

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

**В.П. Петрович, Н.А. Воронина,
Л.А. Паюк, К.В. Образцов**

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Лабораторный практикум

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УДК 537.31(076.5)
ББК 32.85:22.3я73
Ф50

Петрович В.П.
Ф50 Физические основы электроники: лабораторный практикум /
В.П. Петрович, Н.А. Воронина, Л.А. Паюк, К.В. Образцов;
Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во
Томского политехнического университета, 2012. – 80 с.

В лабораторном практикуме содержится краткое описание физических процессов, протекающих в основных типах полупроводниковых приборов, применяемых в современных электронных системах. Описан порядок проведения экспериментов при исследовании конкретных схем, приведены требования к оформлению отчетов по лабораторным работам. Для подготовки к защите отчетов по каждой работе приводятся контрольные вопросы, а также представлен список рекомендуемых литературных источников.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электротехника и электроэнергетика».

УДК 537.31(076.5)
ББК 32.85:22.3я73

Рецензенты

Кандидат технических наук
заместитель директора по научной работе обособленного
подразделения
«НИИ АЭМ ТУСУР»
И.В. Целебровский

Кандидат технических наук,
доцент кафедры «электроника и автоматика физических
установок» СТИ НИЯЦ МИФИ
А.А. Филипас

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012
© Петрович В.П., Воронина Н.А.,
Паюк Л.А., Образцов К.В., 2012
© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Лабораторная работа № 1 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИОДОВ И СТАБИЛИТРОНА ПО ВОЛЬТАМПЕРНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ».....	5
Лабораторная работа № 2 «ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ В ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ»	19
Лабораторная работа № 3 «ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРОВ».....	31
Лабораторная работа № 4 «ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА»	40
Лабораторная работа № 5 «ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ»	50
Лабораторная работа № 6 «ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ»	61
Лабораторная работа № 7 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОПАР»	72
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	79

ВВЕДЕНИЕ

Изучение курса «Физические основы электроники» включает в себя проведение цикла лабораторных работ, целью которых является изучение особенностей работы, параметров и характеристик основных типов полупроводниковых приборов. Лабораторные работы призваны закрепить теоретические знания по изучаемому курсу. Работы проводятся на лабораторном стенде, который имеет источник питания с различной формой сигнала, активное поле включения аналоговых элементов, набор таких элементов с определенным номиналом, блок мультиметров и электронный осциллограф. Содержание и структура лабораторного практикума отражает и дополняет основные позиции курса и включает в себя следующие работы:

1. Определение основных параметров диодов и стабилитрона по вольтамперным характеристикам.
2. Применение полупроводниковых диодов в источниках питания.
3. Исследование характеристик тиристоров.
4. Исследование режимов работы биполярного транзистора.
5. Исследование усилительных каскадов на биполярных транзисторах.
6. Исследование статических характеристик транзисторов.
7. Исследование основных характеристик оптопар.

Каждая из лабораторных работ содержит методические указания к их выполнению, контрольные вопросы и требования к оформлению отчета.

Лабораторная работа № 1

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИОДОВ И СТАБИЛИТРОНА ПО ВОЛЬТАМПЕРНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ»

Цель работы: изучение основных свойств диодов и стабилитрона и определение их параметров по вольтамперным характеристикам.

Общие сведения

Диоды и стабилитроны представляют собой полупроводниковые приборы с одним электронно-дырочным переходом (*p-n* переходом). Простейшими неуправляемыми силовыми ключами являются полупроводниковые диоды, использующие вентильное свойство *p-n* перехода, т. е. пропускающие ток в одном направлении и практически не пропускающие его в другом направлении (рис. 1.1.). Структура диода показана на рис. 1.1, а, его графическое изображение на рис. 1.1, б, а его вольтамперная характеристика – на рис. 1.1, в.

Одним из замечательных свойств *p-n*-перехода является **вентильное свойство**, т. е. способность его изменять свое сопротивление протекающему под действием напряжения внешнего источника току в зависимости от направления этого тока. Причем разница сопротивлений при прямом и обратном направлении тока может быть настолько велика, что в ряде случаев, например, для силовых диодов, можно считать, что ток протекает через диод только в одном направлении – прямом, а в обратном направлении ток настолько мал, что им можно пренебречь. Прямое направление – это когда электрическое поле внешнего источника направлено навстречу электрическому полю *p-n*-перехода, а обратное – когда направления этих электрических полей совпадают.

Полупроводниковые диоды, использующие вентильное свойство *p-n*-перехода, называются **выпрямительными диодами** и широко используются в различных устройствах для выпрямления переменного тока.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) идеализированного *p-n*-перехода описывается известным уравнением (1.1):

$$I = I_0 \left(e^{\frac{Uq}{kT}} - 1 \right), \quad (1.1)$$

где I_0 – обратный ток *p-n* перехода;

q – заряд электрона ($q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.);

k – постоянная Больцмана ($k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{дж}}{\text{град}}$);

T – температура в градусах Кельвина.

Графическое изображение этой зависимости представлено на рис. 1.1, в.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) имеет явно выраженную нелинейность, что предопределяет зависимость сопротивления диода от положения рабочей точки.

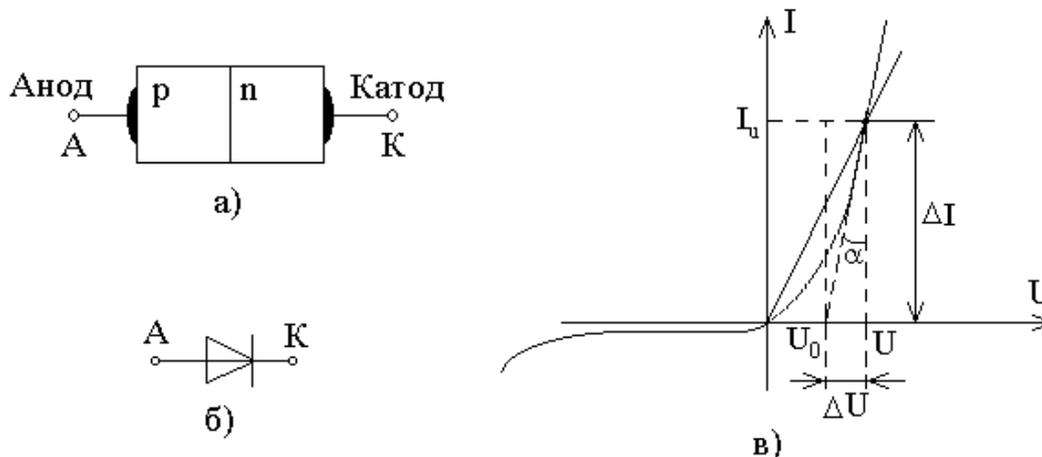


Рис. 1.1. Полупроводниковые диоды: а) – структура диода; б) – графическое изображение диода; в) – ВАХ диода

Поскольку на начальном участке прямой ветви вольтамперной характеристики диод имеет большое сопротивление, то обычно прямую ветвь аппроксимируют в виде двух отрезков прямых (пунктир на рис. 1.1, в), что позволяет определить напряжение отсечки – U_0 , а также дифференциальное сопротивление диода, которое определяется по формуле (1.2):

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \text{tg} \alpha \quad (1.2)$$

При линеаризации характеристики напряжение на диоде в прямом направлении описывается уравнением (1.3):

$$U = U_0 + R_{\text{диф}} \cdot I \quad (1.3)$$

Если увеличивать напряжение, приложенное в обратном направлении к диоду, то сначала обратный ток будет изменяться незначительно, а затем, при определенной величине $U_{\text{Л}}$ начнет его быстрое увеличение (рис. 1.2), что говорит о начале пробоя р-п-перехода. В большинстве случаев этот режим является нерабочим режимом, опасным для диода. Поэтому в паспортных данных диода всегда указывается предельно допустимое обратное напряжение $U_{\text{Л}}$ (напряжение лавинообразования), соответствующее началу пробоя р-п-перехода.

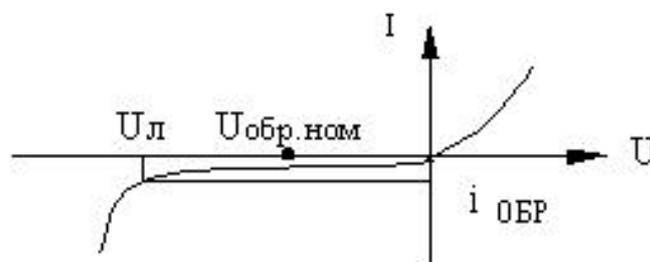


Рис. 1.2. Обратная ветвь вольтамперной характеристики диода

Номинальное значение обратного напряжения $U_{обр,ном}$ составляет обычно $0,5 U_{л}$ и определяет класс прибора по напряжению. Так, класс 1 соответствует 100 В обратного напряжения, класс 2–200 В и т. д.

Силовые диоды характеризуются системой статических, динамических и предельных параметров.

К статическим параметрам относятся:

- статическое сопротивление диода $R_{ст} = U/I$ (рис. 1.1, в);
- номинальное значение прямого тока $I_{пр,ном}$;
- номинальное значение обратного тока $I_{обр,ном}$;
- номинальное значение обратного напряжения $U_{обр,ном}$;
- номинальное значение прямого падения напряжения $U_{пр,ном}$;
- напряжение отсечки U_0 ;

Основные **статические параметры** диодов и стабилитронов, такие как пороговое напряжение U_0 , прямое падение напряжения $U_{пр}$, дифференциальное сопротивление $R_{диф}$, обратный ток $I_{обр}$, напряжение стабилизации стабилитрона $U_{ст}$, можно определить по вольтамперной характеристике, снятой на **постоянном** или **медленно изменяющемся** токе.

К динамическим параметрам относятся:

- дифференциальное сопротивление $R_{диф}$;
- скорость нарастания прямого тока di/dt ;
- скорость нарастания обратного напряжения dU/dt ;
- время восстановления обратного напряжения $t_{вост}$;
- предельная частота f_{max} .

Динамические параметры определяются в переходных режимах работы диода. Переключение диода из закрытого состояния в открытое происходит не мгновенно. Это можно наблюдать на экране осциллографа, если приложить к диоду напряжение прямоугольной формы высокой частоты (рис. 1.3).

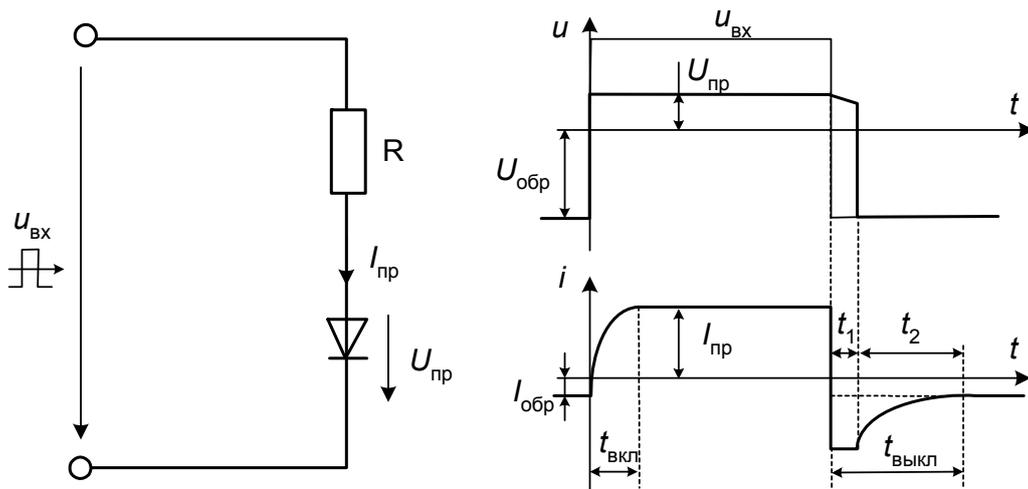


Рис. 1.3. Схема (а) и осциллограммы (б), характеризующие частотные характеристики диода

Диоды Шотки используют переход металл-полупроводник в качестве барьера Шотки (вместо р-п перехода, как у обычных диодов). Барьер Шотки имеет меньшую электрическую ёмкость перехода, что позволяет заметно повысить рабочую частоту. В силовой электронике малое время восстановления позволяет строить выпрямители на частоты в сотни кГц и выше.

Отличие **стабилитрона** от выпрямительного диода заключается в относительно низком напряжении пробоя при обратном напряжении. Когда напряжение превышено, ток обратного направления возрастает (пробой Зенера). В выпрямительных диодах такой режим является аварийным, а стабилитрон, напротив, работает при таких условиях нормально, при условии, что обратный ток не превышает максимально допустимое значение $I_{обр.мах}$.

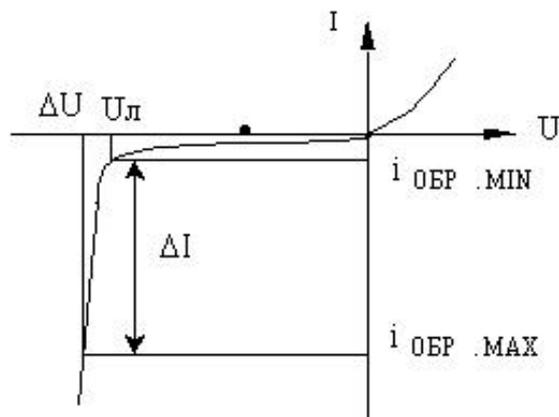


Рис. 1.4. ВАХ стабилитрона

В некоторых случаях этот режим пробоя используют для получения круто нарастающего участка ВАХ, когда малому приращению напряжения ΔU соответствует большое изменение тока ΔI (рис. 1.4). В стабилитронах в рабочем диапазоне изменение обратного тока от $i_{обр.min}$ до $i_{обр.max}$ напряжение на диоде остается почти неизменным, стабильным. Поэтому для стабилитронов рабочим является участок пробоя на обратной ветви ВАХ, а напряжение пробоя (напряжение стабилизации $U_{ст}$) является одним из основных параметров.

Стабилитроны находят широкое применение в качестве источников опорного напряжения, в стабилизаторах напряжения, в качестве ограничителей напряжения и др.

Программа работы

Задание

Снять двумя способами (на постоянном токе и на переменном токе с помощью осциллографа) вольтамперные характеристики (ВАХ) выпрямительных диодов (типа КД226, 1N5408), импульсных диодов (типа КД521, КД522, 1N4148), диода Шотки (типа 1N5819) и стабилитрона (типа КС456). Определить по ВАХ параметры диодов и стабилитрона.

Порядок работы

Опыт № 1. Регистрация прямой ветви ВАХ выпрямительного диода КД226, импульсного диода КД522 и диода Шотки 1N5819

1. Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 1.5, а), исследуя диод КД226. Монтажная схема изображена на рис. 1.6. **Обратите внимание, что вольтметр в этой схеме подключён к точке «В» (после амперметра) и на его показания не влияет падение напряжения на амперметре, которое соизмеримо с прямым падением напряжения на диоде. В то же время ток через вольтметр несоизмеримо мал с прямым током диода и не вносит заметной погрешности в показания амперметра.** Подайте на вход регулируемое постоянное напряжение от источника регулируемого напряжения. Ручку потенциометра этого источника повернуть **против часовой стрелки до упора.**

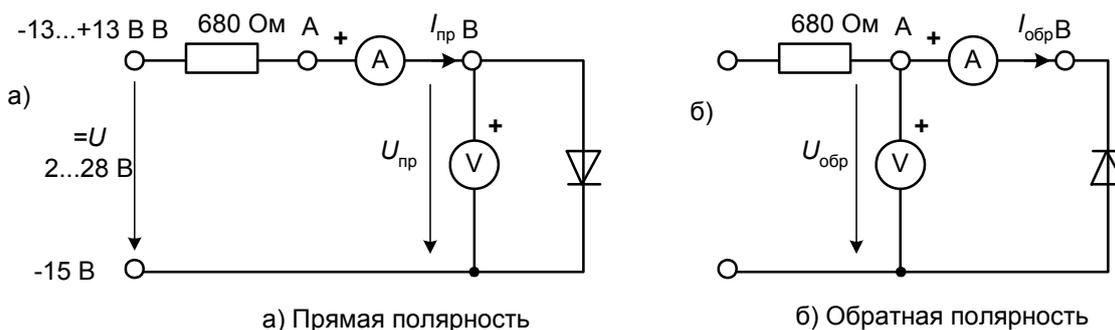


Рис. 1.5. Схема для регистрации прямой (а) и обратной (б) ветвей ВАХ диодов

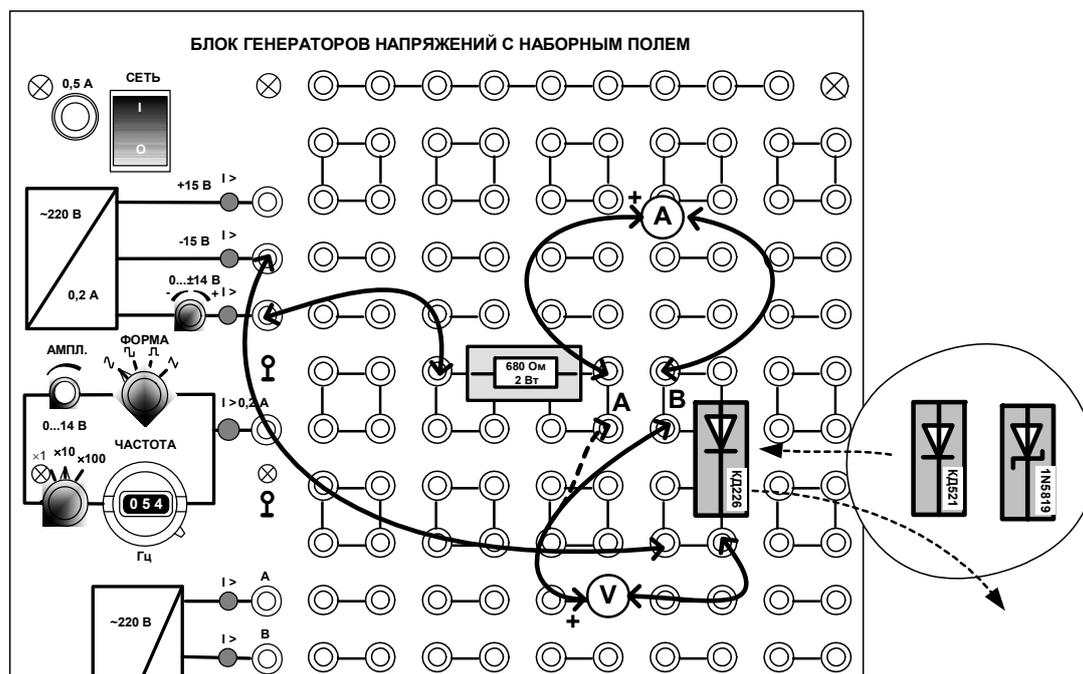


Рис. 1.6. Монтажная схема

2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».

3. Поворачивая ручку потенциометра, устанавливайте токи, указанные в таблице 1.1, фиксируя значения напряжений по результатам измерений в таблице 1.1.

Таблица 1.1

I _{пр} , мА		2	5	10	20	30	40
U _{пр} , В	КД226						
	КД522						
	1N5819						
	КС456						

4. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».
5. Пункты 1-4 программы работы повторите для импульсного диода КД522 и для диода Шотки 1N5819, заполните соответствующие поля в таблице 1.1.
6. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».

Опыт № 2. Регистрация обратной ветви ВАХ выпрямительного диода КД226, импульсного диода КД522 и диода Шотки 1N5819

1. Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 1.5, б), исследуя диод КД226, включенный в обратном направлении. *Обратите внимание, что вольтметр в этой схеме подключён к точке «А» (до амперметра). В этой схеме через амперметр не протекает ток вольтметра, который соизмерим и даже больше обратного тока через диод. В то же время падение напряжения на амперметре ничтожно мало по сравнению с обратным напряжением на диоде.* Подайте на вход регулируемое постоянное напряжение от источника регулируемого напряжения. Ручку потенциометра этого источника поверните против часовой стрелки до упора.
2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».
3. Поворачивая ручку потенциометра, устанавливайте напряжения, указанные в таблице 1.2, фиксируя значения токов по результатам измерений в таблице 1.2.

Таблица 1.2

U _{ОБР} , В		2	5	10	20	25	30
I _{ОБР} , мкА	КД226						
	КД522						
	1N5819						

4. Опыт повторите для импульсного диода КД522 и для диода Шотки 1N5819, заполните соответствующие поля в таблице 1.2.
5. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».
6. По данным таблиц 1.1 и 1.2 постройте ВАХ диодов на рисунке, аналогичном рис. 1.7.

Опыт № 3. Регистрация прямой ветви ВАХ стабилизатора КС456

1. Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 1.5, а) или монтажной схеме (рис. 1.6), но, заменив диод на стабилизатор КС456, а резистор **680 Ом** на **100 Ом**. Ручку потенциометра источника напряжения поверните **против часовой стрелки до упора**.

2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».

3. Поворачивая ручку потенциометра, устанавливайте токи, указанные в таблице 1.1, фиксируя значения напряжений по результатам измерений в таблице 1.1.

4. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».

Опыт № 4. Регистрация обратной ветви ВАХ стабилизатора КС456

1. Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 1.5, б) или монтажной схеме (рис. 1.6), но, заменив резистор **680 Ом** на **100 Ом**, а диод – на стабилизатор КС456, и включив стабилизатор в обратном направлении. Ручку потенциометра источника напряжения поверните **против часовой стрелки до упора**.

2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».

3. Поворачивая ручку потенциометра, устанавливайте напряжения, указанные в таблице 1.3. Увеличить число фиксируемых точек характеристики, начиная с 5 В. Для каждого значения напряжения измерить ток. Результаты измерений занести в таблицу 3.

Обратный ток не должен превышать 120 мА!

4. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».

5. По данным таблиц 1.1 и 1.3 построить ВАХ стабилизатора на рисунке, аналогичном рис. 1.7.

6. По ВАХ или таблице определить напряжение стабилизации $U_{ст}$.

Таблица 1.3

$U_{обр}$, В	0	2	4	5	...			
$I_{обр}$, мА						30	80	120

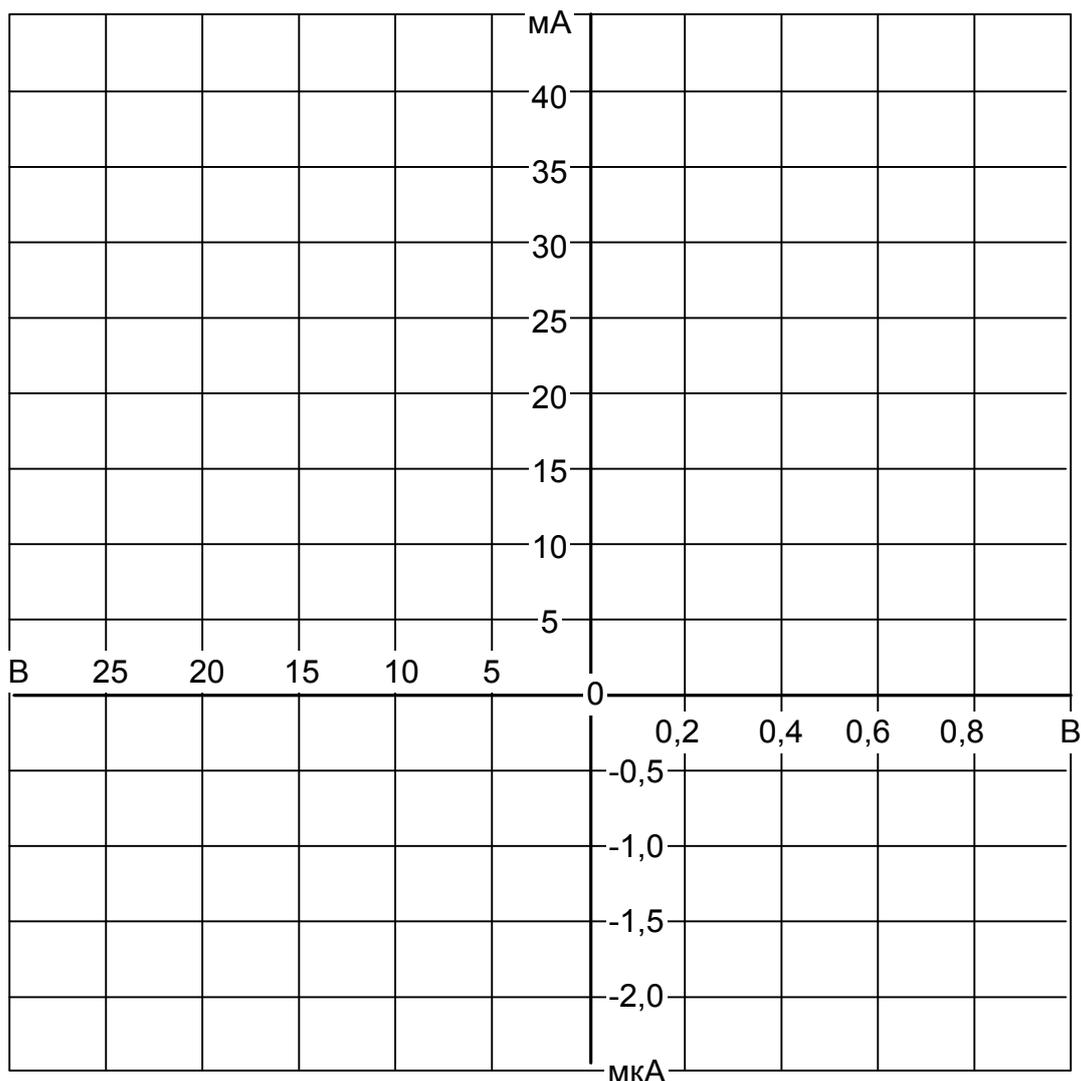


Рис. 1.7. Статические ВАХ диодов

Опыт № 5. Снятие ВАХ стабилитрона КС456 на переменном токе

1. Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 1.8) или монтажной (рис. 1.9). Подайте на вход синусоидальное напряжение от генератора напряжения специальной формы частотой 0,5...1 кГц (по заданию преподавателя) максимальной амплитуды и отрегулируйте развёртку по времени, синхронизацию и усиление по двум каналам так, чтобы на экране помещались 1,5-2 периода кривых тока и напряжения.

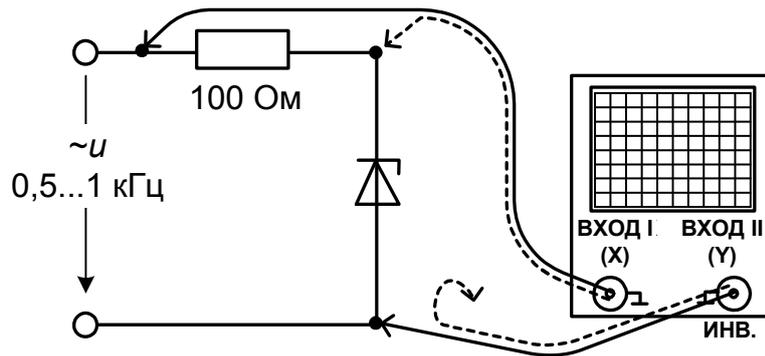


Рис. 1.8. Принципиальная схема для регистрации ВАХ на переменном токе

Измерительные приборы в схему не включайте, так как они могут создать дополнительные паразитные ёмкости. Включите инвертирование сигнала по каналу II, чтобы отклонение луча вверх соответствовало прямому току через диод.

2. Переключая множитель частоты $\times 1$, $\times 10$, $\times 100$, и регулируя при каждом переключении длительность развёртки осциллографа, наблюдайте за изменением кривой тока, сохраните полученные изображения для дальнейшего анализа. В выводе объясните результаты (имейте в виду, что в положении $\times 100$ выходное напряжение генератора снижается примерно в 2 раза).

3. Включите и настройте осциллограф в режиме X–Y. При этом на экране появится изображение **динамической вольтамперной характеристики** диода: прямой ток по оси Y вверх, прямое падение напряжения – по оси X вправо.

4. Сохраните изображение с экрана осциллографа.

5. Определите по осциллограмме напряжение стабилизации, напряжение на стабилитроне при прямом токе, дифференциальное сопротивление в середине диапазона стабилизации (при токе 70-80 мА).

6. Увеличьте частоту в 10 и 100 раз и посмотрите, как изменится вольтамперная характеристика. Объясните почему.

Опыт № 6. Снятие ВАХ диодов на переменном токе

1. Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 1.8) или монтажной (рис. 1.9), но заменив резистор **100 Ом на 680 Ом**, а **стабилитрон – на соответствующий диод**. Подайте на вход синусоидальное напряжение от генератора напряжения специальной формы частотой 0,5...1 кГц (по заданию преподавателя) половинной амплитуды (установите регулятор амплитуды примерно в среднее

положение – 4–6В) и отрегулируйте развёртку по времени, синхронизацию и усиление по двум каналам так, чтобы на экране помещались 1,5–2 периода кривых тока и напряжения. Измерительные приборы в схему не включайте, так как они могут создать дополнительные паразитные ёмкости. Включите инвертирование сигнала по каналу II, чтобы отклонение луча вверх соответствовало прямому току через диод.

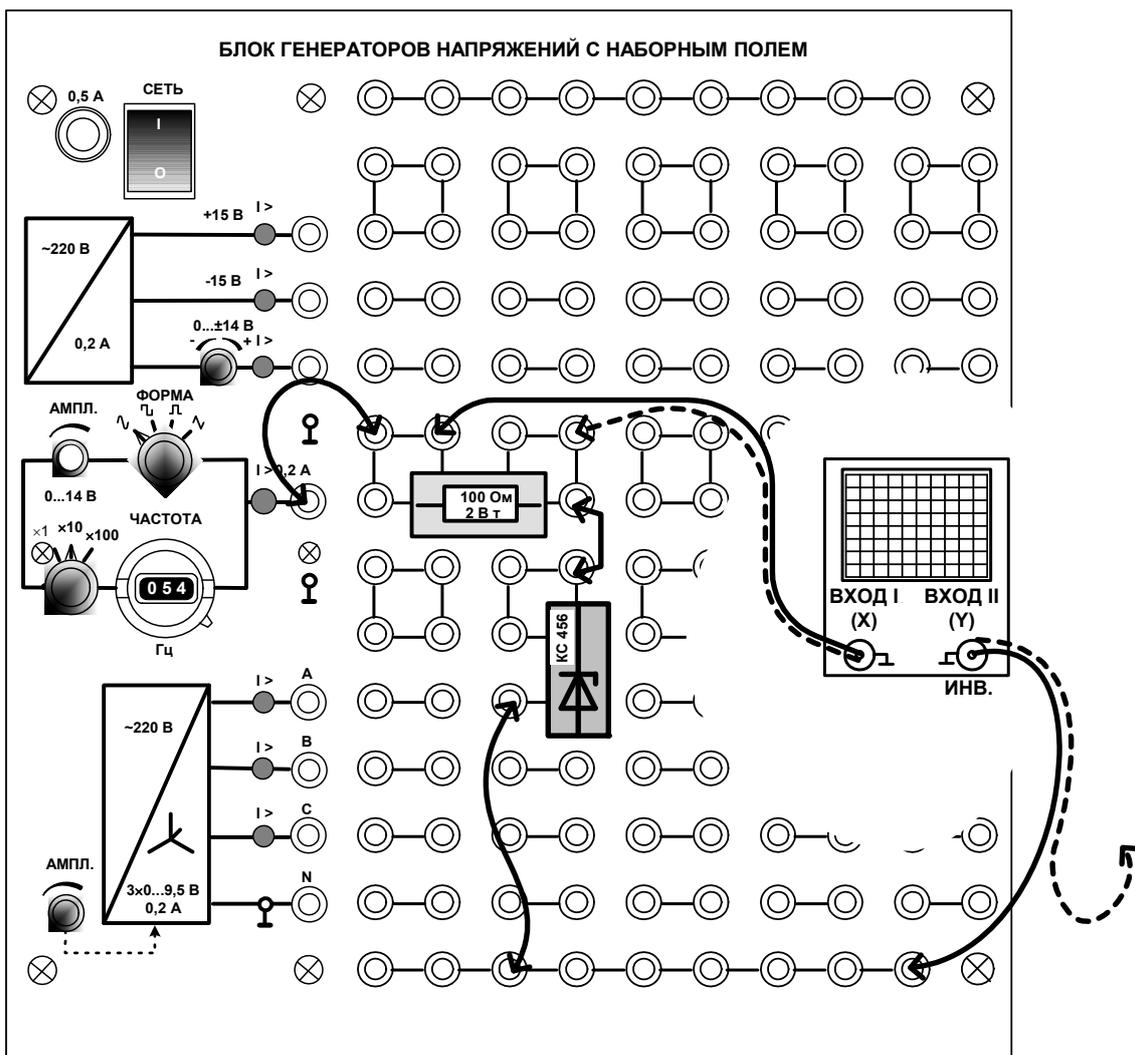


Рис. 1.9. Монтажная схема

2. Переключая множитель частоты $\times 1$, $\times 10$, $\times 100$, и регулируя при каждом переключении длительность развёртки осциллографа, наблюдайте за изменением кривой тока, сохраните полученные изображения для дальнейшего анализа. В выводе объясните результаты (имейте в виду, что в положении $\times 100$ выходное напряжение генератора снижается примерно в 2 раза).

3. Переключите осциллограф в режим $X-Y$. При этом на экране появится изображение *динамической ВАХ* диода: прямой ток по оси Y вверх, прямое падение напряжения – по оси X вправо.

4. Снова попереключайте множитель частоты, наблюдая за изменением динамической ВАХ диода. Сохраните изображения с экрана осциллографа. Объясните в выводе, почему при низкой частоте динамическая ВАХ совпадает со статической, а при высокой – не совпадает.

5. Повторите эти опыты с импульсным диодом и с диодом Шотки. Объясните отличия.

6. Снова включите в цепь выпрямительный диод, переключите осциллограф в режим развёртки и установите на входе прямоугольное двухполярное напряжение частотой примерно 40...50 кГц и небольшой амплитуды (2..3В), чтобы меньше искажалось выходное напряжение генератора.

7. Настройте развёртку, сохраните изображение осциллограммы и определите по осциллограмме время включения $t_{\text{ВКЛ}}$ и время выключения $t_{\text{ВЫКЛ}}$.

Контрольные вопросы

1. Объясните выпрямляющее действие диода.
2. Приведите основные параметры выпрямительного диода.
3. Как влияет температура на характеристики диодов?
4. Как изменяется вольтамперная характеристика диода при увеличении частоты и почему?
5. Как влияет температура на стабилитрон?
6. Чем определяется рабочая область стабилитрона?
7. В чем заключается основное свойство стабилитрона?
8. Как включается стабилитрон в схемах?
9. Почему у диода Шотки пороговое напряжение меньше, чем у выпрямительного диода, а обратный ток – больше?
10. Какой из испытанных диодов имеет наименьшее быстродействие и почему?

Содержание отчёта

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень оборудования.

4. Исследуемые схемы.
5. Результаты исследований с таблицами.
6. Статические ВАХ диодов и стабилитрона по эксперименту на постоянном токе (опыты 1-4) построить на одном рисунке с разными масштабами для прямых и обратных ветвей ВАХ. Обработать полученные графики и определить основные параметры диодов и стабилитрона.
7. Динамические ВАХ (опыты 5-6) и графические построения, позволяющие определить основные параметры диодов и стабилитрона.
8. Основные параметры рассчитать как для статических, так и для динамических ВАХ:

- Прямое статическое и дифференциальное сопротивления

диодов: $R_{ст.пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}$ в двух точках: – при малом напряжении

($U_{пр} = 0,1$ В);

– при среднем напряжении (в середине восходящего участка ВАХ)

$$R_{диф.пр} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}};$$

- Прямое статическое и дифференциальное сопротивления стабилитрона:

$R_{ст.пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}$ в двух точках: – при малом напряжении

($U_{пр} = 0,1$ В);

– при среднем напряжении (в середине восходящего участка ВАХ)

$$R_{диф.пр} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}};$$

- Обратное статическое и дифференциальное сопротивления

диодов: $R_{ст.обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}}$ при $U_{обр} = 20$ В;

$$R_{диф.обр} = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}}$$

- Обратное статическое и дифференциальное сопротивления стабилитрона (в середине диапазона стабилизации):

$$R_{ст.ОБР} = \frac{U_{ОБР}}{I_{ОБР}} \text{ при } I_{ОБР} = 60 \text{ мА};$$

$$R_{диф.ОБР} = \frac{\Delta U_{ОБР}}{\Delta I_{ОБР}}$$

9. Из осциллограмм определить для тех же значений:

$U_{ст} =$ В, $U_0 =$ В и $R_{диф} =$ Ом – для стабилитрона;

$U_0 =$ В и $R_{диф} =$ Ом – для диодов.

10. Выводы.

11. Ответы на контрольные вопросы

Лабораторная работа № 2 «ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ В ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ»

Цель работы: исследование характеристик и параметров выпрямительных схем, сглаживающих фильтров и стабилизаторов напряжения, определение параметров различных выпрямителей и сравнение их между собой.

Общие сведения

Электронные приборы и устройства требуют для своего питания стабильного напряжения постоянного тока. В большинстве практических случаев такое напряжение получают из переменного напряжения сети с помощью вторичных источников питания, состоящих как правило (рис. 2.1) из следующих элементов: силовой трансформатор Tr , выпрямитель B , сглаживающий фильтр Φ и стабилизатор напряжения $Ст$.

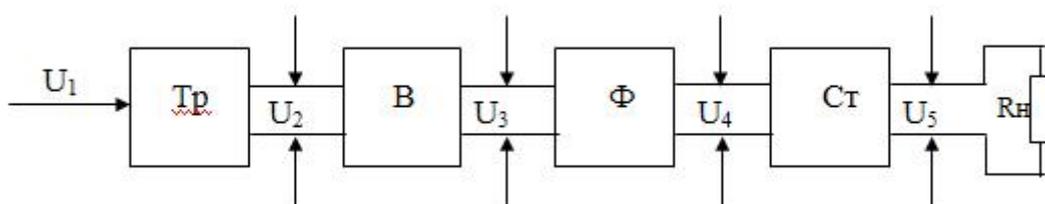


Рис. 2.1. Структурная схема вторичного источника электропитания

Силовой трансформатор предназначен для получения необходимой величины переменного напряжения из напряжения сети, а также для гальванической развязки с сетью; Выпрямитель (чаще всего выполненный на полупроводниковых диодах) преобразует напряжение переменного тока в пульсирующее напряжение постоянного тока; сглаживающий фильтр, подключаемый к выходу выпрямителя, уменьшает пульсацию выходного напряжения.

Если к выходному напряжению предъявляются высокие требования по стабильности при колебаниях напряжения сети и тока нагрузки, то в источник питания вводят стабилизатор напряжения.

На рис. 2.2 представлена схема **однополупериодного выпрямителя** с полупроводниковым выпрямительным диодом VD , установившийся ток в котором может протекать только при

положительной полярности приложенного к диоду напряжения. При изменении полярности напряжения диод запирается и ток прекращается. В результате при синусоидальном приложенном напряжении $u_{вх}$ в нагрузке протекает пульсирующий ток одного направления. Такую же форму имеет и выпрямленное напряжение на нагрузке u_d . Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяются сглаживающие фильтры. Простейшим фильтром является конденсатор, подключенный параллельно нагрузке. Тогда при открытом состоянии диода конденсатор заряжается, а при закрытом – разряжается на нагрузку. Ток и напряжение на нагрузке становятся непрерывными, пульсации уменьшаются, и увеличивается среднее значение напряжения на нагрузке. Кривая $u_d(t)$ для этого случая показана на рис. 2.2 пунктиром.

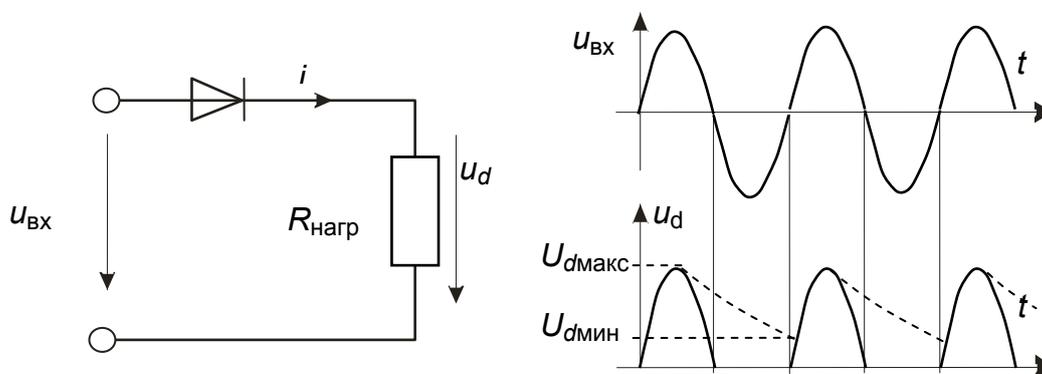


Рис. 2.2. Схема (а) и осциллограммы напряжений входного и выходного напряжений однофазного однополупериодного выпрямителя

При исследовании выпрямителей применяются следующие обозначения:

$u_{вх}$, $U_{вх}$, $U_{вхmax}$ – мгновенное, действующее и амплитудное значения синусоидального входного напряжения;

u_d , U_d , U_{dmax} , U_{dmin} – мгновенное, среднее, максимальное, минимальное значения выходного (выпрямленного) напряжения;

$U_{max\sim}$ – амплитуда переменной составляющая выпрямленного напряжения, которая в первом приближении может быть определена из графика (рис. 2.2) по формуле:

$$U_{max\sim} \cong \frac{U_{dmax} - U_{dmin}}{2};$$

f_{Π} – частота пульсаций выходного напряжения;

$m = f_{\Pi} / f_{вх}$ – число пульсаций выпрямленного напряжения за один период напряжения питания;

$K_{\Pi} = \frac{U_{\max\sim}}{U_d}$ – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения.

В однополупериодном выпрямителе без фильтра:

$$U_d = \frac{U_{\text{вхmax}}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{вх}}}{\pi} \cong 0,45 \cdot U_{\text{вх}}; \quad U_{\max\sim} \cong \frac{U_{\text{вхmax}}}{2}; \quad K_{\Pi} = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

Двухполупериодный **мостовой выпрямитель** состоит из четырёх диодов (рис. 2.3). При положительном полупериоде входного напряжения диоды Д2 и Д4 открыты, и через них течёт ток в нагрузку. Диоды Д1 и Д3 в этот момент закрыты. При отрицательном полупериоде диоды Д2 и Д4 закрываются, но открываются диоды Д1 и Д3, пропуская ток в нагрузку в том же направлении. По сравнению с однополупериодным выпрямителем в двухполупериодном в два раза увеличивается постоянная составляющая выпрямленного напряжения и в два раза увеличивается частота пульсации, что облегчает задачу сглаживания пульсаций фильтрами.

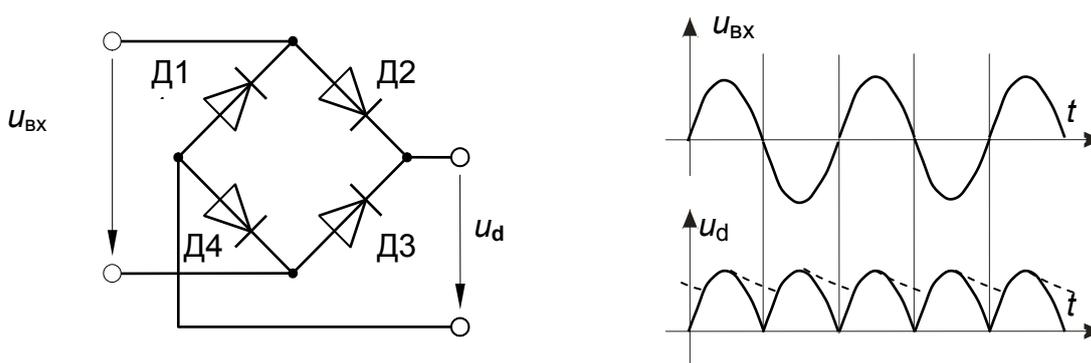


Рис. 2.3. Схема (а) и осциллограммы напряжений входного и выходного напряжений однофазного мостового выпрямителя

В двухполупериодном выпрямителе без фильтра:

$$U_d = \frac{2U_{\text{вхmax}}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_{\text{вх}}}{\pi} \cong 0,9 \cdot U_{\text{вх}}; \quad U_{\max\sim} \cong \frac{U_{\text{вхmax}}}{2}; \quad K_{\Pi} = \frac{\pi}{4} = 0,785.$$

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения между выпрямителем и нагрузкой включают **сглаживающий фильтр**. Простейшими сглаживающими фильтрами являются емкостной и индуктивный сглаживающие фильтры.

В качестве **емкостного фильтра** (рис. 2.4) используется конденсатор. При превышении напряжения U_2 над напряжением конденсатора U_C , выходной ток выпрямителя I_D заряжает конденсатор током I_{C3} и питает нагрузку. Если напряжение U_2 становится меньше U_C , то ток разряда I_{CP} протекает из конденсатора в нагрузку. Таким

образом, конденсатор является аккумулятором энергии, который поддерживает постоянное напряжение на нагрузке, поэтому он подключается параллельно нагрузке.

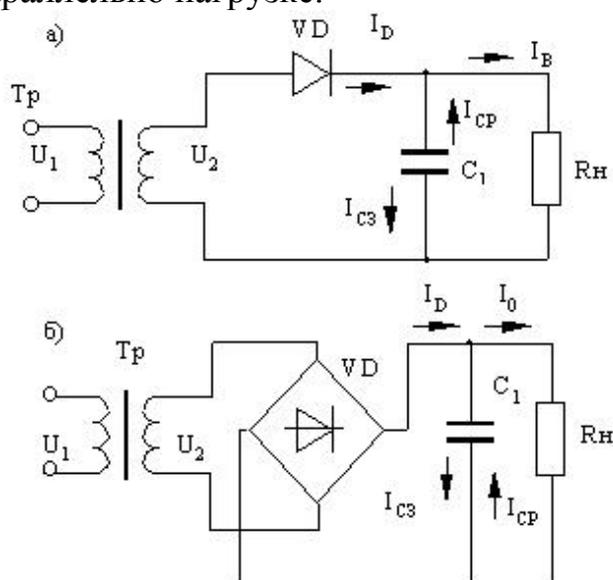


Рис. 2.4. Схемы однофазных (а) – однополупериодного, б) – мостового выпрямителей с емкостным фильтром

Качество сглаживания фильтра определяется **коэффициентом сглаживания** $K_{СГЛ}$:

$$K_{СГЛ} = \frac{K_{ПВХ}}{K_{ПВЫХ}},$$

где $K_{ПВХ}$ и $K_{ПВЫХ}$ – коэффициенты пульсаций на входе и выходе фильтра соответственно.

При работе выпрямителя с **индуктивным сглаживающим фильтром** (рис. 2.5) сглаживание пульсаций происходит потому, что на интервале нарастания тока нагрузки ($0 \div t_1^|$) в обмотке дросселя L возникает Э.Д.С. самоиндукции $e_x = -L \frac{di}{dt}$, препятствующая росту тока; в точке $t_1^|$ ток достигает максимума, а Э.Д.С. самоиндукции становится равной 0; а на интервале $t_1^| \div t_2^|$ ток нагрузки убывает, а Э.Д.С. самоиндукции меняет свой знак на противоположный и поддерживает убывающий ток за счет энергии, накопленной в магнитном поле дросселя на интервале нарастания тока ($0 \div t_1^|$). Индуктивный фильтр включается последовательно с нагрузкой, так как он стабилизирует ток, протекающий через нагрузку. Таким образом, ток

нагрузки, а, следовательно, и напряжение нагрузки будут иметь более сглаженную форму.

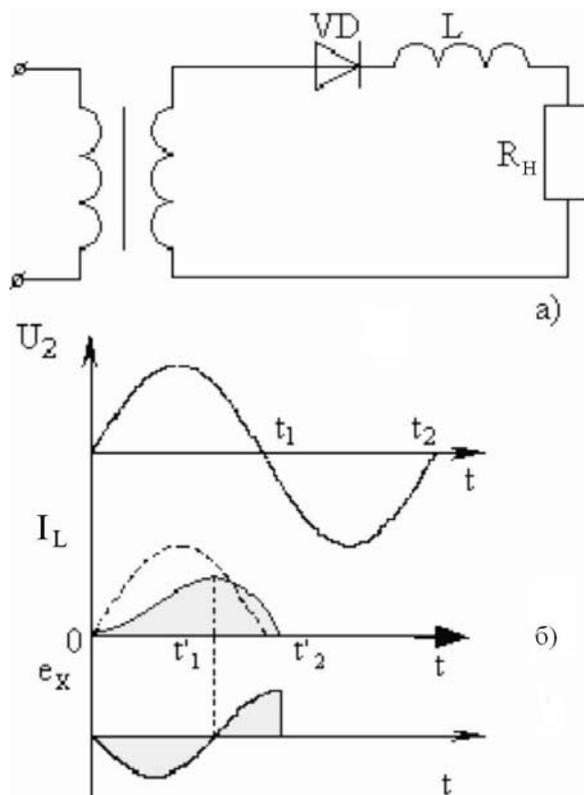


Рис. 2.5. Схема (а), осциллограммы (б) однополупериодного выпрямителя с индуктивным фильтром

Возможно объединение С-фильтра и L-фильтра в Г-образный LC-фильтр, а также в многозвенную схему П-образного фильтра (рис.2.6 а, б). При этом общий коэффициент сглаживания такого фильтра определяется как произведение коэффициентов сглаживания отдельных фильтров.

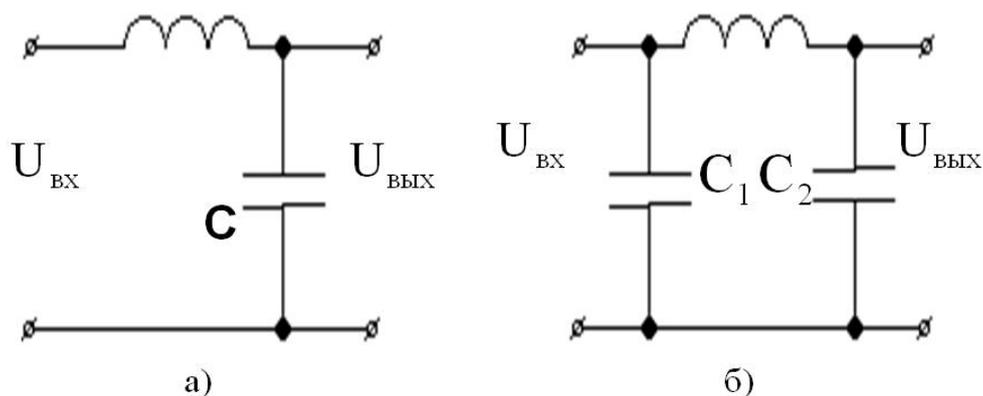


Рис. 2.6. Схемы многозвенных фильтров: а) Г-образного фильтра, б) П-образного фильтра

Для того, чтобы напряжение на нагрузке не зависело от колебаний напряжения источника питания, а также от изменения величины самой нагрузки, в схемы электропитания вводятся **стабилизаторы напряжения**.

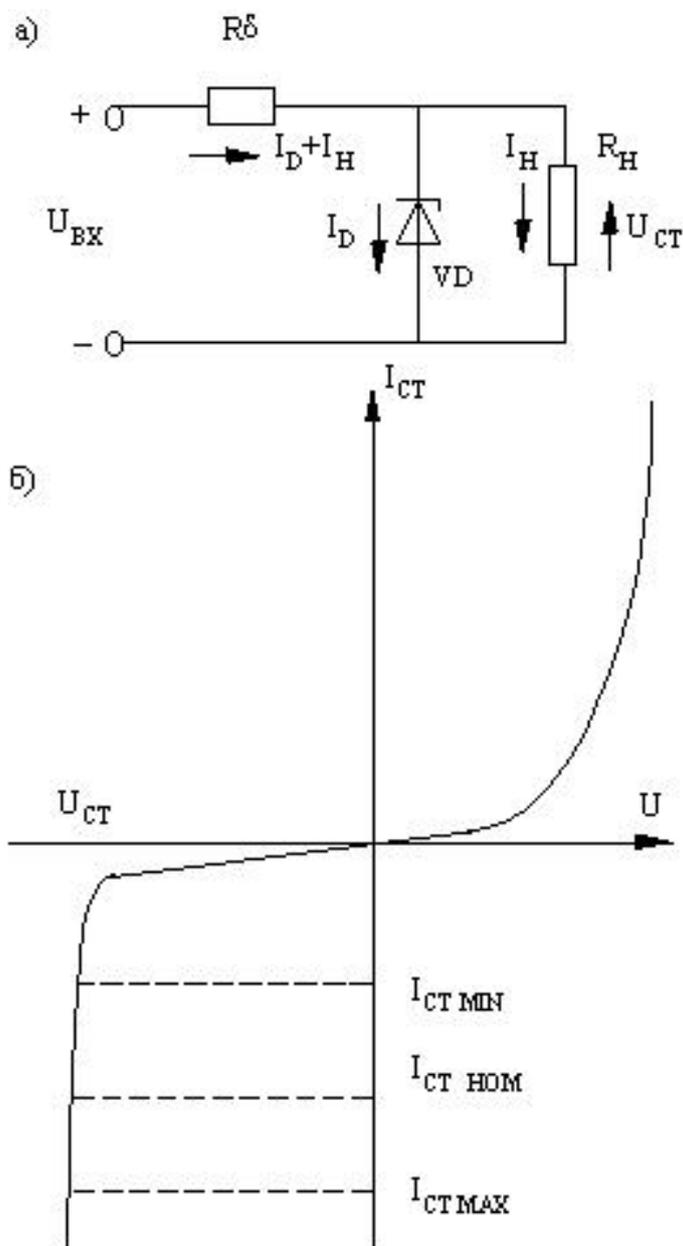


Рис. 2.7. Схема параметрического стабилизатора (а) и вольтамперная характеристика стабилитрона (б)

Простейшим электронным стабилизатором является **параметрический стабилизатор** (рис. 2.7, а), состоящий из балластного сопротивления R_{δ} и стабилитрона VD . Он устанавливается в источнике питания между нагрузкой и выпрямителем со сглаживающим фильтром, если таковой имеется. В этой схеме

используется свойство обратно смещенного стабилитрона сохранять напряжение в области пробоя практически неизменным при значительных изменениях протекающего через него тока (рис. 2.7, б, обратная ветвь ВАХ стабилитрона в области $U_{СТ}$). При отклонении $U_{ВХ}$ от номинального значения почти все приращение входного напряжения попадает на R_6 , а выходное напряжение практически не меняется. При изменении тока нагрузки I_H ($U_{ВХ} = \text{const}$) происходит перераспределение тока между стабилитроном и нагрузкой (изменяется $I_{СТ}$) почти без изменения общего тока. Напряжение на нагрузке остается практически постоянным, так как нагрузку включают параллельно стабилитрону. Чтобы избежать перегрузки, последовательно со стабилитроном включают **балластный резистор**. Его сопротивление определяется по формуле:

$$R_6 = \frac{(U_{ВХ} - U_{СТ})}{(I_{СТ} + I_H)},$$

где $U_{ВХ}$ – входное напряжение стабилизатора; $U_{СТ}$ – напряжение стабилизации стабилитрона; $I_{СТ}$ – допустимый ток стабилизации; I_H – ток в резисторе нагрузки R_H , включенном параллельно стабилитрону.

Качество стабилизации оценивается **коэффициентом стабилизации** при постоянном токе нагрузки, вычисляемом по формуле:

$$K_{СТ} = \frac{\Delta U_{ВХ}}{U_{ВХ.НОМ}} : \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ.НОМ}},$$

где $\Delta U_{ВЫХ}$ – приращение $U_{ВЫХ}$ при изменении $U_{ВХ}$ на величину $\Delta U_{ВХ}$; $U_{ВХ.НОМ}$; $U_{ВЫХ.НОМ}$ – номинальное значение напряжений на входе и выходе стабилизатора.

Программа работы

Задание

Исследовать характеристики и параметры однополупериодного и двухполупериодного однофазных выпрямителей, ёмкостного фильтра и параметрического стабилизатора напряжения.

Порядок выполнения эксперимента

Опыт № 1. Регистрация характеристик и осциллограмм однофазного однополупериодного выпрямителя

1. Соберите цепь согласно принципиальной (рис. 2.8) или монтажной схеме (рис. 2.9) сначала без сглаживающего фильтра ($C=0$). Включите мультиметры: $V1$ – для измерения действующего значения

синусоидального напряжения, V2 – для измерения постоянного напряжения.

2. Включите и настройте осциллограф. Установите развертку 5 мс/дел.

3. Сделайте измерения и запишите в табл. 2.1. значения: $U_{ВХ}$ – по мультиметру V1, U_d – по мультиметру V2, $U_{d\max}$ и $U_{d\min}$ – по осциллографу, $m = f_{П} / f_{ВХ}$. Сохраните на носитель информации или перерисуйте осциллограмму выходного напряжения.

4. Рассчитайте и запишите в табл. 2.1 значения $U_d / U_{ВХ}$, $U_{\max\sim}$ и $K_{П}$.

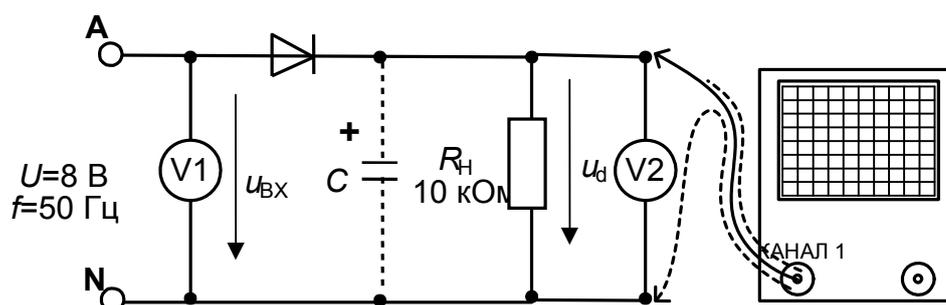


Рис. 2.8. Принципиальная схема для исследования однофазного однополупериодного выпрямителя

5. Параллельно нагрузочному резистору $R_{Н}$ подключите сглаживающие конденсаторы C с емкостями, указанными в табл. 2.1 (не ошибитесь с полярностью при подключении электролитических конденсаторов!), повторите измерения и вычисления.

Таблица 2.1

$C, \text{ мкФ}$	0	1	10	100
$U_{ВХ}, \text{ В}$				
$U_d, \text{ В}$				
$U_{d\max}, \text{ В}$				
$U_{d\min}, \text{ В}$				
m				
$U_d / U_{ВХ}$				
$U_{\max\sim}$				
$K_{П}$				

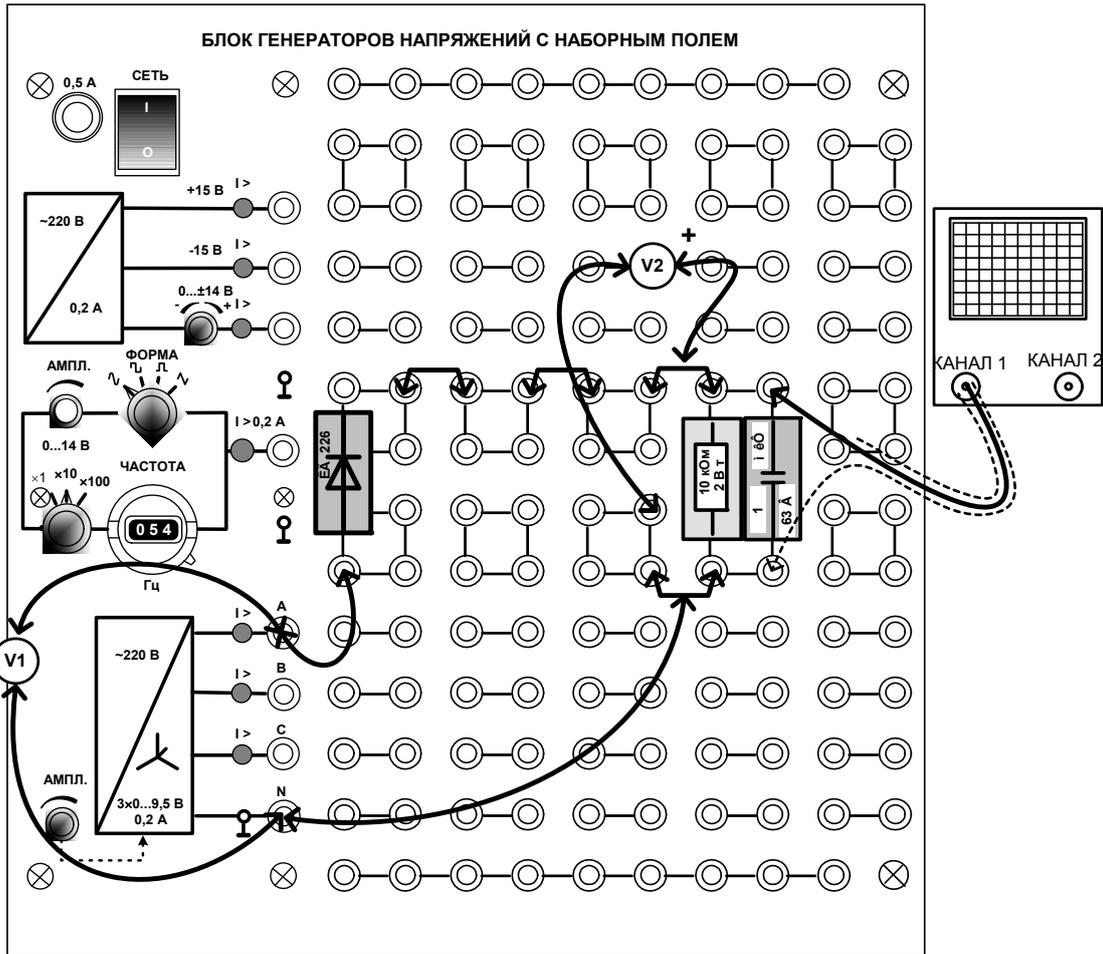


Рис. 2.9. Монтажная схема для исследования однофазного однополупериодного выпрямителя

Опыт № 2. Регистрация характеристик и осциллограмм однофазного двухполупериодного выпрямителя

1. Соберите цепь двухполупериодного мостового выпрямителя (рис. 2.10), повторите все измерения и вычисления. Результаты сведите в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$C, \text{мкФ}$	0	1	10	100
$U_{\text{BX}}, \text{В}$				
$U_d, \text{В}$				
$U_{d\text{max}}, \text{В}$				
$U_{d\text{min}}, \text{В}$				
m				
U_d / U_{BX}				
$U_{\text{max}\sim}$				
$K_{\text{П}}$				

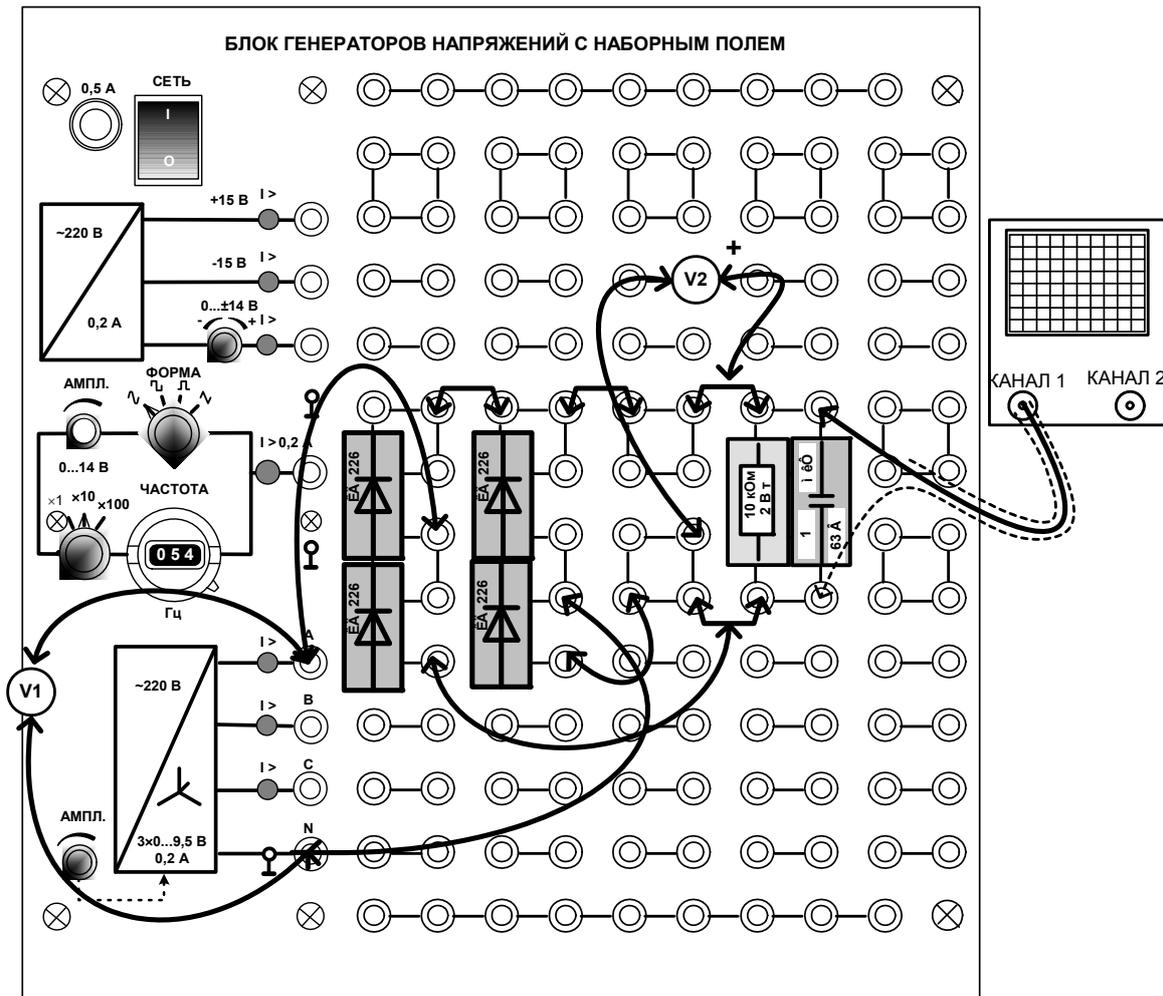


Рис. 2.10. Монтажная схема для исследования однофазного двухполупериодного выпрямителя

Опыт № 3. Регистрация характеристик и определение параметров параметрического стабилизатора

1. Соберите цепь параметрического стабилизатора согласно принципиальной схеме (рис. 2.11), сначала не включая в неё сопротивление нагрузки.
2. Включите генератор напряжений и, изменяя постоянное напряжение на входе стабилизатора от 0 до максимального значения 13...14 В, снимите зависимость выходного напряжения от входного на холостом ходу. Результаты записывайте в табл. 2.3.
3. Установите максимальное напряжение на входе и, включая различные сопротивление нагрузки, согласно табл. 2.4, снимите зависимость выходного напряжения стабилизатора от тока нагрузки.

4. На рис. 2.12, а и б постройте графики $U_{\text{ВЫХ}} (U_{\text{ВХ}})$ и $U_{\text{ВЫХ}} (I_{\text{Н}})$.
 5. На графиках укажите минимально допустимое входное напряжение, максимально допустимый ток нагрузки и определите коэффициенты стабилизации по напряжению и по току, приняв $U_{\text{ВХ НОМ}} = 8 \text{ В}$ и $I_{\text{Н.НОМ}} = 80 \text{ мА}$.

$$K_{\text{ст}U} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ НОМ}}} : \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ НОМ}}} = \frac{\delta U_{\text{ВХ}}}{\delta U_{\text{ВЫХ}}} = \dots\dots\dots$$

$$K_{\text{ст}I} = \frac{\Delta I_{\text{Н}}}{I_{\text{Н НОМ}}} : \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ НОМ}}} = \frac{\delta I_{\text{Н}}}{\delta U_{\text{ВЫХ}}} \dots\dots\dots$$

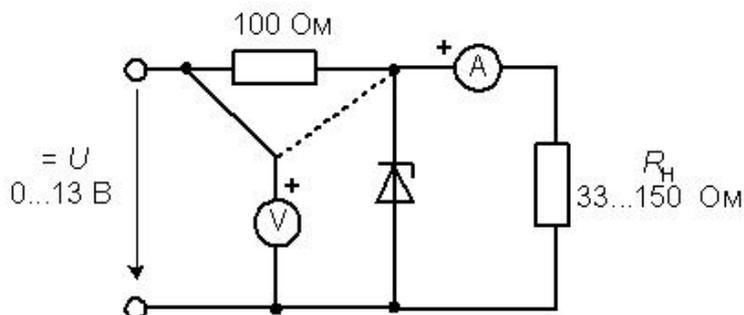


Рис. 2.11. Принципиальная схема параметрического стабилизатора

Таблица 2.3

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12	
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$								

Таблица 2.4

$R_{\text{Н}} \text{ Ом}$	∞	150	100	47+22	47+10	47	33+10	33
$I_{\text{Н}}, \text{мА}$	0 (х.х.)							
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$								

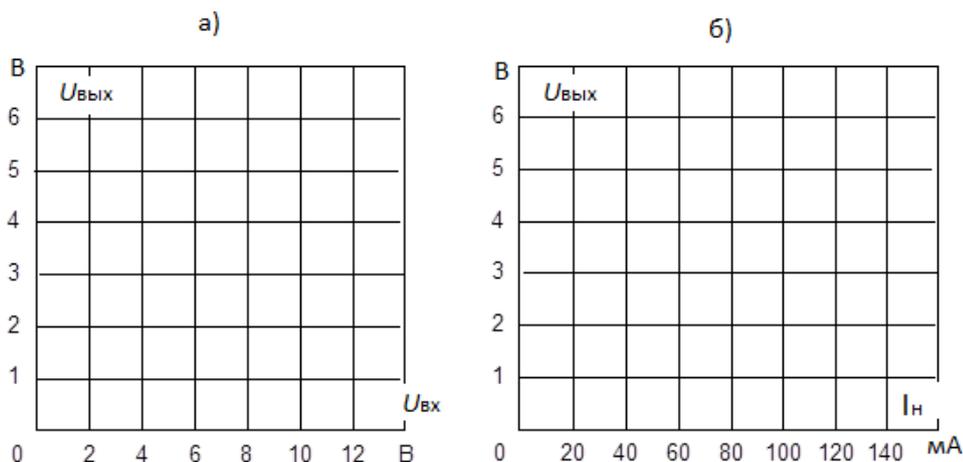


Рис. 2.12

Контрольные вопросы

1. Из каких основных элементов состоит вторичный источник питания?
2. Какое напряжение по форме и по роду тока получается на выходе выпрямителя?
3. Чем отличаются параметры выходного напряжения различных однофазных выпрямителей?
4. Сравните между собой схемы однофазных двухполупериодных выпрямителей (с выводом средней точки и мостовой) и выделите их достоинства и недостатки?
5. Как подключается емкостной фильтр в схему источника питания и почему?
6. В чём заключается принцип действия индуктивного фильтра?
7. Как изменяется коэффициент сглаживания при увеличении числа звеньев фильтра?
8. Как включается стабилитрон в схеме параметрического стабилизатора и почему?
9. Для чего в параметрическом стабилизаторе балластный резистор?
10. Определить величину балластного сопротивления, так, чтобы в нормальном режиме ток через стабилитрон был равен 80 мА, если напряжение питания параметрического стабилизатора напряжения 9 В; напряжение стабилизации стабилитрона 5,6 В; ток стабилизации – от 3 до 160 мА; сопротивление нагрузки – 100 Ом.

Содержание отчёта

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень оборудования.
4. Исследуемые схемы.
5. Схемы исследуемых выпрямителей, фильтров и стабилизатора напряжения.
6. Результаты исследований
 - 6.1. Таблицы с результатами измерений.
 - 6.2. Расчеты и характеристики.
 - 6.3. Осциллограммы выходного напряжения трансформатора, исследуемых выпрямителей без фильтров и с применением заданных типов фильтров, а также с параметрическим стабилизатором напряжения.
7. Выводы
8. Ответы на контрольные вопросы

Лабораторная работа №3 «ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРОВ»

Цель работы: Исследование статических вольтамперных характеристик динистора, управляемого тиристора и триодного симистора. Определение основных параметров тиристоров.

Общие сведения

Тиристоры – переключающие полупроводниковые приборы, имеющие четырёхслойную структуру. Они имеют два устойчивых состояния: открытое (проводящее) и закрытое (непроводящее). Они выпускаются с двумя или тремя выводами. В первом случае они называются **динисторами** (или диодными тиристорами) во втором – **тринисторами** (триодными или управляемыми тиристорами). Их условные обозначения показаны на рис. 3.1. Выводы обозначаются: А – анод, К – катод, УЭ – управляющий электрод. Производятся также **симисторы** – симметричные динисторы и тиристоры, которые могут проводить ток в обоих направлениях и эквивалентны двум динисторам или тиристорам, соединённым встречно – параллельно.

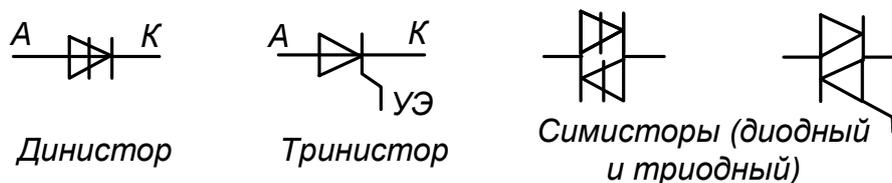


Рис. 3.1. Условные графические обозначения различных типов тиристоров

Четырёхслойная структура динистора представлена на рис. 3.2, а. Для уяснения принципа действия четырёхслойный прибор можно представить как два трёхслойных прибора (рис. 3.2, б) или два транзистора, соединённых как показано на рис. 3.2, в.

При прямом приложенном напряжении, показанном на рисунках, левый и правый **p – n** переходы открыты, а средний закрыт. Через тиристор протекает лишь незначительный ток неосновных носителей (рис. 3.2, г). По мере увеличения прямого напряжения энергия носителей заряда, проходящих через запертый **n1 – p2** увеличивается и при некотором напряжении ($U_{ВКЛ}$) возникает ударная ионизация атомов полупроводника в зоне **n1 – p2** перехода, ток резко возрастает, два транзистора (рис. 3.2, в) открываются, напряжение на тиристоре резко падает, и он переходит в открытое состояние. Вольтамперная характеристика открытого тиристора аналогична вольтамперной

характеристике диода. При снижении тока тиристор остаётся в открытом состоянии до некоторого небольшого тока, называемого током удержания ($I_{уд}$). Он несколько меньше тока включения, показанного на рис. 3.2, г.

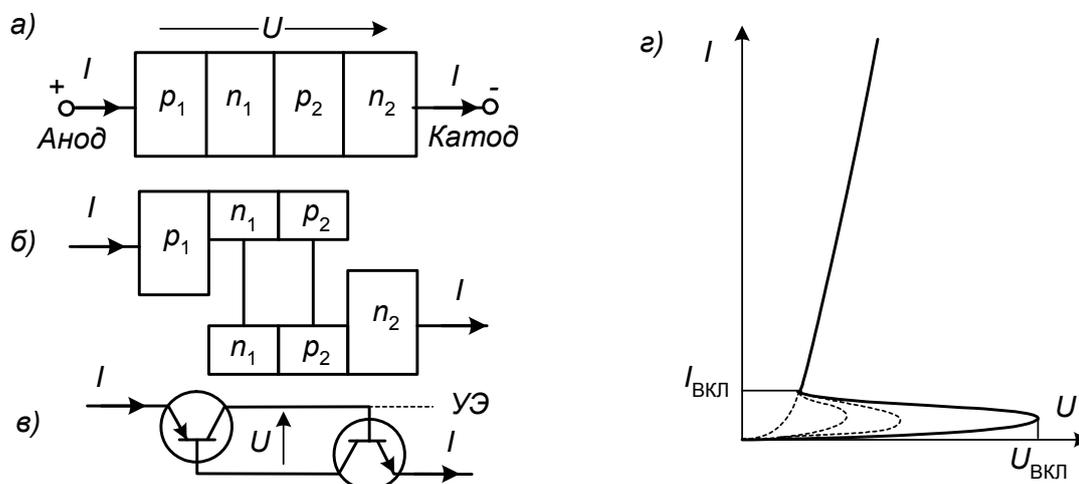


Рис. 3.2

Управляемые тиристоры имеют кроме основных выводов «Анод» и «Катод» третий вывод «Управляющий электрод». Он показан на рис. 3.2, в пунктиром. Подавая на него импульс тока положительной полярности, мы принудительно открываем один из транзисторов, второй транзистор также открывается, так как через его базу начинает протекать ток коллектора другого транзистора. Напряжение включения уменьшается, как показано на рис. 3.2, г пунктиром. При токе управления, превышающем открывающий ток управления ($I_{откр. у}$) вольтамперная характеристика тиристора полностью аналогична характеристике диода.

Таким образом, тиристор представляет собой частично управляемый вентиль, который можно перевести в проводящее состояние при наличии одновременно двух факторов: положительный потенциал анода относительно катода; подача управляющего сигнала в виде тока управления в цепи управляющего электрода. Если хотя бы один из этих факторов отсутствует, то тиристор будет оставаться в закрытом состоянии.

Частичная управляемость тиристора заключается в том, что после включения тиристора, цепь управления становится ненужной, так как он сам себя поддерживает во включенном состоянии. Выключить обычный тиристор по цепи управления невозможно. Поэтому он

называется **однооперационным тиристором** или в зарубежной терминологии *SCR (Silicon Controlled Rectifier)*. Для запираания тиристора необходимо каким-либо способом снизить анодный ток до нуля и удерживать его на нулевом уровне в течение времени рассасывания неосновных носителей, накопившихся в базах транзисторов $VT1$ и $VT2$, называемое временем восстановления запирающих свойств. Кроме того, скорость нарастания анодного напряжения не должна превышать для данного типа тиристорov допустимую величину.

В настоящее время разработаны новые типы тиристорov, так называемые **двухоперационные тиристоры** или **запираемые тиристоры**. Они являются полностью управляемыми полупроводниковыми приборами, которые можно и включить и выключить по цепи управления. Такой тиристор в зарубежной терминологии получил обозначение *GTO-тиристор (Gate Turn-Off)*. Это достигается благодаря тому, что в областях анода и катода такой прибор состоит из большого числа технологических ячеек, представляющих отдельные тиристоры, которые включены параллельно.

Физические процессы, протекающие в запираемых тиристорах, во многом аналогичны уже рассмотренным для однооперационного тиристора. Исключение составляет процесс выключения отрицательным током управления.

Во включенном состоянии все переходы тиристора находятся в состоянии насыщения. При достаточной величине, длительности управляющего тока, а также равномерности его распределения по всем ячейкам, избыточная концентрация носителей заряда снижается до нуля вблизи коллекторного перехода. При этом коллекторный переход смещается в обратном направлении. Транзисторы начинают работать в активном режиме и в структуре возникает положительная обратная связь при отрицательном базовом токе в $n-p-n$ -транзисторе $VT2$. Вследствие лавинообразного уменьшения зарядов в базовых областях анодный ток начинает снижаться. Транзистор $VT2$ $n-p-n$ -типа первый входит в режим отсечки. Действие положительной обратной связи прекращается, и дальнейший спад анодного тока определяется рекомбинацией в n^- базе тиристора.

Вольтамперная характеристика запираемого тиристора аналогична характеристике незапираемого тиристора (рис. 3.3). На электрических принципиальных схемах запираемые тиристоры обозначаются условными обозначениями, представленными на рис. 3.4.

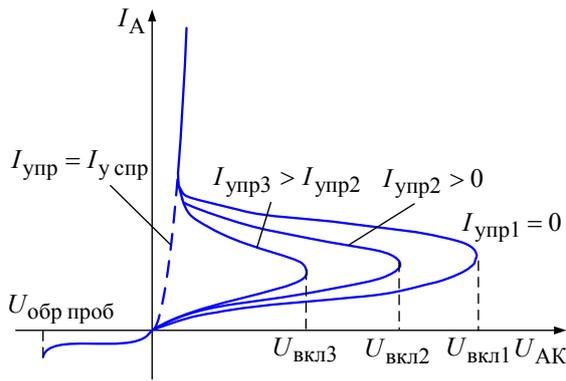


Рис. 3.3. Вольт-амперная характеристика двухоперационного тиристора

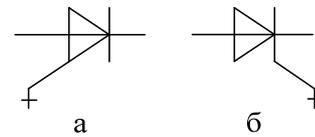


Рис. 3.4. Условные обозначения запираемых триггисторов с управлением по аноду (а), с управлением по катоду (б)

Программа работы

Задание

Снять статические вольтамперные характеристики динистора, управляемого тиристора и триодного симистора. Определить напряжение включения динистора, минимальные открывающие токи и токи удержания тиристора и симистора. Определить по ВАХ параметры тиристор.

Порядок работы

Опыт №1. Регистрация ВАХ динистора КН102А

1. Соберите цепь для регистрации вольтамперной характеристики динистора согласно принципиальной схеме (рис. 3.5).

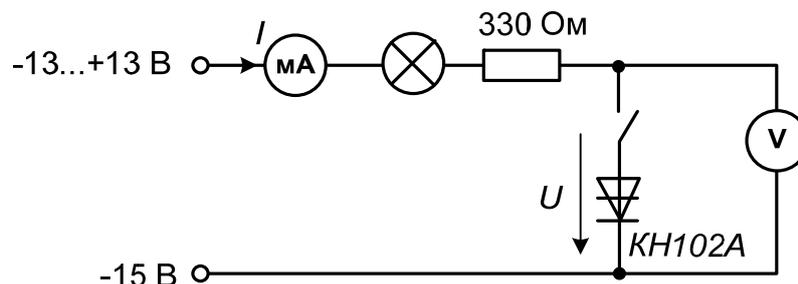


Рис. 3.5. Принципиальная схема исследования динистора

2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».
3. Для определения напряжения включения установите регулятором напряжения какое-нибудь напряжение, например 3 В. Включая и

выключая динистор тумблером, определите по показаниям амперметра и вольтметра, включается динистор или нет. При включении динистора напряжение на нём падает, а ток возрастает. Если динистор не включается, то увеличьте напряжение и снова попробуйте несколько раз тумблером включить динистор. Повторяя этот опыт, подберите напряжение, при котором динистор будет стабильно включаться. Запишите значения токов при указанных напряжениях (под надписью «Динистор закрыт») и значение напряжения $U_{\text{ВКЛ}}$ в табл. 3.1.

4. Приведите динистор во включенное состояние и, уменьшая напряжение регулируемого источника, поочередно устанавливайте значения тока, указанные в табл. 3.1 и записывайте соответствующие напряжения на динисторе (под надписью «Динистор открыт»).

Таблица 3.1

Прямая ветвь ВАХ динистора

		Динистор закрыт				Динистор открыт			
		$I_{\text{ПР}}, \text{мА}$	0			5	10	20	30
Динистор $U_{\text{ВКЛ}} = \dots \text{В}$	$U_{\text{ПР}}, \text{В}$	0	3	5	$U_{\text{ВКЛ}}$				

5. Отключите питание выключателем «СЕТЬ» и переключите динистор в обратном направлении. Ручку потенциометра источника напряжения поверните **против часовой стрелки до упора**.
6. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».
7. Поворачивая ручку потенциометра, устанавливайте напряжения, указанные в таблице 3.2. Для каждого значения напряжения измерить ток. Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Обратная ветвь ВАХ динистора

$U_{\text{ОБР}}, \text{В}$	0	2	4	5	7	9	10	12
$I_{\text{ОБР}}, \text{мА}$								

8. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».
9. По данным табл. 3.1, 3.2 постройте прямую и обратную ветвь вольтамперной характеристики динистора.

Опыт №2. Регистрация ВАХ тринистора ВТ149

1. Соберите цепь (рис. 3.6) для исследования характеристик управляемых тиристоров. Ручку потенциометра поверните вправо до упора (ток управления равен нулю).

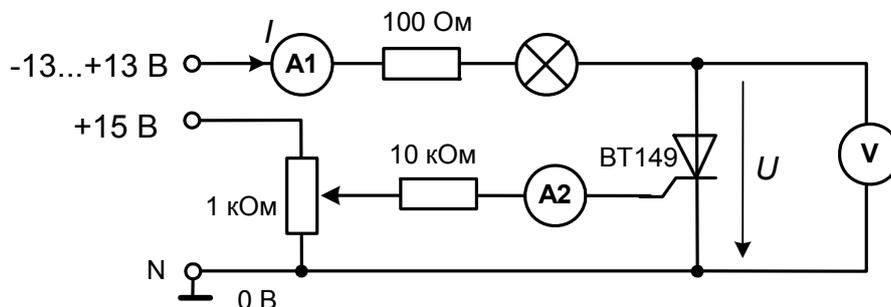


Рис. 3.6. Принципиальная схема исследования тринистора

2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ» и, вращая ручку регулятора постоянного напряжения влево и вправо до упора, убедитесь, что тиристор закрыт, как при прямом, так и при обратном приложенном напряжении. Запишите значения токов при указанных напряжениях (под надписью «Тринистор закрыт») в табл. 3.3.
3. Оставьте ручку регулятора постоянного напряжения в крайнем правом положении, и потенциометром увеличивайте ток управления до тех пор, пока не включится лампочка, что свидетельствует о переходе тиристора в открытое состояние. Верните ручку потенциометра в правое крайнее положение и убедитесь, что и при отсутствии тока управления тиристор остаётся включённым.
4. Выключите тиристор кратковременным разрыванием анодной цепи или снижением приложенного напряжения до любого отрицательного значения.
5. Снова включите тиристор при максимальном приложенном напряжении, ток управления сделайте равным нулю и, уменьшая приложенное напряжение, поочередно устанавливайте значения тока, указанные в табл. 3.3 и записывайте соответствующие напряжения на тринисторе (под надписью «Тринистор открыт»).

Таблица 3.3

Прямая ветвь ВАХ тринистора

		Тринистор закрыт				Тринистор открыт			
		0				5	10	20	30
Тринистор ($I_{уд} = \dots \text{мА}$, $I_{откр.у} = \dots \text{мА}$)	$U_{пр}, \text{В}$	0	3	5	10				

6. Снова включив тиристор и, плавно уменьшая напряжение регулируемого источника напряжения, определите ток удержания тиристора $I_{уд}$ (Определяйте его при токе управления равном нулю!). Запишите значение $I_{уд}$ также в табл. 3.3.
7. Медленно увеличивая ток управления потенциометром (при максимальном анодном напряжении и непроводящем состоянии тиристора), зафиксируйте ток управления, при котором происходит включение тиристора. Прodelайте этот опыт несколько раз и запишите $I_{откр.у}$ в табл. 3.3.
8. Отключите питание выключателем «СЕТЬ» и переключите тринистор в обратном направлении. Ручку потенциометра источника напряжения поверните против часовой стрелки до упора.
9. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».
10. Поворачивая ручку потенциометра, устанавливайте напряжения, указанные в таблице 3.4. Для каждого значения напряжения измерить ток. Результаты измерений занести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

Обратная ветвь ВАХ тринистора

$U_{обр}, \text{В}$	0	2	4	5	7	9	10	12
$I_{обр}, \text{мА}$								

11. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».
12. По данным табл. 3.3, 3.4 постройте прямую и обратную ветвь вольтамперной характеристики тринистора

Опыт №3. Регистрация ВАХ симистора МАС97А6

1. Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 3.6), но заменив тиристор симистором МАС97А6, включенном в прямом

направлении, а сопротивление в цепи управления 10 кОм на 1 кОм.

2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ» и проделайте аналогичные опыты по определению $I_{откр.у}$, при двух напряжениях питания: +13 В (ручка регулятора в правом крайнем положении) и (13 В (ручка регулятора в левом крайнем положении). В каждом из этих случаев симистор может открываться как положительным током управления, так и отрицательным. Для получения отрицательного тока управления переключите питание потенциометра с гнезда +15 В на гнездо (15 В).
3. Снимите вольтамперные характеристики при положительном и отрицательном анодном напряжениях, определите токи удержания. Результаты запишите в табл. 3.5.
4. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».
5. По данным табл. 3.5 постройте прямую и обратную ветвь вольтамперной характеристики симистора.

Таблица 3.5. ВАХ симистора

		Симистор закрыт				Симистор открыт			
Прямая ветвь	$I_{пр}, \text{мА}$	0				5	10	20	30
Симистор при +U ($I_{уд} = \dots \text{мА}$, $I_{откр.у} = + \dots \text{мА}$, $I_{откр.у} = - \dots \text{мА}$)	$U_{пр}, \text{В}$	0	3	5	10				
Обратная ветвь	$I_{пр}, \text{мА}$	0				-5	-10	-20	-30
Симистор при -U ($I_{уд} = \dots \text{мА}$, $I_{откр.у} = + \dots \text{мА}$, $I_{откр.у} = - \dots \text{мА}$)	$U_{пр}, \text{В}$	0	-3	-5	-10				

Контрольные вопросы

1. Какие типы тиристоров вы знаете и чем они отличаются друг от друга?
2. Как работает динистор, каковы его основные характеристики?
3. Как влияет температура на характеристики тиристоров?

4. Как изменяется вольтамперная характеристика тринистора при увеличении величины управляющего импульса и почему?
5. Почему тиристор называют частично управляемым вентилем?
6. Нарисуйте структуру p-n переходов тринистора и подпишите его выводы.
7. Чем отличается симистор от тринистора по структуре и по характеристикам?
8. Каковы условия открытия тринистора?
9. Какие условия должны быть выполнены, чтобы тринистор закрылся?
10. Чем двухоперационный тиристор отличается от однооперационного??

Содержание отчёта

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень оборудования.
4. Исследуемые схемы.
5. Результаты исследований с таблицами.
6. Статические ВАХ тиристоров по эксперименту (опыты 1-3) построить на одном рисунке. Обработать полученные графики и определить основные параметры тиристоров.
7. Выводы.
8. Ответы на контрольные вопросы.

Лабораторная работа № 4 «ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА»

Цель работы: Экспериментально установить различные классы усиления биполярного транзистора. Определить оптимальную точку покоя и максимальную амплитуду неискажённого выходного сигнала, а так же минимальную амплитуду входного напряжения, при которой транзистор переходит в режим насыщения.

Общие сведения

Транзисторы представляют собой управляемые полупроводниковые приборы, использующие различные физические принципы в своей работе. В силовой преобразовательной технике наибольшее распространение получили:

- биполярные транзисторы;
- полевые транзисторы с изолированным затвором;
- комбинированные транзисторы.

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих p - n перехода. Структура биполярного транзистора изображена на рис. 4.1.

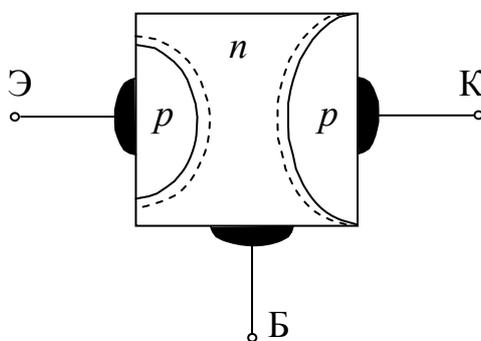


Рис. 4.1. Структура биполярного транзистора

Он представляет собой монокристалл полупроводника, в котором созданы три области с чередующимися типами электропроводности. На границах этих областей возникают электронно-дырочные переходы. От каждой области полупроводника сделаны токоотводы (омические контакты, не имеющие контактной разности потенциалов). Среднюю область транзистора, расположенную между электронно-дырочными переходами, называют базой. Примыкающие к базе области обычно

делают неодинаковыми. Одну из областей делают так, чтобы из неё наиболее эффективно проходила инжекция носителей в базу, а другую так, чтобы $p-n$ переход между базой и этой областью наилучшим образом собирал инжектированные в базу носители, то есть осуществил экстракцию носителей из базы. Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют эмиттером, а $p-n$ переход между базой и эмиттером – эмиттерным. Область транзистора, основным назначением которой является собирание, экстракция носителей из базы, называют коллектором, а $p-n$ переход между базой и коллектором – коллекторным.

В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают $p-n-p$ транзисторы (рис. 4.2, а) и $n-p-n$ транзисторы (рис. 4.3, а), графические обозначения которых представлены соответственно на рис. 4.2, б и рис. 4.3, б.

В обоих типах транзисторов физические процессы аналогичны, они различаются только типом инжектируемых и собираемых носителей и имеют одинаково широкое применение.

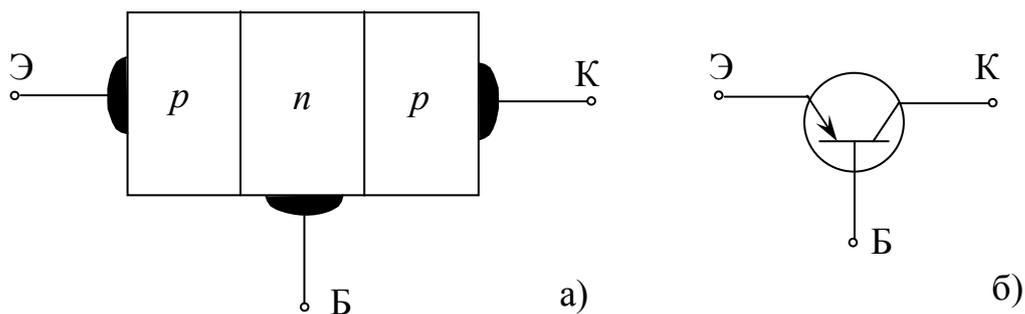


Рис. 4.2. $p-n-p$ транзистор

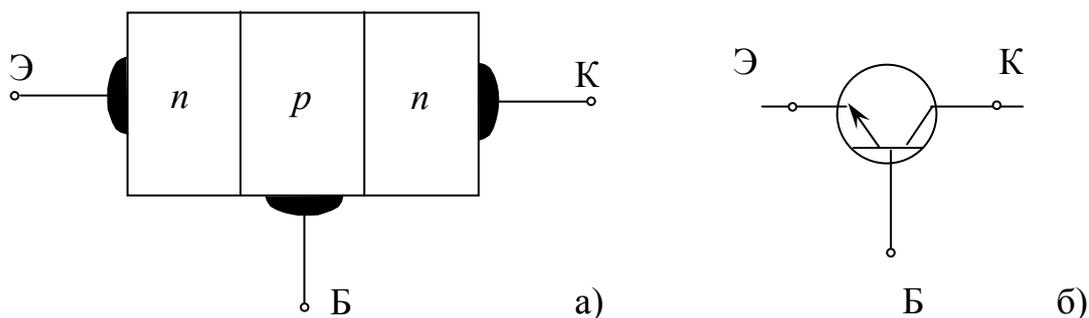


Рис. 4.3. $n-p-n$ транзистор

Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, и он инжектирует носители в базу, а на коллекторном переходе напряжение обратное, и он собирает носители из базы, то такое включение транзистора называют нормальным.

Если же на коллекторном переходе напряжение прямое, и он инжектирует носители в базу, а на эмиттерном переходе напряжение обратное и он осуществляет экстракцию носителей из базы, то такое включение транзистора называют инверсным. Следует отметить, что вследствие не симметрии реальной структуры транзистора относительно базы схемное включение транзистора в инверсном режиме, как правило, не применяется, однако, в переходных процессах он иногда имеет место.

Рассмотрим процесс включения и выключения транзистора (рис. 4.4).

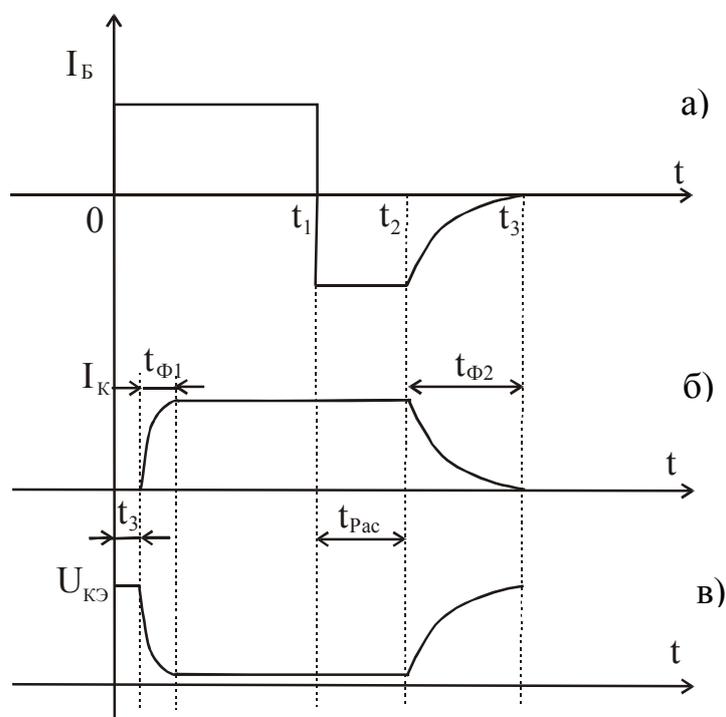


Рис. 4.4. Процесс включения и выключения биполярного транзистора

На интервале $(0 \div t_1)$ эмиттерный переход смещён в прямом направлении и по нему протекает базовый ток I_B (рис. 4.4, а). При этом ток в коллекторной цепи начнёт протекать с задержкой на время $t_{\text{задерж}}$, которое требуется инжектируемым в базу носителям для прохождения расстояния, равного ширине базовой области. Затем коллекторный ток нарастает постепенно в течение времени фронта $t_{\Phi 1}$, что связано с процессом накопления носителей в базе. После окончания входного

импульса в точке t_1 входной сигнал меняет полярность, эмиттерный переход смещается в обратном направлении и инжекция носителей в базу прекращается. Но поскольку в базе был накоплен некоторый заряд носителей, то ток коллектора ещё в течение времени рассасывания $t_{\text{рас}}$ будет поддерживаться, а затем снижаться до нуля в течение времени фронта $t_{\phi 2}$. Время рассасывания сильно зависит от степени насыщения транзистора перед его выключением. Минимальное время рассасывания, а, следовательно, и время выключения получается при граничном режиме насыщения. Для ускорения процесса рассасывания к эмиттерному переходу прикладывают обратное запирающее напряжение, которое во избежание пробоя перехода, не превышает величины нескольких вольт.

Динамические потери транзистора (потери на переключение) (как видно из рис. 4.4, б, в) определяются, в основном, длительностью фронтов нарастания $t_{\phi 1}$ и спада $t_{\phi 2}$ тока коллектора, когда и напряжение $U_{\text{кэ}}$, и ток коллектора $I_{\text{к}}$ имеют значительную величину. Силовые ключи, построенные на биполярных транзисторах, имеют ряд серьёзных недостатков, главными из которых являются:

- низкое быстродействие, по сравнению с силовыми ключами других типов;
- низкий коэффициент передачи по току в области больших нагрузок и, как следствие, сложность и большая стоимость систем управления;
- малая стойкость к перегрузкам.

При работе транзистора возможны следующие три режима: линейный (усилительный), насыщения и отсечки. В линейном режиме эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, а в режиме отсечки – в обратном. Работа транзистора основана на управлении токами электродов, в зависимости от приложенных к его переходам напряжений. В линейном режиме, когда эмиттерный переход открыт благодаря приложенному к нему прямому напряжению, через него протекает ток базы $I_{\text{б}}$, что приводит к инжекции носителей из эмиттера в базу. Смещённый в обратном направлении коллекторный переход экстрагирует не основные носители из базы, образуя ток коллектора $I_{\text{к}}$:

$$I_{\text{к}} = \beta \cdot I_{\text{б}} \quad (1),$$

где β – коэффициент передачи транзистора по току.

В силовой электронике, где наиболее важными являются энергетические показатели, схемы с общей базой и с общим

коллектором практически не применяются, а применяются схемы с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 4.5).

На рис. 4.5 представлена простейшая схема транзисторного усилителя с общим эмиттером и, поясняющая его работу, диаграмма. Резистор R_K является сопротивлением нагрузки, на резисторах R_1 и R_2 выполнен делитель напряжения, создающий постоянный ток в цепи база – эмиттер. Он поддерживает транзистор в открытом состоянии, если нет входного сигнала, благодаря чему через сопротивление R_K протекает постоянный ток. При этом напряжение на транзисторе $U_{КЭ}(I_K) = U_{пит} - R_K \cdot I_K$. Точки пересечения этой прямой с вольтамперными характеристиками $I_K(U_{КЭ})$ позволяют определить напряжение и ток в транзисторе при любом токе базы. В зависимости от начального положения точки покоя (при отсутствии входного сигнала) различают несколько классов усиления (рис. 4.6).

В **классе А** точка покоя выбирается в примерно в середине активной зоны от $I_{Kмакс}$ до $I_{Kмин}$, в которой характеристики транзистора близки к линейным (точка А на поясняющей диаграмме). В этом случае при подаче на базу переменного сигнала (например, синусоидального) в токе базы появляется переменная составляющая, что вызывает соответствующие изменения тока I_K и напряжения $U_{КЭ}$.

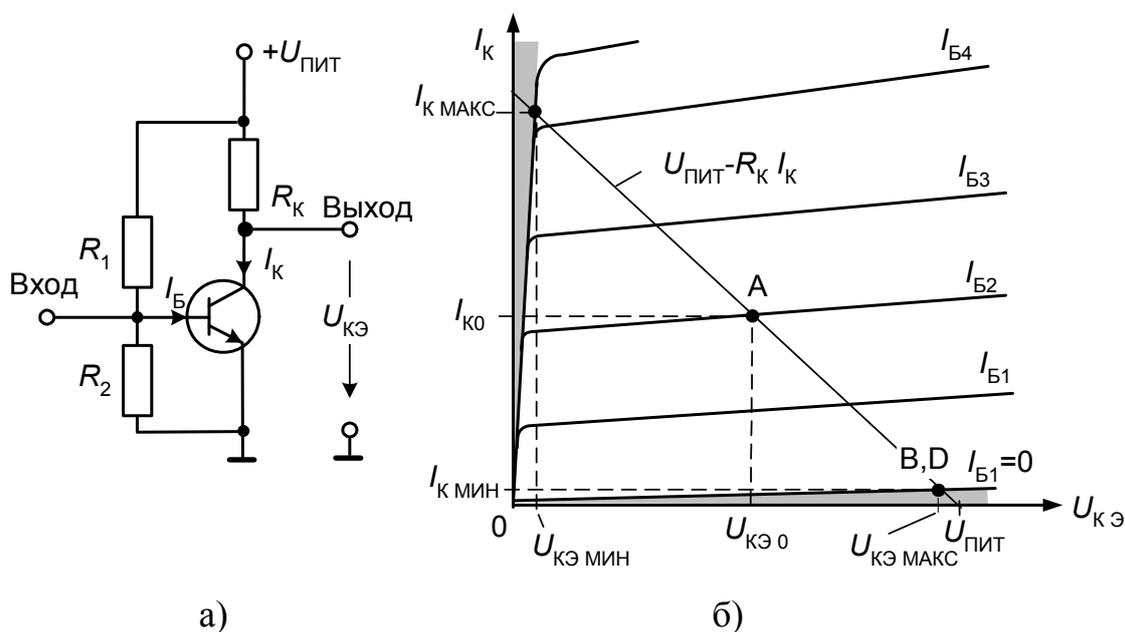


Рис. 4.5. Схема включения (а) и характеристики (б) транзистора по схеме с общим эмиттером

Рабочая точка при этом перемещается по прямой линии $U_{пит} - R_K \cdot I_K$ между зонами насыщения ($I_{Kмакс}$) и отсечки ($I_{Kмин}$). Если входной сигнал не превышает допустимую величину, то происходит

пропорциональное усиление всего сигнала. При превышении допустимых уровней наступает ограничение выходного сигнала на уровнях $I_{K\max}$ до $I_{K\min}$ по току и на уровнях $U_{KЭ\min}$ и $U_{KЭ\max}$ по напряжению.

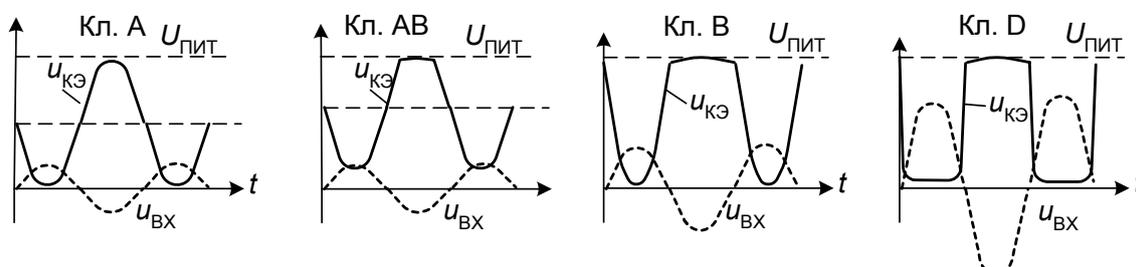


Рис. 4.6. Классы работы биполярного транзистора

В **классе АВ** точка покоя смещена в сторону зоны отсечки, поэтому часть синусоидального сигнала (меньше полупериода) при усилении «обрезается».

В **классе В** усиливается точно половина синусоидального сигнала. Для этого точка покоя должна выбираться на границе зоны отсечки (точка B, D). В действительности её выбирают несколько выше, чтобы избежать искажений, вызванных существенной нелинейностью начального участка входной характеристики транзистора.

В **классе D** транзистор работает в ключевом режиме. Для этого точка покоя выбирается также как и в классе B на границе зоны отсечки, но на вход подаётся большой сигнал, чтобы транзистор быстро переходил в режим насыщения. Ещё лучше в этом режиме на вход подавать сигнал прямоугольной формы. Тогда отпадает необходимость в его большой амплитуде. Становится ненужной и цепь, задающая начальное смещение (делитель из резисторов R_1 и R_2), так как при отсутствии входного сигнала транзистор должен быть надёжно закрыт.

Программа работы

Задание

Экспериментально ознакомиться с различными классами усиления. В классах A и B подобрать оптимально точку покоя и определить максимальную амплитуду неискажённого выходного сигнала и допустимую амплитуду входного сигнала. В классе D определить минимальную амплитуду прямоугольного входного напряжения, при которой транзистор надёжно переходит в режим насыщения.

Порядок работы

Опыт №1. Исследование усилителя класса А

1. Соберите цепь согласно рис. 4.7 и рис. 4.8. В ней постоянный ток базы регулируется потенциометром 1 кОм и ограничивается постоянным сопротивлением тоже 1 кОм. Последовательно с источником переменного сигнала включен конденсатор 1 мкФ для предотвращения протекания через источник постоянного тока и токоограничивающее сопротивление 1 кОм. Диод включён для защиты эмиттерного перехода от обратного напряжения, а сопротивление 10 Ом для стабилизации характеристик транзистора. Измерение входного и выходного напряжений осуществляется осциллографом, а токов – двумя мультиметрами в режиме миллиамперметров.

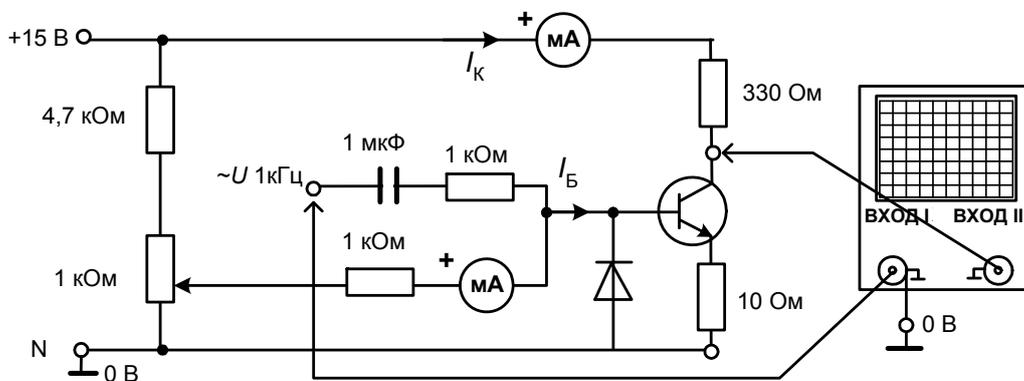


Рис. 4.7. Принципиальная схема

2. Включите осциллограф для наблюдения по двум каналам одновременно (канал I – 0,5 В/дел., канал II – 5 В/дел). Включите мультиметры для измерения постоянных токов (пределы измерения: ток базы – 2 мА, ток коллектора – 200 мА). После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ». В блоке генераторов напряжений установите частоту синусоидального напряжения 1 кГц, а амплитуду сначала равной нулю. Настройте осциллограф, установите и запомните положение линий нулевого сигнала.

3. Изменяя напряжение смещения на базе поворотом ручки потенциометра вправо и влево, наблюдайте по осциллографу за изменением напряжения на коллекторе, а по мультиметрам за изменением токов базы и коллектора. Установите напряжение покоя $U_{кэ0}$ примерно в середине диапазона его изменения.

при котором выходной сигнал не искажается, подкорректируйте ещё раз смещение и запишите в табл. 1. параметры режима усиления в классе В.

2. Сохраните на носитель информации или перерисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения.

Примечание: $I_{Б0}$ $I_{К0}$ $U_{КЭ0}$ измеряйте при отключённом входном сигнале!

Таблица 4.1

Класс	$I_{Б0}, mA$	$I_{К0}, mA$	$U_{КЭ0}, B$	$U_{ВХмакс}, B$	$U_{ВЫХмакс}, B$	K_U
A						
B						
D(~U)						

Опыт №3. Исследование усилителя класса D

1. Увеличивая входной сигнал, убедитесь, что выходной сигнал принимает форму трапеции. Переключите форму входного сигнала с синусоиды на прямоугольник и убедитесь, что выходной сигнал тоже стал прямоугольным. Отключите цепь смещения и убедитесь, что выходной сигнал не изменился.
2. Подберите и запишите минимальную амплитуду входного прямоугольного сигнала, при которой транзистор надёжно переходит в режим насыщения.

$$U_{\text{мин.прямоуг.}} = \dots\dots\dots B.$$

Сохраните на носитель информации или перерисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения прямоугольной формы в классе D.

3. Рассчитайте и внесите в таблицу 1 значения коэффициентов усиления транзистора по напряжению для разных классов усиления по формуле:

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХмакс}}}{U_{\text{ВХмакс}}}$$

4. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».

Контрольные вопросы

1. Какими достоинствами и недостатками обладает биполярный транзистор?
2. Какое включение биполярного транзистора называют инверсным?

3. Почему при включении транзистора ток коллектора начинает протекать с временной задержкой после начала протекания тока базы?
4. Чем определяется время выключения транзистора?
5. От чего зависят динамические потери транзистора?
6. Что такое область активного усиления транзистора?
7. Как транзистор работает в режиме насыщения?
8. Что такое режим отсечки для транзистора?
9. Как выбирается точка покоя в классах усиления А, АВ, В и D?
10. Перечислите достоинства и недостатки различных классов усиления.

Содержание отчёта

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень оборудования.
4. Исследуемые схемы.
5. Результаты исследований с таблицами.
6. Расчёты с указанием размерности.
7. Осциллограммы с обозначенными параметрами сигналов.
8. Графики.
9. Выводы.
10. Ответы на контрольные вопросы.

Лабораторная работа № 5 «ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ»

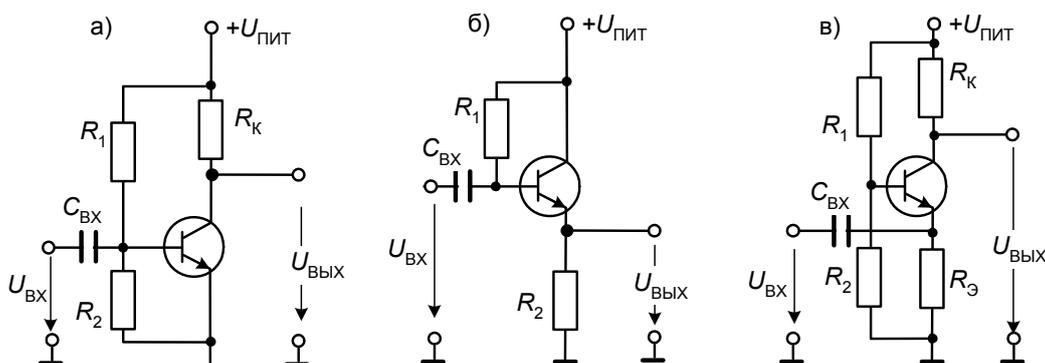
Цель работы: изучение основных свойств усилительных каскадов на биполярных транзисторах, определение их входных и выходных сопротивлений.

Общие сведения

В зависимости от соединения двух источников напряжений, смещающих эмиттерный и коллекторный переходы транзистора, различают три способа включения (рис. 5.1):

- с общей базой (ОБ);
- общим эмиттером (ОЭ);
- общим коллектором (ОК).

В каждой из этих схем один из выводов транзистора является общей точкой, а два других входом и выходом. При этом на эмиттерный переход подается напряжение смещения в прямом направлении, а на коллекторный – в обратном. Напряжение смещение задаётся резисторами R_1 и R_2 . В цепи эмиттера и (или) коллектора включают сопротивления для ограничения тока и придают усилителю определенные свойства. На входе усилительного каскада (часто и на входе) включают разделительный конденсатор $C_{вх}$ для предотвращения протекания постоянного тока через источник переменного сигнала.



**Рис. 5.1. Схемы включения биполярного транзистора:
а) с ОЭ; б) с ОК; в) с ОБ**

Схема усилительного каскада (УК) с ОЭ (рис. 5.1, а), является наиболее распространенной. В ней входной сигнал подаётся на цепь база – эмиттер, а выходное напряжение снимается с цепи коллектор – эмиттер. Она имеет большой коэффициент, как по напряжению, так и по току, а, следовательно, и по мощности.

Коэффициент усиления по току k_i такого каскада представляет собой отношение амплитуд (или действующих значений) выходного и входного переменных токов, т. е. переменных составляющих токов коллектора и базы:

$$K_i = \frac{I_{m\text{вых}}}{I_{m\text{вх}}} = \frac{I_{m\text{кол}}}{I_{m\text{база}}}$$

Поскольку ток коллектора в десятки раз больше тока базы, то k_i составляет десятки единиц. Усилительные свойства транзистора при включении его по схеме ОЭ характеризует один из главных его параметров – известный нам *статический коэффициент усиления по току* (или *коэффициент передачи тока*) для схемы ОЭ, обозначаемый β . Поскольку он должен характеризовать только сам транзистор, то его определяют в режиме без нагрузки ($R_n = 0$), т. е. при постоянном напряжении участка коллектор – эмиттер:

$$\beta = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B} \quad \text{при } U_{K-Э} = \text{const}$$

Коэффициент β бывает равным десяткам и даже сотням, а реальный коэффициент усиления по току каскада k_i всегда меньше, чем β , так как при включении нагрузки R_n ток i_K уменьшается.

Коэффициент усиления каскада по напряжению k_u равен отношению амплитудных или действующих значений выходного и входного переменных напряжений. Входным является переменное напряжение база – эмиттер $U_{Б-Э}$ выходным – переменное напряжение на резисторе нагрузки U_{RH} или, что все равно, между коллектором и эмиттером $U_{К-Э}$. Выражение для определения коэффициента усиления по напряжению, запишется следующим образом:

$$k_U = \frac{U_{m\text{вых}}}{U_{m\text{вх}}} = \frac{U_{mRH}}{U_{mБ-Э}} = \frac{U_{mК-Э}}{U_{mБ-Э}}$$

Напряжение база – эмиттер не превышает десятых долей вольта, а выходное напряжение при достаточном сопротивлении резистора нагрузки и напряжении источника E_u достигает единиц вольт и больше. Поэтому k_u имеет значение от десятков до сотен.

Отсюда следует, что коэффициент усиления каскада по мощности k_P получается равным сотням или тысячам или даже десяткам тысяч. Этот коэффициент представляет собой отношение выходной мощности к входной. Каждая из этих мощностей определяется половиной произведения амплитуд соответствующих токов и напряжений:

$$P_{\text{вых}} = 0,5 \cdot I_{\text{вых}} \cdot U_{\text{вых}} = 0,5 \cdot I_{mK} \cdot U_{mK-Э};$$

$$P_{\text{вх}} = 0,5 \cdot I_{\text{вх}} \cdot U_{\text{вх}} = 0,5 \cdot I_{\text{мБ}} \cdot U_{\text{мБ-Э}};$$

поэтому

$$k_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{мввых}} \cdot U_{\text{мввых}}}{I_{\text{мвх}} \cdot U_{\text{мвх}}} = k_I \cdot k_U$$

Важной величиной, характеризующей транзистор, является его входное сопротивление $R_{\text{вх}}$, которое определяется по закону Ома.

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{мвв}}}{I_{\text{мвв}}} = \frac{U_{\text{мБ-Э}}}{I_{\text{мБ}}}.$$

И составляет от сотен Ом до единиц кОм. Это вытекает из того, что при $U_{\text{мБ-Э}}$, равном десятым долям вольта, ток $I_{\text{мБ}}$ транзисторов малой и средней мощности может быть до десятых долей миллиампера. Малое входное сопротивление является существенным недостатком биполярных транзисторов. Выходное сопротивление транзистора при включении его по схеме ОЭ составляет от единиц до десятков кОм.

Схема к ОК.

В схеме с ОК (рис. 5.1, б) входной сигнал подаётся на цепь база – коллектор, а выходной снимается с цепи эмиттер – коллектор. Это утверждение не противоречит рисунку 5.1, б, так как для переменного сигнала общая точка имеет такой же потенциал, как и $+U_{\text{пит}}$. Эту схему называют ещё эмиттерным повторителем, так как выходное напряжение в ней почти равно входному ($k_U < 1$). Схема имеет большой коэффициент усиления по току k_I , высокое входное сопротивление и низкое выходное.

В этой схеме (рис. 5.1, б) коллектор является общей точкой входа и выхода, поскольку источники питания E_1 и E_2 всегда шунтированы конденсаторами большой емкости и для переменного тока могут считаться короткозамкнутыми. Особенность этой схемы в том, что входное напряжение полностью передается обратно на вход, т. е. имеется очень сильная отрицательная обратная связь. Нетрудно видеть, что входное напряжение равно сумме переменного напряжения база – эмиттер $U_{\text{Б-Э}}$ и выходного напряжения:

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} + U_{\text{вых}}$$

Коэффициент усиления по току каскада ОК равен нескольким десяткам. Действительно,

$$k_I = \frac{I_{\text{мЭ}}}{I_{\text{мБ}}} = \frac{(I_{\text{мК}} + I_{\text{мБ}})}{I_{\text{мБ}}} = \frac{I_{\text{мК}}}{I_{\text{мБ}}} + 1,$$

а отношение $I_{\text{мК}}/I_{\text{мБ}}$ есть коэффициент усиления по току для схемы ОЭ.

Зато коэффициент усиления по напряжению близок к единице, но всегда меньше ее:

$$k_U = \frac{U_{mвых}}{U_{mвх}} = \frac{U_{mвых}}{U_{mБ-Э} + U_{mвых}} < 1.$$

Напряжение $U_{mБ-Э}$ не более десятых долей вольта, а $U_{mвых}$ при этом составляет единицы вольт, т. е. $U_{mБ-Э} \ll U_{mвых}$. Следовательно, $k_U \approx 1$.

Надо отметить, что переменное напряжение, поданное на вход транзистора, усиливается в десятки раз, так же как и в схеме ОЭ, но весь каскад не дает усиления. Коэффициент усиления по мощности, очевидно, примерно равен k_1 , т. е. нескольким десяткам.

Рассмотрев полярность переменных напряжений в схеме, можно установить, что фазового сдвига между $U_{вых}$ и $U_{вх}$ нет. Пусть, например, в данный момент подается положительная полуволна $U_{вх}$. Тогда увеличится напряжение $U_{б-э}$ и возрастет ток эмиттера, который увеличит падение напряжения на резисторе нагрузки. Следовательно, на выходе получится положительная полуволна напряжения. Таким образом, выходное напряжение совпадает по фазе с входным и почти равно ему. Иначе говоря, выходное напряжение повторяет входное. Именно поэтому данный каскад обычно называют эмиттерным повторителем. Эмиттерным потому, что резистор нагрузки включен в провод эмиттера и выходное напряжение снимается с эмиттера (по отношению к корпусу).

Входное сопротивление каскада по схеме ОК составляет десятки килоОм, что является важным достоинством схемы. Действительно,

$$R_{вх} = \frac{U_{mвх}}{I_{mвх}} = \frac{U_{mБ-Э} + U_{mвых}}{I_{mБ}}.$$

Отношение $U_{mБ-Э}/I_{mБ}$ есть входное сопротивление самого транзистора для схемы ОЭ, которое, как известно, достигает единиц килоОм. А так как $U_{mвых}$ в десятки раз больше $U_{mБ-Э}$, то и $R_{вх}$ в десятки раз превышает входное сопротивление схемы ОЭ. Выходное сопротивление в схеме ОК, наоборот, получается сравнительно небольшим, обычно единицы килоОм или сотни Ом.

Схема с ОБ

В схеме УК с ОБ (рис. 5.1, в) входное напряжение подаётся на цепь эмиттер – база, а выходное снимается с цепи коллектор – база. Здесь также нет противоречия с рисунком 5.1, в. так как для переменного сигнала общая точка имеет такой же потенциал, как и потенциал базы. Эта схема имеет большой коэффициент усиления по напряжению k_U , но ток на выходе почти равен току на входе ($k_I < 1$).

В противоположность схеме с общим коллектором схема имеет малое входное сопротивление, но большое выходное.

$$I_k \leq I_3, \quad I_k = 0.95 I_3.$$

Коэффициент усиления по току: $\alpha = I_k / I_3 = (0.95 - 0.99)$.

Входное сопротивление транзистора $R_{вхБ} = E_1 / I_3$. Чем оно больше, тем лучше (меньше нагружен входной источник).

Коэффициент усиления напряжения $K_{УБ} = I_k * R_H / E_1 = \alpha R_H / R_{вхБ}$
 $K_{УБ} > 1$.

Коэффициент усиления мощности $K_{РБ} = \alpha K_{УБ} > 1$.

Хотя эта схема (рис. 5.1, в) дает значительно меньшее усиление по мощности и имеет еще меньшее входное сопротивление, чем схема ОЭ, все же ее иногда применяют, так как по своим частотным и температурным свойствам она значительно лучше схемы ОЭ. Коэффициент усиления по току каскада ОБ всегда несколько меньше единицы:

$$k_I = \frac{I_{мк}}{I_{мэ}} \approx 1,$$

так как ток коллектора всегда лишь немного меньше тока эмиттера.

Важнейшим параметром транзисторов является *статический коэффициент усиления по току* (или *коэффициент передачи тока*), для схемы ОБ обозначаемый α . Он определяется для режима без нагрузки ($R_H = 0$), т. е. при постоянстве напряжения коллектор – база:

$$\alpha = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_3}, \quad \text{при } U_{КБ} = \text{const} \quad (0)$$

Коэффициент α всегда меньше 1, и чем ближе он к 1, тем лучше транзистор. Коэффициент усиления по току k_i для каскада ОБ всегда немного меньше α , так как при включении R_H ток коллектора уменьшается.

Коэффициент усиления по напряжению определяется формулой:

$$k_u = \frac{U_{мк-б}}{U_{мэ-б}}; \quad (0)$$

он получается равным десяткам или сотням.

Входное сопротивление для схемы ОБ

$$R_{вх} = \frac{U_{мэ-б}}{I_{мэ}}; \quad (0)$$

Входное сопротивление для схемы ОБ – всего лишь десятки, а у более мощных транзисторов даже единицы Ом. Такое малое $R_{вх}$ является существенным недостатком схемы ОБ. Выходное сопротивление в этой схеме получается до сотен кОм.

Программа работы

Задание

Определить экспериментально коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности усилительных каскадов с ОЭ, ОК и ОБ, определить их входные и выходные сопротивления.

Порядок работы

Опыт №1. Регистрация характеристик каскада с ОЭ

1. Соберите на наборном поле схему усилительного каскада с ОЭ (рис. 5.2). В ней напряжение смещения регулируется потенциометром 1 кОм. Последовательно с источником переменного сигнала и на выходе включены конденсаторы 1 мкФ для развязки цепей постоянного и переменного тока. На входе имеется также токоограничивающее сопротивление 1 кОм. Диод включён для защиты эмиттерного перехода от обратного напряжения, а сопротивление 10 Ом для стабилизации характеристик транзистора. Измерение входного и выходного напряжений осуществляется осциллографом и двумя мультиметрами.

2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».

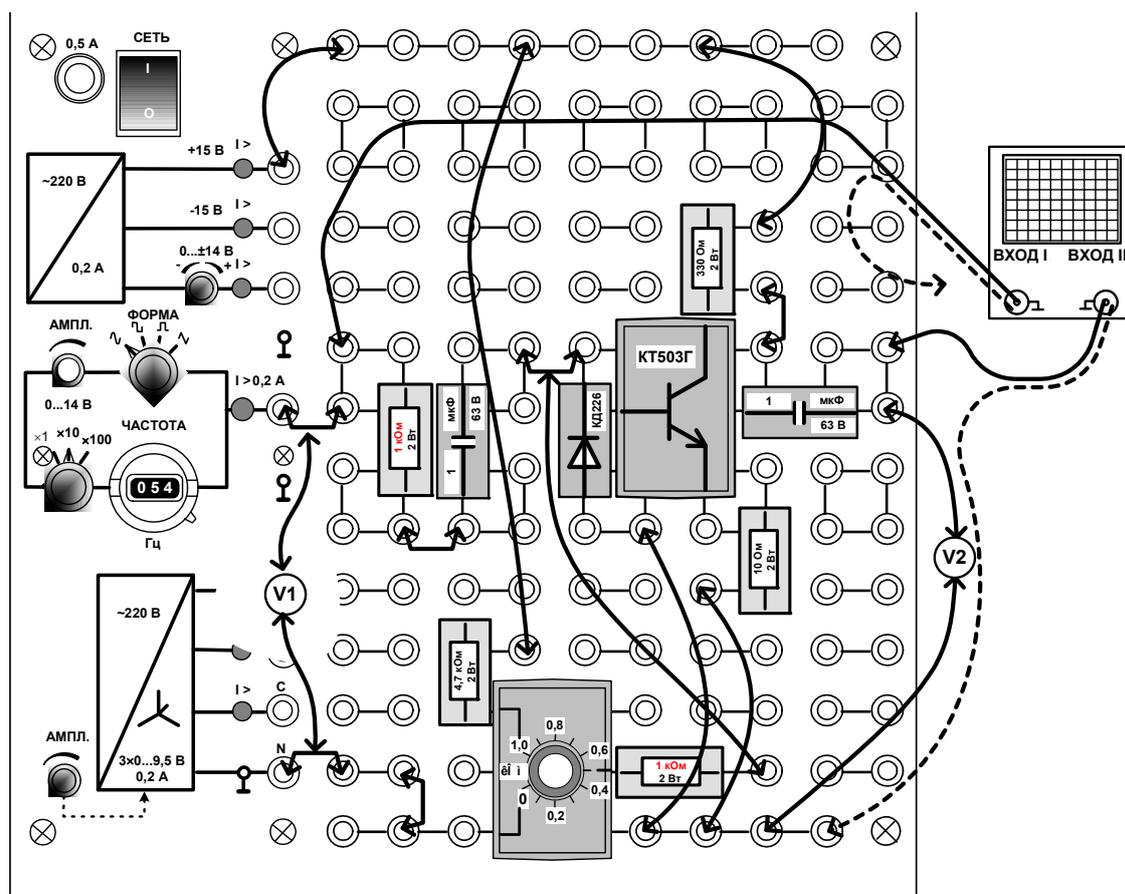


Рис. 5.2. Монтажная схема соединения УК с ОЭ

3. Включите осциллограф для наблюдения по двум каналам одновременно (канал I 0,5 В/дел., канал II 5 В/дел). Включите мультиметры для измерения переменных напряжений.

Примечание. Не используйте предел измерения 200 mV для измерения переменных напряжений, содержащих постоянную составляющую! Другие пределы использовать можно.

4. В блоке генераторов напряжений установите частоту синусоидального напряжения 1 кГц, а амплитуду сначала равной нулю.

5. Изменяя напряжение смещения на базе поворотом ручки потенциометра вправо и влево, установите напряжение покоя $U_{кэ}$ примерно в середине диапазона его изменения. Подайте на вход усилителя синусоидальное напряжение и, регулируя его амплитуду, установите на входе максимальный сигнал, соответствующий неискажённому напряжению на выходе. При необходимости уточните положение точки покоя.

6. Запишите в табл. 5.1 входное и выходное напряжения. Для определения тока базы и тока коллектора измерьте также напряжения на резисторе 1 кОм ($U_{RГ}$) во входной цепи и на резисторе 330 Ом в цепи коллектора ($U_{Rн}$).

7. Вычислите ток базы (входной ток) и ток коллектора (выходной ток), разделив напряжения на соответствующие сопротивления и также запишите их в табл. 5.1.

8. Определите коэффициенты усиления по напряжению, току, и мощности ($k_P = k_U k_I$).

9. Для определения выходного сопротивления подключите к выходу (параллельно вольтметру V2) нагрузочное сопротивление, указанное в таблице. При этом напряжение на выходе уменьшится от $U_{ВЫХ}$, которое уже записано в табл. 5.1, до $U_{ВЫХ1}$. Запишите это значение также в табл. 5.1 и вычислите выходное сопротивление по формуле:

$$R_{ВЫХ} = R_{н} \left(\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ1}} - 1 \right).$$

10. Уберите нагрузочное сопротивление, а для определения входного сопротивления включите добавочное сопротивление $R_{доб}$ во входную цепь (последовательно с генератором переменного напряжения). При этом напряжение на выходе уменьшится от $U_{ВЫХ}$ до $U_{ВЫХ2}$. Запишите это значение также в табл. 5.1 и вычислите входное сопротивление по формуле:

$$R_{ВХ} = \frac{R_{доб}}{\left(\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ2}} - 1 \right)}.$$

11. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».

Опыт №2. Регистрация характеристик каскада с ОК

1. Соберите схему усилительного каскада с ОК (рис. 5.3).
2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».
3. Снова подайте на вход синусоидальное напряжение, соответствующее максимальному неискажённому напряжению на выходе, отрегулировав предварительно точку покоя потенциометром 10 кОм.
4. Прделайте все те же опыты, что и в схеме сообщим эмиттером (ОЭ), и заполните второй столбец табл. 5.1.
5. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».

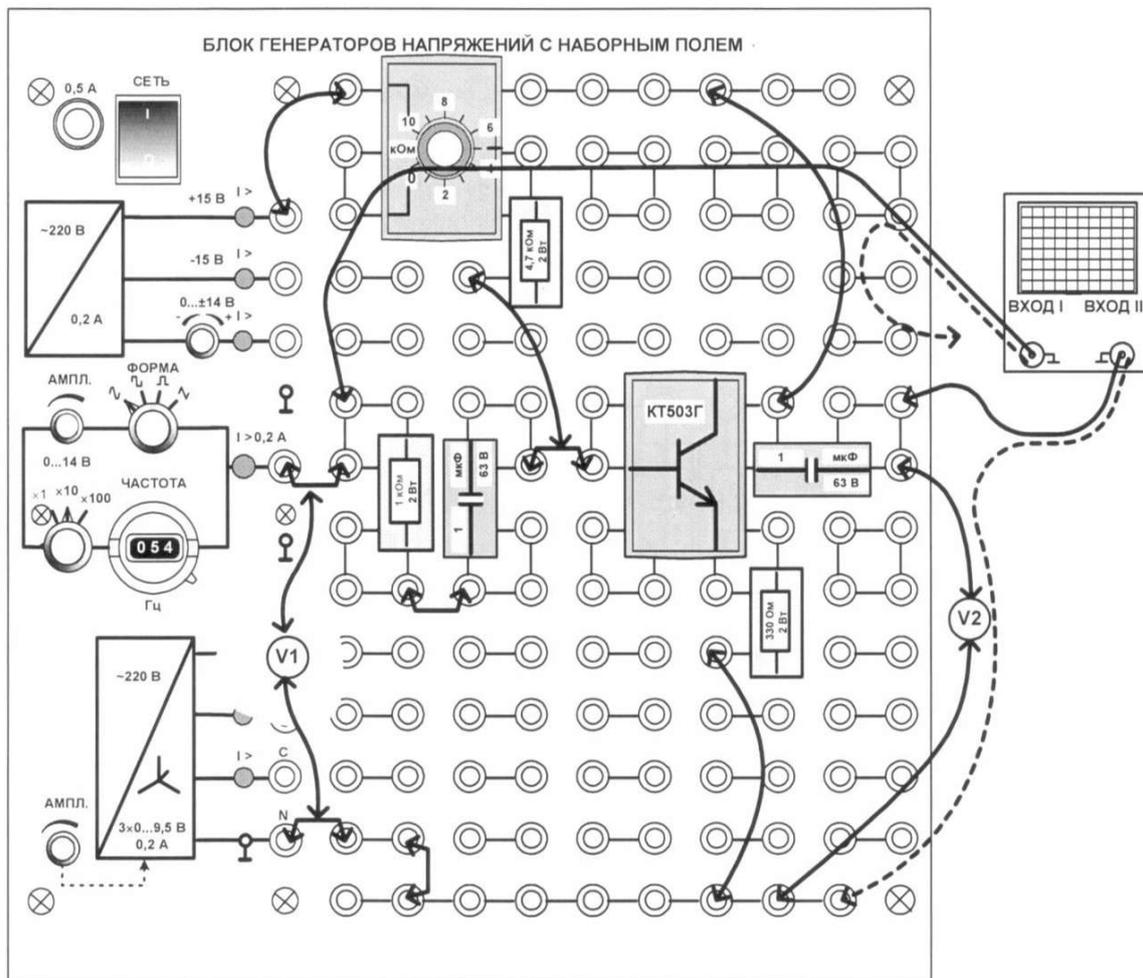


Рис. 5.3. Монтажная схема УК с ОК

Опыт №3. Регистрация характеристик каскада с ОБ

1. Соберите схему согласно принципиальной схеме каскада с ОБ (рис. 5.4, а),
2. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».
3. Прodelайте аналогичные опыты в схеме усилителя с общей базой (ОБ), заполните второй столбец табл. 5.1 и сравните результаты.
При сборке схемы не ошибитесь с полярностью электролитического конденсатора 470 мкФ!
4. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».

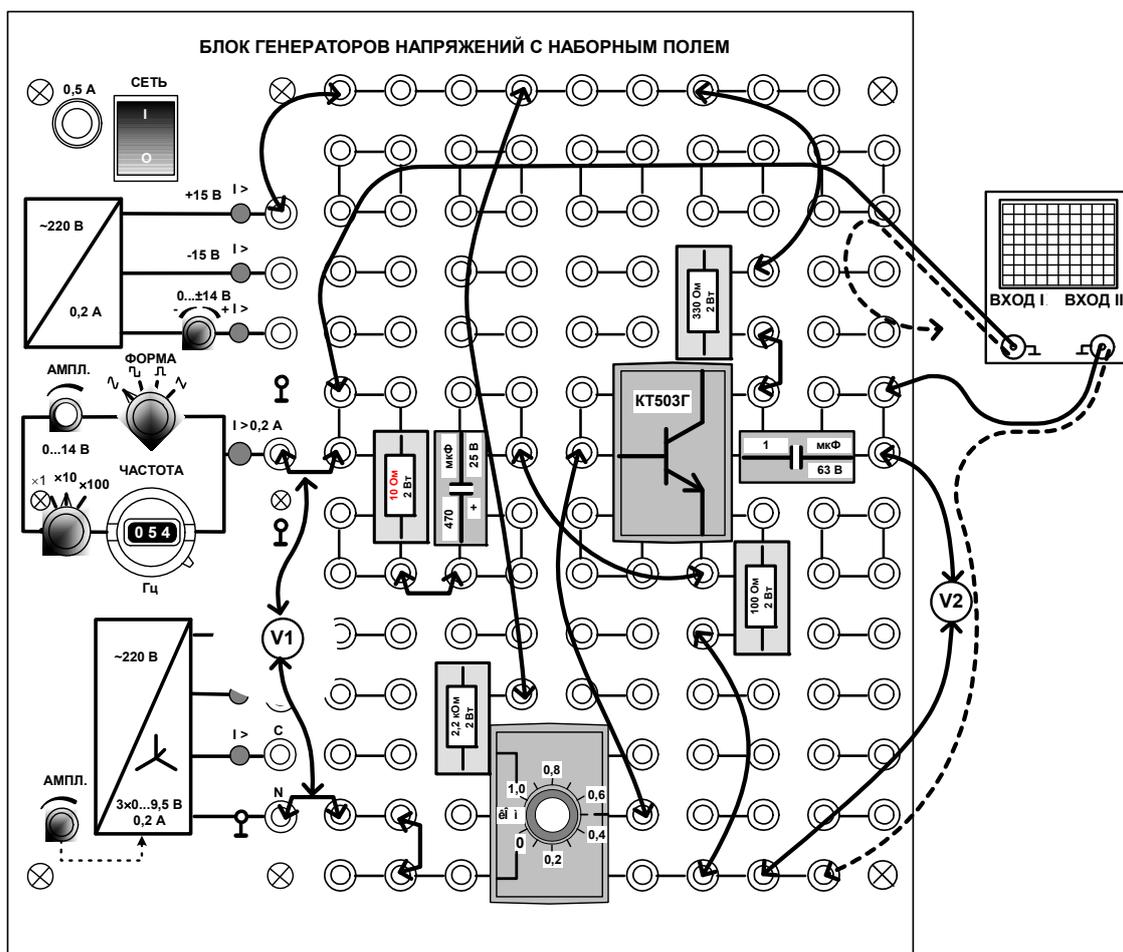


Рис. 5.4. Монтажная схема УК с ОБ

Таблица 5.1

	Схема с ОЭ	Схема с ОК	Схема с ОБ
$U_{ВХ}, В$			
$U_{ВЫХ}, В$			
$U_{R_{Г}}, В$			
$U_{R_{Н}}, В(*)$			
$U_{ВЫХ1}, В$	(при $R_{Н} = 1кОм$)	(при $R_{Н} = 0,47кОм$)	(при $R_{Н} = 1кОм$)
$U_{ВЫХ2}, В$	(при $R_{доб} = 1кОм$)	(при $R_{доб} = 4,7кОм$)	(при $R_{доб} = 10кОм$)
$I_{ВХ}, мА$			
$I_{ВЫХ}, мА$			
k_U			
k_I			
k_p			
$R_{ВЫХ}, кОм$			
$R_{ВХ}, кОм$			

(*) в схеме с ОЭ измеряется на сопротивлении, включённом в цепь эмиттера.

Контрольные вопросы

1. Для чего служат делители напряжения в цепи базы усилительных каскадов?
2. Почему происходит искажение выходного сигнала?
3. Как влияет температура на биполярный транзистор?
4. В чем особенность эмиттерного повторителя?
5. Почему схема с ОБ имеет наибольший коэффициент по напряжению?
6. Основные особенности схемы с ОК.
7. В каком из усилителей происходит инвертирование сигнала и в чём оно выражается?
8. Какой из усилителей имеет наибольший коэффициент усиления по мощности?
9. Что такое режим покоя усилителя?
10. Почему на низких частотах наблюдается уменьшение коэффициента усиления?
11. В каких областях можно применять каждый из усилителей?

Содержание отчёта

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень оборудования.
4. Исследуемые схемы.
5. Результаты исследований с таблицами.
6. Осциллограммы напряжений на входе и выходе УК, напряжение на коллекторе.
7. Расчёты с указанием размерности.
8. Графики.
9. Выводы.
10. Ответы на контрольные вопросы.

Лабораторная работа № 6 «ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ»

Цель работы: изучение основных статических характеристик биполярных и полевых транзисторов.

Общие сведения

Транзисторы представляют собой управляемые полупроводниковые приборы, использующие различные физические принципы в своей работе. В силовой преобразовательной технике наибольшее распространение получили:

- биполярные транзисторы;
- полевые транзисторы с изолированным затвором;
- комбинированные транзисторы.

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих $p-n$ перехода. Структура биполярного транзистора изображена на рис. 6.1.

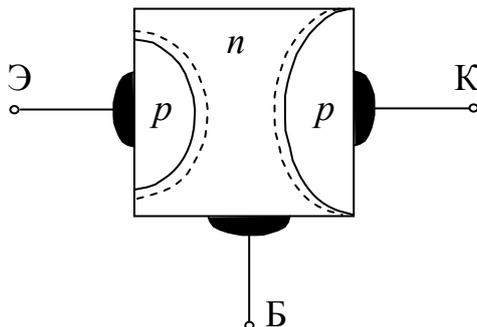


Рис. 6.1. Структура биполярного транзистора

Он представляет собой монокристалл полупроводника, в котором созданы три области с чередующимися типами электропроводности. На границах этих областей возникают электронно-дырочные переходы. От каждой области полупроводника сделаны токоотводы (омические контакты, не имеющие контактной разности потенциалов). Среднюю область транзистора, расположенную между электронно-дырочными переходами, называют базой. Примыкающие к базе области обычно делают неодинаковыми. Одну из областей делают так, чтобы из неё наиболее эффективно проходила инжекция носителей в базу, а другую так, чтобы $p-n$ переход между базой и этой областью наилучшим образом собирал инжектированные в базу носители, то есть осуществил

экстракцию носителей из базы. Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют эмиттером, а $p-n$ переход между базой и эмиттером – эмиттерным. Область транзистора, основным назначением которой является собирание, экстракция носителей из базы, называют коллектором, а $p-n$ переход между базой и коллектором – коллекторным.

В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают $p-n-p$ транзисторы (рис. 6.2, а) и $n-p-n$ транзисторы (рис. 6.3, а), графические обозначения которых представлены соответственно на рис. 6.2, б и рис. 6.3, б.

В обоих типах транзисторов физические процессы аналогичны, они различаются только типом инжектируемых и собираемых носителей и имеют одинаково широкое применение.

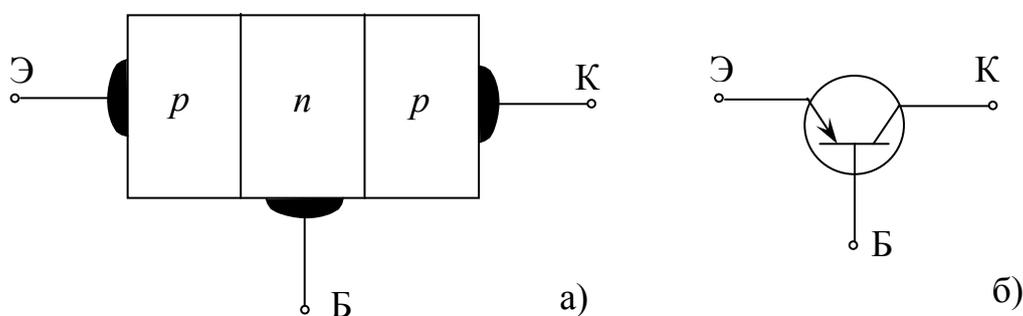


Рис. 6.2. $p-n-p$ транзистор

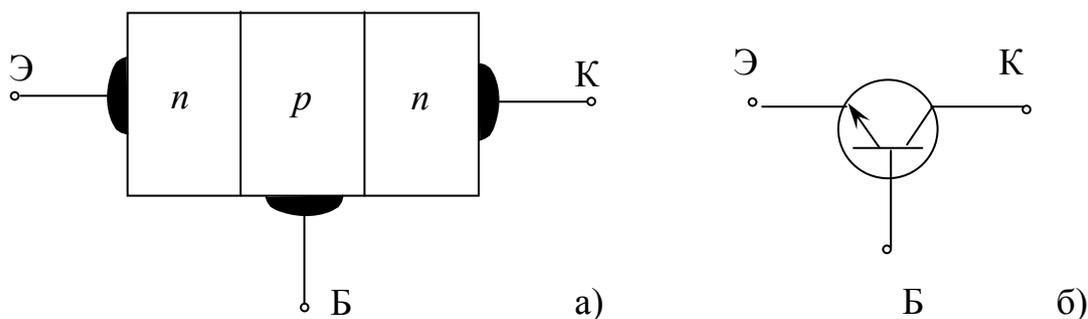


Рис. 6.3. $n-p-n$ транзистор

Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, и он инжектирует носители в базу, а на коллекторном переходе напряжение обратное, и он собирает носители из базы, то такое включение транзистора называют нормальным.

Свойства биполярных транзисторов описываются следующими четырьмя семействами характеристик:

Входная характеристика показывает зависимость тока базы I_B от напряжения в цепи база/эмиттер $U_{БЭ}$ (при $U_{КЭ} = \text{const}$).

Выходная характеристика показывает зависимость тока коллектора I_C от напряжения цепи коллектор/эмиттер $U_{КЭ}$ при различных фиксированных значениях тока базы.

Характеристика управления представляет собой зависимость тока коллектора I_C от тока базы I_B (при $U_{КЭ} = \text{const}$).

Характеристика обратной связи есть зависимость напряжения цепи база / эмиттер $U_{БЭ}$, от напряжения цепи коллектор/эмиттер $U_{КЭ}$ при различных фиксированных значениях тока базы.

Полевые транзисторы с изолированным затвором отличаются тем, что затвор выполнен в виде слоя металла, отделённого от полупроводникового канала тонким изолирующим слоем оксида кремния. Поэтому их называют МОП-транзисторами (металл – оксид – полупроводник). Канал между истоком и стоком МОП-транзистора может быть встроенным, т. е. специально изготовленным или наведённым. В первом случае характеристики МОП-транзистора аналогичны характеристикам транзистора с р-п переходом, но отличаются возможностью работы с прямым смещением затвора (в режиме обогащения). На рис. 6.4 показаны структура, условное обозначение и характеристики транзистора с встроенным каналом типа п.

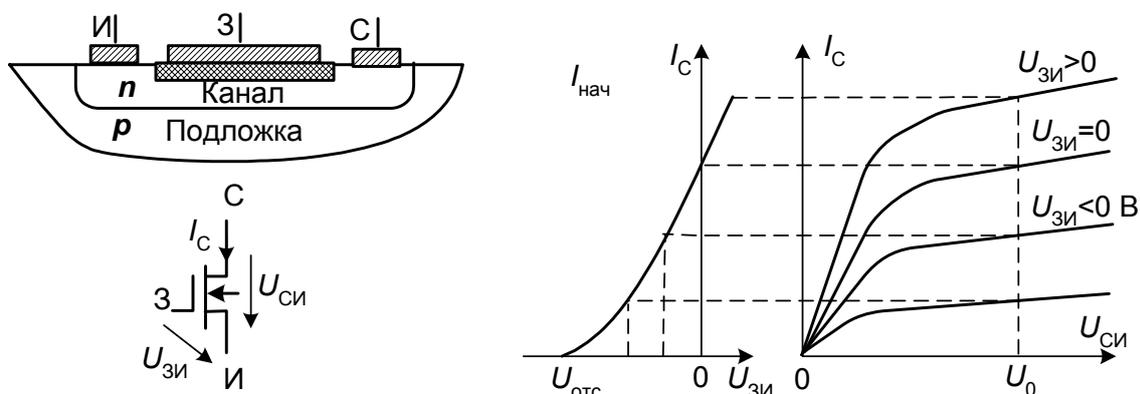


Рис. 6.4

Структура, условное обозначение и стоко-затворная характеристика МОП-транзистора с индуцированным каналом типа *n* показана на рис. 6.5. В подложке типа *p* изготовлены только небольшие области противоположного типа проводимости. При подаче на затвор положительного напряжения относительно истока к затвору будут притягиваться электроны, в то время как дырки от него будут отесняться. При некотором напряжении, называемом пороговым ($U_{ЗИпор}$) под затвором образуется *n*-слой, перемыкающий *n*-области под истоком и стоком. Вся стоко-затворная характеристика лежит в области обогащения.

В МОП транзисторе с индуцированным каналом типа *p* структура симметрична, и аналогичные процессы протекают при отрицательном напряжении на затворе.

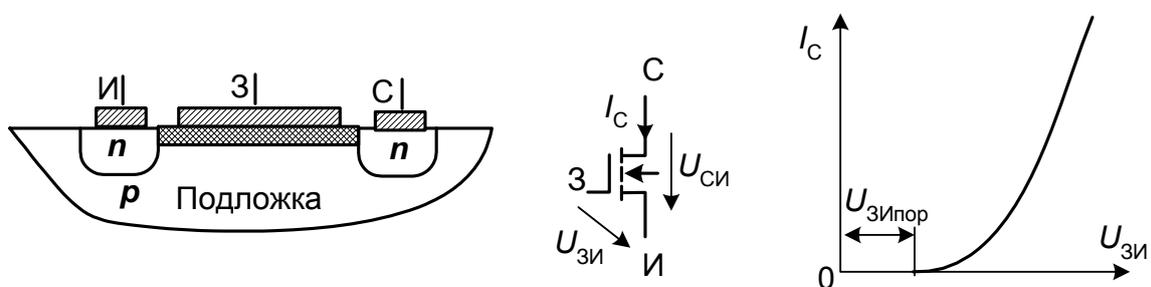


Рис. 6.5

Программа работы

Задание

Снять экспериментально и построить графики четырех семейств характеристик биполярного транзистора *n-p-n* типа. Снять статические выходные характеристики и стоко-затворную характеристику МОП-транзистора с индуцированным каналом типа *n*, определить пороговое напряжение $U_{ЗИпор}$, максимальную крутизну стоко-затворной характеристики S , сопротивления канала в ключевом режиме (в закрытом состоянии $R_{СИзакр}$ и в открытом – $R_{СИоткр}$)

Порядок работы

Опыт № 1. Регистрация статических характеристик биполярного транзистора

1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 6.6, 6.7). Потенциометр 1 кОм используется для регулирования тока базы, резисторы 100 и 47

кОм – для ограничения максимального тока базы. Регулирование напряжения $U_{кэ}$ осуществляется регулятором источника постоянного напряжения. Для предотвращения подачи обратного напряжения на транзистор в цепь коллектора включён диод. Переход эмиттер база также защищён шунтирующим диодом. Измерение тока базы I_B и напряжения $U_{бэ}$ производятся мультиметрами на пределах 200 μ А и 2 В соответственно, Пределы измерения тока коллектора I_K и напряжения $U_{кэ}$ изменяются в ходе работы по мере необходимости. **При сборке схемы предусмотрите переключки для переключения амперметра из одной ветви в другую.** После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ»

2. Установите первое значение тока базы 20 μ А, переключите миллиамперметр в цепь коллектора и, изменяя напряжение $U_{кэ}$ согласно значениям, указанным в табл. 6.1, снимите зависимости $I_K(U_{кэ})$ и $U_{бэ}(U_{кэ})$. Повторите эти измерения при каждом значении I_B , указанном в таблице.

Примечание: характеристики транзистора изменяются в ходе работы из-за его нагрева. Поэтому для большей определенности рекомендуется установить нужные значения $I_{бэ}$ и $U_{кэ}$, выключить на 30 с блок генераторов напряжений, затем включить его и быстро записать показания приборов V1 и A2.

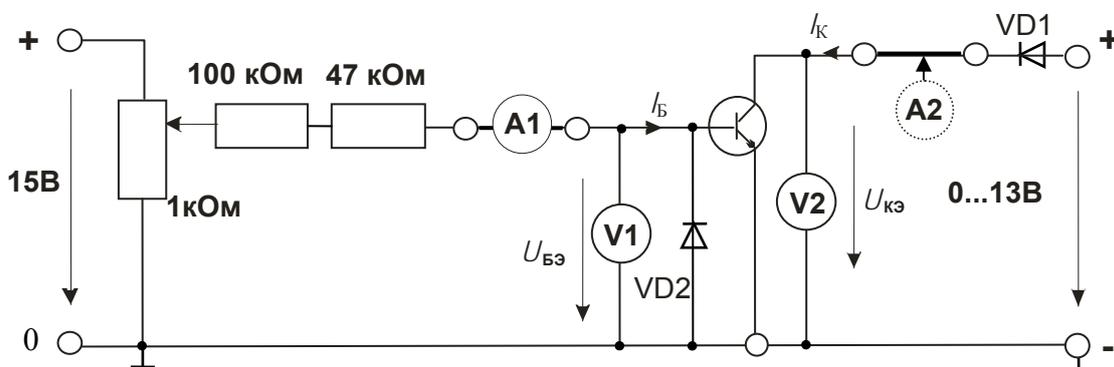


Рис. 6.6

Таблица 6.1

$U_{кэ}$, В	$I_B = 20 \mu\text{A}$		$I_B = 40 \mu\text{A}$		$I_B = 60 \mu\text{A}$		$I_B = 80 \mu\text{A}$	
	I_K , мА	$U_{бэ}$, В						
0								
0,5								
1								
2								
5								
10								
15								

3. На рис. 6.8 постройте графики семейства выходных характеристик $I_K(U_{KЭ})$ и семейство характеристик обратной связи $U_{БЭ}(U_{KЭ})$, не забыв указать какому току базы соответствует каждая кривая.

4. Установите $U_{KЭ} = 0$ и изменяя ток базы в соответствии со значениями, указанными в табл. 6.2, снимите зависимость $U_{БЭ}(I_B)$, Увеличьте напряжение $U_{KЭ}$ до 5 В и снова снимите зависимость $U_{БЭ}(I_B)$, а также и $I_K(I_B)$. Повторите этот опыт также при $U_{KЭ} = 15$ В. (При проведении этих измерений также учитывайте примечание к предыдущему опыту).

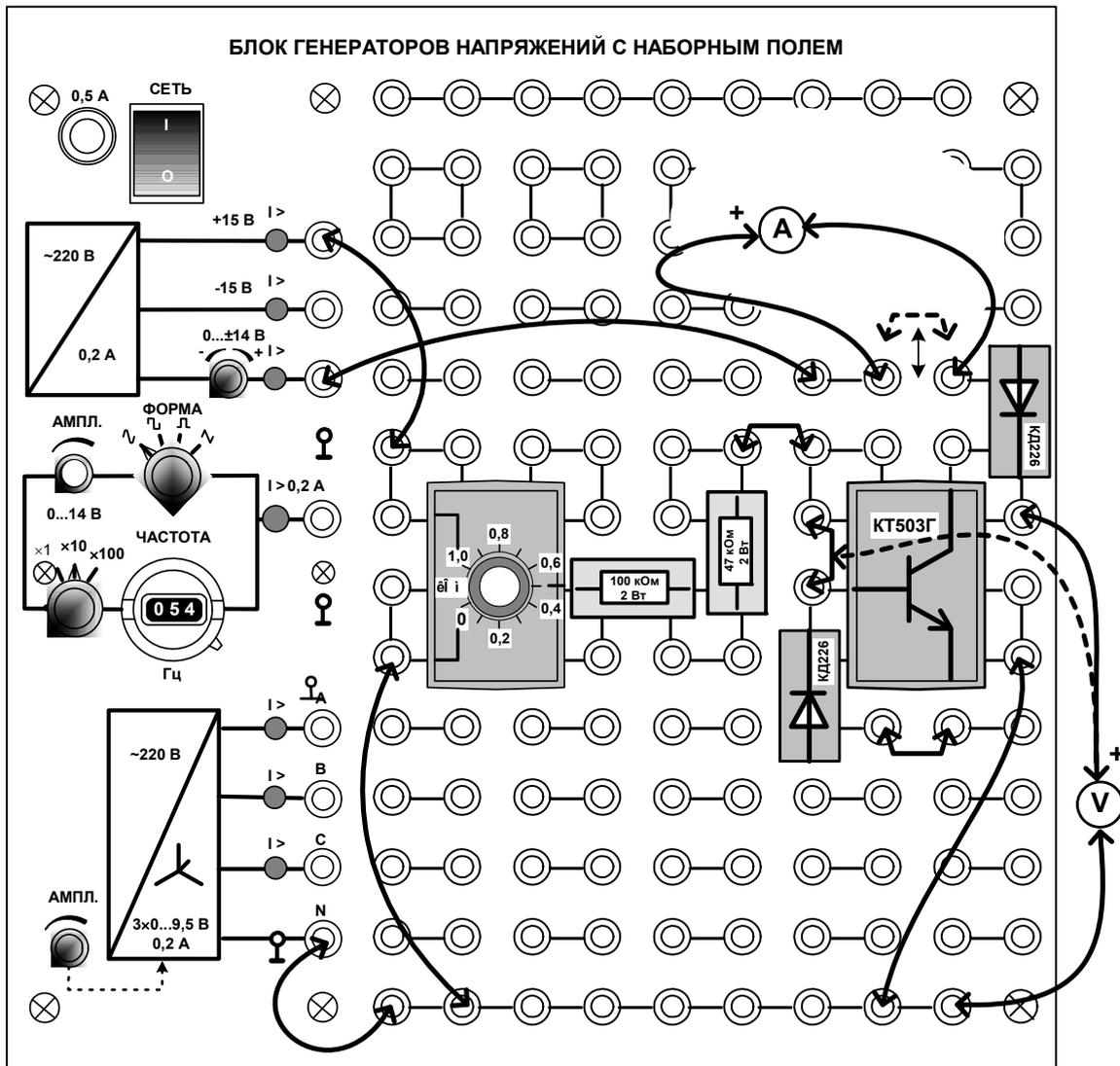


Рис. 6.7

5. На рис. 6.8 постройте графики входных $I_B(U_{БЭ})$ и регулировочных $I_K(I_B)$ характеристик, указав для каждой кривой соответствующие значения $U_{KЭ}$.

Таблица 6.2

$I_B, \mu A$	$U_{KЭ} = 0 B$		$U_{KЭ} = 5 B$		$U_{KЭ} = 15 B$	
	$U_{БЭ}, B$	I_K, mA	$U_{БЭ}, B$	I_K, mA	$U_{БЭ}, B$	I_K, mA
0						
5						
10						
20						
50						
80						

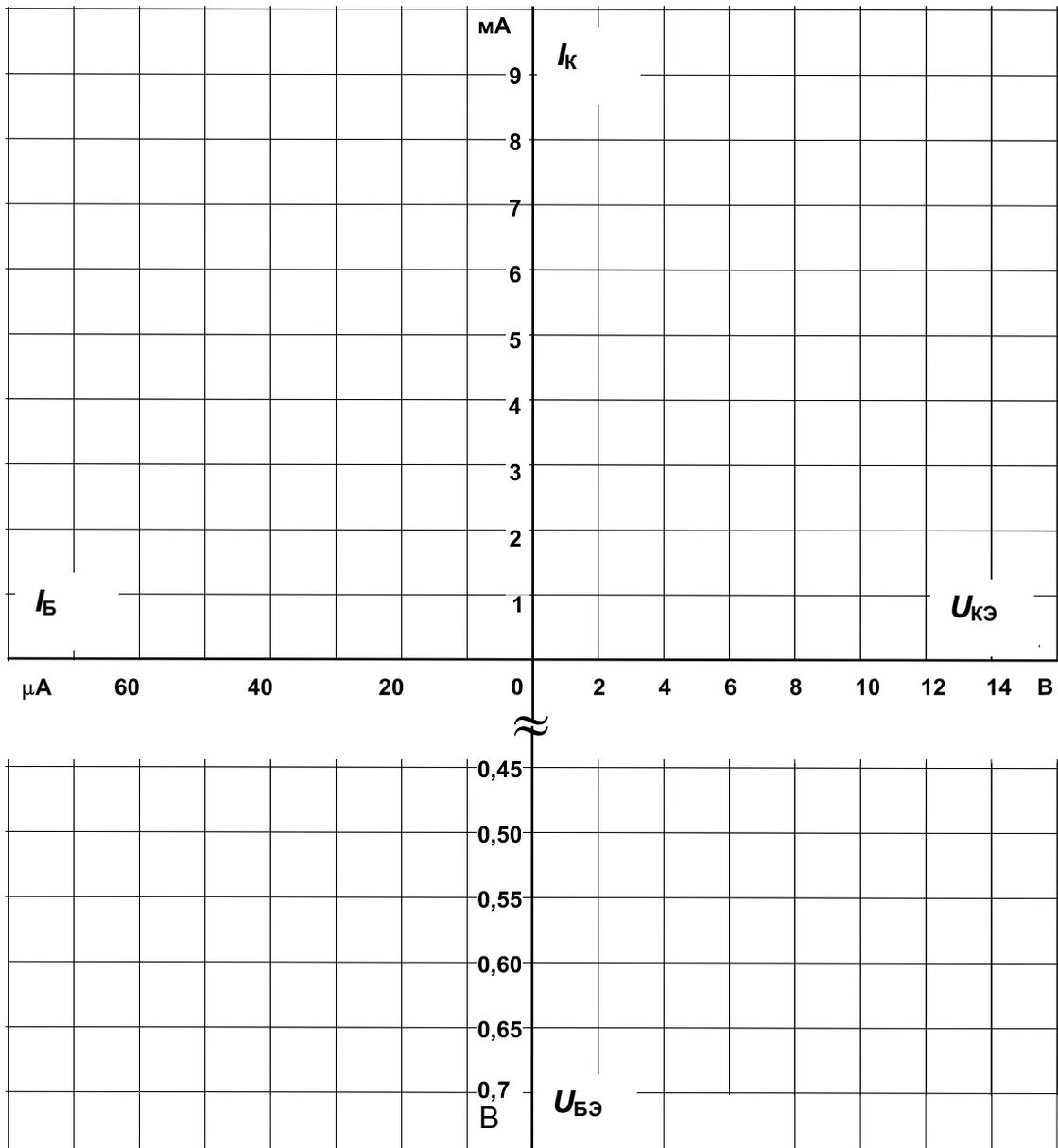


Рис. 6.8. Статические характеристики биполярного транзистора

Опыт №2. Регистрация статических характеристик полевого транзистора IRFD024

1. Соберите цепь для снятия характеристик транзистора (рис. 6.9). Диод Д226 включен в схему для предотвращения подачи отрицательного напряжения на транзистор при снятии выходных характеристик. Диод, показанный внутри микросхемы IRFD024 является паразитным элементом, обусловленным конструкцией р-п переходов в транзисторах подобного типа. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».

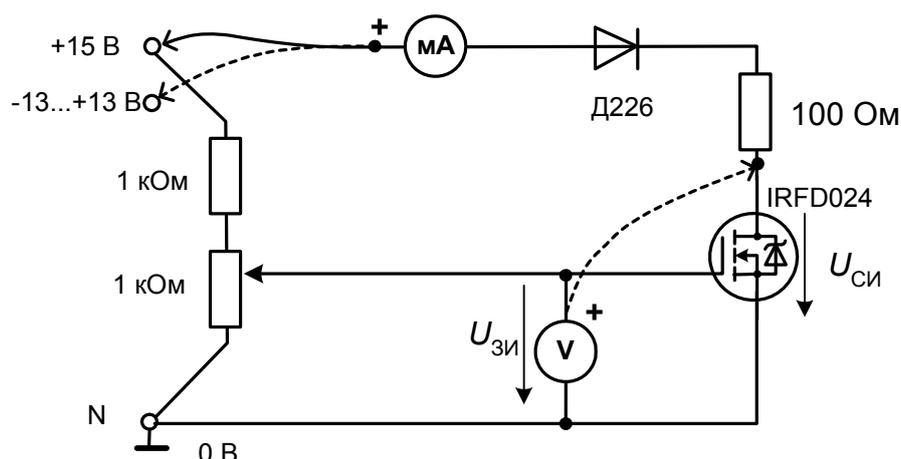


Рис. 6.9

2. Включите блок генераторов напряжений и мультиметры. Регулируя напряжение на затворе потенциометром, определите пороговое напряжение, при котором появляется ток стока.

$$U_{зи\text{пор}} = \dots\dots\dots\text{В.}$$

3. Устанавливая потенциометром напряжения на затворе, указанные в табл. 6.3, снимите стоко-затворную характеристику.

Таблица 6.3

$U_{зи}, \text{В}$	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4
$I_C, \text{мА}$										

4. Постройте график стоко-затворной характеристики (рис. 6.10) и определите крутизну:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зи}} = \dots\dots\dots \frac{\text{иА}}{\text{иА}};$$

5. Для снятия выходных характеристик транзистора переключите питание на регулируемый источник постоянного напряжения -13...+13 В,

как показано на схеме пунктиром, установите напряжение на затворе равным 3,9 В и переключите вольтметр для измерения напряжения $U_{СИ}$.

6. Регулируя напряжение питания от 0 до максимального значения (13...14 В), снимите зависимость $I_C(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = 3,9$ В (табл. 6.4).

Таблица 6.4

$U_{СИ}, В$		0	0,2	0,5	1	1,5	2	4
I_C мА	при $U_{ЗИ} = 3,9 В$							
	при $U_{ЗИ} = 4 В$							
	при $U_{ЗИ} = 4,1 В$							
	при $U_{ЗИ} = 4,2 В$							

7. Переключите снова вольтметр для измерения напряжения $U_{ЗИ}$, установите потенциометром $U_{ЗИ} = 4$ В, переключите вольтметр обратно для измерения напряжения $U_{СИ}$ и снимите зависимость ($U_{СИ}$) при $U_{ЗИ} = 4$ В.

8. Аналогично снимите выходные характеристики при других значениях $U_{ЗИ}$.

9. На рис. 6.10 постройте графики выходных характеристик.

10. Установите такое напряжение на затворе, при увеличении которого ток стока не изменяется (полностью открытое состояние транзистора) и определите сопротивление:

$$R_{СИоткр} = U_{СИ} / I_C = \dots\dots\dots \text{Ом.}$$

11. Установите на затворе напряжение равным нулю и определите сопротивление транзистора в закрытом состоянии:

$$R_{СИоткр} = U_{СИ} / I_C = \dots\dots\dots \text{Ом.}$$

Примечание: В последнем опыте ток весьма мал, поэтому для его измерения необходимо отключить вольтметр и переключить прибор на минимальный предел измерения тока.

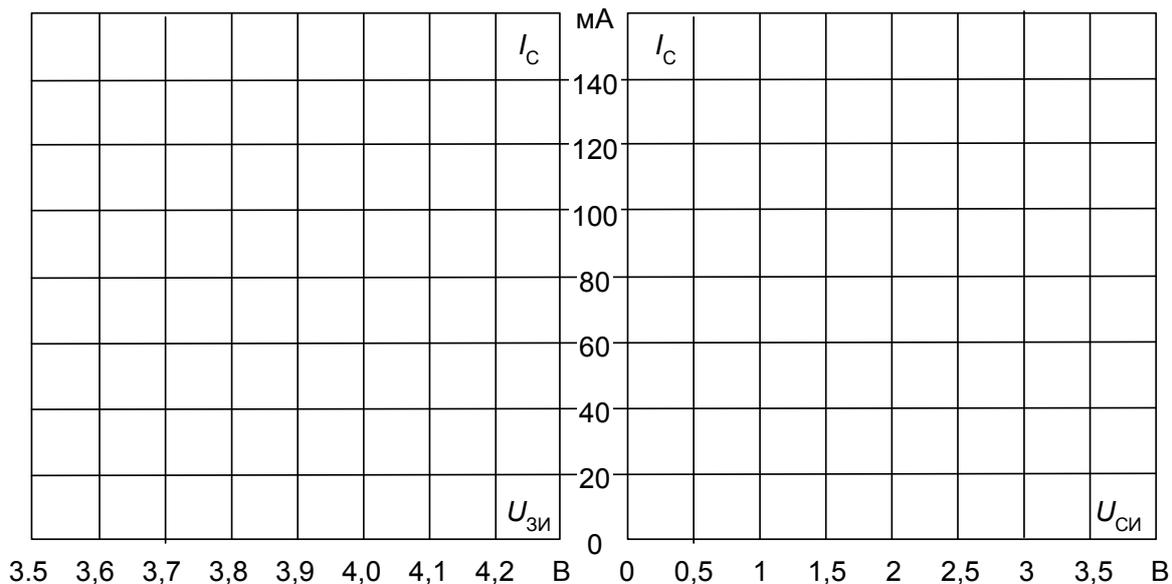


Рис. 6.10. Статические характеристики полевого транзистора

Контрольные вопросы

1. Какие типы транзисторов вы знаете и чем они отличаются друг от друга?
2. Как работает биполярный транзистор?
3. Каковы его основные характеристики?
4. Как выглядит выходная характеристика биполярного транзисторов и при каких условиях она снимается?
5. Какое явление в биполярном транзисторе отражает характеристика обратной связи?
6. Как можно построить характеристику управления по семейству выходных характеристик?
7. Нарисуйте структуру полевого транзистора с изолированным каналом и поясните его работу.
8. Чем отличается полевой транзистор с индуцированным каналом и его характеристики от полевого транзистора с изолированным каналом?
9. Какие преимущества и недостатки есть у полевых транзисторов по сравнению с биполярными?
10. Какие сферы применения биполярных и полевых транзисторов?

Содержание отчёта

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень оборудования.
4. Исследуемые схемы.
5. Результаты исследований с таблицами.
6. Статические ВАХ транзисторов по эксперименту (опыты 1-2)
Обработать полученные графики и определить основные параметры транзисторов.
7. Выводы.
8. Ответы на контрольные вопросы

Лабораторная работа № 7 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОПАР»

Цель работы: изучение основных свойств оптопар и определение их характеристик.

Общие сведения

Оптрон – это прибор, у которого входная и выходная цепи связаны только с помощью оптических сигналов. Основным излучателем света в оптронах является светодиод, но иногда используется сверхминиатюрная лампочка накаливания.

Условные обозначения оптопар, исследуемых в данной работе приведены на рис. 7.1.

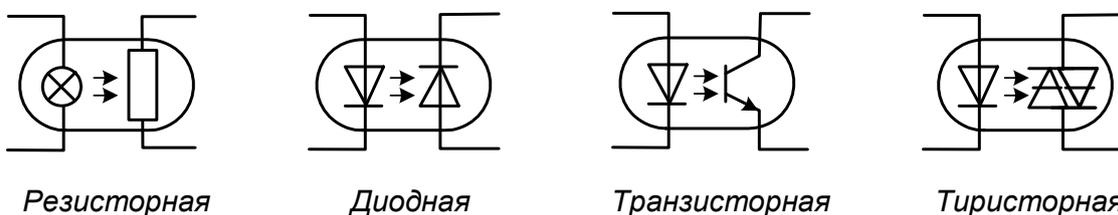


Рис. 7.1. Условно-графические обозначения различных типов оптопар

Основными характеристиками резисторной оптопары являются входная вольтамперная характеристика, выходная температурная и передаточная характеристики – зависимость выходного сопротивления от входного тока.

Диодная оптопара может работать в генераторном и фотодиодном режиме. В генераторном режиме при облучении оптронного фотодиода в нём возникает генерация пар носителей заряда – электронов и дырок. Свободные электроны и дырки разделяются электрическим полем перехода и заряжают p – область положительно, а n – область отрицательно. На выходных зажимах оптрона появляется фото-ЭДС 0,7...0,8 В.

Если к фотодиоду приложено обратное напряжение больше 0,5 В, то электроны и дырки, генерированные излучением увеличивают обратный ток. Это фотодиодный режим. Величина обратного фототока практически линейно возрастает с увеличением силы света излучающего диода.

Основными характеристиками диодной оптопары являются входная и выходная вольтамперные характеристики и передаточные характеристики в фотодиодном и генераторном режимах. Передаточная характеристика в фотодиодном режиме представляет собой зависимость выходного тока от входного. Она практически линейна в широком диапазоне изменения

входного тока. В фотогенераторном режиме это зависимость фото-ЭДС от входного тока. Эта зависимость нелинейна, так как фото-ЭДС не может превышать контактной разности потенциалов 0,5...0,8 В.

Транзисторные оптопары также как и диодные характеризуются входными и выходными вольтамперными характеристиками и передаточной характеристикой. Входные характеристики такие же, как у диодных оптопар, так как в них используются сходные излучатели. Выходные вольтамперные характеристики аналогичны выходным характеристикам биполярного транзистора. Передаточная характеристика в отличие от характеристики диодной оптопары существенно нелинейна и имеет большую крутизну (коэффициент передачи тока) за счёт усиления фототока.

В тиристорных оптопарах выходным элементом является тиристор, который обладает всеми свойствами и характеристиками обычных тиристоров, однако, он управляется фототоком.

Программа работы

Задание

Снять передаточные характеристики резисторной оптопары, диодной оптопары в генераторном и фотодиодном режимах, передаточную характеристику транзисторной оптопары, определить открывающий ток управления и остаточное напряжение в открытом состоянии симисторной оптопары при двух полярностях приложенного напряжения.

Порядок работы

Опыт №1. Регистрация характеристики $R_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ВХ}})$ резисторной оптопары ОЭП13

1. Соберите цепь (рис. 7.2) для снятия передаточной характеристики резисторной оптопары. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».

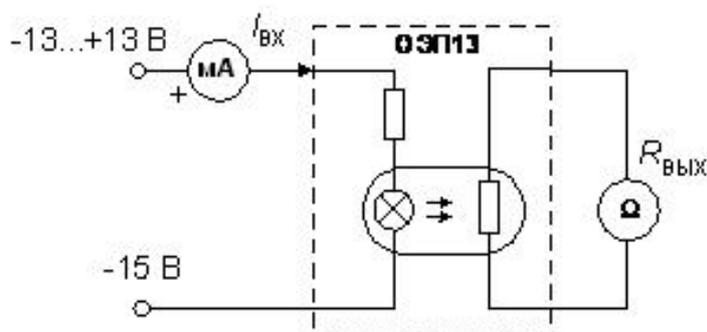


Рис. 7.2. Принципиальная схема резисторной оптопары

2. Изменяя входной ток регулятором напряжения, проследите за изменением сопротивления фоторезистора.

3. Устанавливая изменением входного тока значения сопротивлений, указанные в табл. 7.1, снимите передаточную характеристику и на рис. 7.7, а) постройте график в логарифмическом масштабе по оси $R_{\text{ВЫХ}}$.

4. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».

Таблица 7.1

$R_{\text{ВЫХ}}, \text{ Ом}$	10^8	10^7	10^6	10^5	10^4	10^3	10^2
$I_{\text{ВХ}}, \text{ мА}$							

Опыт № 2. Регистрация характеристик диодной оптопары ЗОД101Б в фотогенераторном режиме

1. Соберите цепь (рис. 7.3) для снятия передаточной характеристики диодной оптопары в фотогенераторном режиме. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».

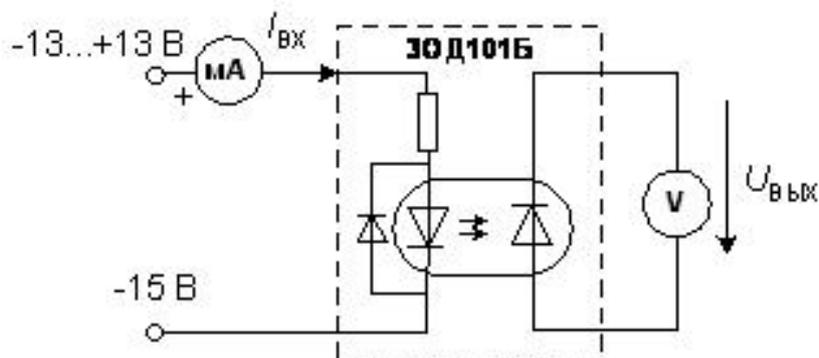


Рис. 7.3. Принципиальная схема диодной оптопары в фотогенераторном режиме

2. Увеличивая входной ток, согласно табл. 7.2 снимите зависимость $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВХ}})$ (для установки нулевого входного тока разомкните цепь!).

Таблица 7.2

$I_{\text{ВХ}}, \text{ мА}$	0	0,5	1	2	4	6	8	10	12
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$									

3. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».

4. По данным табл. 7.2 постройте график на рис. 7.7 б).

Опыт № 3. Регистрация характеристики диодной оптопары ЗОД101Б в фотодиодном режиме

1. Соберите цепь (рис. 7.4) для снятия передаточной характеристики диодной оптопары в фотодиодном режиме. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».
2. Изменяя входной ток регулятором напряжения, проследите за изменением выходного тока, заполните табл. 7.3.

Таблица 7.3

$I_{ВХ}, \text{ мА}$	0	2	4	6	8	10	12
$I_{ВЫХ}, \text{ мА}$							

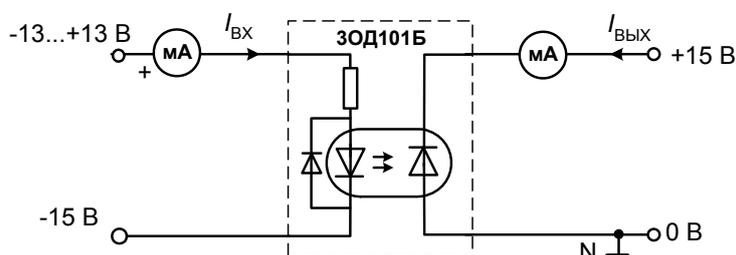


Рис. 7.4. Принципиальная схема диодной оптопары в фотодиодном режиме

3. Отключите питание выключателем «СЕТЬ».
4. По данным табл. 7.3 постройте график на рис. 7.7, б.

Опыт № 4. Регистрация характеристики транзисторной оптопары АОТ110А

1. Соберите цепь (рис. 7.5) для снятия передаточной характеристики транзисторной оптопары. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».

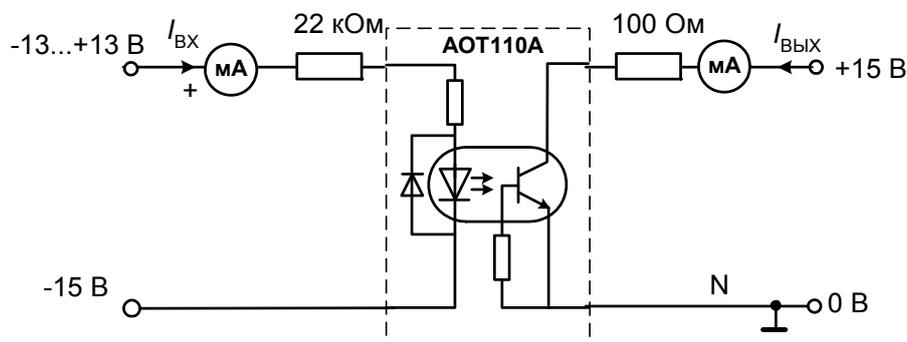


Рис. 7.5. Принципиальная схема транзисторной оптопары

2. Изменяя входной ток регулятором напряжения, проследите за изменением выходного тока, заполните табл. 7.4.

Таблица 7.4

$I_{ВХ},$ мА	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
$I_{ВЫХ},$ В											

- Отключите питание выключателем «СЕТЬ».
- По данным табл. 7.4 постройте график на рис. 7.7, в.

Опыт №5. Регистрация характеристики симисторной оптопары МОС3010

- Соберите цепь (рис. 7.6) для определения открывающего тока управления ($I_{откр.у}$) и остаточного напряжения ($U_{ост}$) симисторной оптопары. После проверки схемы преподавателем подайте питание на панель выключателем «СЕТЬ».
- Изменяя ток управления регулятором напряжения, убедитесь, что при увеличении тока симистор включается, но при уменьшении не выключается.
- Выключите симистор кратковременным размыканием цепи нагрузки и, медленно увеличивайте ток управления от нулевого значения. Заметьте и запишите в таблицу (на рис. 7.7, г) значения открывающего тока управления и остаточного напряжения на открытом симисторе.
- Отключите питание выключателем «СЕТЬ». Повторите опыт при обратной полярности питания (*переключите провод с +15В на -15В*).

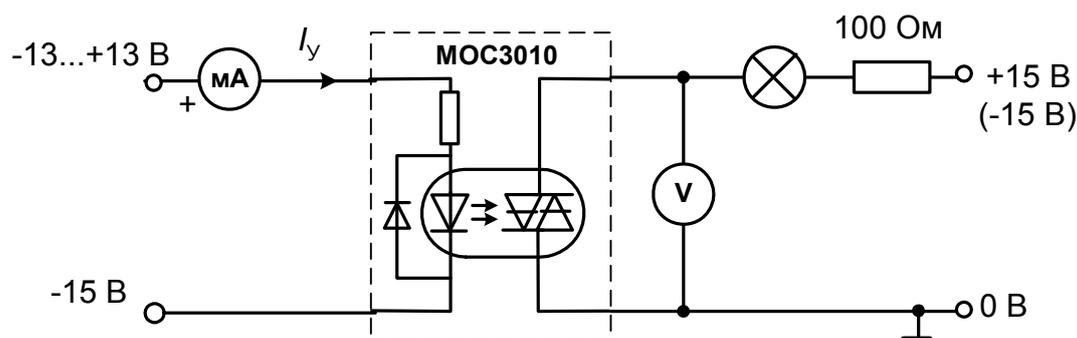


Рис. 7.6. Принципиальная схема симисторной оптопары

Контрольные вопросы

- Какие типы оптопар вы знаете, и чем они отличаются друг от друга?
- Как работает опторезистор, какова его основная регулировочная характеристика?

3. Как влияет температура на характеристики оптопар?
4. Как работает диодная оптопара в фотогенераторном режиме?
5. Почему диодную оптопару часто используют в фотодиодном режиме?
6. Нарисуйте структуру p-n переходов фототранзистора и объясните его работу.
7. Чем отличается фотосимистор от фототранзистора по структуре и по характеристикам?
8. Каковы условия открытия фотосимистора?
9. Какие условия должны быть выполнены, чтобы фотосимистор закрылся?
10. Что такое чувствительность оптопары и как её найти экспериментально?

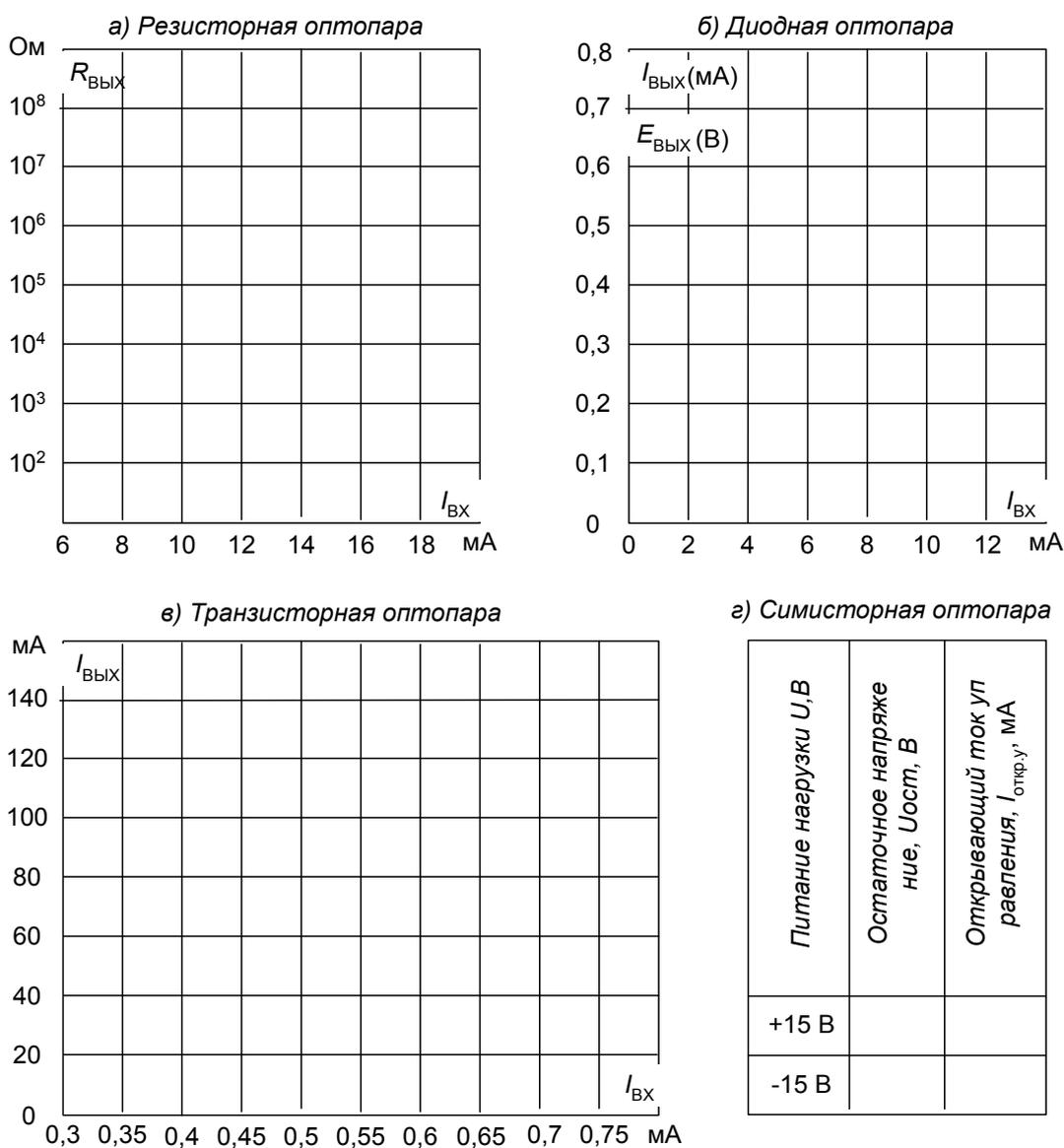


Рис. 7.7. Регулировочные характеристики оптопар

Содержание отчёта

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень оборудования.
4. Исследуемые схемы.
5. Результаты исследований с таблицами.
6. Передаточные характеристики оптопар по эксперименту (опыты 1–5). Обработать полученные графики и определить основные параметры оптопар.
7. Выводы.
8. Ответы на контрольные вопросы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: учеб. Пособие. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2005. – 408 с.
2. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – 4-е изд. – М.: Энергия, 1977. – 671 с.
3. Ржевкин К.С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов. – М.: изд-во. МГУ, 1986. – 256 с.
4. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов. – 6-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2002. – 480 с.
5. Жеребцов И.П. Основы электроники. – 5-е изд., пераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат; Ленингр. отд-ние, 1990. – 352 с.
6. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с.
7. Петрович В.П. Физические основы электроники: учеб. пособие. – Томск: Изд-во. ТПУ, 2006. – 243 с.

Учебное издание

ПЕТРОВИЧ Виталий Петрович
ВОРОНИНА Наталья Алексеевна
ПАЮК Любовь Анатольевна
ОБРАЗЦОВ Константин Валентинович

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Лабораторный практикум

Издано в авторской редакции

Научный редактор
кандидат технических наук, доцент Л.К. Бурулько
Компьютерная вёрстка *Н.А. Воронина, Л.А. Паюк, К.В. Образцов*
Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

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

Подписано к печати 28.12.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,21.
Заказ 83-13. Тираж 100 экз.



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



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