая ветвь для диода (п. п. 2.3 ... 2.5). Результаты измерений занесите в табл. 1.4.
- 6.3 Выключите все источники стенда и измерительные приборы.

Таблица 1.4

Ток стабилизации $I_{ст}$, мА	0,1	0,5	1	3	5	10
Напряжение стабилизации $U_{ст}$, В						

7. Обработка результатов эксперимента

- 7.1 Используя данные табл. 1.3 и табл. 1.4 постройте графики прямой и обратной ветвей **ВАХ** стабилитрона. Они имеют вид, представленный на

рис. 1.2, б.

7.2 Сравните прямые ветви **ВАХ** диода и стабилитрона.

Определите, находится ли напряжение стабилизации $U_{СТ}$ в пределах допустимого разброса напряжений стабилизации $\Delta U_{СТ}$

7.3 Определите дифференциальное сопротивление стабилитрона r_{cm} на участке характеристики от $I_{ст.мин} = 3$ мА до $I_{ст.макс} = 10$ мА, используя выражение (1.1) и рис. 1.2, б.

7.5 Сравните полученное значение дифференциального сопротивления стабилитрона r_{cm} со справочным.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими параметрами характеризуются полупроводниковые диоды?
2. Почему для диодов и стабилитронов используется динамическое, а не статическое сопротивление?
3. Одинаково ли сопротивление диода при прямом и обратном смещении?
4. Как от величины дифференциального сопротивления стабилитрона r_{cm} зависят его стабилизирующие свойства?

РАБОТА № 2. «ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА»

Цель работы - снятие и анализ входных и выходных ВАХ транзистора, включенного по схеме сОЭ; определение по ним его параметров.

ПОЯСНЕНИЯ

Типы биполярных транзисторов

Транзистор - это один из основных «активных» электронных компонентов. Биполярный транзистор состоит из двух р-п-переходов, образованных слоями полупроводников с примесями. На рис. 2.1 показана самая простая конструкция п-р-п-транзистора и его условное обозначение. Тонкий слой слабо легированного полупроводника р-типа (база) расположен между двумя более толстыми слоями n-типа (эмиттер и коллектор). Толщина базы может быть меньше одного микрона.



Рисунок 2.1. Устройство **n-p-n** транзистора и его условное обозначение

Транзисторы со структурой р-п-р-типа наиболее распространены. Они обладают характеристиками, идентичными с п-р-п-транзисторами, но требуют напряжения питания противоположной полярности. На рисунке 2.2 показана структура р-п-р-транзистора и его условное обозначение.



Рисунок 2.2 Устройство **p-n-p** транзистора и его условное обозначение

Режимы работы транзисторов

В зависимости от выполняемых схемой функций транзистор может работать в трех режимах.

В активном режиме (режим усиления; линейный режим) транзистор работает в усилителях, когда требуется усиление сигналов с минимальным искажением их формы. В активном режиме транзистор управляется в любой момент процесса усиления, т. е. каждому изменению входного сигнала соответствует изменение выходного.

В режиме насыщения сопротивление промежутка коллектор - эмиттер транзистора резко уменьшается. В этом режиме транзистор не управляется. Режим насыщения используют в тех случаях, когда необходимо уменьшить почти до нуля сопротивление цепи, в которую включен транзистор.

В режиме отсечки транзистор закрыт. В этом режиме он обладает большим сопротивлением.

Схемы включения биполярных транзисторов

При включении биполярного транзистора в электрическую схему образуется две цепи: управляющая и управляемая. В управляющей цепи действует входной сигнал, который обычно подают на базу или эмиттер. В управляемой цепи (коллекторной или эмиттерной) формируется выходной сигнал, поступающий затем на вход следующего каскада или в нагрузку. Третий электрод транзистора является общим для входной и выходной цепей.

Широко распространены три схемы включения транзисторов: с общей базой (рис. 2.3, а), с общим эмиттером (рис. 2.3, б) и с общим коллектором (рис. 2.3, в).

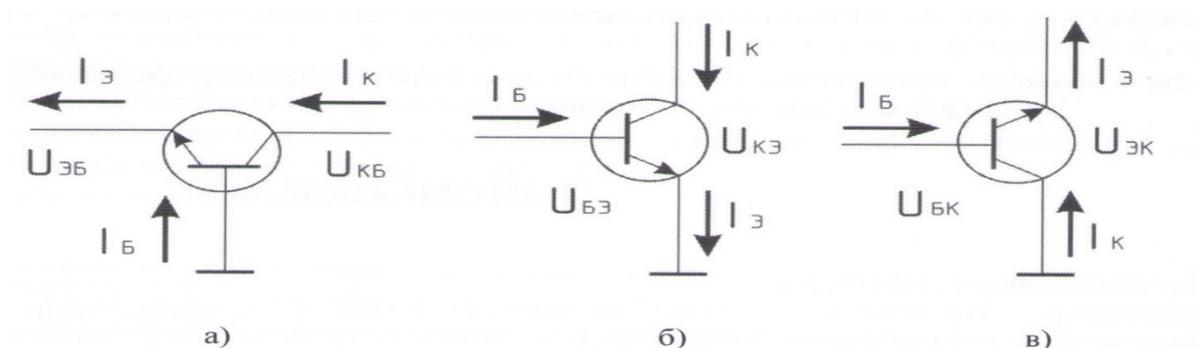


Рисунок 2.3 Схемы включения транзисторов с общей базой а) , общим эмиттером б) , и общим коллектором в)

Вольт-амперные характеристики

Для понимания работы схем, в состав которых входят транзисторы, очень полезны их входные и выходные вольт-амперные характеристики (**ВАХ**). Схема для снятия **ВАХ** биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ) приведена на рис. 2.4.

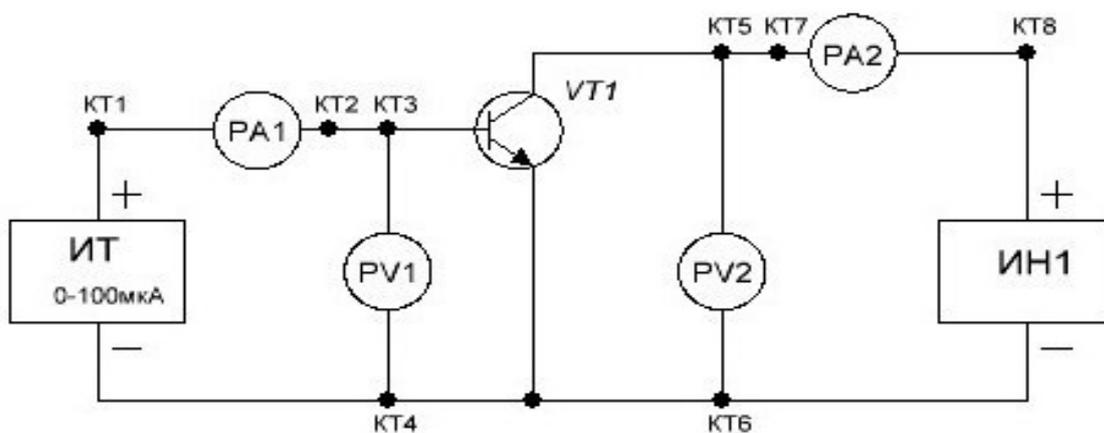


Рисунок 2.4 Схема снятия входной и выходной характеристик биполярного транзистора.

Входные характеристики транзистора показывают зависимости тока входного электрода от напряжения между ним и общим электродом при постоянном напряжении на выходном электроде. Для схемы с **ОЭ** это зависимость тока базы от напряжения между ней и эмиттером при постоянных напряжениях на коллекторе (рис. 2.5): $I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const}$.

В схеме с **к** эмиттерному переходу приложено прямое напряжение, поэтому при напряжении $U_{КЭ} = 0$ входная характеристика соответствует прямой ветви **ВАХ** полупроводникового диода. При увеличении напряжения входные характеристики смещаются вправо, что соответствует уменьшению тока базы.

Выходные характеристики транзистора показывают зависимость тока выходного электрода от напряжения между ним и общим электродом. Снимают выходные характеристики для ряда постоянных токов входного электрода. Для схемы с **ОЭ** это зависимости тока коллектора от напряжения между ним и эмиттером при постоянных токах базы: $I_K = f(U_{КЭ})$ при $I_B = \text{const}$.

Вид семейства выходных характеристик для различных значений базового тока I_B показан на рис. 2.6, а. Здесь видно, что с увеличением напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ от нуля вначале происходит резкое нарастание коллекторного тока, пока $U_{КЭ}$ не достигнет значения 0,6В. Дальнейшее увеличение $U_{КЭ}$ незначительно влияет на ток коллектора I_K и кривые становятся горизонтальными.

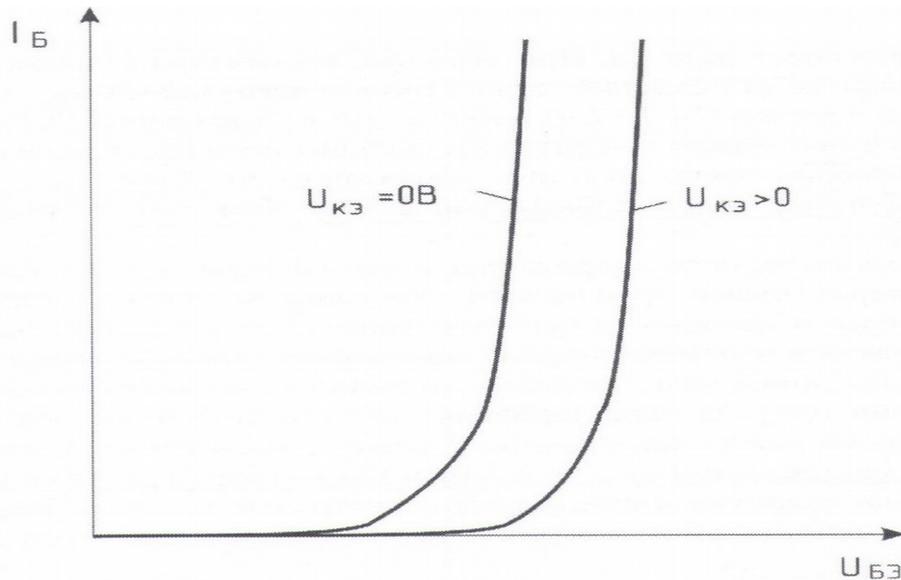


Рисунок 2.5 Входные характеристики транзистора в схеме с **ОЭ**

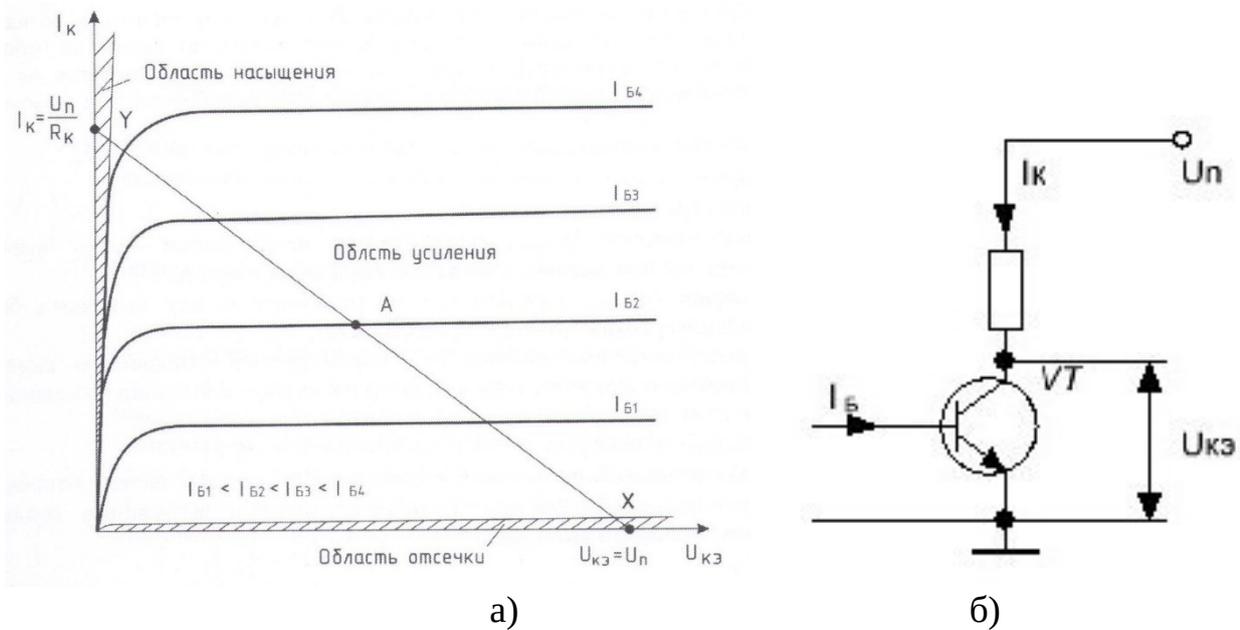


Рисунок 2.6 Семейство выходных характеристик транзистора с линией нагрузки **(а)** и выходная цепь схемы с **ОЭ(б)**

Нагрузочная прямая

На рис. 2.6, б изображена выходная цепь схемы усилителя с **ОЭ**. На семействе выходных характеристик транзистора (рис. 2.6, а) проведена прямая линия *XY*. Это - *линия нагрузки*. Линия нагрузки представляет собой траекторию, в соответствии с которой должны изменяться коллекторное напряжение и ток при данном резисторе нагрузки R_K и напряжении питания $U_{П}$.

Из второго закона Кирхгофа для выходной цепи усилителя

$$U_{КЭ} = U_{П} - R_K I_K \quad (2.1)$$

В результате преобразования имеем

$$I_K = -(1 / R_K) U_{КЭ} + U_{П} / R_K \quad (2.2)$$

Уравнение линии нагрузки (2.2) - это выражение связи между током

коллектора I_K и напряжением коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$. Линию нагрузки легко провести через точки Y и X , которые соответствуют максимальному коллекторному току и максимальному напряжению на коллекторе.

Уравнение (2.2) описывает прямую с отрицательным коэффициентом, равным $1/R_K$, пересекающую ось тока в точке Y . Точка Y линии нагрузки выражает собой гипотетическое состояние транзистора с нулевым напряжением на коллекторе ($U_{КЭ} = 0$). При этом напряжение питания полностью падает на коллекторной нагрузке. В этом состоянии $I_K = U_n / R_K$.

В точке X наступает отсечка. При этом ток коллектора становится равным нулю ($I_K = 0$) и поэтому нет падения напряжения на резисторе коллекторной нагрузки ($R_K I_K = 0$). В результате к коллектору приложено все напряжение питания ($U_{КЭ} = U_{П}$), что следует из выражения (2.1).

На линии нагрузки можно выбрать оптимальное положение рабочей точки A , для которого напряжение на коллекторе примерно равно половине напряжения питания ($U_{КЭ} \approx U_{П}/2$). В этом случае при изменениях тока базы получатся максимальные равные по величине положительные и отрицательные отклонения напряжения $U_{КЭ}$.

Колебания коллекторного напряжения и коллекторного тока удобно рассматривать в непосредственной связи с характеристиками транзистора. Достоинство такого подхода состоит в том, что можно видеть реальные пределы, в которых будут происходить эти колебания. Очевидно, что выходное напряжение $U_{КЭ}$ может увеличиваться почти до напряжения питания (когда наступает отсечка).

Нижний предел линейного изменения выходного напряжения находится там, где линия нагрузки больше не пересекает ни одну из характеристик. За этой точкой расположена заштрихованная область, которая представляет собой режим насыщения. В режиме насыщения напряжение между коллектором и эмиттером $U_{КЭ}$ нас очень мало (обычно $U_{КЭ \text{ нас}} < 0,2$ В) и транзистор больше не управляет коллекторным током, который ограничен только сопротивлением резистора нагрузки и напряжением питания ($I_{K \text{ нас}} \approx U_{П}/R_K$).

Транзисторы, используемые в переключающих схемах, работают попеременно то в режиме насыщения, то в режиме отсечки.

При разработке схем на основе транзисторов входные и выходные вольт-амперные характеристики не так полезны, как при разработке схем на основе вакуумных электронных ламп. Во-первых, вольт-амперные характеристики, указываемые для полупроводниковых элементов, являются «типичными», а их технологический разброс может быть 5-кратным. Во-вторых, они сильно изменяются при колебаниях температуры. В-третьих, для элементов, обладающих логарифмическими характеристиками, таких, как $p-n$ переход, точный результат получается только на небольшом участке (для малого сигнала). Поэтому использование графических методов расчета для транзисторов на основе публикуемых в паспортных данных вольт-амперных характеристик даст ложное чувство уверенности в правильности полученных результатов.

Параметры биполярных транзисторов

Основными параметрами биполярных транзисторов являются:

напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭ\text{ нас}}$, определяемое напряжением между выводами коллектора и эмиттера в режиме насыщения при заданных токах базы I_B и коллектора I_K ;

напряжение насыщения база-эмиттер $U_{БЭ\text{ нас}}$, определяемое напряжением между выводами базы и эмиттера в режиме насыщения при заданных токах базы I_B и коллектора I_K ;

коэффициент передачи тока в режиме малого сигнала $h_{21э}$, определяемый отношением изменения выходного тока к вызвавшему его изменению входного тока в режиме короткого замыкания выходной цепи по переменному току

$$h_{21э} = \Delta I_K / \Delta I_B \quad (2.3)$$

статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером $h_{21э}$, определяемый отношением постоянного тока коллектора к постоянному току базы при заданных постоянном напряжении коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ и токе эмиттера $I_э$ в схеме с общим эмиттером

$$h_{21э} = I_K / I_B \quad (2.4)$$

максимально допустимое постоянное напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ\text{ макс}}$

максимально допустимое постоянное напряжение база-эмиттер $U_{БЭ\text{ макс}}$

максимально допустимый постоянный ток коллектора $I_{K\text{ макс}}$

максимально допустимый постоянный ток базы $I_{B\text{ макс}}$

максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора $P_{K\text{ макс}}$

Превышение максимально допустимых параметров приводит к разрушению р-п-переходов и выходу транзистора из строя.

Различие между статическим коэффициентом передачи тока $h_{21э}$ и коэффициентом передачи тока в режиме малого сигнала $h_{21э}$ не всегда очевидно. Для того и для другого случая часто используют понятие коэффициента усиления транзистора по току β . Если учесть, что $h_{21э} \approx h_{21э}$ (за исключением очень высоких частот), то использование коэффициента β вполне допустимо.

Для определения коэффициента передачи тока в режиме малого сигнала $h_{21э}$ на графике выходных характеристик транзистора обозначают рабочую точку **A** (рис. 2.7). Семейство выходных характеристик в области рабочей точки пересекают линией $U_{КЭ\text{ р.т}} = \text{const}$, что соответствует короткому замыканию по переменному току на выходе транзистора. Затем по формуле (2.3) находят $h_{21э}$, графически определив $\Delta I_K = I_{K2} - I_{K1}$ и вычислив $\Delta I_B = I_{B2} - I_{B1}$.

Величина коэффициента передачи тока биполярного транзистора зависит от тока коллектора. Результатом является искажение формы выходного сигнала усилителей, если эти сигналы велики.

На рис. 2.7 также показано как при заданных значениях тока базы I_{B4} и тока коллектора I_{K3} определить напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭ\text{ нас}}$. Транзистор насыщается благодаря введению в базу тока, большего чем $I_K / h_{21э}$.

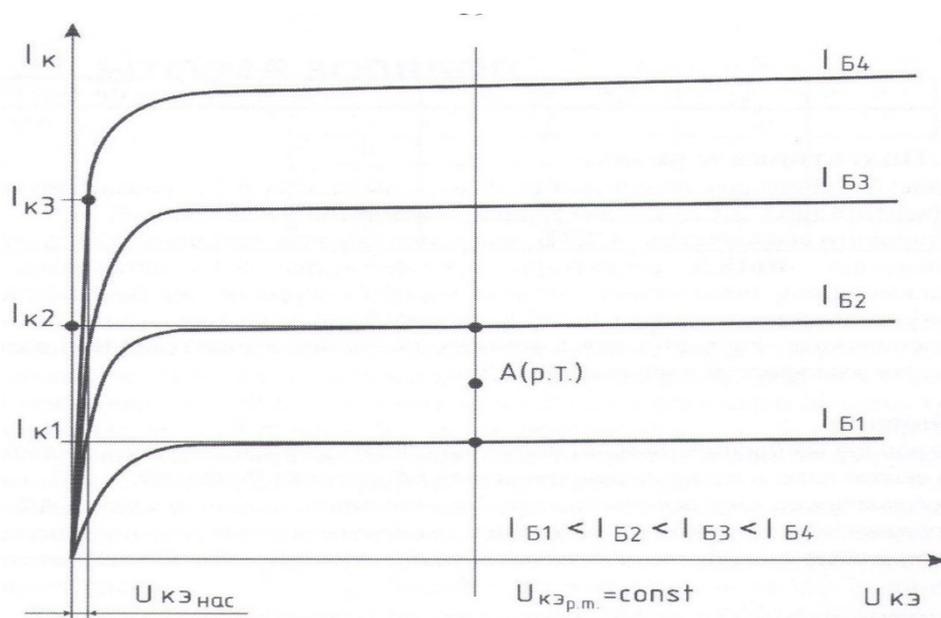


Рисунок 2.7 Определение параметров транзистора в схеме с общим эмиттером графическим методом

Основные электрические параметры транзистора *KT503E*

Напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$

при $I_K = 10\text{ мА}$, $I_B = 1\text{ мА}$

не более 0,6 В

тип. значение 0,2 В

Напряжение насыщения база-эмиттер $U_{БЭнас}$

при $I_K = 10\text{ мА}$, $I_B = 1\text{ мА}$

не более 1,2 В тип.

значение 0,8 В

Статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$

при $U_{КЭ} = 5\text{ В}$, $I_Э = 10\text{ мА}$

40 ... 120

Максимально допустимое постоянное напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ макс}$

100 В

Максимально допустимое постоянное напряжение база-эмиттер $U_{БЭ макс}$

5 В

Максимально допустимый постоянный ток коллектора $I_{К макс}$

0,15 А

Максимально допустимый постоянный ток базы $I_{Б макс}$

0,1 А

Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора $P_{К макс}$

0,35 Вт

Модуль «Биполярный транзистор»

Схема модуля «Биполярный транзистор» приведена на рис. 2.8.

$VT1$ -транзистор $KT503E$.

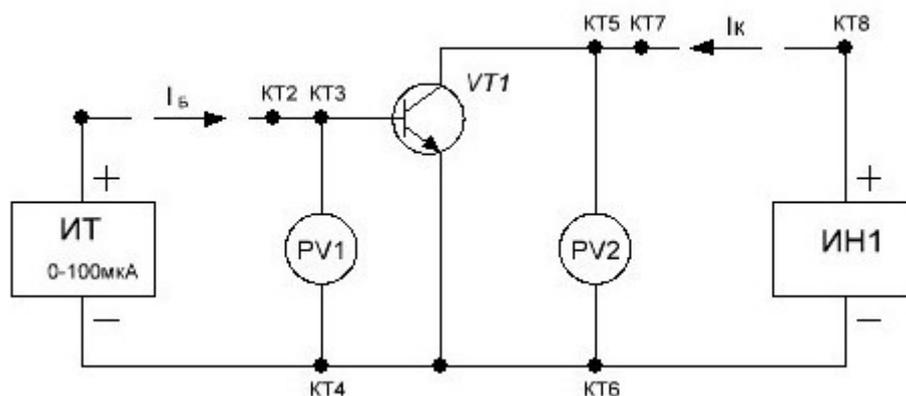


Рисунок 2.8 Схема модуля «Биполярный транзистор».

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Подготовка к работе

1.1 Зарисуйте схему для получения входных и выходных $ВАХ$ транзистора (см. рис. 2.4).

1.2 Вычертите табл. 2.1 ... 2.4 для записи результатов исследований.

1.3 Установите выключатель СЕТЬ, выключатели всех источников сигналов и измерительных приборов в положение ВЫКЛ, регуляторы потенциометров всех источников в крайнее левое положение, переключатель диапазонов источника тока $ИТ$ - в положение $0 - 100 \text{ мкА}$.

1.4 Подключите сменный модуль №2 к разъему базового блока.

1.5 Подсоедините шнур питания к разъему на задней стенке стенда и включите вилку шнура питания в розетку электросети напряжением 220В.

Внимание!

Если показания на дисплее измерительного прибора не изменяются при изменении измеряемой величины, то выключите и снова включите его тумблером ВКЛ / ВЫКЛ.

Если при включении амперметра на его дисплее отображается символ АС (режим измерения переменного напряжения), то выключите и снова включите амперметр тумблером ВКЛ / ВЫКЛ для измерения постоянного по роду тока (при этом на его дисплее должен отобразиться символ DC).

2. Снятие входных характеристик транзистора

2.1 Для снятия входных $ВАХ$ транзистора подключите встроенные в стенд приборы (см. рис 2.4):

$РА1$ - микроамперметр для измерения тока базы I_B ;

$PV1$ - вольтметр для измерения напряжения база-эмиттер $U_{БЭ}$;

$PV2$ - вольтметр для измерения напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$;

$РА2$ - миллиамперметр для измерения тока коллектора I_K ;

2.2 После проверки правильности подключения приборов преподавателем включите питание стенда выключателем СЕТЬ.

2.3 Включите источник тока **ИТ**, источник напряжения **ИН1** и подключенные к схеме измерительные приборы.

2.4 Установите регуляторы ГРУБО и ТОЧНО источника напряжения **ИН1** в крайние левые положения. При этом значение напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ примерно равно 0 В.

2.5 Регуляторами ГРУБО и ТОЧНО источника тока **ИТ** устанавливайте значения тока базы I_b согласно табл. 2.1. Для каждого значения тока базы I_b снимайте соответствующие значения напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ и заносите их в табл. 2.1.

2.6 Установите поочередно значение напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ равным 1 В и 10 В. Для каждого из этих напряжений снимите входную характеристику выполнив п. 2.5.

2.7 Установите регуляторы ГРУБО и ТОЧНО источника тока **ИТ** и источника напряжения **ИН1** в крайнее левое положение и выключите источники тока **ИТ** и напряжения **ИН1**.

Таблица 2.1

Ток базы I_b , мкА		5	10	20	40	60	80
Напряжение база-эмиттер $U_{бэ}$, В, при $U_{кэ}$, В	0						
	1						
	10						

3. Снятие выходных характеристик транзистора

3.1 Для снятия выходных **ВАХ** транзистора измерительные приборы должны быть подключены так же, как указано в п.п. 2.1.

3.2 Включите источник тока **ИТ**, источник напряжения **ИН1** и подключенные к схеме измерительные приборы.

3.3 Регуляторами ГРУБО и ТОЧНО источника тока **ИТ** установите значение тока базы I_b равным 10 мкА.

3.4 Регуляторами ГРУБО и ТОЧНО источника напряжения **ИН1** устанавливайте значения напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ согласно табл. 2.2. Для каждого значения напряжения $U_{кэ}$ снимайте соответствующие значения тока коллектора I_k и заносите их в табл. 2.2.

3.5 Снимите остальные выходные характеристики для токов базы, указанных в табл. 2.2, выполняя п. п. 3.5.

3.6 Установите регуляторы ГРУБО и ТОЧНО источников тока **ИТ** и напряжения **ИН1** в крайнее левое положение и выключите источник тока **ИТ**, источник напряжения **ИН1** и подключенные к схеме измерительные приборы.

Таблица 2.2

Напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$, В		0,2	0,5	1	2	5	10
Ток коллектора I_k , мА, при I_b , мА	10						
	20						
	40						
	60						
	80						

4. Обработка результатов экспериментов

4.1 Используя данные табл. 2.1 и табл. 2.2 постройте графики семейств входных и выходных характеристик транзистора. Они имеют вид, представленный на рис. 2.5 и рис 2.6, а.

4.2 Постройте на семействе выходных характеристик линию нагрузки. Для этого примите напряжение питания схемы усилителя $U_{п} = 10$ В и отметьте точку X на графике характеристик (рис. 2.9). Выберите оптимальное положение рабочей точки A (р. т.) с напряжением $U_{к р.т} = U_{п} / 2 = 5$ В на характеристике с током базы $I_b = 40$ мкА. Проведите через найденные точки X и A линию нагрузки до пересечения с осью тока коллектора I_k . Обозначьте на графике точку пересечения Y.

4.3 Определите, каким должно быть сопротивление резистора нагрузки R_k , чтобы режимы работы транзистора соответствовали построенной линии нагрузки. Для этого найдите по графику выходных характеристик величину тока коллектора I_k в точке Y. Так как в этом состоянии $I_k = U_{п} / R_k$, то рассчитайте сопротивление $R_k = U_{п} / I_k$. Занесите рассчитанную величину сопротивления R_k в табл.2.3.

4.4 По графикам выходных характеристик (см. рис. 2.9) определите, какими будут изменения напряжения коллектор-эмиттер $\Delta U_{кэ1} = U_{кэ1} - U_{кэ р.т}$ и $\Delta U_{кэ2} = U_{кэ1} - U_{кэ р.т}$ при уменьшении и увеличении значения тока базы в рабочей точке $I_{б р.т}$ на 20 мкА. Занесите результаты в табл. 2.3 и сделайте вывод о линейности зависимости выходного напряжения $U_{кэ}$ от входного тока I_b при выбранном положении рабочей точки.

4.5 По графикам выходных характеристик определите, как показано на рис. 2.7 напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{кэ нас}$ при токе базы $I_b = 80$ мкА и токе коллектора $I_k = 3$ мА и занесите его значение в табл. 2.4. Сравните полученное значение со справочным. Проанализировав графики полученных выходных характеристик, сделайте вывод, как напряжение насыщения $U_{кэ нас}$ зависит от тока базы I_b .

4.6 Определите коэффициент передачи тока в режиме малого сигнала $h_{21э}$ при напряжении коллектор- эмиттер $U_{кэ} = 5$ В и изменении тока базы от 20 мкА до 40 мкА, как показано на рис. 2.7 и используя выражение (2.3). Занесите полученное значение в табл. 2.4.

4.7 Определите статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером $h_{21э}$ при напряжении коллектор-эмиттер $U_{кэ} = 5$ В и токе базы $I_b = 40$

мкА, пользуясь выражением (2.4). Занесите полученное значение в табл. 2.4.

4.8 Сравните полученные значения коэффициентов передачи $h_{21э}$ и $h_{21э}$ между собой. Сравните также полученное значение статического коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером $h_{21э}$ со справочным значением.

Таблица 2.3

Параметр	Значение
Сопrotивление нагрузки R_k	
Напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ1}$ при токе базы $I_B = 60$ мкА	
Напряжение коллектор-эмиттер в рабочей точке $U_{кэp.m.}$ (при токе базы $I_B = 40$ мкА)	
Напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ2}$ при токе базы $I_B = 20$ мкА	
Изменение напряжения коллектор-эмиттер $\Delta U_{кэ1}$ при увеличении тока базы на 20 мкА (от 40 мкА до 60 мкА), $\Delta U_{кэ1} = U_{кэ1} - U_{кэp.m.}$	
Изменение напряжения коллектор-эмиттер $\Delta U_{кэ2}$ при уменьшении тока базы на 20 мкА (от 40 мкА до 20 мкА), $\Delta U_{кэ2} = U_{кэ2} - U_{кэp.m.}$	

Таблица 2.4

Параметр	Экспериментальное значение	Справочное значение
Коэффициент передачи тока в режиме малого сигнала, $h_{21э} = \Delta I_k / I_B$		
Статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером, $h_{21э} = I_k / I_B$		40...120
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{кэ нас.}$, В		Не более 0,6

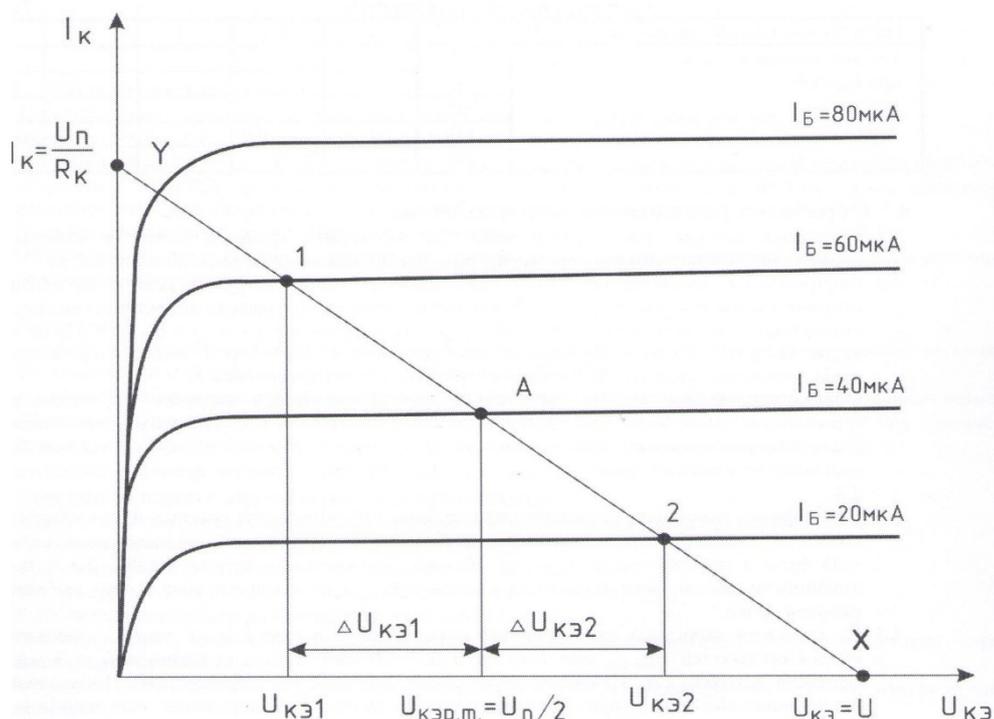


Рисунок 2.9 Определение величины изменения выходного напряжения усилителя от изменения тока базы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой входные и выходные **ВАХ** биполярных транзисторов?
2. Какими параметрами характеризуются биполярные транзисторы?
3. Какие параметры транзистора, включенного по схеме с **ОЭ**, характеризуют его рабочую точку?
4. Каковы особенности активного режима работы транзистора?
5. Как перевести транзистор в режим насыщения и в режим отсечки?

РАБОТА № 3. «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ»

Цель работы - снятие стоко-затворных и стоковых характеристик полевых транзисторов с *p-n* переходом и с изолированным затвором и определение их параметров.

ПОЯСНЕНИЯ

Типы полевых транзисторов

Полевые транзисторы, так же как и биполярные, имеют три вывода: исток, сток и затвор. Проводимостью канала сток-исток управляет электрическое поле, создаваемое приложенным к затвору напряжением. Здесь нет прямосмещенных *p-n* переходов, поэтому ток через затвор не течет, и это - наиболее важное преимущество полевых транзисторов перед биполярными. Получаемое, как следствие этого, высокое входное полное сопротивление (оно может быть больше 10^{14} Ом) существенно во многих применениях. Интегральные схемы на МОП-транзисторах революционизировали цифровую электронику. На малой площади в интегральной микросхеме может быть размещено большое число слаботочных полевых транзисторов. Поэтому они особенно полезны для создания больших интегральных схем (БИС), таких как микрокалькуляторы, микропроцессоры и устройства памяти. Плюс к тому появление сильноточных полевых транзисторов позволяет во многих случаях заменить биполярные транзисторы, зачастую получая более простые схемы с улучшенными параметрами.

Как и биполярные транзисторы, полевые транзисторы бывают двух полярностей: *n*-канальные (с проводимостью за счет электронов) и *p*-канальные (с дырочной проводимостью). Однако разнообразие полевых транзисторов этим не ограничивается, что может приводить к путанице. Во-первых, полевые транзисторы могут изготавливаться с затворами двух различных типов. В результате мы имеем полевые транзисторы с *p-n*-переходом и полевые транзисторы с изолированным затвором, так называемые **МОП**- транзисторы. Во-вторых, **МОП**-транзисторы бывают с двумя типами легирования канала. Это дает полевые транзисторы обогащенного и обедненного типа.

Несмотря на все обескураживающее разнообразие типов полевых транзисторов только пять из них реализованы на практике. А основной интерес представляют четыре случая из пяти. Это полевые транзисторы с *p-n*-переходом и обогащенные МОП-транзисторы. И те, и другие могут быть *n*-канальными, либо *p*-канальными. Поскольку МОП-транзисторы почти всегда обогащенные, а полевые транзисторы с *p-n*-переходом всегда обедненные, то будем далее опускать эти понятия.

Характеристики А/ОЯ-транзисторов

Рассмотрим вначале n -канальный МОП-транзистор. Его биполярным аналогом является n - p - n -транзистор (рис. 3.1). В нормальном режиме сток (или соответствующий ему коллектор) имеет положительный потенциал относительно истока (эмиттера). Ток от стока к истоку отсутствует, пока на затвор (базу) не будет подано положительное по отношению к истоку напряжение. В последнем случае затвор становится «прямосмещенным» и возникает ток стока, который весь проходит к истоку.

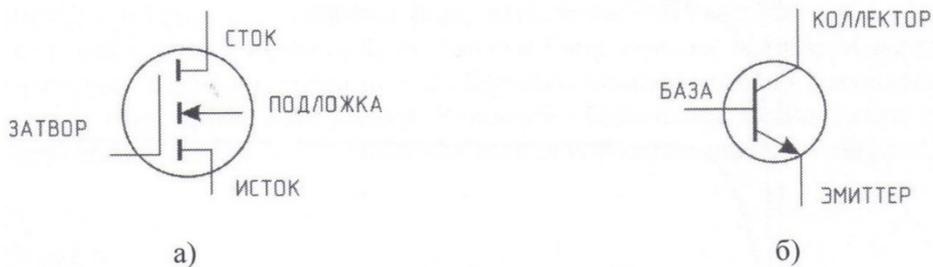


Рисунок 3.1 Условные обозначения n -канального МОП-транзистора **а)** и биполярного n - p - n -транзистора **б)**

Для полевых транзисторов, включенных по схеме с общим истоком (рис. 3.2 и рис. 3.6) семейство выходных характеристик - это зависимость тока стока I_C от напряжения сток-исток $U_{СИ}$ при различных значениях напряжения затвор-исток $U_{ЗИ}$: $I_C = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$. Семейство стоковых характеристик n -канального МОП-транзистора приведено на рис. 3.3, а. Для сравнения здесь же приведено семейство выходных характеристик обычного n - p - n -транзистора.

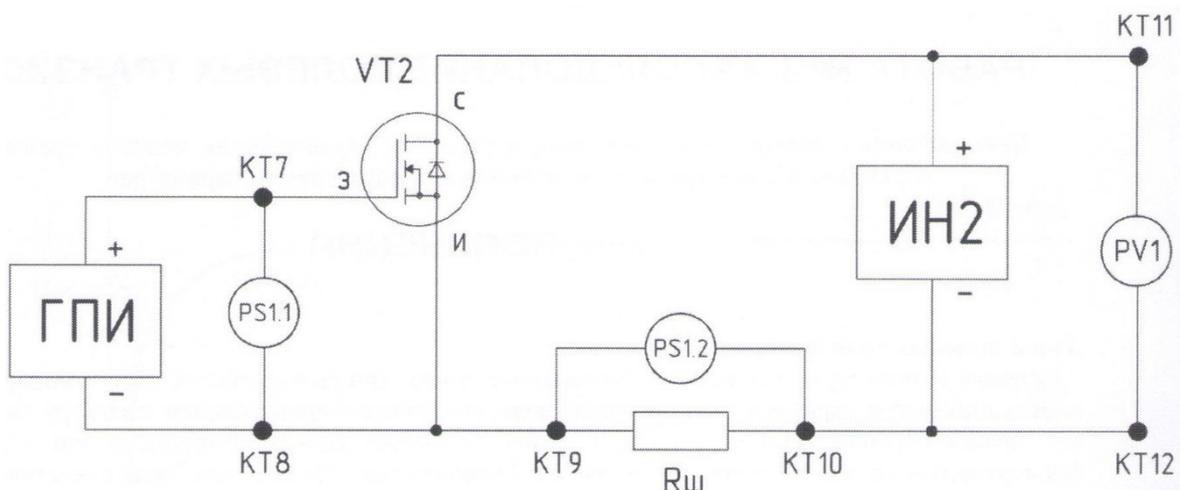


Рисунок 3.2 Схема исследования n -канального МОП-транзистора в импульсном режиме.

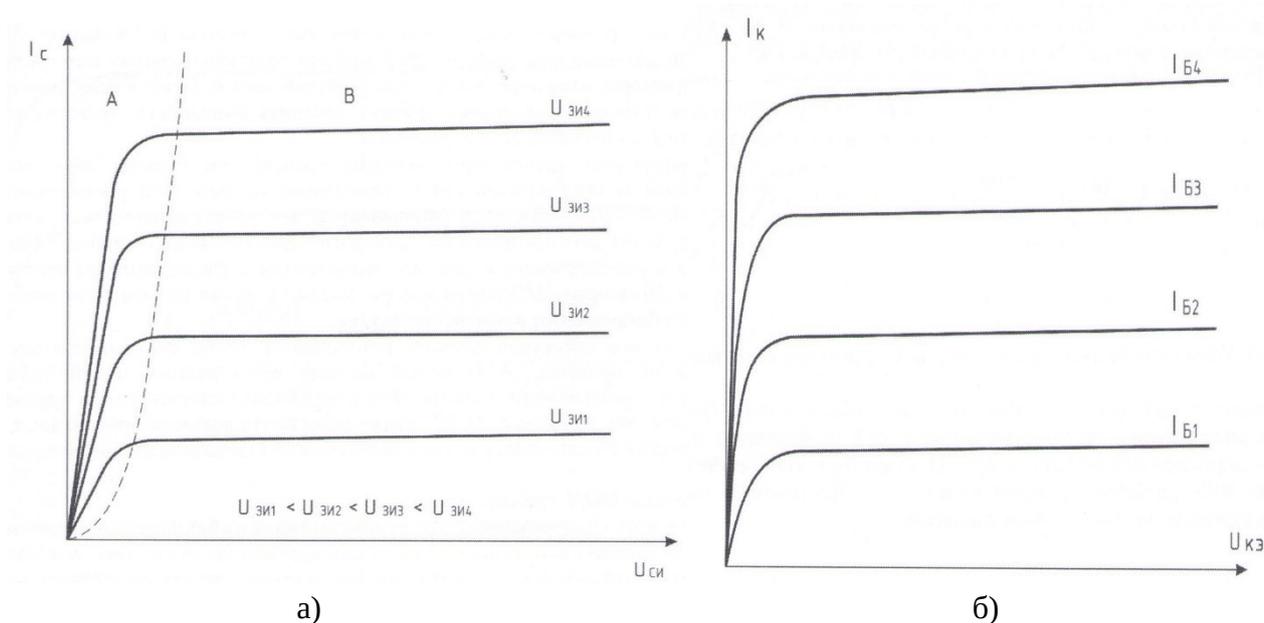


Рисунок 3.3 Стоковые характеристики *n*-канального МОП-транзистора **а)** и выходные характеристики биполярного *n-p-n*-транзистора **б)**.

Очевидно, что *n*-канальные МОП-транзисторы и биполярные *n-p-n*-транзисторы во многом похожи. Подобно *n-p-n*-транзистору, у полевого транзистора при напряжении $U_{СИ}$ свыше 1...2 В ток стока I_C почти не изменяется. Эту область стокowych характеристик называют областью насыщения. Это область **В** справа от пунктирной линии на рис. 3.3, а. Подобно биполярному транзистору, чем больше смещение затвора относительно истока, тем больше (в области насыщения) ток стока.

Область **А** стокowej характеристики (слева от пунктирной линии) называют линейной. В этой области ток стока I_C линейно зависит от напряжения $U_{СИ}$, т.е. полевой транзистор ведет себя как резистор с сопротивлением канала сток-исток $R_{СИ} = U_{СИ} / I_C$. Напряжение $U_{ЗИ}$ способно изменять величину сопротивления $R_{СИ}$. Это видно из того, что наклон стокowych характеристик в области **А** зависит от напряжения $U_{ЗИ}$. Таким образом, полевой транзистор можно использовать, как управляемый напряжением переменный резистор. Эта возможность используется в системах автоматической регулировки усиления и в управляемых напряжением аттенуаторах.

На рис. 3.4 приведена стокo-затворная характеристика *n*-канального МОП-транзистора. Она снимается при постоянном напряжении сток-исток $U_{СИ}$ в области насыщения и показывает зависимость тока стока от напряжения затвор-исток: $I_C = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = const$. Так как в области насыщения ток стока I_C практически не зависит от напряжения сток-исток $U_{СИ}$, то все стокo-затворные характеристики сливаются в одну линию. Напряжение затвор-исток

$U_{зи}$, при котором начинает течь ток стока I_c называется пороговым $U_{зи.пор}$. На практике зафиксировать величину порогового напряжения $U_{зи.пор}$ трудно, поэтому за пороговое напряжение принимают величину напряжения затвористок, при котором ток стока достигает заданного низкого значения.

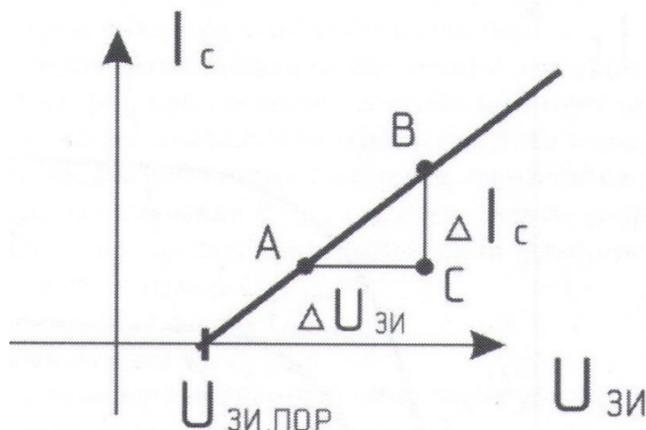


Рисунок 3.4 Стоково-затворная характеристика n-канального МОП-транзистора.

Характеристики полевых транзисторов p-n-переходом

У МОП-транзисторов затвор изолирован от проводящего канала тонким слоем окисла. В результате на затвор такого транзистора можно подавать напряжение любой полярности относительно истока. При этом через затвор не будет проходить никакой ток. Поэтому МОП-транзисторы просты в применении.

В полевых транзисторах p-n-переходом затвор образует с расположенным под ним каналом полупроводниковый p-n-переход. Следовательно, в полевом транзисторе с p-n-переходом во избежание прохождения тока через затвор последний не должен быть смещен в прямом направлении относительно канала. Затвор работает будучи смещенным в обратном направлении по отношению к каналу и в цепи затвора нет никакого тока, кроме тока утечки. Условное обозначение n-канального полевого транзистора с p-n-переходом изображено на рис. 3.5, а схема для снятия его характеристик - на рис. 3.6.

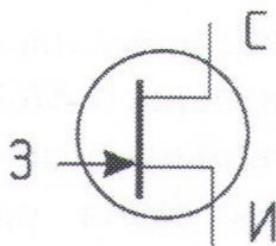


Рисунок 3.5 Условное обозначение n-канального транзистора с p-n-переходом.

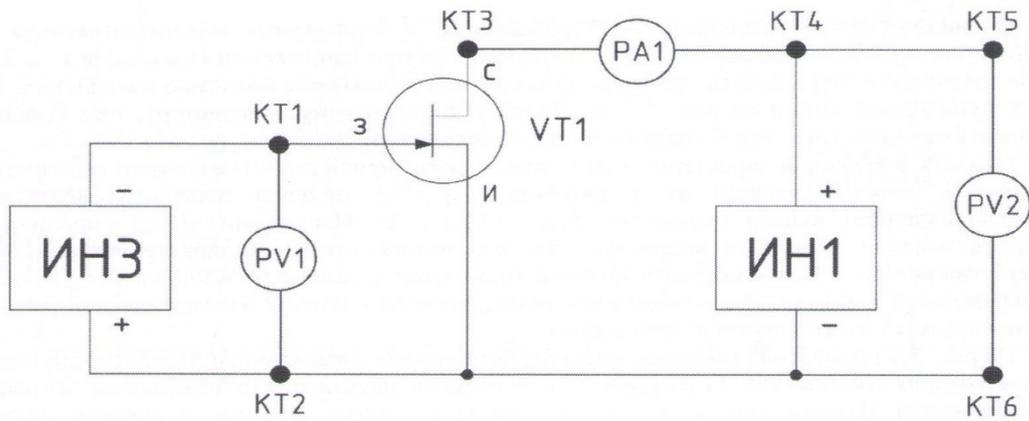


Рисунок 3.6 Схема для снятия характеристик n-канального полевого транзистора с p-n-переходом.

Стокные характеристики n-канального полевого транзистора с p-n-переходом (рис.3.7) также имеют две области: линейную - **A** и насыщения - **B**.

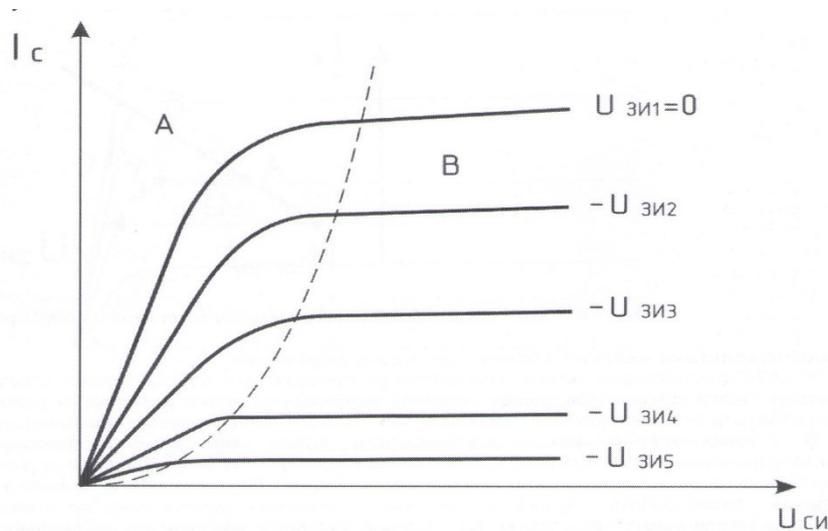


Рисунок 3.7 Стокные характеристики n-канального полевого транзистора с p-n-переходом; **A** – область переменного сопротивления, **B** – область насыщения.

График стокно-затворной характеристики n-канального полевого транзистора с p-n-переходом (рис.3.8) поможет уяснить его отличие от n-канального МОП-транзистора. МОП-транзистор не проводит ток, пока потенциал затвора не станет положительным по отношению к истоку ($U_{зи} > 0$). Наоборот, ток стока полевого транзистора с p-n-переходом будет равен максимальному при потенциале затвора равном потенциалу истока ($U_{зи} = 0$). Этот ток называется начальным током стока $I_{C \text{ нач}}$. Для получения нулевого тока стока затвор должен иметь обратное смещение, которое называется напряжением отсечки $U_{зи \text{ отс}}$. На практике зафиксировать величину напряжения отсечки $U_{зи \text{ отс}}$ очень трудно, поэтому за напряжение отсечки принимают

величину напряжения затвор-исток, при котором ток стока достигает заданного низкого значения.

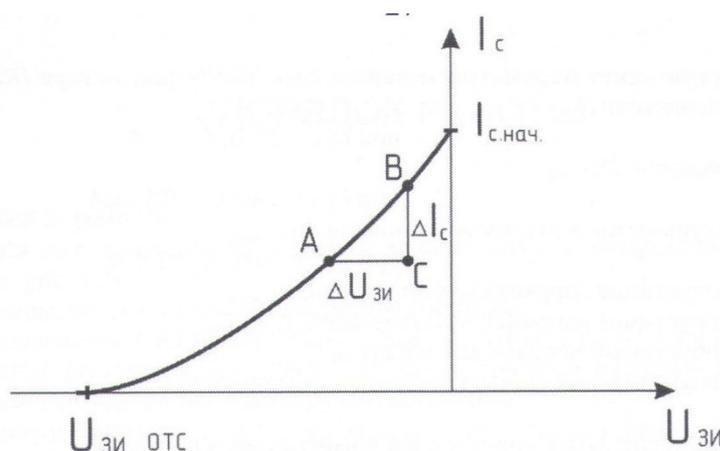


Рисунок 3.8 Стоко -затворная характеристика n-канального транзистора с p-n-переходом.

Параметры полевых транзисторов

Основными параметрами полевых транзисторов являются:

начальный ток стока $I_{C\text{ нач}}$, определяемый током стока транзистора с p-n-переходом при напряжении между затвором и истоком, равном нулю, и при напряжении на стоке, равном или превышающем напряжение насыщения $U_{СИ.нас}$;

напряжение отсечки $U_{зи\text{ отс}}$ определяемое напряжением между затвором и истоком транзистора с p-n-переходом, при котором ток стока достигает заданного низкого значения;

пороговое напряжение ($U_{зи.пор}$), определяемое напряжением между затвором и истоком транзистора с изолированным затвором (МОП-транзистора), при котором ток стока достигает заданного низкого значения;

крутизна характеристики S , определяемая отношением изменения тока стока к изменению напряжения на затворе при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора в схеме сообщим истоком;

сопротивление сток-исток в открытом состоянии $R_{СИ\text{ отк}}$ определяемое сопротивлением между стоком и истоком в открытом состоянии транзистора при заданном напряжении затвор-исток и токе стока;

максимально допустимое напряжение сток-исток $U_{СИ\text{ макс}}$;

максимально допустимое напряжение затвор-исток $U_{зи\text{ макс}}$;

максимально допустимый постоянный ток стока $I_{C\text{ макс}}$;

максимально допустимый прямой ток затвора полевого транзистора с p-n-переходом $I_{з\text{ макс}}$;

максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность $P_{\text{ макс}}$.

У всех типов полевых транзисторов током стока управляет напряжение затвор-исток $U_{зи}$. Таким образом, о способности полевых транзисторов усиливать нужно судить по величине отношения тока стока к напряжению затвор-исток. Эта величина называется крутизной S и находится как отношение приращения тока стока ΔI_C к приращению напряжения затвор-исток $\Delta U_{зи}$

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{зи} \quad (3.1)$$

Размерность крутизны выражается в мА / В или в Сименсах ($1 \text{ См} = 1 \text{ А} / \text{В}$). Обычно крутизну полевого транзистора рассчитывают для режима, соответствующего линейному участку стоко-затворной характеристики. Для этого строят треугольник ABC (рис. 3.4 и рис. 3.7), по которым находят приращения тока ΔI_C и напряжения $\Delta U_{зи}$, и по формуле (3.1) рассчитывают крутизну S .

Крутизна полевых транзисторов зависит от тока стока. В области насыщения она растет пропорционально $1/2$ корню квадратному из тока стока $S = (k I_C)^{1/2}$.

Здесь были рассмотрены «-канальные полевые транзисторы, P-канальные полевые транзисторы симметричны n-канальным в том же смысле, в каком являются таковыми n-p-n- и p-n-p-транзисторы. Обычно p-канальные полевые транзисторы имеют более плохие параметры, а именно более высокое пороговое напряжение, более высокое сопротивление сток-исток в открытом состоянии $R_{СИ \text{отк}}$. И меньший начальный ток стока и применяются реже.

Основные электрические параметры n-канального полевого транзистора с p-n-переходом КП303Д

Крутизна характеристики S , при $U_{СИ} = 10\text{В}$, $U_{зи} = 0 \text{ В}$	не менее 2.6 мА/В
Начальный ток стока $I_{C \text{нач}}$ при $U_{СИ} = 10\text{В}$, $U_{зи} = 0 \text{ В}$	3.0...9.0 мА
Напряжение отсечки $U_{зи \text{отс}}$ при $U_{СИ} = 10\text{В}$, $I_C = 0.01 \text{ мА}$	не более -8.0 В
Максимально допустимое напряжение сток-исток $U_{СИ \text{макс}}$	25 В
Максимально допустимое напряжение затвор-исток $U_{зи \text{макс}}$	-30 В
Максимально допустимый постоянный ток стока $I_{C \text{макс}}$	20

мА	
Максимально допустимый прямой ток затвора $I_{з\text{ макс}}$	5,0
мА	
Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность $P_{\text{ макс}}$	200
мВт	

Основные электрические параметры n-канального МОП-транзистора *IRFD024*

Крутизна характеристики S при $U_{СИ} = 25\text{В}$, $I_C = 1\text{А}$	не менее 960 мА/
В	
Пороговое напряжение $U_{зи\cdot\text{пор}}$ при $U_{СИ} = U_{зи}$, $I_C = 0.25\text{мА}$	2,0 ... 4,0
В	
Сопротивление СТОК-ИСТОК В ОТКРЫТОМ СОСТОЯНИИ $R_{СИ\text{ макс}}$ при $U_{зи} = 10\text{ В}$; $I_C = 1,0\text{ А}$	не более 0,20
Ом	
Максимально допустимое напряжение сток-исток $U_{СИ\text{ макс}}$	60
В	
Максимально допустимое напряжение затвор-исток $U_{зи\text{ макс}}$	$\pm 20\text{ В}$
Максимально допустимый постоянный ток стока $I_{С\text{ макс}}$	1,7
А	
Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность $P_{\text{ макс}}$	1,3
Вт	

Снятие характеристик МОП-транзистора в импульсном режиме

Характеристики полевых транзисторов средней и большой мощности обычно получают в импульсном режиме работы, так как при этом максимально допустимая рассеиваемая мощность превышает в течение времени, которого недостаточно, чтобы транзистор мог выйти из строя.

Схема измерения, приведенная на рис. 3.2, позволяет строить стоко-затворную и стоковые характеристики n-канального МОП-транзистора в импульсном режиме. Импульсы на затвор транзистора подаются с генератора прямоугольных импульсов **ГПИ**. Частота импульсов - 1 кГц, скважность - 10.

Первым каналом осциллографа **PS1.1** измеряют амплитуду импульсов напряжения затвор-исток $U_{зи}$.

Для определения величины тока стока транзистора I_C второй канал

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Подготовка к работе

1.1 Зарисуйте схемы для исследования полевого транзистора с р-п-переходом (см. рис. 3.6) и **МОП**- транзистора (см. рис. 3.2).

1.2 Вычертите таблицы для снятия характеристик транзисторов.

1.3 Установите выключатель **СЕТЬ**, выключатели всех источников сигналов и измерительных приборов в положение **ВЫКЛ**, регуляторы потенциометров всех источников в крайнее левое положение.

1.4 Подключите сменный модуль №3 к разъему базового блока.

Подсоедините шнур питания к разъему на задней стенке стенда и включите вилку шнура питания в розетку электросети напряжением 220В.

Внимание!

Если показания на дисплее измерительного прибора не изменяются при изменении измеряемой величины, то выключите и снова включите его тумблером ВКЛ / ВЫКЛ.

Если при включении амперметра на его дисплее отображается символ АС (режим измерения переменного напряжения), то выключите и снова включите амперметр тумблером ВКЛ / ВЫКЛ для измерения постоянного по роду тока (при этом на его дисплее должен отобразиться символ DC).

2. Снятие стоко-затворных характеристик полевого транзистора с р-п-переходом

2.1 Соберите схему, показанную на рис. 3.6.

2.2 Для снятия характеристик полевого транзистора с р-п-переходом подключите встроенные в стенд приборы:

РА1 - миллиамперметр для измерения тока стока I_c ;

PV1 - вольтметр для измерения напряжения затвор-исток $U_{зи}$;

PV2 - вольтметр для измерения напряжения сток-исток $U_{си}$;

2.3 После проверки правильности подключения приборов преподавателем включите питание стенда выключателем **СЕТЬ**.

2.4 Включите источники напряжения **ИН1** и **ИН3** и подключенные к схеме измерительные приборы.

2.5 Регуляторами **ГРУБО** и **ТОЧНО** источника напряжения **ИН1** установите напряжение сток-исток $U_{СИ}$ и, равное 5 В.

2.6 Регуляторами **ГРУБО** и **ТОЧНО** источника напряжения **ИН3** установите напряжение затвор-исток $U_{ЗИ} = 0$, определите при этом величину начального тока $I_{С\ нач}$ транзистора и занесите ее значение в табл. 3.1.

2.7 Изменяйте напряжение затвор-исток согласно табл. 3.1 и записывайте в эту таблицу соответствующие значения тока стока I_C .

2.8 Аналогично снимите стоко-затворную характеристику транзистора при напряжении $U_{СИ} = 10$ В.

Таблица 3.1

Напряжение затвор-исток $U_{ЗИ}, В$		0	-0,5	-1,0	-1,5	-2,0	-3,0	-4,0
Ток стока I_C , мА при напряжении $U_{СИ}, В$	5	$I_{С.нач} =$						
	10	$I_{С.нач} =$						

3. Снятие стоковых характеристик полевого транзистора с р-п переходом

3.1 Установите напряжение $U_{ЗИ} = 0$.

3.2 Изменяйте напряжение сток-исток $U_{СИ}$ согласно табл. 3.2 и записывайте в эту таблицу соответствующие им значения тока стока.

3.3 Аналогично снимите стоковые характеристики при напряжениях затвор-исток -0,5 В; -1,0 В и -1,5 В.

Таблица 3.2

Напряжение сток-исток $U_{СИ}, В$		0,2	0,5	1	2	5	10	15
	0							
	-0,5							
	-1,0							
	-1,5							

4. Измерение напряжения отсечки полевого транзистора с р-п переходом

4.1 Установите напряжение $U_{СИ} = 10$ В.

4.2 Изменяя напряжение затвор-исток $U_{ЗИ}$, установите ток стока $I_C = 0,01$ мА (ЮмкА). Запишите соответствующее этому значению тока стока значение

напряжения отсечки $U_{зи\ отс}$ в табл. 3.3.

4.3 Выключите источники напряжения **ИН1** и **ИН3** и подключенные к схеме измерительные приборы.

5. Обработка результатов экспериментов с полевым транзистором с р-п-переходом

5.1 Занесите из табл. 3.1 в табл. 3.3 значение начального тока стока, найденное при напряжении $U_{си} = 10\text{В}$.

5.2 Используя данные табл. 3.1 и табл. 3.2 постройте графики семейств стоко-затворных и стоковых характеристик транзистора. Они имеют вид, представленный на рис. 3.7 и рис 3.8.

5.3 Выполните на стоко-затворной характеристике необходимые построения для определения крутизны характеристики при изменении напряжения $U_{зи}$ от 0 В до -0,5 В (см. рис. 3.8). Рассчитайте значение крутизны, используя выражение (3.1) и занесите результат в табл. 3.3.

5.4 Сравните параметры транзистора, полученные экспериментальным путем, со справочными значениями.

Таблица 3.3

Параметр	Экспериментальное значение	Справочное значение
Начальный ток стока $I_{с.нач.}$, мА при $U_{си} = 10\text{ В}$, $U_{зи} = 0\text{ В}$		3,0....9,0
Напряжение отсечки $U_{зи.отс}$, В при $U_{си} = 10\text{ В}$, $I_c = 0,01\text{ мА} = 10\text{ мкА}$		не более -8,0
Крутизна характеристики S , мА/В при $U_{си} = 10\text{ В}$, $U_{зи} = 0\text{ В}$		не менее 2,6

6. Измерение порогового напряжения МОП-транзистора

6.1 Для исследования МОП-транзистора соберите схему, показанную на рис. 3.2.

Для измерения напряжения питания $U_{п}$ подключите вольтметр, встроенный в стенд.

Подключите первый канал осциллографа **PS1.1** к напряжению затвористок $U_{зи}$ транзистора. При этом общий вывод входного кабеля осциллографа подключите к истоку.

Сигнальный вывод входного кабеля второго канала осциллографа **PS1.2** подключите к контакту **КТ 10** сменного модуля, а его общий вывод - к контакту **КТ9**. В этом случае на второй канал осциллографа подается падение

напряжения на шунте $U_{ш}$, пропорциональное току стока I_C .

Если осциллограф имеет функцию инвертирования сигнала второго канала, то включите ее. В этом случае на осциллограмме импульсы напряжения на шунте будут иметь положительную полярность.

6.2 После проверки правильности подключения приборов преподавателем включите источники **ГПИ**, **ИН2** и подключенные к схеме измерительные приборы.

6.3 Регуляторами **ГРУБО** и **ТОЧНО** источника напряжения **ИН2** установите напряжение питания $U_{п} = 10$ В (здесь $U_{си} \approx U_{п}$).

6.4 Изменяя амплитуду импульсов напряжения затвор-исток $U_{зи}$ регуляторами **ГРУБО** и **ТОЧНО** генератора прямоугольных импульсов **ГПИ** установите амплитуду импульсов напряжения на шунте $R_{ш}$ равной 25 мВ. В этом случае ток стока равен $I_C = U_{ш} / R_{ш} = 25/100 = 0,25$ мА.

6.5 Определите амплитуду импульсов напряжения $U_{зи}$ пор и занесите значение порогового напряжения в табл.3.9.

7. Снятие стоко-затворной характеристики МОП-транзистора

7.1 Для снятия стоко-затворной характеристики измерительные приборы должны быть подключены так, как указано в п.п. 6.1.

7.2 Регуляторами источника напряжения **ИН2** установите напряжение питания $U_{п} = 10,5$ В.

7.3 Изменяя амплитуду импульсов напряжения $U_{зи}$ регуляторами **ГПИ** установите амплитуду импульсов напряжения на шунте $U_{ш} = 500$ мВ.

7.4 Измеряйте амплитуду импульсов напряжения $U_{зи}$. Занесите результаты в табл. 3.4.

7.5 Действуя аналогично, устанавливайте значения $U_{ш}$ и $U_{п}$ указанные в табл. 3.4 и снимите остальные точки стоко-затворной характеристики.

Таблица 3.4

Напряжение сток-исток $U_{си} = U_{п} - U_{ш} = 10$ В				
Напряжения питания $U_{п}$, В	10,5	11,0	13,0	15,0
Напряжение на шунте $U_{ш}$, В	0,5	1,0	3,0	5,0
Напряжение затвор-исток $U_{зи}$, В				
Ток истока $I_{ш} = U_{ш} / R_{ш} = U_{ш} (В) / 0,1 (кОм), мА$	$I_{C1} = 5$	$I_{C2} = 10$	$I_{C3} = 30$	$I_{C4} = 50$

8. Снятие стоковых характеристик МОП-транзистора

8.1 Для снятия стоковых характеристик измерительные приборы должны быть

подключены так, как указано в п.п. 6.1.

8.2 Регуляторами источника напряжения **ИН2** установите напряжение питания $U_{\Pi} = 15\text{В}$.

8.3 Установите регуляторами **ГПИ** значение напряжения на шунте $U_{\text{Ш}} = 0,5\text{В}$.

8.4 Определите напряжения $U_{\text{ЗИ}1}$ и занесите его значение в табл. 3.5.

8.5 Изменяйте напряжение питания U_{Π} согласно табл. 3.5 и записывайте в эту таблицу соответствующие им значения амплитуды импульсов напряжения на шунте $U_{\text{Ш}}$. Занесите результаты в табл. 3.5.

8.6 Действуя аналогично (как указано в п.п. 8.2 ... 8.5), снимите стоковые характеристики для напряжений на шунте $U_{\text{Ш}} = 1,0\text{В}; 3,0\text{В}; 5,0\text{В}$ (при напряжении питания $U_{\Pi} = 15\text{В}$). Результаты заносите соответственно в табл. 3.6, табл. 3.7, и табл. 3.8.

8.7 Выключите источники **ГПИ**, **ИН2** и подключенные к схеме измерительные приборы.

8.8 Рассчитайте значения напряжения сток-исток $U_{\text{СИ}} = U_{\Pi} - U_{\text{Ш}}$ и тока стока $I_{\text{С}} = U_{\text{Ш}} / R_{\text{Ш}}$, где $U_{\text{Ш}}$ - в Вольтах; $R_{\text{Ш}}$ - в килоомах; $I_{\text{С}}$ - в миллиамперах. Занесите результаты в табл. 3.5, табл. 3.6, табл. 3.7, и табл. 3.8.

Таблица 3.5

Напряжение затвор-исток $U_{\text{ЗИ}1} =$						
Напряжение питания U_{Π} , В	0,5	1,0	2,0	5,0	10	15
Напряжение на шунте $U_{\text{Ш}}$, В						0,5
Напряжение сток-исток $U_{\text{СИ}} = U_{\Pi} - U_{\text{Ш}}$, В						
Ток стока $I_{\text{С}} = U_{\text{Ш}} / R_{\text{Ш}} = U_{\text{Ш}} (\text{В}) / 0,1 (\text{кОм})$, мА						

Таблица 3.6

Напряжение затвор-исток $U_{\text{ЗИ}2} =$						
Напряжение питания U_{Π} , В	0,5	1,0	2,0	5,0	10	15
Напряжение на шунте $U_{\text{Ш}}$, В						1,0
Напряжение сток-исток $U_{\text{СИ}} = U_{\Pi} - U_{\text{Ш}}$, В						
Ток стока $I_{\text{С}} = U_{\text{Ш}} / R_{\text{Ш}} = U_{\text{Ш}} (\text{В}) / 0,1 (\text{кОм})$, мА						

Таблица 3.7

Напряжение затвор-исток $U_{\text{ЗИ}3} =$						
Напряжение питания U_{Π} , В	0,5	1,0	2,0	5,0	10	15
Напряжение на шунте $U_{\text{Ш}}$, В						3,0
Напряжение сток-исток $U_{\text{СИ}} = U_{\Pi} - U_{\text{Ш}}$, В						
Ток стока $I_{\text{С}} = U_{\text{Ш}} / R_{\text{Ш}} = U_{\text{Ш}} (\text{В}) / 0,1 (\text{кОм})$, мА						

Таблица 3.8

Напряжение затвор-исток $U_{\text{ЗИ}4} =$						
Напряжение питания U_{Π} , В	0,5	1,0	2,0	5,0	10	15
Напряжение на шунте $U_{\text{Ш}}$, В						5,0
Напряжение сток-исток $U_{\text{СИ}} = U_{\Pi} - U_{\text{Ш}}$, В						
Ток стока $I_{\text{С}} = U_{\text{Ш}} / R_{\text{Ш}} = U_{\text{Ш}} (\text{В}) / 0,1 (\text{кОм})$, мА						

9. Обработка результатов экспериментов с МОП-транзистором

9.1 Используя данные табл. 3.4 и табл. 3.5 ... 3.8 постройте графики стоко-затворной характеристики и семейства стоковых характеристик транзистора. Они имеют вид, представленный на рис. 3.4 и рис 3.3, а.

9.2 Проведите касательную к графику стоко-затворной характеристики в точке $I_C = 50$ мА (см. рис. 3.4). Рассчитайте значение крутизны, используя полученный треугольник и выражение (3.1). Занесите результат в табл. 3.9.

9.3 Сравните параметры транзистора, полученные экспериментальным путем, со справочными значениями.

Таблица 3.9		
Параметр	Экспериментальное значение	Справочное значение
Пороговое напряжение $U_{зи. пор}$, В при $I_C = 0,25$ мА		2,0 ... 4,0
Крутизна характеристики S , мА/В	при $U_{си} = 10$ В, $I_C = 50$ мА	не менее 960 при $U_{си} = 25$ В, $I_C = 1$ А

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие транзисторы называют полевыми?
2. Чем объясняется высокое входное сопротивление полевых транзисторов?
3. Чем отличается полевой транзистор от биполярного?
4. Каковы основные параметры полевых транзисторов?
5. Где применяют полевые транзисторы?

РАБОТА № 4. «ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРА»

Цель работы - снятие и анализ анодной характеристики тиристора; определение электрических параметров тиристора.

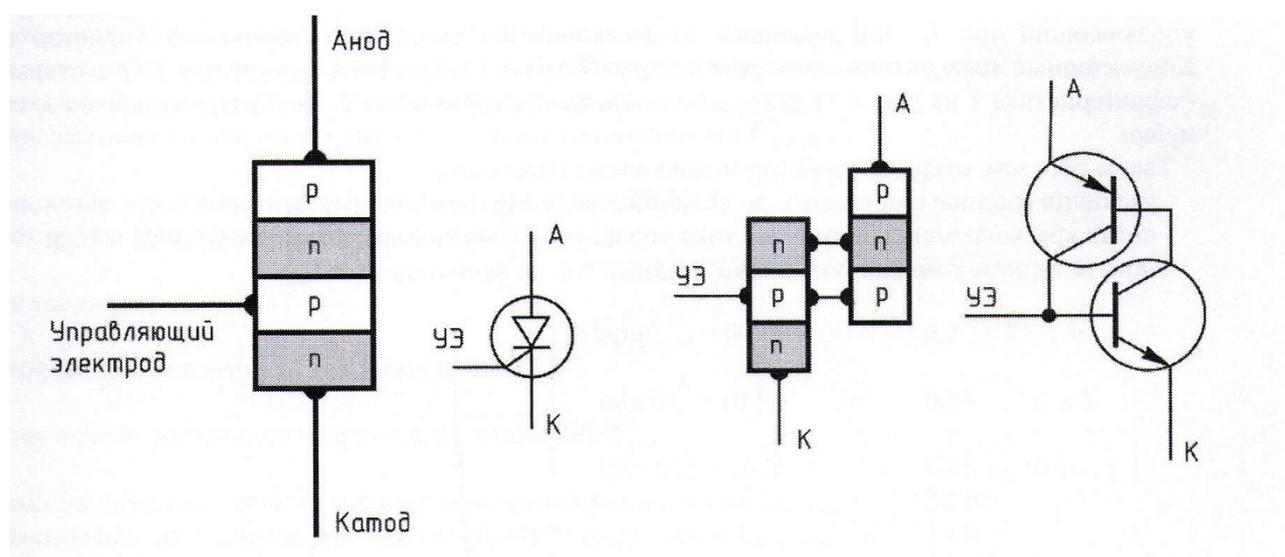
ПОЯСНЕНИЯ

Конструкция

Тиристоры - это полупроводниковые приборы, обладающие двумя устойчивыми состояниями: открытым и закрытым. В открытом состоянии тиристоры хорошо проводят электрический ток, а в закрытом они представляют собой большое сопротивление, соизмеримое с сопротивлением кремниевого диода при обратном напряжении. Основное назначение тиристоров - безобрывная коммутация электрических цепей.

Тиристор, как показано на рис 4.1, а, является четырехслойным устройством ($p-n-p-n$). Однако его условное обозначение (рис 4.1, б) выглядит просто как выпрямительный диод с дополнительным управляющим электродом. Напряжение между основными выводами тиристора (анодом и катодом) и ток, протекающий через них, называются основными. Напряжение между управляющим электродом и катодом и ток, протекающий через них, называются управляющими.

Объяснить принцип действия тиристора можно, представив четыре его слоя в виде двух взаимно связанных транзисторов, как показано на рис. 4.1, в, г.



а) б) в) г)

Рисунок 4.1 Тиристор : а) структура, б) условное обозначение, в) транзисторный эквивалент, г) эквивалентная схема с транзисторами.

Принцип действия

На схеме, приведенной на рис. 4.2, указаны ток нагрузки I_A , управляющий ток I_y , коллекторный ток I_{K1} транзистора $VT1$ и коллекторный ток I_{K2} транзистора $VT2$. Положительное относительно катода основное напряжение U_A подается на анод, а управляющее напряжение U_y - на управляющий электрод. При управляющем напряжении $U_y = 0$ ток I_y также равен нулю. Если при этом напряжение на его аноде меньше напряжения переключения $U_{ПРК}$ (рис. 4.3), то тиристор закрыт (оба транзистора $VT1$ и $VT2$ закрыты). Это состояние устойчиво и может длиться неограниченно долго. На рис. 4.3 это характеристика 2 закрытого состояния тиристора.

Дальнейшее увеличение напряжения U_A уменьшает сопротивление смещенных в обратном направлении переходов база-коллектор транзисторов $VT1$ и $VT2$. При напряжении $U_A = U_{ПРК}$ транзисторы открываются, и тиристор переключается в проводящее состояние. Ток анода открытого тиристора $I_{Oс}$ определяется сопротивлением нагрузки (см рис. 4.2). На рис. 4.3 это характеристика 1 открытого состояния тиристора. Тиристор может находиться в открытом состоянии неограниченно долго: пока существуют условия для протекания в его основной цепи анодного тока большего, чем ток удержания $I_{уд}$.

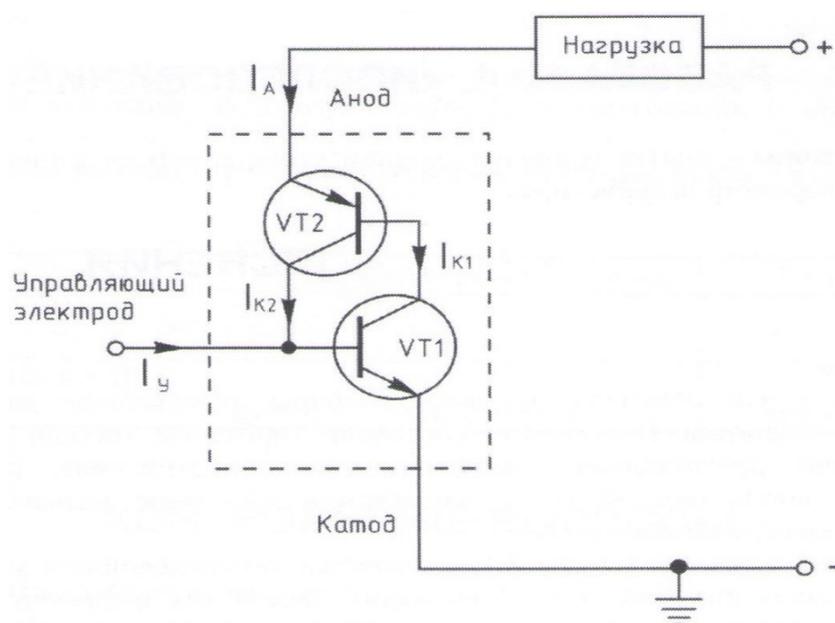


Рисунок 4.2 Схема , объясняющая работу тиристора с точки зрения транзисторного эквивалента.

Если на управляющий электрод закрытого тиристора подать напряжение

управления $U_y > 0$, то в цепи базы транзистора $VT1$ потечет управляющий ток I_y , который откроет этот транзистор. В свою очередь, появившийся ток коллектора I_{K1} транзистора $VT1$ откроет транзистор $VT2$ и тиристор откроется. Чем больше управляющий ток I_y , тем меньшим напряжением на аноде U_A открывается тиристор (см. рис. 4.3). Коллекторный ток I_{K2} открытого транзистора $VT2$ будет удерживать транзистор $VT1$ в открытом состоянии (характеристика 1 на рис. 4.3) даже, если напряжение управления U_y и управляющий ток I_y станут равными нулю.

Таким образом, открыть тиристор можно двумя способами:

- увеличив анодное напряжение до величины $U_A = U_{ПРК}$ при токе управления $I_y = 0$;
- подав кратковременный импульс тока управления I_y при анодном напряжении $U_A < U_{ПРК}$.

Закреть тиристор можно, уменьшив анодный ток до величины $I_A < I_{уд}$.

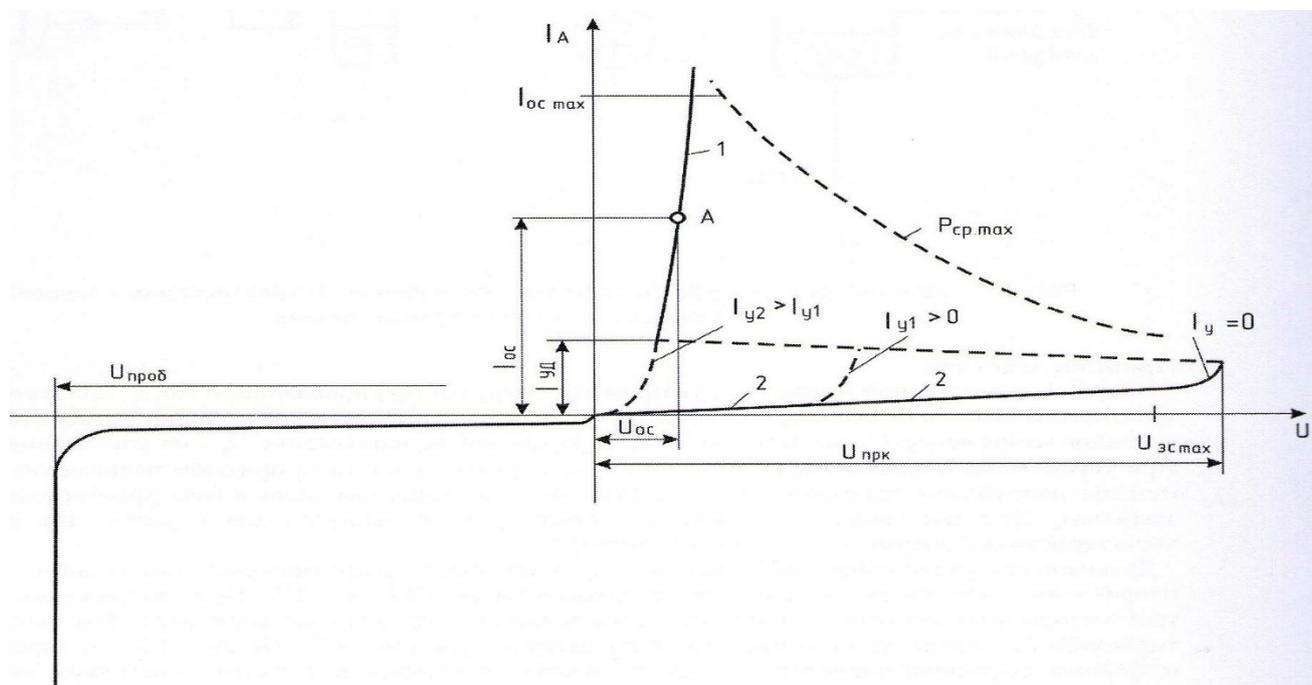


Рисунок 4.3 Анодная характеристика тиристора, не проводящего в обратном направлении: 1-характеристика открытого состояния; 2-характеристики закрытого состояния.

Внутренняя обратная связь делает тиристор чрезвычайно эффективным и быстрым переключающим устройством (типичное время включения 1 мкс). Им можно воспользоваться для управления очень большими мощностями, поскольку $p-n$ переходы можно сделать такими, чтобы они выдерживали многие сотни Вольт при смещении в обратном направлении. При соответствующих размерах $p-n$ переходов с помощью тиристора можно переключать токи величиной сотни Ампер и при этом на нем падает напряжение всего лишь

порядка Вольта или около этого. Такого сочетания высокого напряжения пробоя с большим эффективным коэффициентом усиления тока нельзя достичь в мощном транзисторе: большой коэффициент усиления тока требует, чтобы область базы была тонкой, а это приводит к низкому напряжению пробоя.

Параметры тиристоров

Основными параметрами тиристоров являются:

постоянное напряжение в открытом состоянии U_{OC} - основное напряжение на открытом тиристоре при определенном среднем основном токе в открытом состоянии $I_{OC.CP}$;

ток удержания $I_{уд}$ - наименьший основной ток, необходимый для поддержания тиристора в открытом состоянии, при определенном отпирающем постоянном токе управления $I_{y OT}$;

отпирающий постоянный ток управления $I_{y OT}$ - наименьший постоянный ток управления, необходимый для включения тиристора, при определенном постоянном основном напряжении в закрытом состоянии U_{3C} ;

отпирающее постоянное напряжение управления $U_{y OT}$ - постоянное напряжение управления, соответствующее отпирающему постоянному току управления $I_{y OT}$ при определенном постоянном основном напряжении в закрытом состоянии тиристора U_{3C} ;

максимальное постоянное напряжение в закрытом состоянии $U_{3C MAXC}$ - максимальное прямое основное напряжение, при котором прибор остается закрытым при токе $I_y = 0$;

максимально допустимое постоянное обратное напряжение $U_{OBR.MAXC}$;
максимально допустимый постоянный или средний ток в открытом состоянии $I_{OC.MAXC}$;

максимально допустимый постоянный ток управления $I_{y MAXC}$;

максимально допустимая средняя рассеиваемая мощность $P_{CP.MAXC}$;

Основные электрические параметры тиристора КУ101Б

Постоянное напряжение в открытом состоянии U_{OC}	при $I_{OC.CP} = 75 \text{ мА}$	2,5 В
Ток удержания $I_{уд}$	при $I_{y OT} = 0$	0,5 ... 25 мА
Отпирающий постоянный ток управления $I_{y OT}$	при $U_{3C} = 10 \text{ В}$	0,05 ... 7,5 мА
Отпирающее постоянное напряжение управления $U_{y OT}$	при $U_{3C} = 10 \text{ В}$	0,25 ... 10 В

Максимальное постоянное напряжение в закрытом состоянии $U_{ЗС\ МАКС}$	50 В
Максимально допустимое постоянное обратное напряжение $U_{ОБР.МАКС}$	50 В
Максимально допустимый постоянный или средний ток в открытом состоянии $I_{ОС.МАКС}$	75 мА
Максимально допустимый постоянный ток управления $I_{У.МАКС}$	15 мА
Максимально допустимая средняя рассеиваемая мощность $P_{СР.МАКС}$	150 мА

Модуль «Тиристор»

Схема модуля «Тиристор» приведена на рис. 4.4. Элементы схемы на сменном модуле №4 имеют следующие параметры:

$VS1$ - тиристор $KU101Б$;

резистор $R_H = 510\ \text{Ом}$.

$HG1$ - светодиод $L-934LSRD$

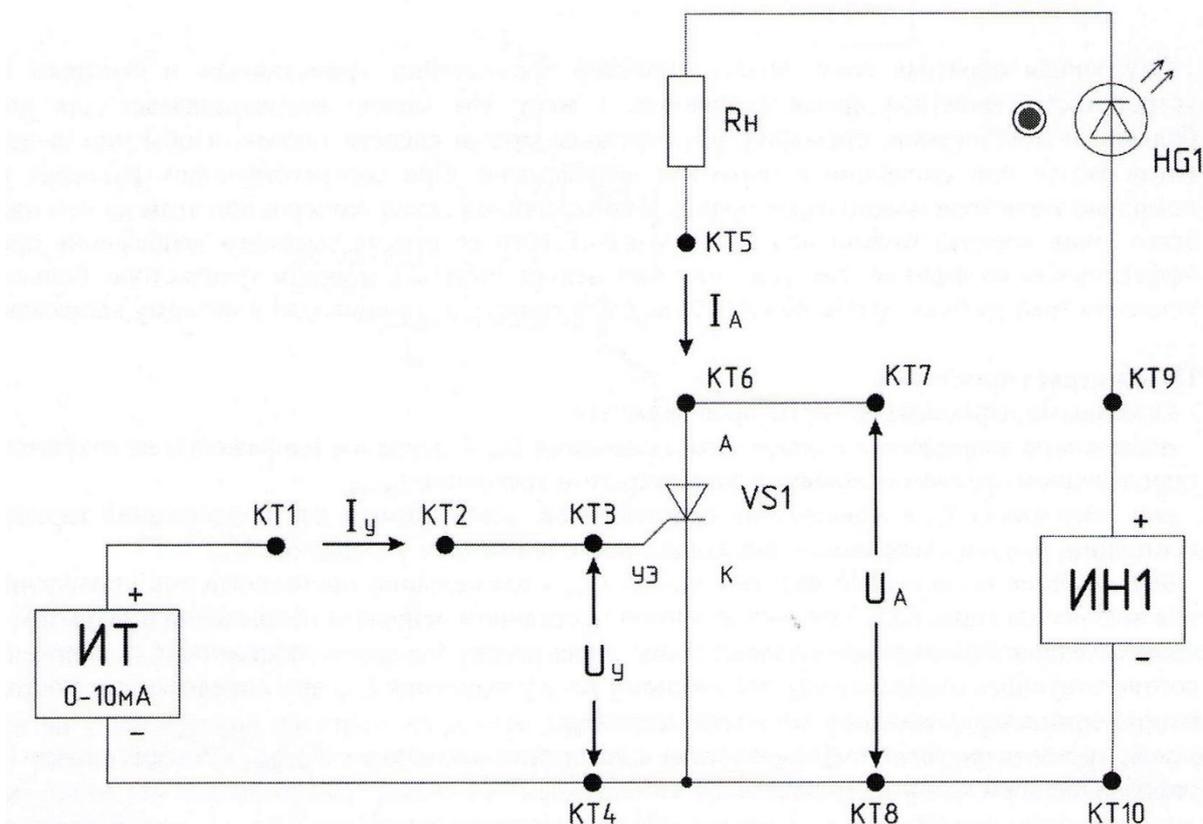


Рисунок 4.4 Схема модуля «Тиристор»

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Подготовка к работе

- 1.1 Зарисуйте схему для получения анодной характеристики тиристора (см. рис. 4.5).
- 1.2 Вычертите табл. 4.1 ...4.3 для записи результатов исследований тиристора.
- 1.3 Установите выключатель **СЕТЬ**, выключатели всех источников сигналов и измерительных приборов в положение **ВЫКЛ**, регуляторы потенциометров всех источников в крайнее левое положение, переключатель диапазонов источника тока *ИТ* - в положение 0 - 10 мА.
- 1.4 Подключите сменный модуль №4 к разъему базового блока.
- 1.5 Подсоедините шнур питания к разъему на задней стенке стенда и включите вилку шнура питания в розетку электросети напряжением 220В.

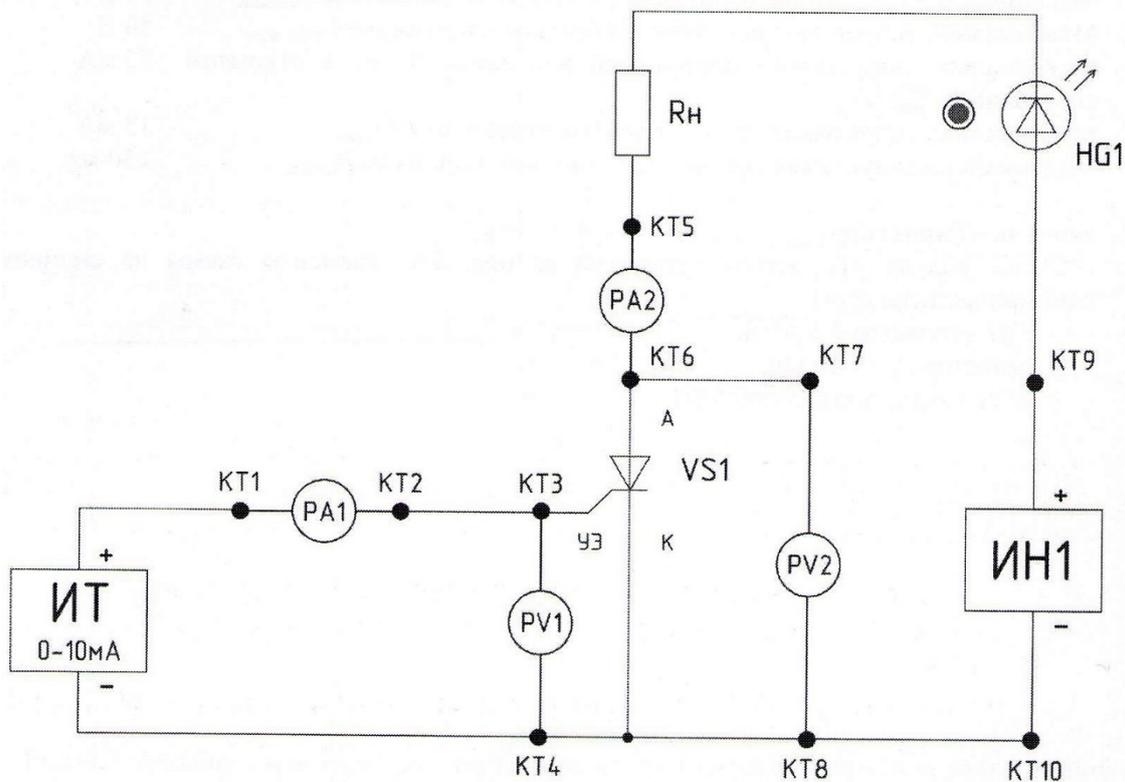


Рисунок 4.5 Схема модуля «Тиристор» с подключенными измерительными приборами.

Внимание!

Если показания на дисплее измерительного прибора не изменяются при

изменении измеряемой величины, то выключите и снова включите его тумблером ВКЛ / ВЫКЛ.

Если при включении амперметра на его дисплее отображается символ AC (режим измерения переменного напряжения), то выключите и снова включите амперметр тумблером ВКЛ / ВЫКЛ для измерения постоянного по роду тока (при этом на его дисплее должен отобразиться символ DC).

2. Определение электрических параметров тиристора

2.1 Для исследования тиристора подключите встроенные в стенд приборы:

РА1 - микроамперметр для измерения тока управления I_y ;

РА2 - миллиамперметр для измерения тока анода I_A ;

PV1 - вольтметр для измерения напряжения управления U_y ;

PV2 - вольтметр для измерения анодного напряжения U_A ;

2.2 После проверки преподавателем правильности подключения приборов включите питание стенда выключателем СЕТЬ.

2.3 Включите источник тока ИТ, источник напряжения ИН1 и подключенные к схеме измерительные приборы.

2.4 Регуляторами ГРУБО и ТОЧНО источника напряжения ИН1 установите значение анодного напряжения U_A равным 10 В.

2.5 Регуляторами ГРУБО и ТОЧНО источника тока ИТ увеличивайте значения тока управления I_y до отпирания тиристора (в момент отпирания напряжение на аноде тиристора U_A резко уменьшается, анодный ток I_A увеличивается и светодиод НГ1 начинает светиться).

2.6 Занесите в табл. 4.1 значения отпирающего постоянного тока управления $I_{y.от}$ и отпирающего постоянного напряжения управления $U_{y.от}$.

2.7 Установите ток управления $I_y = 0$. Убедитесь, что тиристор остался в открытом состоянии.

2.8 Плавно уменьшайте анодный ток I_A , регулируя величину напряжения источника питания ИН1, пока тиристор не перейдет в закрытое состояние.

2.9 Занесите величину анодного тока, при котором тиристор закрылся $I_A = I_{уд}$ в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Параметр	Экспериментальное значение	Справочное значение
Отпирающий постоянный ток управления $I_{y.от}$ при $U_{зс} = 10В$		0,05...7,5 мА
Отпирающее постоянное напряжение управления $U_{y.от}$ при $U_{зс} = 10В$		0,25...10 В
Ток удержания $I_{уд}$ при $I_y = 0$		0,5...25 мА

Постоянное напряжение в открытом состоянии U_{oc}		не более 2,5 В
--	--	----------------

3. Снятие характеристики закрытого состояния тиристора при

$$I_y = 0,9 I_{y\text{от}}$$

3.1 Установите минимальное значение анодного напряжения регуляторами источника *ИН1*.

3.2 Установите значение тока управления $I_y = 0,9 I_{y\text{от}}$.

3.3 Регулируя величину напряжения источника питания *ИН1* устанавливайте значения анодного напряжения U_A согласно табл. 4.2. Для каждого значения анодного напряжения U_A снимайте соответствующие значения анодного тока $I_A = I_{зс}$ и заносите их в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Ток управления $I_y = 0,9 I_{y\text{от}}$				
Анодное напряжение $U_A = U_{зс}$, В	1	5	10	15
Анодный ток $I_A = I_{зс}$, мА				

4. Снятие характеристики открытого состояния тиристора

4.1 Если тиристор находится в закрытом состоянии, то переведите его в открытое состояние, выполнив п.п. 2.4 и 2.5.

4.2 Установите максимальное значение напряжения источника питания *ИН1*. При этом анодный ток I_A будет иметь максимальное для данной схемы включения значение $I_{A3} = I_{A.\text{макс}}$.

4.3 Установите значение тока управления $I_y = 0$ мА. Убедитесь, что тиристор остался в открытом состоянии. Занесите значения анодного тока / $I_{A3} = I_{A.\text{макс}}$ и соответствующего ему анодного напряжения $U_A = U_{oc}$ в табл. 4.3. Значение анодного напряжения U_{oc} занесите также в табл. 4.1.

4.4 Рассчитайте значения анодного тока $I_{A2} = 0,5 (I_{A.\text{макс}} + I_{уд})$ и $I_{A1} = (I_{уд} + 1\text{мА})$. Занесите их в табл. 4.3.

4.5 Устанавливайте значения анодного тока I_{A2} и I_{A1} и снимайте соответствующие значения анодного напряжения $U_A = U_{oc}$. Полученные результаты заносите в табл. 4.3.

4.6 Выключите источник тока *ИТ*, источник напряжения *ИН1* и подключенные к схеме измерительные приборы.

Таблица 4.3

Ток управления $I_y = 0$			
Анодный ток $I_A = I_{oc}$, мА	$I_{A1} =$	$I_{A2} =$	$I_{A3} = I_{A\text{макс}} =$

Анодное напряжение $U_A = U_{oc}$, В			
--	--	--	--

5. Обработка результатов эксперимента

5.1 Используя данные табл. 4.1 сравните экспериментально полученные значения электрических параметров тиристора со справочными значениями.

5.2 Используя данные табл. 4.2 и 4.3 постройте график анодной характеристики тиристора. Она имеет вид, представленный на рис. 4.3.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение тиристором?
2. Какие условия необходимы для отпирания тиристора?
3. Какие условия необходимы для запираания тиристора?
4. Какими параметрами характеризуются тиристоры?
5. В каком случае тиристор будет вести себя, как полупроводниковый диод?

РАБОТА № 5. «ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА ТРАНЗИСТОРЕ»

Цель работы - расчет и экспериментальная проверка режима работы в рабочей точке каскада с ООС; снятие амплитудно-частотной и амплитудной характеристик каскада с ООС по переменному току и каскада с шунтирующим конденсатором; сравнение нелинейных искажений и параметров этих каскадов.

ПОЯСНЕНИЯ

Режим каскада с ОЭ по постоянному току

Состояние усилителя при равном нулю входном сигнале называется рабочей точкой каскада или режимом покоя. Рабочая точка каскада с ОЭ определяется четырьмя параметрами: токами I_B и I_K и напряжениями на базе U_B и коллекторе U_K .

Рабочая точка в схеме рис. 5.1 задается фиксированным напряжением базы U_B относительно общей точки с помощью базового делителя R_1 , R_2 . Ток делителя напряжения устанавливают на порядок выше тока базы ($I_D \geq$

$10 I_B$), поэтому изменения тока базы слабо влияют на потенциал базы. Напряжение базы определяется по формуле

$$U_B = U_{\Pi} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \quad (5.1)$$

где - U_{Π} - напряжение питания схемы.

Так как переход база-эмиттер смещен в прямом направлении, то на нем падает приблизительно 0,6 В. Поэтому потенциал эмиттера ниже потенциала базы на 0,6 В.

$$U_{\text{Э}} = U_B - 0,6. \quad (5.2)$$

Отсюда можно найти величину тока эмиттера

$$I_{\text{Э}} = U_{\text{Э}} / R_{\text{Э}}. \quad (5.3)$$

Поскольку $I_{\text{Э}} = I_K + I_B$, а $I_B \ll I_K$, то можно считать, что

$$I_K \approx I_{\text{Э}} \quad (5.4)$$

Напряжение на коллекторе транзистора

$$U_K = U_{\Pi} - I_K R_K. \quad (5.5)$$

Интересно отметить, что в приведенном расчете отсутствует нестабильный коэффициент усиления по току $h_{21Э}$ транзистора. Фактически единственным параметром транзистора, влияющим на режим работы схемы, является напряжение $U_{БЭ}$, которое принято равным 0,6 В и изменяется очень мало (меньше 0,1 В) от одного транзистора к другому. Падение напряжения на эмиттерном резисторе $R_Э$ должно быть больше возможных изменений напряжения $U_{БЭ}$. Обычно подходящим является напряжение 1 В. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что положение рабочей точки в данной схеме имеет высокую стабильность.

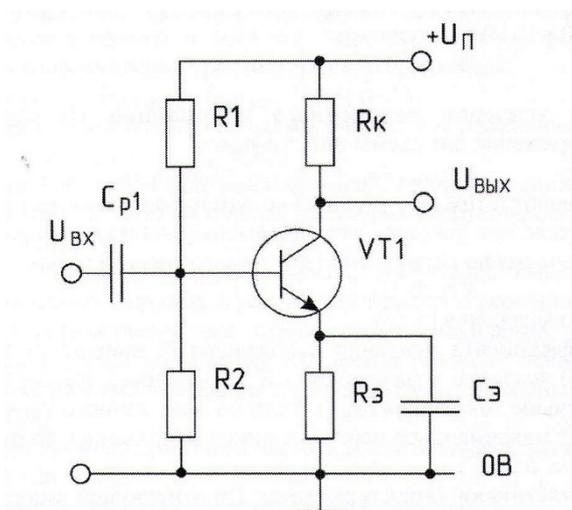


Рисунок 5.1 Схема усилительного каскада с ОЭ с заземленным по переменному току эмиттером.

Максимально возможное значение тока базы в рабочей точке

$$I_{Б,макс} = I_K / h_{21Э мин} \quad (5.6)$$

Где $h_{21Э мин}$ - Минимально возможный коэффициент усиления транзистора по току в схеме с ОЭ.

Для транзисторов марки *КТ503Е* коэффициент $h_{21Э мин} = 40$. Так как у разных транзисторов типа *КТ503Е* величина $h_{21Э мин}$ может иметь значение от 40 до 120, то точное значение $I_Б$ рассчитать нельзя.

Усилительный каскад с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера

Каскады усиления звуковой частоты чаще всего выполняют на транзисторах, включенных с ОЭ, так как при этом получают усиление и по напряжению и по току. В схеме на рис. 5.1 конденсатор большой емкости $C_Э$ шунтирует эмиттерный резистор. Импеданс этого конденсатора X_C должен быть гораздо меньше сопротивления резистора $R_Э$. Таким образом, можно считать,

что для переменного тока эмиттер транзистора соединен с общей точкой схемы.
Сопротивление перехода эмиттер-база со стороны эмиттера

Эмиттер транзистора имеет собственное сопротивление $r_{\text{э}}$, которое выступает в качестве последовательного для эмиттерной цепи во всех транзисторных схемах. Величина этого сопротивления рассчитывается по формуле

$$r_{\text{э}} = [25 / I_{\text{к}}(\text{мА})] \text{ Ом}, \quad (5.7)$$

где $I_{\text{к}}$ (мА) - ток коллектора, взятый в миллиамперах.

Если резистор $R_{\text{э}}$, как в данной схеме, зашунтирован конденсатором или величина его сопротивления сравнима с величиной $r_{\text{э}}$, то в расчетах необходимо учитывать величину $r_{\text{э}}$.

Зависимость тока коллектора от напряжения база-эмиттер транзистора достаточно точно описывается уравнением Эберса-Молла:

$$I_{\text{к}} = I_0 [\exp (q U_{\text{БЭ}} / kT) - 1] \quad (5.8)$$

где I_0 - ток утечки коллектор-база, протекающий при $U_{\text{БЭ}} = 0$; q - заряд электрона (1.60×10^{-19} Кл); k - постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К); T - температура перехода в кельвинах ($K = \text{°C} + 273,16$).

При комнатной температуре $T = 20 \text{ °C} = 293 \text{ К}$ и при $U_{\text{БЭ}} > 0,1 \text{ В}$ эта зависимость имеет вид

$$I_{\text{к}} = I_0 [\exp (40 U_{\text{БЭ}})] \quad (5.9)$$

Динамическое сопротивление перехода база-эмиттер со стороны эмиттера (для малого сигнала) определяется как

$$r_{\text{э}} = d U_{\text{БЭ}} / d I_{\text{э}} \approx d U_{\text{БЭ}} / d I_{\text{к}} \quad (5.10)$$

Дифференцируя (5.9) и учитывая (5.10), получим

$$d I_{\text{к}} / d U_{\text{БЭ}} = 40 I_{\text{к}} = 1 / r_{\text{э}} \quad (5.11)$$

поэтому сопротивление перехода эмиттер-база со стороны эмиттера равно

$$r_{\text{э}} = 1 / 40 I_{\text{к}} \quad (5.12)$$

Следовательно, сопротивление перехода эмиттер-база обратно пропорционально току коллектора. Ток коллектора величиной 1 мА дает сопротивление $r_{\text{э}}$ около 25 Ом. Выражение (5.12) является достаточно точным для большинства практических целей.

Для малых изменений сигналов выходное напряжение равно

$$u_{\text{ВЫХ}} = -i_K R_K \quad (5.13)$$

Выразим ток коллектора из выражения (5.10)

$$i_K = u_{\text{бэ}} / r_{\text{э}} \quad (5.14)$$

Подставим (5.14) в (5.13) и получим

$$u_{\text{ВЫХ}} = - (u_{\text{ВХ}} / r_{\text{э}}) R_K \quad (5.15)$$

Коэффициент усиления переменного напряжения

Из выражения (5.15) коэффициент усиления переменного напряжения для схемы рис. 5.1 равен

$$K = u_{\text{ВЫХ}} / u_{\text{ВХ}} = - R_K / r_{\text{э}} = -40 R_K I_K \quad (5.16)$$

Знак минус говорит о том, что увеличение потенциала базы дает уменьшение потенциала коллектора.

В таком усилителе при условии, что напряжение коллектора в рабочей точке составляет $0,5 U_{\text{П}} = R_K I_{K \text{ рт.}}$, коэффициент усиления по напряжению для малого сигнала равен

$$K \approx 20 U_{\text{П}} \quad (5.17)$$

что следует из выражения (5.16).

Величина коэффициента усиления напряжения K зависит от тока коллектора, поэтому найденное из выражения (5.16) значение коэффициента K имеет смысл только для малого сигнала $i_K \ll I_K$ (переменный ток i_K гораздо меньше тока покоя $I_{K \text{ рт.}}$). Если на вход данного усилителя подается треугольный сигнал, а на выходе действует максимальное неограниченное напряжение, то оно будет иметь **нелинейные искажения**, показанные на рис. 5.2.

Амплитудно-частотная характеристика

Шунтирующий эмиттерный конденсатор $C_{\text{э}}$ следует выбирать так, чтобы импеданс параллельного соединения резистора $R_{\text{э}}$ и конденсатора $C_{\text{э}}$ не влиял на коэффициент усиления K в нужном диапазоне частот. Для этого импеданс конденсатора $C_{\text{э}}$ должен быть небольшим по сравнению с $r_{\text{э}}$ на самой низкой из интересующих вас частот $f(x_{C_{\text{э}}}, i r_{\text{э}})$ или

$$1/2\pi f C_{\text{э}} \ll 1/40 I_K \quad (5.18)$$

Частота, на которой импеданс конденсатора $C_э$ и сопротивление эмиттера $r_э$ равны

$$f = 40 I_K / 2\pi C_э \quad (5.19)$$

Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 используются для изоляции внешних цепей от постоянных напряжений, имеющих на базе и коллекторе в режиме покоя.

Для оценки влияния частоты сигнала f на коэффициент усиления K используют амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя (рис. 5.3). Полосой пропускания усилителя называют интервал частот Δf , в пределах которого коэффициент усиления снижается не более, чем на 3 дБ (до уровня 0,707) по отношению к его значению на средних частотах K_0 (для усилителя низкой частоты $f_{ср} = 400 \dots 1000$ Гц).

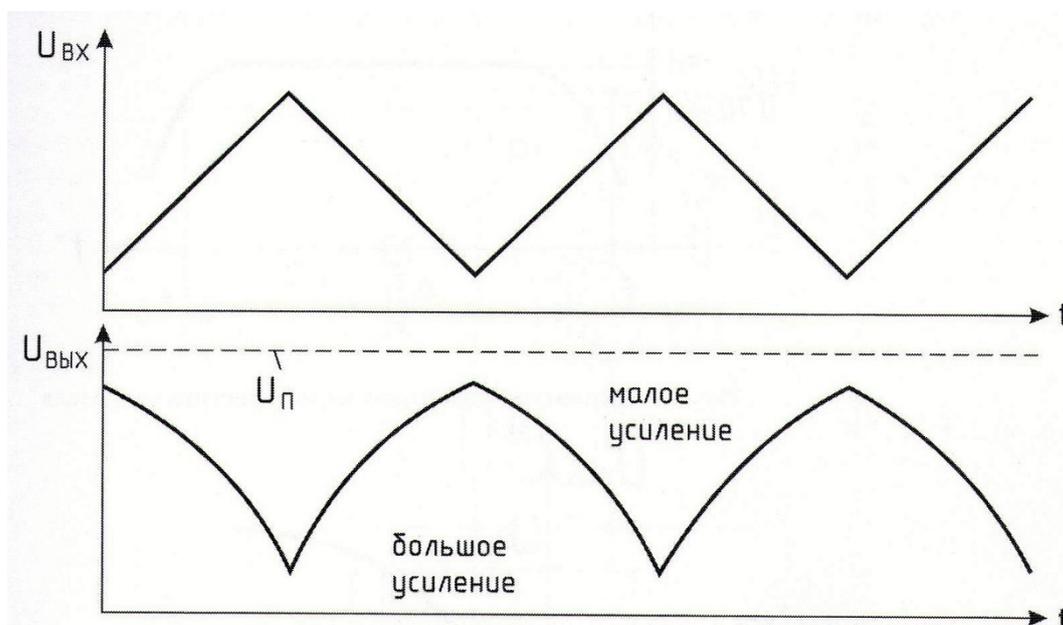


Рисунок 5.2 Форма входного и выходного сигнала в схеме с шунтирующим конденсатором (рис.5.1) при большой амплитуде колебаний. Входной сигнал показан в увеличенном масштабе для удобства сравнения

Входное сопротивление В полосе пропускания усилителя импеданс конденсатора C_1 меньше импеданса входного сопротивления схемы $r_{вх}$. Так как конденсатор C_1 и входное сопротивление соединены последовательно, то полное входное сопротивление усилителя в полосе пропускания равно входному сопротивлению $Z_{вх} \approx r_{вх}$.

Входное сопротивление данной схемы (рис. 5.1) для переменного сигнала определяется параллельным соединением резистора делителя R_2 и входного сопротивления транзистора со стороны базы $r_б$. Обычно $r_б < R_2$. В данной схеме

$$r_B = U_{BЭ} / i_B = U_{BЭ} (h_{21Э} + 1) / i_{Э} \approx r_{Э} h_{21Э} \quad (5.20)$$

с учетом того, что $i_B = i_{Э} / (h_{21Э} + 1)$; $r_{Э} = U_{BЭ} / I_{Э}$; $h_{21Э} \gg 1$.

Так как коэффициент $h_{21Э}$ может сильно отличаться у разных экземпляров одного и того же типа, то можно определить только минимально возможное значение входного сопротивления транзистора со стороны базы

$$r_{B\text{ мин}} \text{ (кОм)} = r_{Э} h_{21Э\text{ мин}} = h_{21Э\text{ мин}} / 40 I_K \text{ (мА)} \quad (5.21)$$

Минимальное значение входного сопротивления схемы рис. 5.1 для переменного сигнала равно

$$r_{ВХ\text{ мин}} = r_{B\text{ мин}} R_2 / (r_{B\text{ мин}} + R_2) \quad (5.22)$$

Нижняя граничная частота Когда импеданс конденсатора C_1 равен входному сопротивлению схемы $r_{ВХ}$, коэффициент усиления падает на 3 дБ. Отсюда нижняя граничная частота усилителя

$$f_H = 1 / 2 \pi C_1 r_{ВХ} \quad (5.23)$$

Выходное сопротивление Обычно выходной импеданс усилителей имеет резистивный (омический) характер в широком диапазоне частот. Поэтому в усилителях говорят о выходном сопротивлении. Выходное сопротивление схемы с ОЭ определяется как параллельное соединение резистора R_K и выходного сопротивления транзистора со стороны коллектора. Коллектор обладает очень большим сопротивлением (порядка мегаОм), поэтому выходное сопротивление определяется коллекторным резистором

$$r_{ВЫХ} \approx R_K \quad (5.24)$$

Верхняя граничная частота Верхняя граничная частота усилителя находится по формуле

$$f_B = 1 / 2 \pi C_H R_H \quad (5.25)$$

где C_H - емкость нагрузки и емкости переходов транзистора; R_H - сопротивление параллельно соединенных $r_{ВЫХ}$ и сопротивления нагрузки.

Амплитудная характеристика

Для усилителей важна также амплитудная характеристика (АХ), выражающая зависимость выходного сигнала $U_{ВЫХ}$ от входного $U_{ВХ}$ (рис. 5.4). Так как участок 0 - 1 ее линейный, коэффициент усиления K до напряжения $U_{ВХ\text{ макс}}$ сохраняет постоянное значение. Начиная с точки 1. рост выходного сигнала отстает от роста входного. Это объясняется тем, что выходное напряжение начинает ограничиваться напряжением питания. При этом резко возрастают

нелинейные искажения.

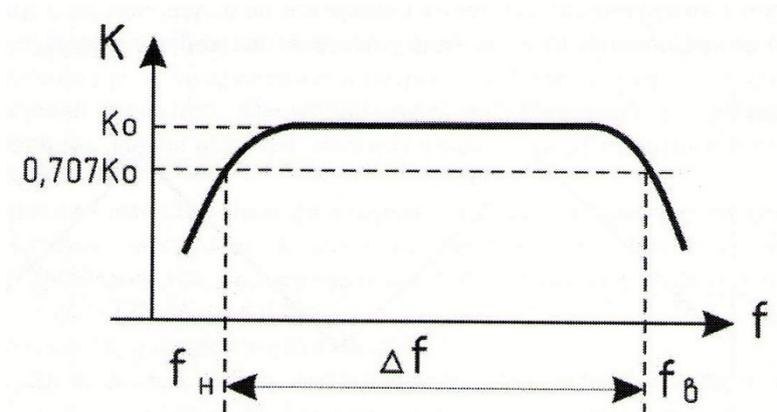


Рисунок 5.3 Амплитудно-частотная характеристика усилителя.

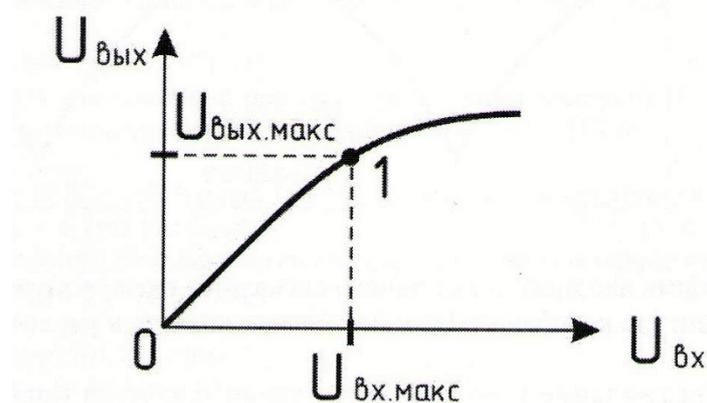


Рисунок 5.4 Амплитудная характеристика усилителя.

Усилительный каскад с ООС по переменному току

Коэффициент усиления напряжения

Схема усилительного каскада с ОЭ и с ООС по переменному току приведена на рис. 5.5. Расчет режима по постоянному току этой схемы аналогичен расчету для схемы с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера. В схеме рис. 5.5 нет шунтирующего резистор $R_Э$ конденсатора. Следовательно, на резисторе $R_Э$ появится переменное напряжение. Это напряжение пропорционально току эмиттера, а значит и току коллектора

$$u_Э = i_Э R_Э \approx i_К R_Э \quad (5.26)$$

В результате к управляющему транзистором переходу база-эмиттер прикладывается разность входного напряжения $U_Б$ и напряжения ООС по току $u_Э$ (так как $u_Э$ пропорционально выходному току $i_К$)

$$u_{ЭБ} = U_Б - u_Э \quad (5.27)$$

Допустим, что на базу подан переменный входной сигнал $U_Б$. Напряжение на

эмиттере будет повторять изменение напряжения на базе $u_{\text{Э}} = u_{\text{Б}}$. Это приведет к изменению тока эмиттера

$$i_{\text{Э}} = u_{\text{Э}} / (R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}) = u_{\text{Б}} / (R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}) \approx u_{\text{Б}} / R_{\text{Э}} \quad (5.28)$$

так как обычно $r_{\text{Э}} \ll R_{\text{Э}}$.

Транзистор имеет большой коэффициент усиления тока $h_{21\text{Э}} \gg 1$. Следовательно, ток коллектора приблизительно равен току эмиттера

$$i_{\text{К}} \approx i_{\text{Э}} = u_{\text{Б}} / R_{\text{Э}} \quad (5.29)$$

Итак, первоначальное изменение напряжения на базе вызывает изменение напряжения на коллекторе

$$u_{\text{К}} = -i_{\text{К}} R_{\text{К}} = -u_{\text{Б}} R_{\text{К}} / R_{\text{Э}} \quad (5.30)$$

Отсюда коэффициент усиления напряжения схемы с ООС по току (рис. 5.5) равен из (5.30)

$$K = u_{\text{ВЫХ}} / u_{\text{ВХ}} = u_{\text{К}} / u_{\text{Б}} = -R_{\text{К}} / R_{\text{Э}} \quad (5.31)$$

Знак минус говорит о том, что увеличение потенциала базы дает уменьшение потенциала коллектора. Из выражения (5.31) видно, что коэффициент усиления по напряжению усилителя с ООС величина постоянная и зависит только от отношения сопротивлений резисторов. Следовательно, такой усилитель обладает высокой стабильностью и не искажает форму выходного сигнала. Эти замечательные качества усилителя с ООС достигаются ценой сильного уменьшения коэффициента усиления K (в усилителе без ООС $K = -R_{\text{К}} / r_{\text{Э}}; r_{\text{Э}} \ll R_{\text{Э}}$).

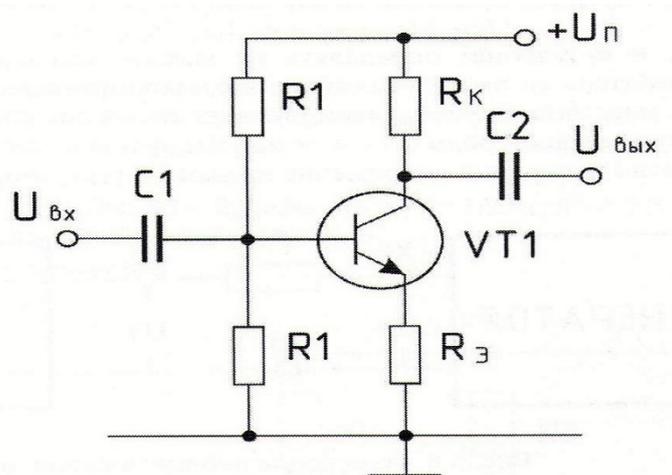


Рисунок 5.5 Каскад усиления переменного тока с ООС в цепи эмиттера

Входное сопротивление В полосе пропускания усилителя импеданс конденсатора $C1$ меньше импеданса входного сопротивления схемы $r_{\text{ВХ}}$. Так как

конденсатор $C1$ и входное сопротивление соединены последовательно, то полное входное сопротивление усилителя в полосе пропускания равно входному сопротивлению $Z_{вх} \approx r_{вх}$.

Входное сопротивление схемы рис. 5.5 для переменного сигнала определяется параллельным соединением резисторов делителя $R1$ и $R2$ и входного сопротивления транзистора со стороны базы r_B .

Входное сопротивление транзистора со стороны базы

$$r_B = u_B / i_B \quad (5.32)$$

Для переменного напряжения

$$u_B = u_{Э} = i_{Э} (R_{Э} + r_{Э}) \approx i_{Э} R_{Э} \quad (5.33)$$

так как $r_{Э} \ll R_{Э}$.

Кроме того

$$i_B = i_K / h_{21Э} \approx i_{Э} / h_{21Э} \quad (5.34)$$

Подставив выражения (5.33) и (5.34) в выражение (5.32) получим, что **сопротивление транзистора со стороны базы**

$$r_B = R_{Э} h_{21Э} \quad (5.35)$$

Для того, чтобы изменения тока базы не влияли на потенциал базы, сопротивление делителя (параллельное соединение $R1$ и $R2$ для переменного тока) должно быть меньше сопротивления транзистора со стороны базы r_B . Следовательно, входное сопротивление определяется параллельным соединением $R1$ и $R2$

$$r_{вх} = R1 R2 / (R1 + R2) \quad (5.36)$$

Так как сопротивление транзистора со стороны базы r_B в схеме с $О О С$ больше, чем в схеме с шунтирующим конденсатором, то и входное сопротивление этой схемы больше.

Выходное сопротивление, нижняя и верхняя граничные частоты усилителя с $О О С$ по переменному току определяются выражениями (5.24), (5.23) и (5.25), как и для усилителя с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера.

Методика измерения входного сопротивления усилителей

Для измерения входного сопротивления усилителя между генератором и входом исследуемой схемы включают резистор с известным сопротивлением r_i . Затем с помощью осциллографа или высокочастотного вольтметра с высоким входным сопротивлением измеряются напряжения u_1 и u_2 по обе стороны резистора r_i (см. рис. 5.6).

Если $i_{вх}$ - переменный входной ток (в Амперах), то, согласно закону Ома на резисторе r_i падает напряжение

$$u_1 - u_2 = r_i i_{вх} \quad (5.37)$$

Поэтому

$$i_{BX} = (u_1 - u_2) / r_i \quad (5.38)$$

По закону Ома искомое входное сопротивление усилителя

$$r_{BX} = u_2 / i_{BX} \quad (5.39)$$

Следовательно, с учетом выражения (5.38)

$$r_{BX} = r_i u_2 / (u_1 - u_2) = r_i / [(u_1 / u_2) - 1] \quad (5.40)$$

Напряжения u_1 и u_2 удобнее определять на выходе усилителя: u_1 измеряется при непосредственном подключении генератора ко входу усилителя, а u_2 - при последовательном включении со входом резистора r_i . Поскольку в выражении для r_{BX} присутствует только отношение u_1 / u_2 , то коэффициент усиления усилителя не играет никакой роли ($u_1 / u_2 = u_{BX1} / u_{BX2} = K u_{BX1} / K u_{BX2} = u_{ВЫХ 1} / u_{ВЫХ 2}$). Предполагается, что при выполнении этих измерений напряжение на выходе генератора остается неизменным.

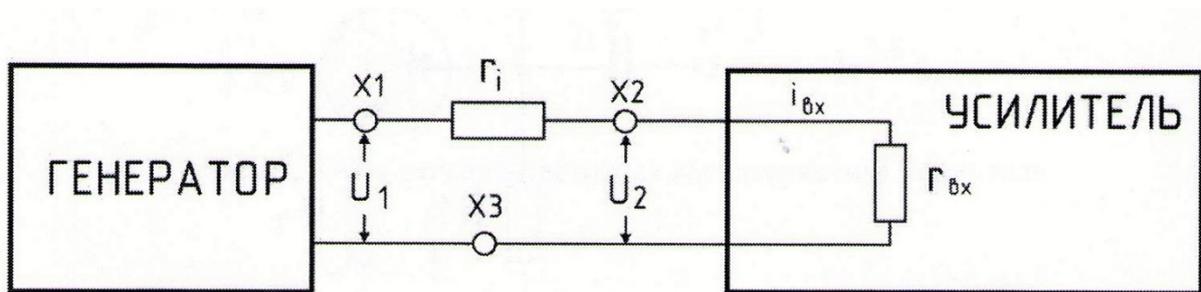


Рисунок 5.6 Измерение входного сопротивления усилителя.

Методика измерения выходного сопротивления усилителей

Практический способ измерения выходного сопротивления $r_{ВЫХ}$ показан на рис. 5.7. Здесь выходное напряжение холостого хода $u_{ВЫХ 1}$ измеряется осциллографом с высокоомным входом или высокочастотным вольтметром, а затем выходные клеммы шунтируются нагрузкой R_H с известным сопротивлением. Уменьшенное подключением нагрузки выходное напряжение $u_{ВЫХ 2}$ измеряется тем же измерительным прибором.

Падение напряжения на выходном сопротивлении усилителя при подключенной нагрузке равно разности показаний измерительного прибора

$$\Delta u_{ВЫХ} = u_{ВЫХ 1} - u_{ВЫХ 2} \quad (5.41)$$

Выходной ток при наличии нагрузки

$$i_{ВЫХ} = u_{ВЫХ 2} / R_H \quad (5.42)$$

поэтому

$$r_{ВЫХ} = \Delta u_{ВЫХ} / i_{ВЫХ} = (u_{ВЫХ 1} - u_{ВЫХ 2}) R_H / u_{ВЫХ 2} \quad (5.43)$$

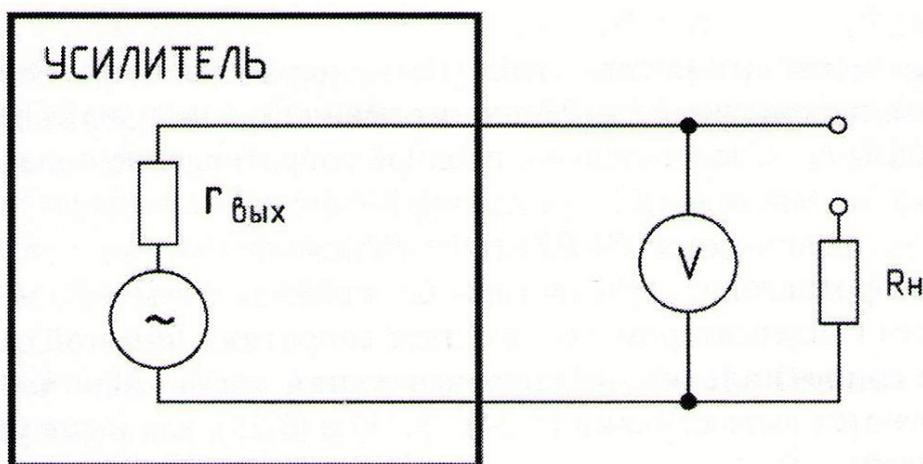


Рисунок 5.7 Измерение выходного сопротивления усилителя.

Основные электрические параметры транзистора *KT503Г*

Напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$ при $I_K = 10\text{мА}$, $I_B = 1\text{ мА}$	не более 0,6 В тип. значение 0,2 В
Напряжение насыщения база-эмиттер $U_{БЭнас}$ при $I_K = 10\text{мА}$, $I_B = 1\text{ мА}$	не более 1,2В тип. значение 0,8В
Статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$ при $U_{КЭ} = 5\text{ В}$, $I_Э = 10\text{ мА}$	80...240
Максимально допустимое постоянное напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭмакс}$	60В
Максимально допустимое постоянное напряжение база-эмиттер $U_{БЭмакс}$	5В
Максимально допустимый постоянный ток коллектора $I_{Кмакс}$	0,15А
Максимально допустимый постоянный ток базы $I_{Бмакс}$	0,1А
Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора $P_{Кмакс}$	0,35Вт

Модуль «Усилительный каскад на транзисторе»

Схема модуля «Усилительный каскад на транзисторе» приведена на рис. 5.8. Элементы усилителя на сменном модуле №5 имеют следующие параметры:

- $VT1$ - транзистор *KT503Г*;
- резисторы $R1 = 91\text{кОм}$; $R2 = 11\text{кОм}$; $R3 = 8,2\text{кОм}$; $R4 = r_i = 1\text{кОм}$; $R5 = 7,5\text{ кОм}$;
- конденсаторы $C1 = 0,1$ и $1,0\text{ мкФ}$; $C2 = C3 = 100\text{ мкФ}$;
- $SB1$ - кнопка без фиксации положения.

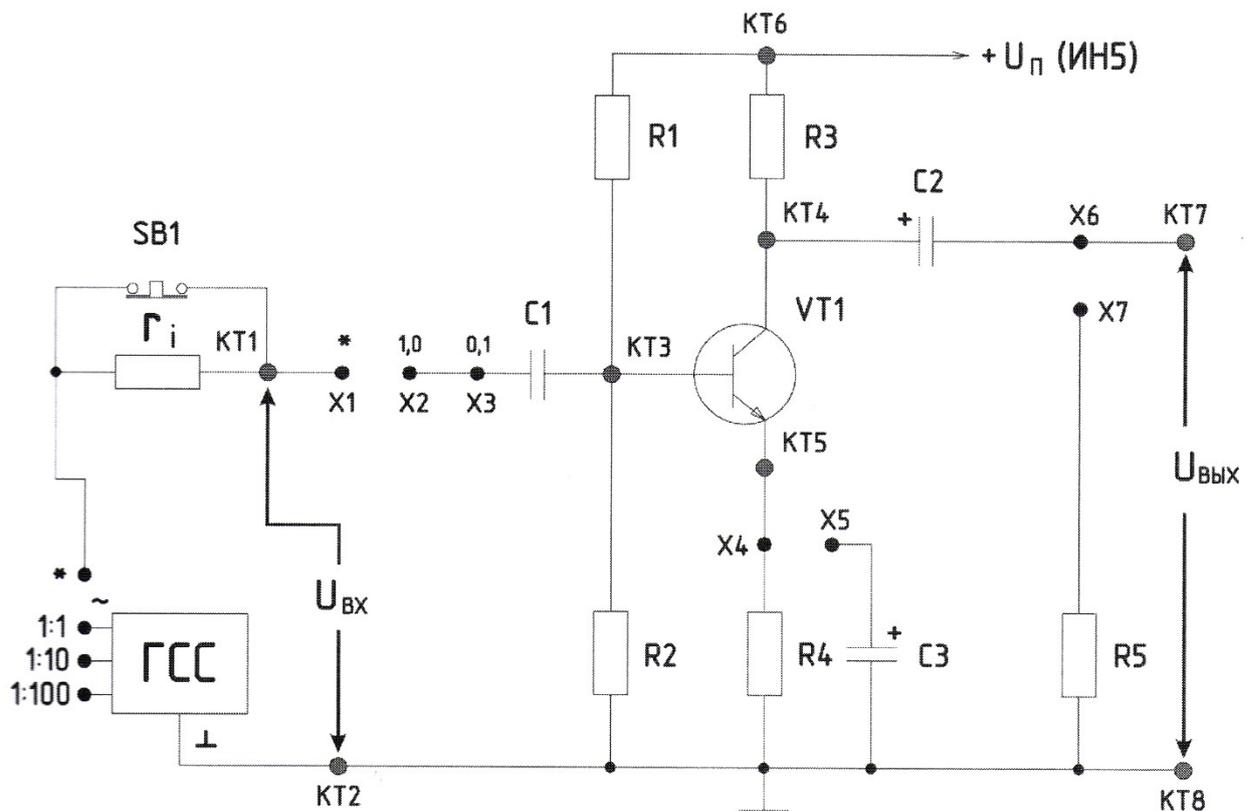


Рисунок 5.8 Схема модуля «Усилительный каскад на транзисторе»

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Подготовка к работе

1.1 Зарисуйте схемы усилителя с *ООС* по переменному току (см. рис. 5.5) и усилителя с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера (см. рис. 5.1).

1.2 Вычертите необходимые таблицы.

1.3 Рассчитайте режим каскада по постоянному току (токи базы $I_{B \text{ макс}}$ и коллектора I_K и напряжения на базе U_B , эмиттере U_E и коллекторе U_K) и занесите результаты расчетов в табл. 5.2.1. При расчетах примите напряжение питания схемы $U_{\Pi} = 15\text{В}$.

1.4 Рассчитайте параметры усилителя с *ООС* по переменному току (коэффициент усиления переменного напряжения K , входное сопротивление переменному току $r_{ВХ}$, нижние граничные частоты $f_{Н1}$ и $f_{Н2}$ (для $C_1 = 0,1$ и $1,0$ мкФ) и выходное сопротивление переменному току $r_{ВЫХ}$). Занесите результаты расчетов в табл. 5.3.4

1.5 Рассчитайте параметры усилителя с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера (коэффициент усиления переменного напряжения K , минимально возможное входное сопротивление переменному току $r_{ВХ \text{ мин}}$, нижние граничные частоты $f_{Н1}$ и $f_{Н2}$ (для $C_1 = 0,1$ и $1,0$ мкФ) и выходное сопротивление переменному току $r_{ВЫХ}$). Занесите результаты расчетов в табл. 5.4.4.

1.6 Установите выключатель **СЕТЬ**, выключатели всех источников сигналов и измерительных приборов в положение **ВЫКЛ**, регуляторы

потенциометров всех источников в крайнее левое положение.

1.7 Подключите сменный модуль №5 к разъему базового блока.

1.8 Подсоедините шнур питания к разъему на задней стенке стенда и включите вилку шнура питания в розетку электросети напряжением 220В.

2. Исследование режима по постоянному току каскада с ОЭ

2.1 После разрешения преподавателя включите питание стенда выключателем СЕТЬ.

2.2 Включите источник питания схемы ИН5.

2.3 Измеряйте вольтметром стенда PV1 значения напряжения питания усилителя $U_{П}$, напряжений на базе $U_{Б}$, эмиттере $U_{Э}$ и коллекторе $U_{К}$ транзистора и занесите результаты измерений в табл. 5.2.1.

2.4 Выключите питание схемы.

2.5 Рассчитайте измеренные ток коллектора $I_{К}$ и максимально возможный ток базы $I_{Б\text{ макс}}$, пользуясь измеренным значением напряжения на эмиттере $U_{Э}$ и известными значениями $R_{Э}$ и $h_{21Э\text{ мин}}$. Занесите результаты расчетов в табл. 5.2.1.

2.6 Используя данные табл. 5.2.1 сравните рассчитанные и измеренные значения параметров транзистора в рабочей точке. Сделайте вывод.

Таблица 5.2.1

Параметр	Рассчитанный	Измеренный
Напряжение питания $U_{П}$, В	15	
Напряжение на базе $U_{Б}$, В	$U_{Б} = U_{П} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) =$	
Напряжение на эмиттере $U_{Э}$, В	$U_{Э} = U_{Б} - 0.6 =$	
Напряжение на коллекторе $U_{К}$, В	$U_{К} = U_{П} - I_{К} R_{К} =$	
Ток коллектора $I_{К}$, мА	$I_{К} = U_{Э} / R_{Э}$	
Максимальный возможный ток базы $I_{Б\text{ макс}}$, мА	$I_{Б\text{ макс}} = I_{К} / h_{21Э\text{ мин}} =$	

3. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ С ООС ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ

3.1 Снятие амплитудно-частотных характеристик усилителя с ООС по переменному току

3.1.1 На сменном модуле отсоедините шунтирующий конденсатор С3 от эмиттерного резистора R4 и резистор нагрузки R5 от выхода усилителя. Подключите разделительный конденсатор С1 = 1,0 мкФ. Соедините перемычкой выход ГСС 1:10 со входом усилителя.

Подключите первый канал двухканального осциллографа ко входу усилителя для измерения частоты и величины входного напряжения $u_{ВХ}$.

Подключите второй канал двухканального осциллографа к выходу усилителя для измерения величины выходного напряжения $u_{ВЫХ}$.

3.1.2 Включите источник питания схемы ИН5.

3.1.3 Переключателем ГСС ФОРМА установите режим источника напряжения синусоидальной формы и включите ГСС.

3.1.4 Установите частоту напряжения ГСС равной 1 кГц.

3.1.5 Регуляторами АМПЛИТУДА ГСС установите величину размаха

выходного напряжения $u_{\text{ВЫХ}}$ ($V_{\text{амп}}$) исследуемого усилителя около 4 В. Определите при этом величину размаха входного напряжения $u_{\text{ВХ}}$ и занесите ее в табл. 5.3.1.

3.1.6 Поддерживая величину входного напряжения $u_{\text{ВХ}}$ постоянной (ее значение занесено в табл. 5.3.1), изменяйте его частоту согласно табл. 5.3.1. Для каждого значения частоты определяйте величину размаха выходного напряжения $u_{\text{ВЫХ}}$ и заносите результат в табл. 5.3.1.

3.1.7 Выключите питание схемы и ГСС. Подключите разделительный конденсатор $C1 = 0,1$ мкФ.

3.1.8 Включите питание схемы и ГСС. Снимите АЧХ усилителя при $C1 = 0,1$ мкФ, выполняя п.п. 3.1.6.

Таблица 5.3.1

Входные напряжение $u_{\text{вх}}$, мВ														
Частота f , кГц		0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Входное напряжение $u_{\text{вх}}$, В при емкости $C1$, мкФ	1,0													
	0,1													
Коэффициент усиления $K = u_{\text{вх}}/u_{\text{вх}}$ при емкости $C1$, мкФ	1,0													
	0,1													

3.2 Снятие амплитудной характеристики усилителя с ООС по переменному току

3.2.1 Перед снятием амплитудной характеристики должны быть выполнены п.п. 3.1.1 ... 3.1.4. Для получения необходимой величины входного напряжения $u_{\text{ВХ}}$ подключайте вход усилителя к выходам **1:1** или **1:10** ГСС.

3.2.2 Изменяйте величину размаха входного напряжения $u_{\text{ВХ}}$ согласно табл. 5.3.2. Для каждого значения величины входного напряжения $u_{\text{ВХ}}$ определяйте величину размаха выходного напряжения $u_{\text{ВЫХ}}$ и заносите результат в табл. 5.3.2. Наблюдайте форму выходного напряжения усилителя $u_{\text{ВЫХ}}$ при каждом измерении.

3.2.3 Выключите питание схемы и ГСС.

Таблица 5.3.2

Входное напряжение $u_{\text{вх}}$, В	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	3,0	4,0
Выходное напряжение $u_{\text{вх}}$, В							

3.3 Определение наличия нелинейных искажений в усилителе с ООС по переменному току

3.3.1 Выполните п.п. 3.1.1 ... 3.1.2.

3.3.2 Переключателем режимов работы ГСС установите режим источника напряжения треугольной формы и включите ГСС.

3.3.3 Установите частоту напряжения ГСС равной 1 кГц.

3.3.4 Регуляторами **АМПЛИТУДА ГСС** установите величину размаха выходного напряжения $u_{\text{ВЫХ}}$ исследуемого усилителя около 10 В.

3.3.5 Чтобы сравнивать форму сигналов было удобней, инвертируйте один из сигналов (если в осциллографе имеется такая функция) и установите такие коэффициенты вертикального отклонения каналов осциллографа, чтобы осциллограммы обоих сигналов на экране имели примерно одинаковый размах.

3.3.6 Зарисуйте осциллограммы входного $u_{\text{ВХ}}$ и выходного $u_{\text{ВЫХ}}$ напряжений усилителя.

3.3.7 Выключите питание схемы и ГСС.

3.4 Измерение входного и выходного сопротивлений усилителя с ООС по переменному току

3.4.1 Выполните п.п. 3.1.1 ... 3.1.4.

3.4.2 Регуляторами **АМПЛИТУДА ГСС** установите величину размаха выходного напряжения u_1 исследуемого усилителя около 2 В. Занесите это значение в табл. 5.3.3.

3.4.3 На сменном модуле подключите резистор r_i последовательно со входом усилителя, нажав кнопку *SB1*. Измеряйте новое значение размаха выходного напряжения u_2 . Занесите это значение в табл. 5.3.3.

3.4.4 Измеряйте значение выходного напряжения $u_{\text{вых}1}$ при не нажатой кнопке *SB1*. Занесите это значение в табл. 5.3.3.

3.4.5 Подключите к выходу усилителя сопротивление нагрузки $R5 = 7.5\text{кОм}$. Измеряйте новое значение выходного напряжения $u_{\text{вых}2}$. Занесите это значение в табл. 5.3.3.

3.4.6 Выключите питание схемы и ГСС.

Таблица 5.3.3

Вид измерения	Измерение входного сопротивления усилителя $\Gamma_{\text{ВХ}}$	Измерение выходного сопротивления усилителя $\Gamma_{\text{ВЫХ}}$
Выходное напряжение $u_{\text{вых}1}, \text{В}$	$u_1 =$	$u_{\text{вых}1} =$
Выходное напряжение $u_{\text{вых}2}, \text{В}$	$u_2 =$	$u_{\text{вых}2} =$

3.5 Обработка результатов экспериментов

3.5.1 Рассчитайте коэффициенты усиления усилителя на разных частотах и занесите их значения в табл. 5.3.1. Используя данные табл. 5.3.1 постройте графики АЧХ усилителя с разделительными конденсаторами $C1 = 0,1$ и $1,0$ мкФ в одних координатных осях. Нанесите значения частоты на графике АЧХ в логарифмическом масштабе. Сравните графики и сделайте вывод.

3.5.2 Определите по графикам АЧХ величины нижних граничных частот f_{H1} (при $C1 = 0,1$ мкФ) и f_{H2} (при $C1 = 1,0$ мкФ). Занесите их значения в табл. 5.3.4. Сравните рассчитанные и измеренные значения нижних граничных частот. Сделайте вывод.

3.5.3 Определите по графикам АЧХ величину верхней граничной частоты f_B . Занесите ее значение в табл. 5.3.4.

3.5.4 Используя данные табл. 5.3.1 занесите величину измеренного коэффициента усиления K в полосу пропускания усилителя в табл. 5.3.4. Сравните рассчитанные и измеренные значения коэффициента усиления K . Сделайте вывод.

3.5.5 Используя данные табл. 5.3.2 постройте график АХ усилителя. По графику АХ определите максимальное входное напряжение $u_{ВХ макс}$, которое дает максимальное не ограниченное напряжением питания напряжение на выходе усилителя $u_{ВЫХ макс}$.

3.5.6 Сравните осциллограммы входного и выходного сигналов усилителя, полученные при выполнении п. 3.3, и сделайте вывод: искажает ли усилитель форму входного сигнала.

3.5.7 Используя данные табл. 5.3.3 и выражения (5.40), (5.43) рассчитайте измеренные значения входного $r_{ВХ}$ и выходного $r_{ВЫХ}$ сопротивлений усилителя. Занесите полученные значения в табл. 5.3.4. Сравните рассчитанные и измеренные значения сопротивлений. Сделайте вывод.

Таблица 5.3.4

Параметр усилителя	Рассчитанный	Измеренный
Коэффициент усиления K	$K = - R_K/R_Э =$	
Нижняя граничная частота $f_{H.1}$, Гц при $C1 = 0,1$ мкФ	$f_{H.1} = 1/2\pi C1 r_{вх}$	
Нижняя граничная частота $f_{H.2}$, Гц при $C1 = 1$ мкФ	$f_{H.2} = 1/2\pi C1 r_{вх}$	
Верхняя граничная частота f_B , Гц	-----	
Входное сопротивление $r_{вх}$, кОм	$r_{вх} = R1 * R2 / (R1 + R2) =$	$r_{вх} = r_i / [(u_1/u_2) - 1] =$
Выходное сопротивление $r_{вых}$, кОм	$r_{вых} \approx R_K =$	$r_{вых} = (u_{вых.1} - u_{вых.2}) * R_5 / u_{вых.2} =$

4. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ С ШУНТИРУЮЩИМ КОНДЕНСАТОРОМ В ЦЕПИ ЭМИТТЕРА

4.1 Снятие амплитудно-частотных характеристик усилителя с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера

4.1.1 Для получения необходимой величины входного напряжения $u_{вх}$ подключите вход усилителя к выходу **1:100 ГСС**.

4.1.2 Снимите АЧХ усилителя как указано в п. 3.1, но с подключенным параллельно резистору $R4$ шунтирующим конденсатором $C3 = 100$ мкФ.

4.1.3 Занесите результаты измерений в табл. 5.4.1.

Таблица 5.4.1

Входные напряжение $u_{вх}$, мВ													
Частота f , кГц		0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Входное напряжение $u_{вых}$, В	$C1=1,0$ мкФ												
	$C1=0,1$ мкФ												
Коэффициент усиления $K = u_{вых}/u_{вх}$	$C1=1,0$ мкФ												
	$C1=0,1$ мкФ												

4.2 Снятие амплитудной характеристики усилителя с конденсатором в цепи эмиттера

4.2.1 Перед снятием амплитудной характеристики должны быть выполнены п.п. 3.1.1 ... 3.1.4. Отличие только в том, что параллельно резистору $R4$ должен быть подключен шунтирующий конденсатор $C3 = 100$ мкФ и для получения необходимой величины входного напряжения $u_{вх}$ подключайте вход усилителя к выходам 1:100 или 1:10 ГСС..

4.2.2 Увеличивайте величину входного напряжения $u_{вх}$ до тех пор, пока выходное напряжение $u_{вых}$ не начнет ограничиваться напряжением питания. Определите величину размаха максимального неограниченного напряжением питания входного напряжения $u_{вх \text{ макс}}$.

4.2.3 Примите $u_{вх 1} = 0,2 u_{вх \text{ макс}}$; $u_{вх 2} = 0,4 u_{вх \text{ макс}}$; $u_{вх 3} = 0,6 u_{вх \text{ макс}}$; $u_{вх 4} = 0,8 u_{вх \text{ макс}}$; $u_{вх 5} = u_{вх \text{ макс}}$; $u_{вх 6} = 2u_{вх \text{ макс}}$; $u_{вх 7} = 3u_{вх \text{ макс}}$; Занесите значения входных напряжений $u_{вх 1} \dots u_{вх 7}$ в табл. 5.4.2.

4.2.4 Изменяйте величину размаха входного напряжения $u_{вх}$ согласно табл.

5.4.2. Для каждого значения величины входного напряжения $u_{ВХ}$ определяйте величину размаха выходного напряжения $u_{ВЫХ}$ и заносите результат в табл. 5.4.2.

4.2.5 Выключите питание схемы и ГСС.

Таблица 5.4.2

Входное напряжение $u_{вх}, В$	$u_{вх.1} =$	$u_{вх.2} =$	$u_{вх.3} =$	$u_{вх.4} =$	$u_{вх.5} =$	$u_{вх.6} =$	$u_{вх.7} =$
Выходное напряжение $u_{вых}, В$							

4.3 Определение наличия нелинейных искажений в усилителе с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера

4.3.1 Снимите и зарисуйте осциллограммы входного $u_{ВХ}$ и выходного $u_{ВЫХ}$ напряжений усилителя как указано в п. 3.3, но с подключенным параллельно резистору $R4$ шунтирующим конденсатором $C3 = 100$ мкФ.

4.4 Измерение входного и выходного сопротивлений усилителя с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера

4.4.1 Измеряйте входное и выходное сопротивления усилителя переменному току как указано в п. 3.4. Отличия: подключите параллельно резистору $R4$ шунтирующий конденсатор $C3 = 100$ мкФ, подключите вход усилителя к выходу **1:100** ГСС, установите величину размаха выходного напряжения u_1 исследуемого усилителя около 4 В.

4.4.2 Результаты измерений заносите в табл. 5.4.3.

4.4.3 Выключите все источники сигналов стенда и измерительные приборы.

Таблица 5.4.3

Вид измерения	Измерение входного сопротивления усилителя $\Gamma_{вх}$	Измерение выходного сопротивления усилителя $\Gamma_{вых}$
Выходное напряжение $u_{вых1}, В$	$u_1 =$	$u_{вых1} =$
Выходное напряжение $u_{вых2}, В$	$u_2 =$	$u_{вых2} =$

4.5 Обработка результатов экспериментов

4.5.1 Используя данные соответствующих п.3 таблиц п. 4, выполните вычисления и построения графиков, как указано в п. 3.5.

4.5.2 Результаты заносите в табл. 5.4.4 и в соответствующие п. 3 таблицы п. 4.

4.5.3 Сравните характеристики и параметры усилителя с ООС по переменному

току с соответствующими характеристиками и параметрами усилителя с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера.

Параметр усилителя	Рассчитанный	Измеренный
Коэффициент усиления K	$K = -40 R_K/R_{Э} =$	
Нижняя граничная частота $f_{н.1}$, Гц при $C1 = 0,1 \text{ мкФ}$	$f_{н.1} = 1/2\pi C1 r_{вх} =$	
Нижняя граничная частота $f_{н.2}$, Гц при $C1 = 1 \text{ мкФ}$	$f_{н.2} = 1/2\pi C1 r_{вх} =$	
Верхняя граничная частота $f_{в}$, Гц	-----	
Входное сопротивление $r_{вх}$, кОм	$r_{вх} = r_{Б.мин}R2/(r_{Б.мин} + R2);$ $r_{Б.мин}(кОм) = h_{21Э}/40 * I_K(мА).$	$r_{вх} = r_i / [(u_1/u_2) - 1] =$
Выходное сопротивление $r_{вых}$, кОм	$r_{вых} \approx R_K =$	$r_{вых} = (u_{вых.1} - u_{вых.2}) * R_5 / u_{вых.2} =$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как в рассмотренных усилителях обеспечивается температурная стабильность рабочей точки?
2. Как повлияет на АЧХ усилителя с шунтирующим конденсатором в цепи эмиттера уменьшение емкости этого конденсатора?
3. Почему в схеме с ООС по переменному току при одинаковом значении емкости разделительного конденсатора полоса пропускания в сторону нижних частот шире, чем в схеме с шунтирующим конденсатором?
4. Какой из двух рассмотренных усилителей имеет больший коэффициент усиления и почему?
5. Какой из двух рассмотренных усилителей не искажает форму выходного сигнала и почему?