

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Кафедра «Электронная техника»

ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Учебно-методическое пособие
для студентов очной и заочной форм обучения
направления подготовки
11.03.04 – «Электроника и наноэлектроника»

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 378.146.9:006.91(07)

Р е ц е н з е н т:

В.К. Макаров – канд. техн. наук, доцент кафедры
«Электронная техника»
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Составитель: Е.Ю. Владыка

Измерения в электронике. Лабораторный практикум по дисциплине:
учеб.-метод. пособие для студентов очной и заочной форм обучения направле-
ния подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» / Сост. Е.Ю. Вла-
дыка. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 44 с.: ил.

Приведены методические рекомендации по выполнению лабораторных работ по дис-
циплине «Измерения в электронике». Показана последовательность выполнения работы,
характер принимаемых решений, порядок расчетных величин.

Каждый этап расчета сопровождается методическими рекомендациями по принятию
соответствующих решений и реализации расчетов.

Предназначены для студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и нано-
электроника».

УДК 378.146.9:006.91(07)

Рассмотрено и рекомендовано на заседании Ученого Совета Института ра-
диоэлектроники и информационной безопасности СевГУ, протокол № 5 от 19
апреля 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие положения	5
1 Лабораторная работа № 1. Определение погрешностей измерения параметров цепей с линейными элементами	7
1.1 Краткая теория.....	7
1.2 Содержание работы.....	7
1.3 Порядок выполнения	8
1.4 Обработка результатов	9
1.5 Контрольные вопросы	11
1.6 Библиография	11
2 Лабораторная работа № 2. Измерение вольт-амперных характеристик нелинейных элементов в цепях постоянного тока	12
2.1 Краткая теория.....	12
2.2 Содержание работы.....	15
2.3 Порядок выполнения	16
2.4 Обработка результатов измерений	18
2.5 Контрольные вопросы	20
2.6 Библиография	20
3 Лабораторная работа №3. Измерение характеристик терморезистора	21
3.1 Краткая теория.....	21
3.2 Содержание работы.....	23
3.3 Порядок выполнения работы	23
3.4 Обработка результатов измерений	24
3.5 Контрольные вопросы	26
3.6 Библиография	26
4 Лабораторная работа №4. Изучение и измерение параметров диодного ограничителя	27
4.1 Краткая теория.....	27
4.2 Содержание работы.....	27
4.3 Порядок выполнения работы	28
4.4 Обработка результатов измерений	28
4.5 Контрольные вопросы	29
4.6 Библиография	29
5 Лабораторная работа №5. Измерение фазы синусоидального сигнала методом фазового эллипса	30
5.1 Краткая теория.....	30
5.2 Содержание работы.....	31
5.3 Порядок выполнения работы	32
5.4 Обработка результатов измерений	33
5.5 Контрольные вопросы	33
5.6 Библиография	33
6 Лабораторная работа № 6. Измерение параметров усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе	34

6.1	Краткая теория.....	34
6.2	Содержание работы.....	35
6.3	Порядок выполнения работы	36
6.4	Обработка результатов измерений	36
6.5	Контрольные вопросы	36
6.6	Библиография	36
7	Лабораторная работа №7. Изучение и измерение параметров диодного выпрямителя	37
7.1	Краткая теория.....	37
7.2	Содержание работы.....	38
7.3	Порядок выполнения работы	38
7.4	Обработка результатов измерений	39
7.5	Контрольные вопросы	39
7.6	Библиография	39
8	Лабораторная работа №8. Изучение и измерение параметров.....	40
	транзисторного ключа.....	40
8.1	Краткая теория.....	40
8.2	Содержание работы.....	41
8.3	Порядок выполнения работы	42
8.4	Обработка результатов измерений	42
8.5	Контрольные вопросы	42
8.6	Библиография	43
	Список использованной литературы	44

Общие положения

Лабораторный практикум по дисциплине «Измерения в электронике» имеет целью развитие у студентов элементарных навыков самостоятельной сборки макетов простейших схем; использования аналоговых и цифровых электроизмерительных приборов; работы с электронным осциллографом, генераторами сигналов и источниками питания.

Практикум состоит из восьми лабораторных работ, включающих в себя решение следующих задач:

- измерение вольт-амперных характеристик линейных и нелинейных элементов радиоэлектронных схем;
- определение частоты, амплитуды и сдвига фаз гармонических колебаний с помощью электронного осциллографа;
- монтаж и измерение основных характеристик простейших электронных схем на основе полупроводниковых приборов:
 - диодного одностороннего ограничителя;
 - выпрямителя переменного тока на диодах;
 - усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе;
 - простейшей ключевой схемы на транзисторе.

При обработке результатов измерений студенты должны уметь рассчитывать абсолютные и относительные погрешности измерений, правильно строить графики по экспериментальным данным.

Работая над составлением отчета о лабораторной работе, студенты должны теоретически осмыслить полученные результаты, уметь объяснить их физический смысл и кратко изложить в отчете.

Защита отчета проводится строго индивидуально в процессе собеседования с преподавателем.

При защите лабораторных работ студенты должны:

Представить преподавателю правильно оформленный и подписанный ими отчет по установленному образцу.

Проявить понимание цели работы и четкое знание порядка ее выполнения, что свидетельствует о самостоятельности работы студента.

Знать принципы работы собранной ими схемы и основное назначение используемых в работе измерительных приборов; уметь объяснить полученные результаты и ответить на теоретические вопросы, имеющие непосредственное отношение к данной работе.

Отчет составляется на развернутом тетрадном листе, внутрь которого при необходимости могут быть вложены дополнительные листы. На первой (лицевой) странице отчета указываются:

- в верхней части - название университета и кафедры;
- в средней части (в центре страницы) - порядковый номер работы, дисциплина («Измерения в электронике») и название лабораторной работы;
- в нижней части справа - номер группы, фамилия и инициалы студента; должность, фамилия и инициалы преподавателя.

На остальных страницах приводятся следующие данные:

- цель и краткое содержание работы (согласно описанию);
- измерительная схема и перечень использованных измерительных приборов с их условными наименованиями;
- таблицы результатов измерений (как прямых, так и косвенных, т.е. вычисленных по результатам прямых измерений);
- формулы, по которым проводились вычисления;
- абсолютные и относительные погрешности измерений с объяснением основных источников погрешностей;
- графики полученных зависимостей (если требуются в данной работе);
- краткие выводы и объяснение полученных результатов.

1 Лабораторная работа № 1. Определение погрешностей измерения параметров цепей с линейными элементами

1.1 Краткая теория

Линейным называется элемент, параметры которого не зависят от величины протекающего через него тока или приложенного к нему напряжения. Если таким элементом является резистор, то его вольт-амперная характеристика (ВАХ) линейна и описывается законом Ома.

Погрешность измерения – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Поскольку на результаты измерений влияет большое количество факторов, распределение результатов измерений и их погрешностей описывается математическим аппаратом теории вероятностей и математической статистики.

Истинное значение измеряемой величины никогда точно неизвестно, поэтому в качестве истинного значения принимают *математическое ожидание* измеряемой величины. Статистической оценкой математического ожидания служит среднее арифметическое значение измеряемой величины, вычисляемое по формуле

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_i, \quad (1)$$

где N – число измерений; X_i – значение измеряемой величины, полученное при i -м измерении.

Таким же образом определяется и абсолютная погрешность результатов измерений:

$$\Delta X = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |\bar{X} - X_i| \quad (2)$$

Относительной погрешностью измерений называется величина

$$\delta = \pm \frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Все сказанное относится к расчету погрешностей прямых измерений (полученных непосредственно по показаниям измерительного прибора). Погрешности косвенных измерений (полученных в результате вычислений по формулам, в которые входят результаты прямых измерений) рассчитывают согласно правилам дифференциального исчисления, но также без учета знаков.

1.2 Содержание работы

Целью работы является определение абсолютной и относительной погрешности измерения падения напряжения на резисторах, соединенных последовательно и подключенных к источнику постоянного напряжения, как показа-

но на рис. 1.1, а также при измерении внутреннего сопротивления цифрового вольтметра (рис. 1.2).

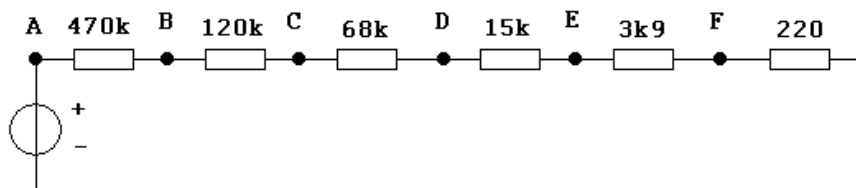


Рис. 1.1 Измерительная схема № 1

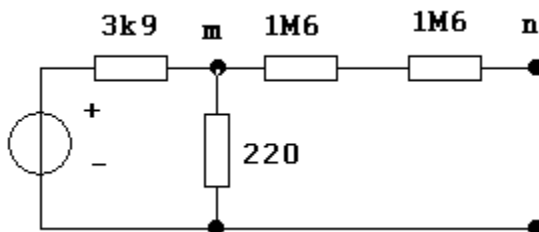


Рис. 1.2. Измерительная схема № 2

1.3 Порядок выполнения

- 1) Измерить с помощью омметра и записать точные величины сопротивлений всех используемых в схемах резисторов. Результаты измерений занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Измеренные значения сопротивлений резисторов

$R_{\text{ном}}, \text{ Ом}$	470k	120k	68k	15k	3k9	220	1M6	1M6
$R_{\text{изм}}, \text{ Ом}$								

- 2) Собрать измерительную схему № 1.
- 3) Задавая значения напряжения в точке А 1, 2, 5 и 10 В, измерить напряжения в точках В, С, D, Е, F относительно отрицательного вывода источника питания. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Измеренные значения напряжений в схеме № 1

$U_A, \text{ В}$	$U_B, \text{ мВ}$	$U_C, \text{ мВ}$	$U_D, \text{ мВ}$	$U_E, \text{ мВ}$	$U_F, \text{ мВ}$
1					
2					
5					
10					

- 4) Собрать измерительную схему № 2.
- 5) Выставляя напряжения в точке **m** относительно *отрицательного* вывода источника питания, измерить напряжения в точке **n** относительно *отрицательного* вывода источника питания. Результаты измерений занести в табл. 1.3.

Таблица 1.2 – Измеренные значения напряжений в схеме № 2 (положительное напряжение)

$U_m, \text{ В}$	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0
$U_n, \text{ мВ}$								

- 6) Изменить полярность источника питания на противоположную.
- 7) Выставляя напряжения в точке **m** относительно *положительного* вывода источника питания, измерить напряжения в точке **n** относительно *положительного* вывода источника питания. Результаты измерений занести в табл. 1.4.

Таблица 1.3 – Измеренные значения напряжений в схеме № 2 (отрицательное напряжение)

U _m , В	-0,1	-0,2	-0,5	-1,0	-2,0	-5,0	-10,0	-20,0
U _n , мВ								

1.4 Обработка результатов

- 1) Используя измеренные значения сопротивлений резисторов на схеме №1 из табл. 1, вычислить ожидаемые значения напряжений в точках В, С, D, Е и F. Результаты вычислений занести в табл. 1.5.

Таблица 1.4 – Расчетные значения напряжений в схеме №1

U _A , В	U _B , мВ	U _C , мВ	U _D , мВ	U _E , мВ	U _F , мВ
1					
2					
5					
10					

Для вычисления напряжений следует воспользоваться формулой

$$U_x = U_a \cdot \sum_{j=x}^N R_j / \sum_{i=1}^N R_i, \quad (4)$$

где U_x – напряжение в искомых точках (В, С, D, Е или F); R_j – резистор после точки x; N – общее количество резисторов цепи (в данном случае 6)

- 2) Вычислить средние значения между расчетными и измеренными значениями напряжений по формуле 1 для каждого отдельного измерения. Результаты занести в табл. 1.6.

Таблица 1.5 – Средние значения напряжений в схеме №1

U _A , В	U _B , мВ	U _C , мВ	U _D , мВ	U _E , мВ	U _F , мВ
1					
2					
5					
10					

Для этого необходимо воспользоваться формулой

$$\overline{U_x} = \frac{U_{x_измер} + U_{x_расч}}{2}, \quad (5)$$

где $U_{x_измер}$ – измеренное значение напряжения в точке (табл. 2); $U_{x_расч}$ – расчетное значение напряжения в точке (табл. 1.5).

- 3) Сравнить расчетные значения напряжений с измеренными и определить абсолютные погрешности измерений по формуле 2 для каждого отдельного измерения. Результаты занести в табл. 1.7.

Таблица 1.6 – Абсолютные погрешности

U _A , В	ΔU _B , мВ	ΔU _C , мВ	ΔU _D , мВ	ΔU _E , мВ	ΔU _F , мВ
1					
2					
5					
10					

- 4) Вычислить относительные погрешности по формуле 3 для каждого отдельного измерения. Результаты занести в табл. 1.8.

Таблица 1.7 – Относительные погрешности

U _A , В	δU _B , %	δU _C , %	δU _D , %	δU _E , %	δU _F , %
1					
2					
5					
10					

- 5) Определить среднее арифметическое значение абсолютной погрешности, включая в сумму все полученные погрешности для всех точек и напряжений источника питания.
- 6) Определить среднее арифметическое значение относительной погрешности, включая в сумму все полученные погрешности для всех точек и напряжений источника питания.
- 7) Используя измеренные значения сопротивлений резисторов на измерительной схеме №2 из табл. 1.1, вычислить *внутреннее сопротивление вольтметра*, включенного между точкой **n** и *минусом* источника питания при различных значениях напряжения в точке **m**. Результаты занести в табл. 1.9.

Для вычисления сопротивления вольтметра следует воспользоваться формулой

$$R_V = \frac{U_n}{U_m - U_n} \cdot (R_{1M6} + R_{1M6}), \quad (6)$$

где R_{1M6} – сопротивления соответствующих резисторов из табл. 1.

Таблица 1.8 – Результаты вычисления внутреннего сопротивления вольтметра

U _m , В	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0
U _n , мВ								
R _V , Ом								

- 8) Используя измеренные значения сопротивлений резисторов на измерительной схеме №2 из табл. 1.1, вычислить *внутреннее сопротивление вольтметра*, включенного между точкой **n** и *плюсом* источника питания при различных значениях напряжения в точке **m**. Результаты занести в табл. 1.10.

Таблица 1.9 – Результаты вычисления внутреннего сопротивления вольтметра

$U_m, \text{ В}$	-0,1	-0,2	-0,5	-1,0	-2,0	-5,0	-10,0	-20,0
$U_n, \text{ мВ}$								
$R_V, \text{ Ом}$								

- 9) Сравнить значения сопротивления вольтметра, вычисленные из результатов измерений при положительных и отрицательных напряжениях источника питания. Объяснить разницу полученных значений (если она будет наблюдаться).
- 10) Проанализировать источники погрешностей измерений. Выделить случайные и систематические погрешности.

1.5 Контрольные вопросы

- 1) Что такое абсолютная и относительная погрешность измерений?
- 2) Чем обусловлены случайные и систематические погрешности?
- 3) Что такое математическое ожидание и дисперсия случайной величины?

1.6 Библиография

[1], [6].

2 Лабораторная работа № 2. Измерение вольт-амперных характеристик нелинейных элементов в цепях постоянного тока

2.1 Краткая теория

Вольт-амперная характеристика элемента – графическое представление зависимости протекающего через элемент тока от приложенного к нему напряжения.

Выделяют линейные и нелинейные элементы.

Простейшим линейным элементом является резистор, т.к. согласно закону Ома, зависимость тока от напряжения описывается выражением:

$$I(U) = \frac{U}{R}, \quad (7)$$

где R – сопротивление резистора (постоянная величина). На рисунке ниже представлены ВАХ нескольких резисторов.

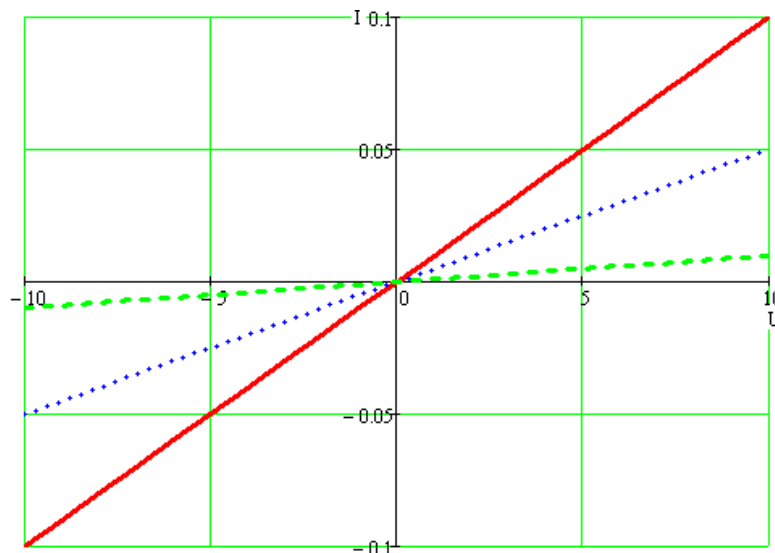


Рис. 2.1. Вольт-амперная характеристика резисторов 100, 200 и 500 Ом

Нелинейными называются элементы радиоэлектронных схем, изменяющие свое внутреннее сопротивление в зависимости от величины протекающего через них тока или приложенного к ним напряжения. Типичным примером такого элемента является полупроводниковый диод с р-п-переходом.

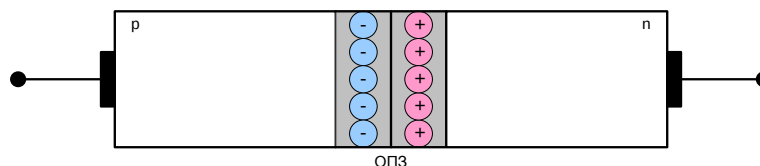


Рис. 2.2. Структура полупроводникового диода

Полупроводниковый диод представляет собой две области полупроводника с различным типом проводимости (р или n). В р-области находится большое количество дырок, в n-области – электронов. При формировании диода из-за

разности энергий носителей заряда в р- и n-областях на границе металлургического перехода образуется область пространственного заряда (ОПЗ), состоящая из заряженных ионов и не содержащая свободных носителей заряда (электронов и дырок). Соответственно р- и n-области имеют низкое электрическое сопротивление, а ОПЗ – высокое.

При подаче прямого смещения (на электрод р-области плюс, на электрод n-области минус) дырки отталкиваются от положительного электрода и двигаются к отрицательному, электроны отталкиваются от отрицательного и двигаются к положительному. Попадая в ОПЗ, они компенсируют заряд ионов, т.е. толщина ОПЗ уменьшается. Соответственно суммарное сопротивление структуры уменьшается. Далее носители заряда проникают в противоположные области и замыкают цепь тока на электродах.

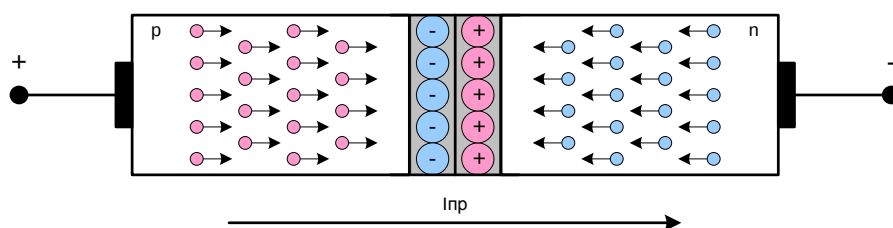


Рис. 2.3. Движение носителей заряда при приложении прямого смещения

Прямой ток ($I_{пр}$) является суммой токов электронов и дырок и определяется их концентрацией.

При подаче обратного смещения (на электрод р-области минус, на электрод n-области плюс) электроны и дырки притягиваются к электродам своих областей, не формируя тока через структуру. ОПЗ расширяется, следовательно, суммарное сопротивление структуры растет. Через структуру диода протекают токи неосновных носителей заряда (ННЗ, электронов в р-области и дырок в n-области). Для них приложенное смещение является ускоряющим (как для основных носителей заряда (ОНЗ) при прямом смещении). ННЗ, пройдя ОПЗ, проникают в противоположную область и замыкают ток на электродах.

Обратный ток ($I_{обр}$) также является суммой токов электронов и дырок и определяется их концентрацией.

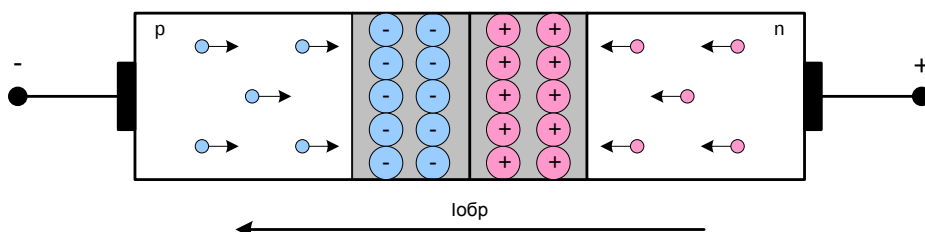


Рис. 2.4. Движение носителей заряда при приложении обратного смещения

Таким образом, при подаче прямого смещения ток через диод определяется основными носителями заряда, а при подаче обратного смещения – неоснов-

ными. Концентрация ОНЗ на несколько порядков больше, чем концентрация ННЗ, следовательно, прямой ток также будет на много больше обратного.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода резко нелинейна (рис. 2.5). Она описывается выражением

$$I = I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (8)$$

где I_0 – ток насыщения, не зависящий от приложенного напряжения (для «идеального» р-п-перехода), пропорциональный концентрации неосновных носителей и обратно пропорциональный их диффузионной длине; q – заряд электрона; U – прикладываемое напряжение; k – постоянная Больцмана; T – температура.

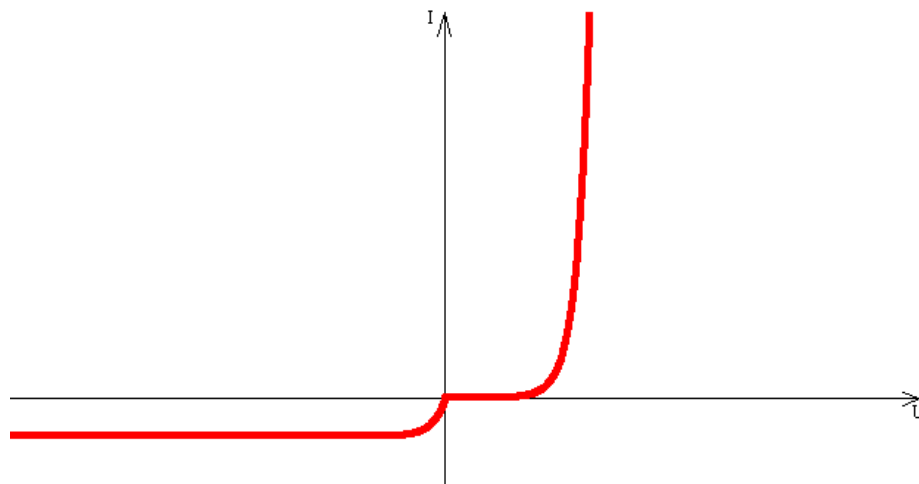


Рис. 2.5. ВАХ идеального диода

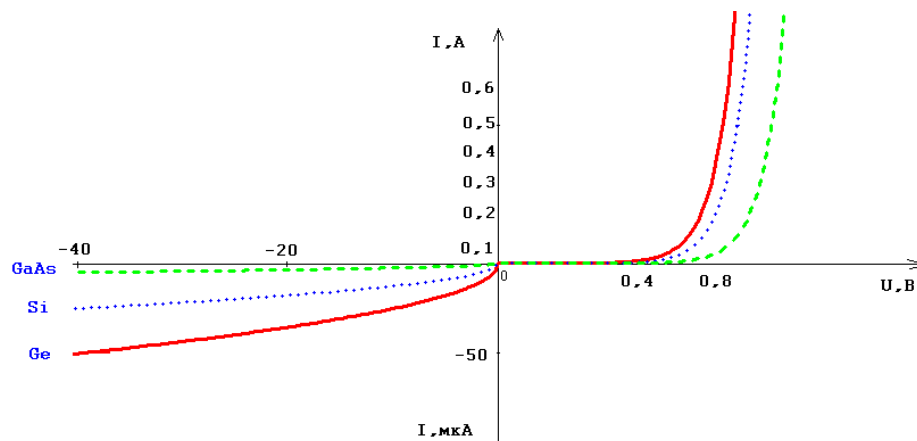


Рис. 2.6. ВАХ диодов из различных полупроводниковых материалов

Простейшим нелинейным элементом является обыкновенная лампочка накаливания. При увеличении тока растет температура, а, следовательно, и сопротивление нити накала в соответствии с выражением:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T), \quad (9)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, R_0 – сопротивление при комнатной температуре.

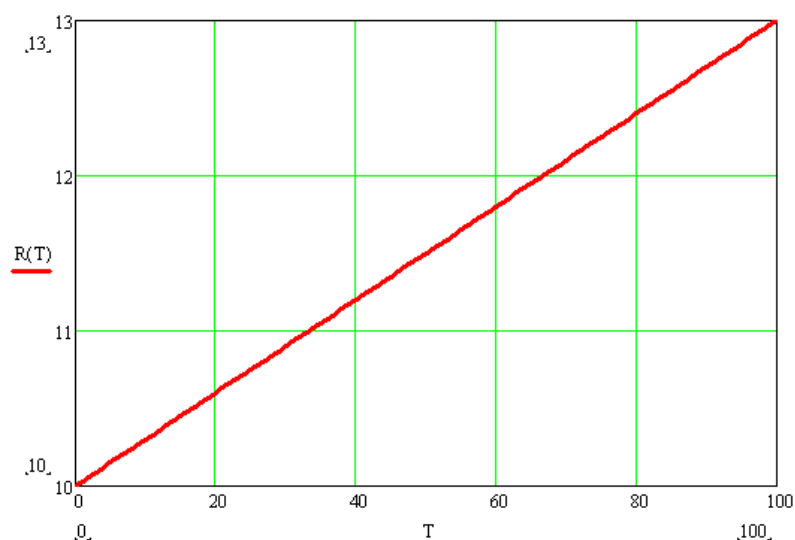


Рис. 2.7. Температурная зависимость нити накала лампочки

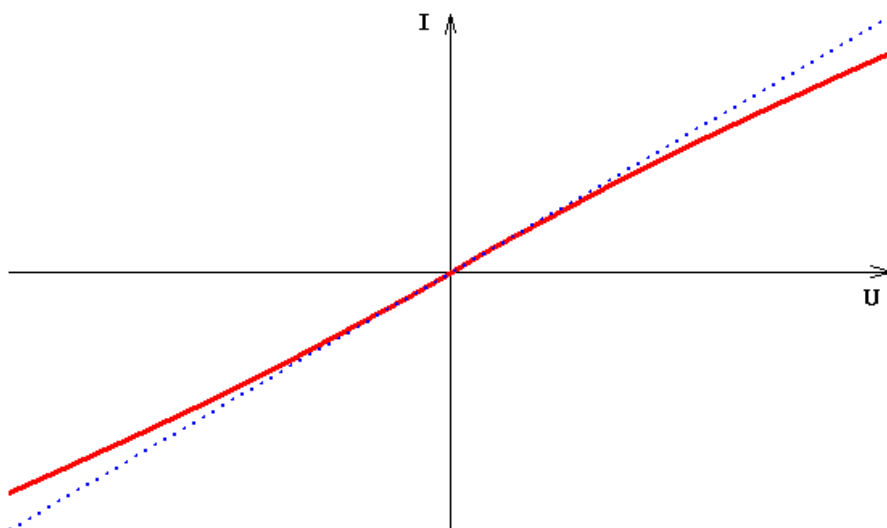


Рис. 2. 8. ВАХ лампочки накаливания и резистора

2.2 Содержание работы

Целью работы является измерение ВАХ полупроводниковых диодов на основе германия (ДЗ11) и кремния (Д220), а также лампочки накаливания и для сравнения – обыкновенного резистора. Соответствующие схемы приведены на рисунках ниже.

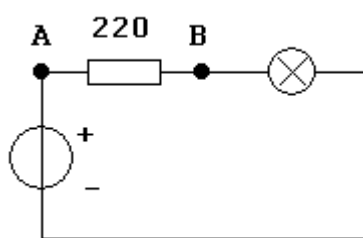


Рис. 2.9. Схема измерения ВАХ лампочки накаливания

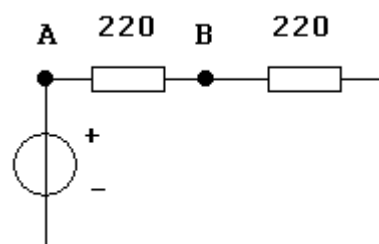


Рис. 2.10. Схема измерения ВАХ резистора

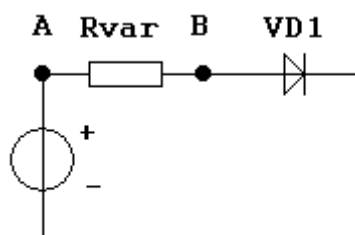


Рис. 2.11. Схема измерения прямой ветви ВАХ диода

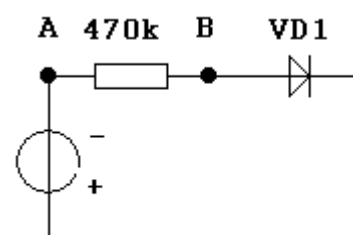


Рис. 2.12. Схема измерения обратной ветви ВАХ диода

2.3 Порядок выполнения

- 1) Собрать схему для измерения ВАХ лампочки накаливания (рис. 2.9).
- 2) Задавая напряжение в точке А от 0 до 20 В с шагом 2 В, измерить напряжение в точке В относительно *минуса* источника питания. Результаты измерений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерения прямой ветви ВАХ лампочки накаливания

$U_A, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$U_B, \text{мВ}$											

- 3) Изменить полярность источника питания на противоположную.
- 4) Задавая напряжение в точке А от -2 до -20 В с шагом -2 В, измерить напряжение в точке В относительно *плюса* источника питания. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерения обратной ветви ВАХ лампочки накаливания

$U_A, \text{В}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20
$U_B, \text{мВ}$										

- 5) Собрать схему для измерения ВАХ резистора (рис. 2.10).
- 6) Задавая напряжение в точке А от 0 до 20 В с шагом 2 В, измерить напряжение в точке В относительно *минуса* источника питания. Результаты измерений занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты измерения прямой ветви ВАХ резистора

$U_A, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$U_B, \text{мВ}$											

- 7) Изменить полярность источника питания на противоположную.
- 8) Задавая напряжение в точке А от -2 до -20 В с шагом -2 В, измерить напряжение в точке В относительно *плюса* источника питания. Результаты измерений занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты измерения обратной ветви ВАХ резистора

U _A , В	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20
U _B , мВ										

- 9) Собрать схему для измерения прямой ветви ВАХ кремниевого диода (Д220).

Сопротивление резистора R_{var} выбрать таким, чтобы при увеличении напряжения до 10 В ток через диод не превысил 15...20 мА (при расчетах сопротивлением диода можно пренебречь).

- 10) Задавая напряжение в точке А от 1 до 10 В с шагом 1 В, измерить напряжение в точке В относительно *минуса* источника питания. Результаты измерений занести в табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты измерения прямой ветви ВАХ кремниевого диода

U _A , В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _B , мВ											

- 11) Собрать схему для измерения прямой ветви ВАХ германиевого диода (Д311).

Сопротивление резистора R_{var} выбрать таким, чтобы при увеличении напряжения до 10 В ток через диод не превысил 15...20 мА (при расчетах сопротивлением диода можно пренебречь).

- 12) Задавая напряжение в точке А от 1 до 10 В с шагом 1 В, измерить напряжение в точке В относительно *минуса* источника питания. Результаты измерений занести в табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты измерения прямой ветви ВАХ германиевого диода

U _A , В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _B , мВ											

- 13) Собрать схему для измерения обратной ветви ВАХ кремниевого диода (Д220).

- 14) Задавая напряжение в точке А от -2 до -30 В с шагом -2 В, измерить напряжение в точке В относительно *плюса* источника питания. Результаты измерений занести в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты измерения обратной ветви ВАХ кремниевого диода

U _A , В	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30
U _B , мВ															

- 15) Собрать схему для измерения обратной ветви ВАХ германиевого диода (Д311).

- 16) Задавая напряжение в точке А от -2 до -30 В с шагом -2 В, измерить напряжение в точке В относительно *плюса* источника питания. Результаты измерений занести в табл. 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты измерения обратной ветви ВАХ германиевого диода

U _A , В	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30
U _B , мВ															

2.4 Обработка результатов измерений

- 1) Согласно полученным данным при измерении ВАХ лампочки накаливания (табл. 2.1 и 2.2) вычислить ток в цепи, сопротивление лампочки и потребляемую мощность. Вычисленные значения занести в табл. 2.8.

Для вычисления тока к цепи следует воспользоваться формулой

$$I = \frac{U_a - U_b}{R_{220}} \quad (9)$$

Вычисление сопротивления лампочки накаливания можно произвести по формуле

$$R = \frac{U_b}{I} \quad (10)$$

Вычисление мощности производится по формуле

$$P = I \cdot U_b \quad (11)$$

Таблица 2.9 – Сводная таблица при измерении ВАХ лампочки накаливания

U _A , В	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
U _B , мВ																					
I, мА																					
R, Ом																					
P, мВт																					

- 2) Согласно полученным данным при измерении ВАХ резистора (табл. 2.3 и 2.4) вычислить ток в цепи, сопротивление резистора и мощность. Вычисленные значения занести в табл. 2.9. Вычисления производятся по аналогичным формулам пункта 1.

Таблица 2.10 – Результирующая таблица при измерении ВАХ резистора

U _A , В	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
U _B , мВ																					
I, мА																					
R, Ом																					
P, мВт																					

- 3) Построить на одном графике ВАХ лампочки накаливания и резистора.

- 4) Согласно полученным данным при измерении прямой ветви ВАХ кремниевого диода (табл. 2.5) вычислить ток в цепи, сопротивление диода и мощность. Вычисленные значения занести в табл. 2.10.

Таблица 2.11 – Сводная таблица при измерении прямой ветви ВАХ кремниевого диода

$U_A, В$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_B, мВ$										
$I, мА$										
$R, Ом$										
$P, мВт$										

- 5) Согласно полученным данным при измерении прямой ветви ВАХ германиевого диода (табл. 2.6) вычислить ток в цепи, сопротивление диода и мощность. Вычисленные значения занести в табл. 2.11.

Таблица 2.12 – Сводная таблица при измерении прямой ветви ВАХ германиевого диода

$U_A, В$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_B, мВ$										
$I, мА$										
$R, Ом$										
$P, мВт$										

- 6) На одном графике построить прямую ветвь ВАХ кремниевого и германиевого диодов.
- 7) Согласно полученным данным при измерении обратной ветви ВАХ кремниевого диода (табл. 2.7) вычислить ток в цепи, сопротивление диода и мощность. Вычисленные значения занести в табл. 2.12.

Таблица 2.13 – Сводная таблица при измерении обратной ветви ВАХ кремниевого диода

$U_a, В$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30
$U_b, мВ$															
$I, мА$															
$R, Ом$															
$P, мВт$															

- 8) Согласно полученным данным при измерении обратной ветви ВАХ германиевого диода (табл. 2.8) вычислить ток в цепи, сопротивление диода и мощность. Вычисленные значения занести в табл. 2.13.

Таблица 2.14 – Сводная таблица при измерении обратной ветви ВАХ германиевого диода

$U_a, В$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30
$U_b, мВ$															
$I, мА$															
$R, Ом$															
$P, мВт$															

- 9) На одном графике построить обратную ветвь ВАХ кремниевого и германиевого диодов.

2.5 Контрольные вопросы

1. Чем отличаются линейные элементы от нелинейных?
2. Причины нелинейности ВАХ полупроводниковых диодов.
3. Особенности измерения прямой и обратной ветви ВАХ диода.
4. Причины нелинейности ВАХ лампочки накаливания.

2.6 Библиография

[3], [7]

3 Лабораторная работа №3. Измерение характеристик терморезистора

3.1 Краткая теория

Терморезистор есть полупроводниковый прибор, используемый как датчик температуры в различных устройствах автоматики. Он может быть изготовлен в виде стержня с двумя омическими контактами на концах. Его действие основано на том, что сопротивление полупроводника экспоненциально уменьшается с ростом температуры согласно выражению

$$R(T) = R_0 \cdot e^{\frac{B \cdot (T_0 - T)}{T_0 \cdot T}}, \quad (12)$$

где R_0 – номинальное сопротивление при $T_0 = 293$ К; B – постоянная, пропорциональная ширине запрещенной зоны полупроводника.

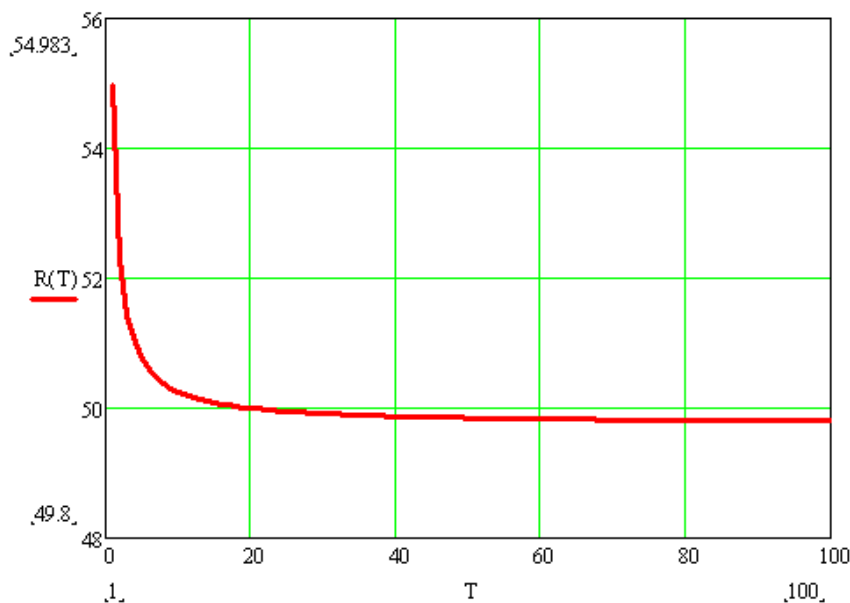


Рис. 3.1. Температурная зависимость полупроводника

Кроме величин B и R_0 , терморезистор характеризуется параметрами:

- 1) Температурный коэффициент сопротивления (ТКС):

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \quad (13)$$

- 2) Максимально допустимая мощность рассеяния $P_{\max}$ и максимально допустимая температура $T_{\max}$, при которых не происходит необратимых изменений характеристик терморезистора;
- 3) Коэффициент рассеяния H , численно равный мощности, отводимой от терморезистора в окружающую среду при разности температур поверхности прибора и среды в 1 град.

- 4) Время, за которое превышение температуры рабочего тела терморезистора над окружающей средой при охлаждении его в спокойном воздухе, уменьшается в 2,7 раз.

Из ВАХ терморезистора (рис. 3.2) видно, что при малых напряжениях его температура не изменяется и ВАХ линейна (выполняется закон Ома). При дальнейшем увеличении напряжения выделяемая энергия приводит к повышению температуры и уменьшению сопротивления. Это вызывает дальнейшее увеличение тока, что обуславливает дальнейшее повышение температуры терморезистора, уменьшение его сопротивления и дальнейший рост тока. Такая положительная обратная связь по току приводит к его лавинному нарастанию и появлению участка с отрицательным сопротивлением. Соответственно ВАХ терморезистора имеет S-образный вид.

В зависимости от назначения схемы терморезисторы работают в двух основных режимах:

- 1) При малых напряжениях (меньше $U_{ср}$) ток, протекающий через терморезистор, не вызывает его заметного разогрева, но сопротивление зависит от температуры среды. Этот режим используется в устройствах датчиков температуры и схемах температурной компенсации.
- 2) Как и всякий прибор с ВАХ S-образного типа, терморезистор может использоваться в схеме *переключателя* и служить в качестве реле, реагирующих на изменение температуры, влажности и др.

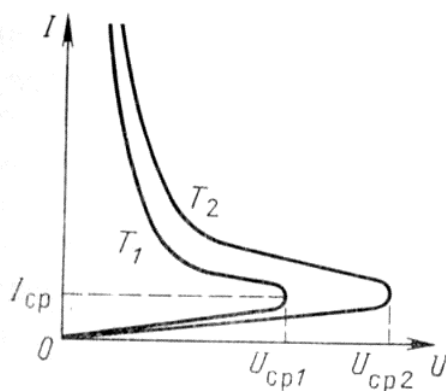


Рис. 3.21. ВАХ терморезистора при различных температурах окружающей среды ($T_1 > T_2$)

Терморезисторы изготавливаются из поликристаллических полупроводников с большим ТКС (окислы переходных металлов или их смеси), а также из легированного Ge и Si. Введение примесей позволяет подобрать оптимальный ТКС для заданного температурного диапазона; кроме того, монокристаллические терморезисторы обладают большей стабильностью и надежностью, хорошо воспроизводимыми параметрами.

3.2 Содержание работы

Целью работы является измерение ВАХ терморезистора, определение его ТКС и величины рассеиваемой мощности, вызывающей переход на участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Схемы измерений приведены на рис. 3.3.

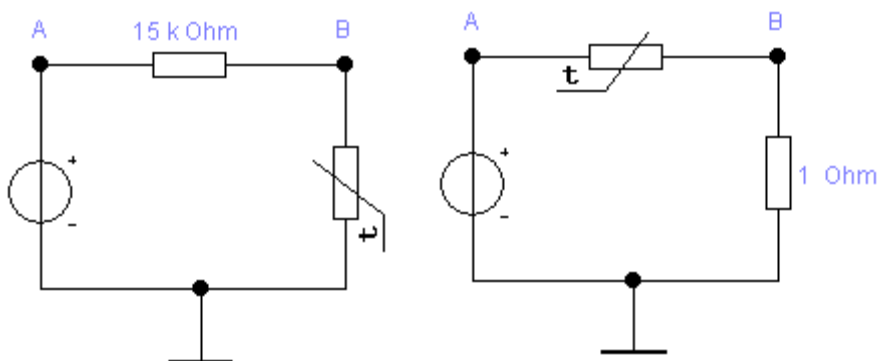


Рис. 3.3. Схемы измерений параметров терморезистора (R_t)

3.3 Порядок выполнения работы

- 1) Измерить омметром сопротивления терморезистора R_t , R_{15k} и резистора R_1 . Полученные данные занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Сопротивления используемых резисторов и терморезистора до сборки схем

R_t	R_{15k}	R_1

- 2) Собрать первую измерительную схему.
- 3) Подавая напряжение в точку А от 0 до 10 В с шагом 1 В, измерить напряжение в точке В. Полученные значения занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерения прямой ветви ВАХ терморезистора

$U_A, \text{В}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_B, \text{мВ}$											

- 4) Изменить полярность источника питания на противоположную.
- 5) Подавая напряжение в точку А от -1 до -10 В с шагом -1 В, измерить напряжение в точке В. Полученные значения занести в табл. 3.3

Таблица 3.3 – Результаты измерения обратной ветви ВАХ терморезистора

$U_A, \text{В}$	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
$U_B, \text{мВ}$										

- 6) Нагреть терморезистор собственным теплом рук до $36,6^\circ\text{C}$, измеряя напряжение между точками Х1-Х2 через каждую минуту при $U_A = 2 \text{ В}$. Результаты занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты измерения напряжения на терморезисторе при его нагреве

t, мин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _B , мВ										

- 7) Собрать вторую измерительную схему
- 8) Задавая напряжение в точке А от 1 до 10 В с шагом 1 В измерить напряжение в точке В (на резисторе R₁). Результаты занести в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты измерения прямой ветви ВАХ терморезистора по второй схеме

U _A , В	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _B , мВ										

- 9) Изменить полярность источника питания на противоположную.
- 10) Задавая напряжение в точке А от 1 до 10 В с шагом 1 В измерить напряжение в точке В (на резисторе R₁). Результаты занести в табл. 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты измерения обратной ветви ВАХ терморезистора по второй схеме.

U _A , В	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
U _B , мВ										

3.4 Обработка результатов измерений

- 1) Для первой измерительной схемы необходимо вычислить ток в цепи, сопротивление терморезистора и рассеиваемую на нем мощность.

Для нахождения тока в цепи необходимо воспользоваться формулой

$$I = \frac{U_a - U_b}{R_{15k}},$$

где R_{15k} – сопротивление обычного резистора, взятое из табл. 3.1

Для нахождения сопротивления терморезистора следует воспользоваться формулой закона Ома:

$$R_t = \frac{U_b}{I}$$

Для нахождения рассеиваемой мощности можно воспользоваться одним из соотношений:

$$P_t = U_b \cdot I = I^2 \cdot R_t = \frac{U_b^2}{R_t}$$

Все полученные результаты занести в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Сводная таблица измеренных и расчетных значений по первой измерительной схеме

U _A , В	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _B , мВ																					
I, мА																					
R _t , Ом																					

P, мВт																				
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

- 2) Используя результаты измерений при нагреве терморезистора и считая температуру окружающей среды равной 20 °С, вычислить ТКС по результатам измерений по п.4, используя формулу (3.1) и заменяя дифференциалы приращениями T и R_t . Таким образом, формула для расчета ТКС примет вид

$$\alpha = \frac{1}{\overline{R_t}} \cdot \frac{\Delta R_t}{\Delta T},$$

где $\overline{R_t}$ – среднее значение сопротивления терморезистора; ΔR_t – разница между сопротивлением терморезистора при максимальной температуре (36,6 °С) и сопротивлением при минимальной (начальной) температуре (20 °С); ΔT – разница температур.

$$\overline{R_t} = \frac{R_t(36.6) + R_t(20)}{2}$$

$$\Delta T = 36.6 - 20$$

$$\Delta R_t = R_t(36.6) - R_t(20)$$

Таблица 3.8 – Сводная таблица измеренных и расчетных значений по второму этапу измерений

t, мин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _B , мВ										
I, мА										
R _t , Ом										

Расчет тока и сопротивления терморезистора производится по аналогичным формулам, как в первом измерении.

- 3) По результатам третьего измерения определить ток в цепи, сопротивление терморезистора и рассеиваемую мощность. Полученные значения занести в таблицу.

Таблица 3.9 – Сводная таблица измеренных и расчетных значений по второй измерительной схеме

U _A , В	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _B , мВ																					
I, мА																					
R _t , Ом																					
P _t , мВт																					

Для расчета тока в цепи следует воспользоваться формулой:

$$I = \frac{U_b}{R_1},$$

где R_1 – сопротивление обычного резистора, взятое из табл. 3.1

Для расчета сопротивления терморезистора следует воспользоваться формулой:

$$R_t = \frac{U_a - U_b}{I}$$

Расчет рассеиваемой мощности производится по формуле, аналогичной для первой измерительной схемы.

- 4) По результатам сводных таблиц построить вольт-амперные характеристики (ВАХ) терморезистора.

3.5 Контрольные вопросы

- 1) Объяснить причину появления участка отрицательного сопротивления на ВАХ терморезистора.
- 2) Основные режимы работы терморезистора в устройствах автоматики.
- 3) По какой причине уменьшается сопротивление терморезистора при его нагревании ?
- 4) Что такое ТКС терморезистора?

3.6 Библиография

[3], [7].

4 Лабораторная работа №4. Изучение и измерение параметров диодного ограничителя

4.1 Краткая теория

Амплитудным ограничителем называется нелинейное устройство, выходное напряжение которого совпадает по форме с входным напряжением, если значения последнего находятся в пределах заданных границ – порогов ограничения, и остается постоянным за пределами этих границ.

Ограничители классифицируют по ряду признаков:

- 1) по типу используемого ключевого нелинейного элемента (диодные, транзисторные, ламповые и другие);
- 2) по способу включения ключевого элемента и нагрузки (последовательные или параллельные);
- 3) по стороне ограничения (односторонние или двусторонние);
- 4) по уровню ограничения выходного сигнала (положительному, отрицательному или нулевому).

Основными требованиями к ограничителям являются стабильность уровней ограничения и линейность передаточной характеристики в области пропускания.

Недостатком диодных ограничителей является низкий коэффициент передачи из-за отсутствия усиления сигнала. Этот недостаток преодолевается в транзисторных и ламповых ограничителях. Эффект усиления позволяет с помощью этих элементов из синусоидального получить трапецеидальное напряжение с крутыми фронтами.

Ограничители применяют для формирования импульсов, близких к прямоугольным, а также для селекции (отбора) импульсов по полярности и амплитуде.

4.2 Содержание работы

Целью работы является наблюдение на экране электронного осциллографа и измерение параметров синусоидального сигнала во входной цепи диодного ограничителя; наблюдение формы и измерение угла отсечки выходного сигнала после его ограничения на разных уровнях с помощью напряжения постоянного смещения. Схема измерений представлена на рис. 4.1.

В данной схеме цепи постоянного и переменного тока разделены: в цепь постоянного тока включен источник постоянного напряжения, а в цепь переменного тока – генератор синусоидальных сигналов.

Электронный осциллограф (на рисунке не показан) подключается поочередно к точкам В и А для наблюдения входного (синусоидального) и выходного (ограниченного) сигналов соответственно.

Метод измерения угла отсечки по осциллограмме выходного сигнала поясняется рис. 4.2.

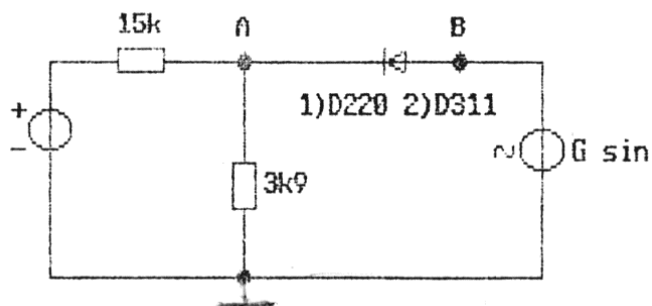


Рис. 4.1. Экспериментальная схема последовательного диодного ограничителя

4.3 Порядок выполнения работы

- 1) Собрать схему и измерить параметры сигнала (период и частоту колебаний) в т. В с помощью осциллографа.
- 2) Подключить осциллограф к т.А и провести измерения угла отсечки по осциллограммам сигнала в зависимости от напряжения смещения, увеличивая его от 0 до 30 В с шагом через 2 В.

Таблица 0.1

Еп, В	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
х0, мс																
х, мс																
φ, рад																

- 3) Изменить полярность напряжения и повторить измерения по п. 4).

Еп, В	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30
х0, мс															
х, мс															
φ, рад															

- 4) Зарисовать осциллограммы при различных знаках и величине напряжения смещения.

4.4 Обработка результатов измерений

- 1) Построить графики зависимости угла отсечки от напряжения смещения на диоде при разной полярности постоянного напряжения смещения.
- 2) Построить передаточную характеристику и временные диаграммы для схемы рис. 4.1.

Угол отсечки φ находить из пропорции:

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{x}{x_0}, \varphi = 2\pi \frac{x}{x_0} \quad (14)$$

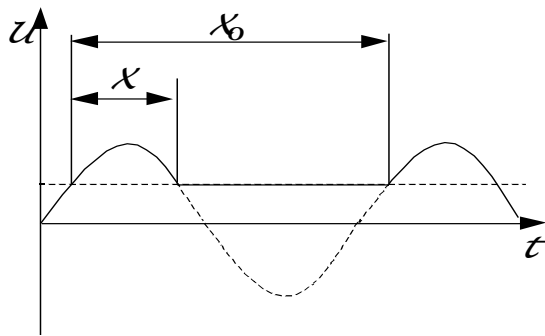


Рис. 4.2. Схема измерения угла отсечки

4.5 Контрольные вопросы

- 1) Определение и назначение ограничителей амплитуды.
- 2) Классификация ограничителей по различным признакам.
- 3) Передаточная характеристика и временная диаграмма ограничителей.
- 4) Что такое угол отсечки гармонического сигнала на выходе ограничителя ?

4.6 Библиография

[7], [8].

5 Лабораторная работа №5. Измерение фазы синусоидального сигнала методом фазового эллипса

5.1 Краткая теория

Для измерения частоты и фазы гармонических колебаний с помощью электронного осциллографа часто используют так называемые фигуры Лиссажу (ФЛ). Это – замкнутые траектории, прочерчиваемые точкой, совершающей одновременно два гармонических колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях (впервые изучены французским ученым Ж.Лиссажу). Они легко наблюдаются на экране осциллографа, если соответствующие гармонические сигналы подать одновременно на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины.

Вид фигур зависит от соотношения между периодами (частотами), фазами и амплитудами обоих колебаний. В простейшем случае равенства обоих периодов ФЛ представляют собой эллипсы, которые при разности фаз $\varphi = 0$ или $\varphi = \pi$ вырождаются в отрезки прямых, а при $\varphi = \pi / 2$ и равенстве амплитуд превращаются в окружности (рис. 5.1).

Если периоды обоих колебаний не совпадают точно, то их разность фаз все время меняется, вследствие чего эллипс непрерывно деформируется. При существенно разных периодах замкнутые кривые не наблюдаются, однако если периоды относятся как целые числа, получаются ФЛ более сложной формы, некоторые из которых показаны на рис. 5.1.

Отношение частот складываемых колебаний равно отношению числа пересечений фигур Лиссажу с прямыми, параллельными осям координат.

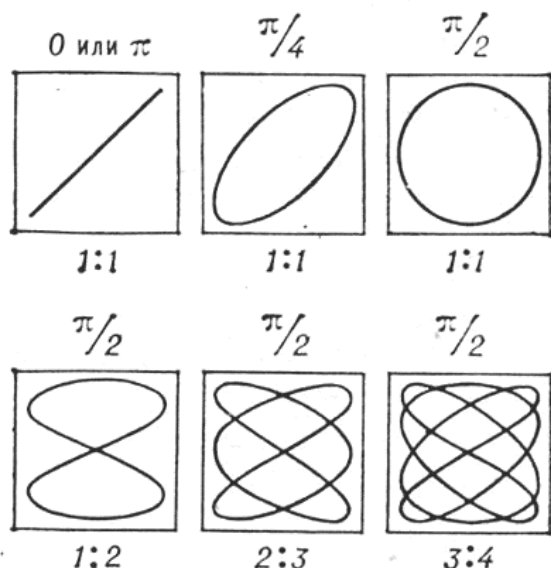


Рис. 5.1. Вид фигур Лиссажу при различных соотношениях периодов колебаний ($1:1$, $1:2$ и т.д.) и разностях фаз

Сдвиг фазы синусоидального сигнала может произойти при прохождении через так называемую фазосдвигающую (или «фазовращающую», если цепочка создает сдвиг фазы, равный π) цепочку (рис. 5.2).

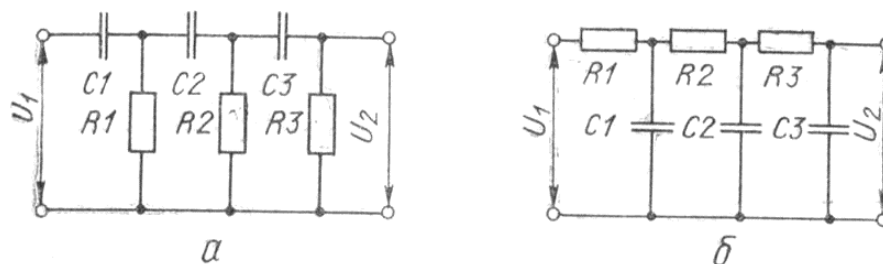


Рис. 5.2. Трехзвенные фазовращающие цепочки:
а) «R – параллель»; б) «C – параллель»

Физической причиной задержки сигнала при прохождении через RC-цепочку является конечное время заряда – разряда конденсатора, напряжение на котором в процессе зарядки меняется согласно выражению

$$U(t) = U(0)[1 - e^{-\frac{t}{RC}}] \quad (15)$$

5.2 Содержание работы

Целью работы является изучение осциллографического метода измерения фазового сдвига двух гармонических сигналов с помощью фигуры Лиссажу, а также способа, каким можно изменять фазовый сдвиг, - прохождения сигнала через фазосдвигающую RC – цепочку (рис. 5.3).

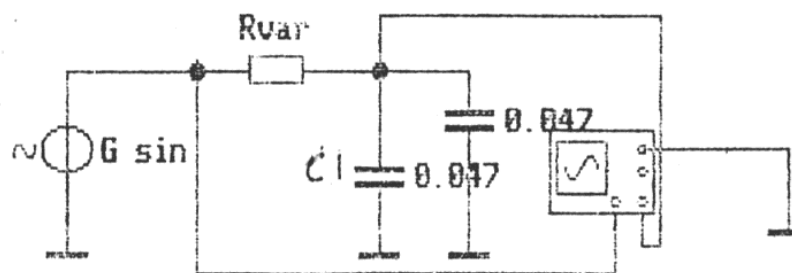


Рис. 5.3. Схема измерений, содержащая фазосдвигающую цепочку:
 R_{VAR} , $C1$ и $C2$

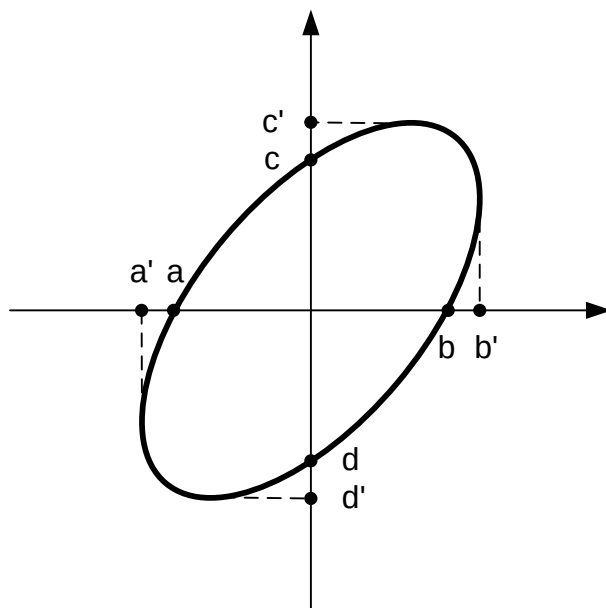


Рис. 5.4 Фигура Лиссажу – фазовый эллипс

Если на вход « X » осциллографа подать сигнал с генератора синусоидальных колебаний, а на вход « Y » - с конденсатора фазосдвигающей цепочки, то ввиду равенства частот обоих колебаний на экране будет виден эллипс. Однако сдвиг фаз сигналов вызовет поворот эллипса относительно осей координат на угол, который можно измерить так, как показано на рис. 5.4 .

$$\varphi = \frac{\pi ab}{2 a'b'} = \frac{\pi cd}{2 c'd'} \quad (16)$$

Если $ab = a'b'$ и $cd = c'd'$, то $\varphi = \pi / 2$, и главные оси эллипса располагаются по осям координат. Однако, окружности, показанной на рис. 5.1, при этом не получится, так как амплитуды обоих сигналов не равны (сигнал, прошедший RC – цепочку, испытывает затухание).

При $ab = 0$ или $cd = 0$ сдвиг фаз $\varphi = 0$, и эллипс вырождается в прямую.

5.3 Порядок выполнения работы

- 1) Собрать схему, приведенную на рис. 5.3, включив в нее один конденсатор С1. Установить на шкале генератора частоту 100 Гц.
- 2) Зарисовать внешний вид и провести измерения осциллограммы в зависимости от величины резистора $R_{VAR} = 68 \text{ k}; 33 \text{ k}; 3,9 \text{ k}; 680 \text{ Ом}$.

$R_{var}, \text{ Ом}$	68k	33k	3k9	680
ab				
a'b'				
cd				
c'd'				
$\varphi_{ab}, \text{ рад}$				
$\varphi_{cd}, \text{ рад}$				

- 3) Увеличить емкость RC – цепочки, добавив еще один конденсатор, равный C1, и выполнить измерения по п. 2 (можно с одним резистором).

R _{var} , Ом	68k	33k	3k9	680
ab				
a'b'				
cd				
c'd'				
φ _{ab} , рад				
φ _{cd} , рад				

5.4 Обработка результатов измерений

- 1) Вычислить углы сдвига фаз по формуле (5.2) для каждого значения R_{VAR} и C.
- 2) Построить график зависимости угла сдвига фаз от величины резистора R_{VAR} при C = const.
- 3) Вычислить постоянные времени RC и сравнить их с периодом колебаний генератора. Какую долю периода составляет величина RC?

5.5 Контрольные вопросы

- 1) Что такое фигуры Лиссажу и как влияет соотношение частот и фаз колебаний на форму фигур Лиссажу?
- 2) Почему сигнал испытывает сдвиг фазы в RC-цепочке?
- 3) Принцип измерения сдвига фаз двух гармонических сигналов с помощью фигуры Лиссажу.

5.6 Библиография

[8], [10].

6 Лабораторная работа № 6. Измерение параметров усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе

6.1 Краткая теория

Среди усилителей низкой частоты (УНЧ) наибольшее применение на практике получили усилители на биполярных транзисторах в схеме с общим эмиттером (ОЭ), так как они обеспечивают усиление сигнала не только по мощности, но и по току, и по напряжению.

Широко распространена схема усилительного каскада с делителем напряжения в цепи базы и эмиттерной термостабилизацией рабочей точки (рисунок 6.1). Поясним назначение всех элементов схемы.

Резистор R_k – активное сопротивление коллекторной нагрузки транзистора, предназначенное для выделения на нем усиленного полезного сигнала, а также для подачи через него на коллектор постоянного напряжения необходимой величины.

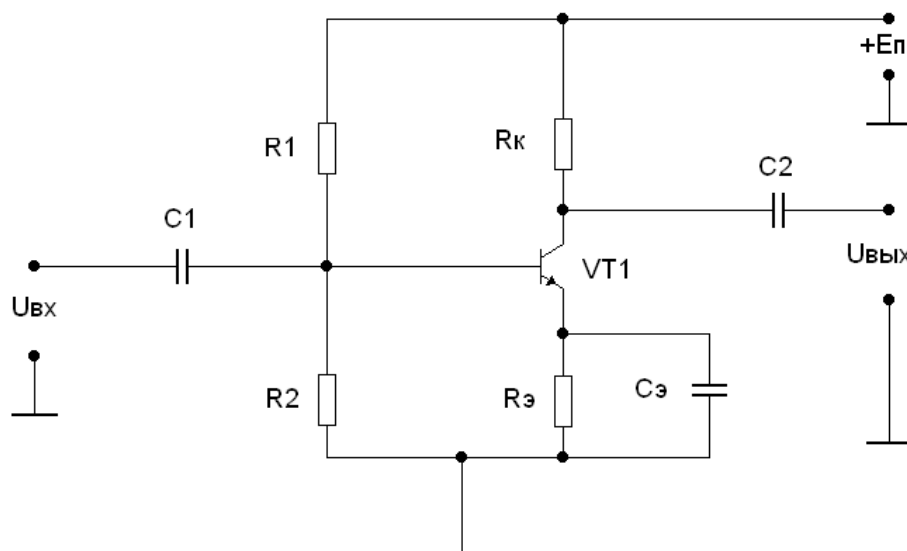


Рис. 6.1. Схема УНЧ на биполярном транзисторе с ОЭ

Цепочка эмиттерной термостабилизации $R_э C_э$ создает отрицательную обратную связь по постоянной составляющей эмиттерного тока, «заземляя» эмиттер по переменной составляющей через конденсатор $C_э$, чтобы не уменьшать коэффициент усиления каскада.

Делитель напряжения R_1, R_2 совместно с $R_э$ создают фиксированное напряжение смещения между базой и эмиттером.

C_{p1}, C_{p2} – разделительные (переходные) конденсаторы, не пропускающие постоянную составляющую коллекторного напряжения на вход следующего каскада; R_H – сопротивление нагрузки (входное сопротивление следующего каскада).

Важнейшими характеристиками УНЧ является *коэффициент усиления* по напряжению (мощности, току) и его зависимость от частоты усиливаемого сигнала. Последняя называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)

усилителя (рис. 6.2). Анализ показывает, что в «идеальном» усилителе коэффициент усиления по напряжению

$$K = \frac{U_{out}}{U_{in}} \approx \frac{R_K}{r_{\varepsilon}} \quad (17)$$

где r_{ε} – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода.

Частоты f_H и f_B , отмеченные на оси абсцисс рис. 6.2, называются нижней и верхней граничными частотами. На этих частотах коэффициент усиления уменьшается до уровня $0,7 K_{cp}$.

Снижение коэффициента усиления («завал» АЧХ) на низких частотах объясняется возрастанием сопротивления разделительных конденсаторов с уменьшением частоты сигнала. На завал АЧХ на высоких частотах основное влияние оказывает емкость база-коллектор ($C_{БК}$) транзистора, сопротивление которой с увеличением частоты сигнала резко уменьшается, и она шунтирует коллекторную нагрузку. Для компенсации влияния этой паразитной емкости в цепь коллектора включают катушку индуктивности (L), что существенно повышает граничную частоту f_B за счет резонанса в контуре, образованном L и $C_{БК}$.

Коррекция АЧХ на НЧ обычно осуществляется с помощью RC-фильтров.

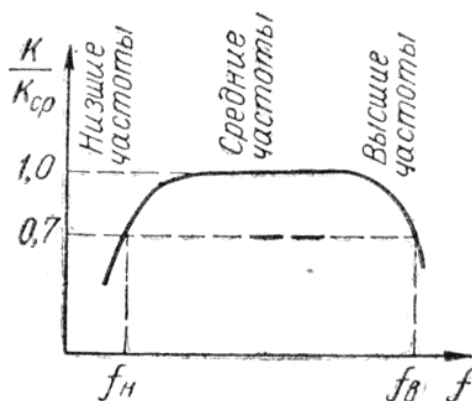


Рис. 6.2. Амплитудно-частотная характеристика УНЧ

Для неискаженной передачи формы входного сигнала транзистор должен работать на линейных участках входной и выходной характеристик при паспортных значениях напряжения питания. Это достигается подбором сопротивлений в цепях коллектора, базы и эмиттера. Коэффициент усиления в наибольшей степени зависит от величины R_K , как это видно из соотношения (6.1).

6.2 Содержание работы

Целью работы является изучение УНЧ на биполярном кремниевом транзисторе КТ301 и измерение его АЧХ. Схема измерений аналогична изображен-

ной на рисунке 6.1 со следующими номинальными значениями элементов схемы: $R_K = 10 \text{ k}$; $R_3 = 3,9 \text{ k}$, $R_1 = 33 \text{ k}$, $R_2 = 15 \text{ k}$; $C = 0,047$.

6.3 Порядок выполнения работы

- 1) Собрать схему, показанную на рис. 6.1, с указанными элементами.
- 2) Изменяя в небольших пределах (10 - 15 В) напряжение источника питания, а также амплитуду входного синусоидального напряжения, добиться получения на выходе неискаженного сигнала.
- 3) Провести измерения постоянных напряжений на эмиттере, коллекторе и базе транзистора с помощью электронного осциллографа.
- 4) Подавая с генератора сигналов синусоидальное напряжение постоянной амплитуды, но разной частоты (от 100 Гц до 100 кГц), измерить с помощью осциллографа амплитуду выходного напряжения при постоянной амплитуде входного сигнала.

F, кГц	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
U_{out} , мВ										
K_u										

6.4 Обработка результатов измерений

- 1) Сравнить измеренные значения постоянных напряжений на эмиттере, коллекторе и базе транзистора с номинальным режимом работы транзистора КТ301 (по справочнику).
- 2) По измеренным значениям амплитуд входного и выходного сигналов рассчитать коэффициент усиления (K_u) на всех исследованных частотах по формуле (6.1).
- 3) Построить зависимость коэффициента усиления от частоты (АЧХ).

6.5 Контрольные вопросы

- 1) Объяснить назначение каждого элемента схемы УНЧ на рис. 6.1.
- 2) Объяснить причины завала АЧХ на низких и высоких частотах.
- 3) Каковы причины искажения усилителем формы входного сигнала?

6.6 Библиография

[7], [8], [11].

7 Лабораторная работа №7. Изучение и измерение параметров диодного выпрямителя

7.1 Краткая теория

Наиболее распространенным источником постоянного тока для питания радиоэлектронных устройств является выпрямитель – устройство, преобразующее переменный ток в постоянный.

Выпрямитель в большинстве случаев состоит из следующих частей:

- 1) силового трансформатора (или автотрансформатора), повышающего или понижающего напряжение сети до нужной величины;
- 2) одного или нескольких вентилях, обладающих односторонней проводимостью тока и выполняющих основную функцию выпрямителя – преобразование переменного тока в ток одного направления (но еще не постоянный, а пульсирующий);
- 3) фильтра, уменьшающего пульсацию выпрямленного тока.

Различные типы выпрямителей классифицируются по числу фаз выпрямленного переменного тока, типу вентилях, схеме их включения и другим показателям. Выпрямители, рассчитанные на небольшие мощности и работающие от однофазной сети переменного тока, делятся на:

- однополупериодные;
- двухполупериодные;
- схемы с умножением напряжения.

В качестве вентилях чаще всего используются полупроводниковые диоды.

В данной работе исследуется мостовая схема двухполупериодного выпрямителя с простейшим сглаживающим фильтром, состоящим из одной RC – цепочки (рис. 7.1). Вместо силового трансформатора используется генератор синусоидального напряжения, подключенный к одной из диагоналей моста, к которой диоды подключены в разной полярности. Вольтметр, подключенный так, как показано на рис. 8.1, всегда измеряет среднеквадратичное (действующее) значение синусоидального напряжения, которое, как известно, в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного значения.

В другое плечо моста, где диоды подключены в одинаковой полярности, включен конденсатор сглаживающего фильтра и параллельно ему – нагрузочный резистор.

Частота пульсаций выпрямленного напряжения в такой схеме равна удвоенной частоте сети, а коэффициент пульсаций (отношение амплитуды переменной составляющей выпрямленного напряжения к постоянной составляющей напряжения на нагрузке) $K_p = 0,67$. Для сравнения отметим, что для однополупериодной схемы он равен 1,57.

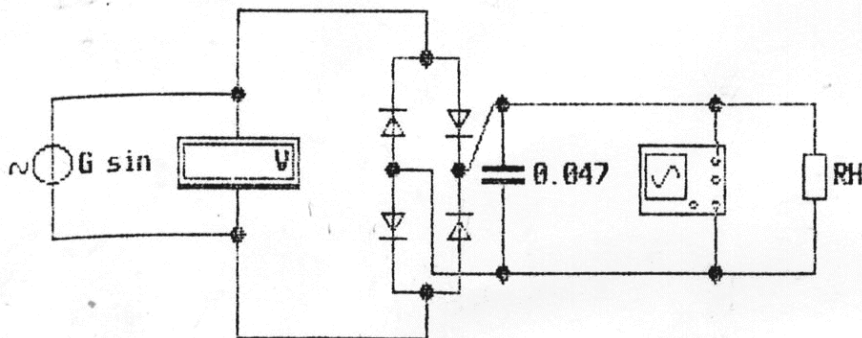


Рис. 7.1. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя, используемая в данной работе

7.2 Содержание работы

Целью работы является наблюдение на экране осциллографа и измерение напряжений в различных точках схемы выпрямителя при изменении частоты синусоидального входного напряжения и параметров схемы: R_n и C ; измерение коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения и изучение изменений формы напряжения на нагрузке при незаземленном генераторе сигналов или осциллографе.

7.3 Порядок выполнения работы

- 1) Собрать схему, приведенную на рис. 7.1; осциллограф (как и прочие приборы, заземлить).
- 2) Установить по вольтметру напряжение на выходе генератора $U = 5$ В при частоте 100 Гц.
- 3) Изменяя величину R_n (120 к, 33 к, 3,9 к, 680 Ом), зарисовать осциллограммы напряжения на конденсаторе с учетом чувствительности осциллографа; измерить постоянную и переменную составляющие выпрямленного напряжения.

Rvar	120k	33k	3k9	680
$U_{out}^{\sim}$				
$U_{out}^=$				
$K_u^{\sim}$				
$K_u^=$				
КП				

- 4) Выполнить измерения по п.3 при $f = 1$ кГц и 10 кГц; $R_n = 120$ к, $U = 5$ В

F	1k	2k	5k	10k
$U_{out}^{\sim}$				
$U_{out}^=$				
$K_u^{\sim}$				
$K_u^=$				
КП				

- 5) Зарисовать осциллограмму напряжения на конденсаторе при незаземленном осциллографе или генераторе сигналов.

7.4 Обработка результатов измерений

- 1) По результатам всех измерений определить коэффициент пульсаций.
- 2) Объяснить влияние изменений частоты синусоидального сигнала и сопротивления нагрузки на вид осциллограммы и коэффициент пульсаций.
- 3) Объяснить изменение формы напряжения на нагрузке при незаземленном генераторе сигналов или осциллографе.

7.5 Контрольные вопросы

- 1) Принцип работы и классификация выпрямителей переменного тока.
- 2) Пояснить работу мостовой схемы двухполупериодного выпрямителя на полупроводниковых диодах.
- 3) Для чего нужен RC-фильтр? Какие еще бывают фильтры?
- 4) Что такое действующее напряжение?
- 5) Что такое коэффициент пульсаций?
- 6) Почему мостовую схему выпрямителя обычно подключают ко вторичной обмотке трансформатора (не заземляя ее).

7.6 Библиография

[3], [8].

8 Лабораторная работа № 8. Изучение и измерение параметров транзисторного ключа

8.1 Краткая теория

Важнейшими элементами современных схем автоматики и ЭВМ являются устройства релейного типа, осуществляющие переключение (коммутацию) различных электрических цепей схемы. Переключающие устройства обладают двумя устойчивыми состояниями равновесия: «включено» и «выключено».

Режим работы транзистора в переключающем устройстве называют ключевым. Этот режим характерен тем, что транзистор в процессе работы переходит из открытого состояния (режима насыщения) в закрытое (режим отсечки) и наоборот. На рис. 8.1 изображена простейшая схема ключа на транзисторе типа р-п-р, включенном по схеме с ОЭ.

Запирание транзистора (режим отсечки) наблюдается в том случае, когда оба перехода (эмиттерный и коллекторный) закрыты. Для этого достаточно, чтобы напряжения на переходах были близки к нулю. Для отпирания транзистора необходимо на его базу подать запускающий импульс отрицательной полярности с амплитудой выше напряжения отсечки эмиттерного р-п-перехода (около 0,6 В для кремниевого транзистора).

Вторым устойчивым состоянием является режим насыщения открытого транзистора, когда оба перехода открыты.

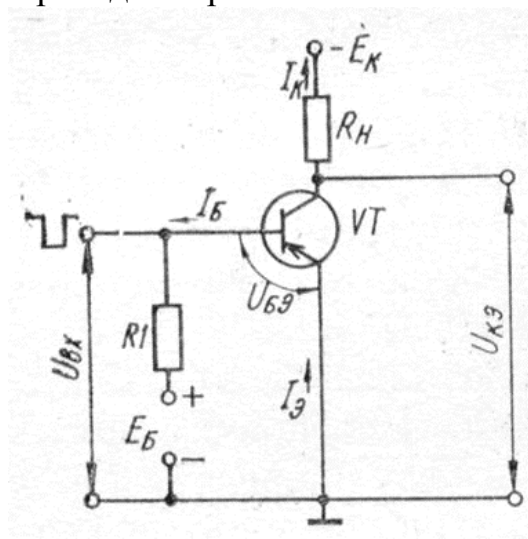


Рис. 8.1. Схема ключа на транзисторе типа р-п-р, включенном по схеме с ОЭ

На рис. 8.2, а приведены статические выходные характеристики транзистора с ОЭ. В семействе этих характеристик проведена нагрузочная прямая АВ, выражающая зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при определенных значениях напряжения источника питания E_K и сопротивления нагрузки R_H . Величина тока насыщения $I_{KH} = E_K / R_H$. В области насыщения (вблизи т. А) $U_{KЭ} \approx 0$. Из рис. 8.2, а видно, что чем больше R_H и ток базы, тем раньше наступает насыщение.

В режиме отсечки, наоборот, $U_{КЭ} \approx E_K$ (вблизи т. В), что соответствует закрытому транзистору, в котором ток I_K есть обратный ток коллекторного перехода.

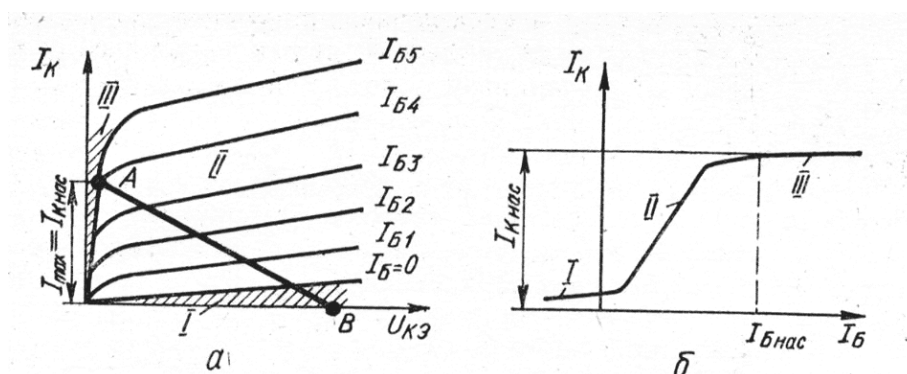


Рис 8.2 Графическое пояснение работы транзистора в ключевом режиме:
I – режим отсечки; II – активный режим; III – режим насыщения

Передаточная характеристика ключа (рис. 8.2, б) имеет изломы на границах областей запираения (отсечки) и насыщения. Это способствует более четкой работе переключающего устройства.

Передаточную характеристику также можно представить как зависимость выходного напряжения от входного.

8.2 Содержание работы

Целью работы является измерение (по осциллограммам) напряжения на коллекторе транзистора с ОЭ в схеме простейшего ключа с резистивной и резистивно-емкостной нагрузкой (рис. 8.3) при различных напряжениях входного сигнала и сопротивлениях R_H ; измерение передаточной характеристики – зависимости амплитуды переменного напряжения на выходе схемы от амплитуды входного напряжения.

Из рис. 8.3 видно, что исследуемый транзистор (типа n-p-n) в исходном состоянии закрыт, так как напряжение смещения между базой и эмиттером отсутствует. Для перевода транзистора из закрытого в открытое состояние необходимо подать на базу положительный импульс.

Однако в данной работе на вход транзистора подается синусоидальное напряжение. Следовательно, транзистор работает, как ограничитель амплитуды, обладающий (в отличие от диодного ограничителя) усилением ограниченного сигнала.

Если бы на выходе схемы был сигнал синусоидальной формы, конденсатор, включенный между коллектором и эмиттером (параллельно нагрузке) не менял бы форму сигнала, лишь уменьшая его амплитуду.

Если же выходное напряжение (при достаточно большом $U_{ВХ} > 1 В$) имеет вид последовательности прямоугольных импульсов, конденсатор будет шунтировать выход по высоким частотам, оставляя без изменения низшие гар-

монические составляющие импульсного сигнала. Таким образом, импульсы будут «сглаживаться», и форма выходного напряжения приближаться к синусоидальной.

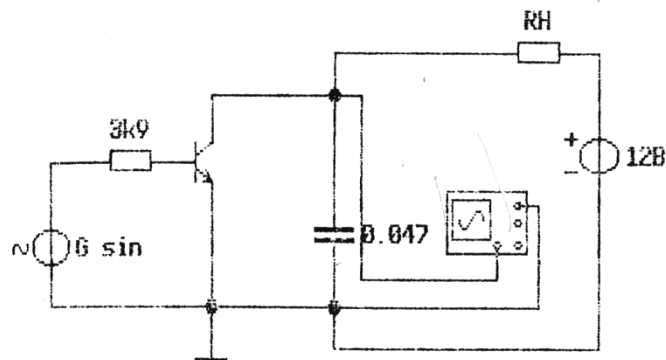


Рис. 8.3. Схема измерений

8.3 Порядок выполнения работы

- 1) Собрать схему как на рис. 8.3, но без выходного конденсатора.
- 2) Зарисовать и провести измерения амплитуды выходного напряжения при следующих параметрах входного сигнала с генератора: $f = 10$ кГц; $R_H = 120$ к; $U_1 = 0,1$ В, $U_2 = 0,5$ В, $U_1 = 0,1$ В, $U_2 = 0,5$ В,
- 3) Изменяя величину R_H (120 к, 33 к, 3,9 к, 680 Ом), провести измерения осциллограмм на коллекторе транзистора для $U = 1$ В и $f = 10$ кГц.
- 4) Подключить конденсатор параллельно нагрузке; зарисовать форму и измерить амплитуду выходного напряжения на коллекторе транзистора.

8.4 Обработка результатов измерений

- 1) Построить график передаточной характеристики ключа (без конденсатора на выходе).
- 2) Объяснить влияние $U_{\text{сигн}}$, f и R_H на вид осциллограмм.

8.5 Контрольные вопросы

- 1) Объяснить устройство, принцип работы и назначение транзисторного ключа.
- 2) Что такое режим отсечки и режим насыщения транзистора?
- 3) Чем отличаются режимы работы транзистора в схеме ключа и в схеме усилителя?
- 3) Объяснить назначение каждого элемента схемы на рис. 8.3.
- 1) Что такое передаточная характеристика ключа?
- 2) Какие схемы более помехоустойчивы – ключевые или аналоговые?
- 3)

8.6 Библиография

[7], [8], [11] .

Список использованной литературы

1. Бурдун Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н.Марков. – М.: Изд. стандартов, 1972. – 312 с.
2. Рудзит Я.А. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении / Я.А. Рудзит, В.Н. Плуталов. – М.: Машиностроение, 1991. – 304 с.
3. Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин / Э.Г. Атамалян. - М.: Высш. шк., 1989. - 384 с.
4. Куликовский К.Л. Методы и средства измерений / К.Л. Куликовский, В.Я. Купер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
5. Методы электрических измерений / Под ред. Э.И. Цветкова. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1964. - 576 с.
7. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1990. – 264.
8. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь, 1985. - 488 с.
9. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения. - ГОСТ 16263-70.
10. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш.Шк., 1998. – 542 с.
11. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам / Под ред. Н.Н. Горюнова. - М: Энергия, 1976. - 744 с.

ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Составитель: Владыка Евгений Юрьевич

Изд. № 54/18. Объем 2,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»