

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ

«Измерение физических характеристик и параметров
полупроводниковых диодов» и «Измерение физических
параметров выпрямленных переменных напряжений и токов»

по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация
в информатике и радиоэлектронике для специальностей:
36 04 02 – промышленная электроника,
40 02 01 – вычислительные машины, системы и сети,
40 03 01 – искусственный интеллект,
53 01 02 – автоматизированные системы отображения информации

Брест 2010

УДК 621 317

В методических указаниях приведено описание лабораторных работ на основе измерительного комплекса, состоящего из осциллографа, генератора и объекта исследования. Структура лабораторной работы включает: теоретические сведения, задания для самостоятельной работы, контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

Составители: Маркевич К.М., старший преподаватель
Чугунов С.В., ассистент

Рецензент: Ворсин Н.Н., доцент УО «БГУ имени А.С. Пушкина»

© Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», 2010 г.

Лабораторная работа №4

Измерение физических характеристик и параметров полупроводниковых диодов

Цель работы: получить практические навыки измерения характеристик и параметров полупроводниковых диодов;

Приборы и оборудование: измерители напряжения и тока, источник напряжения, исследуемые диоды: выпрямительный, стабилитрон, тиристор.

I. Краткие теоретические сведения.

Полупроводниковый диод — электронный прибор, принцип работы которого основывается на свойствах р-п перехода. Развитие современной техники привело к созданию большого количества разнообразных диодов. В средствах электроники, электронно-вычислительной техники, радиотехники используются выпрямительные и импульсные диоды, тиристоры и динисторы, туннельные и обращенные диоды, стабилитроны, варикапы и др. полупроводниковые элементы. Значительное большинство диодов, используемых в схемах электроники и микроэлектроники, это выпрямительные диоды. Полупроводниковые диоды, независимо от их функционального назначения, имеют р-п переход и электроды: анод и катод. Отдельные типы диодов (например, тиристор), имеют более сложную конструкцию: несколько р-п переходов и дополнительный электрод — управляющий.

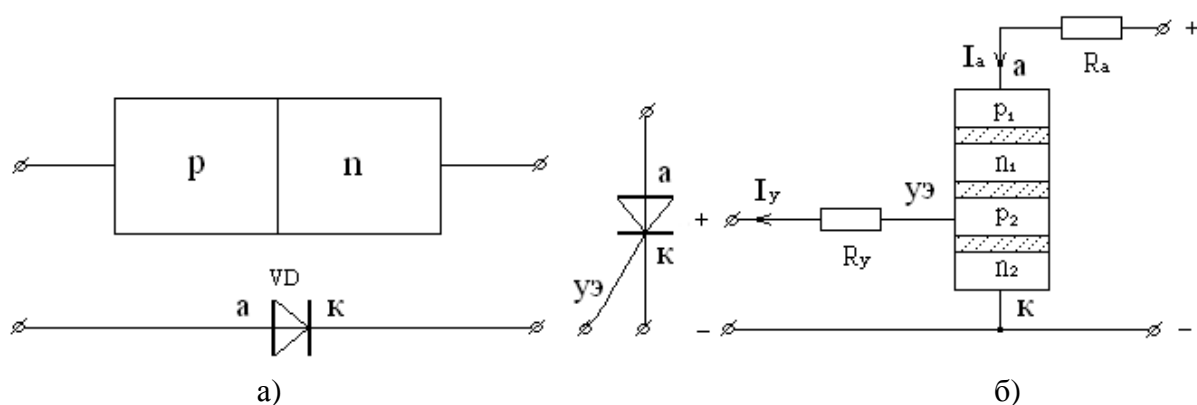


Рисунок 1. - а) структура и схемное обозначение двухэлектродных диодов; б) структура и схемное обозначение тиристора

В дальнейшем, если специально не оговорено, речь будет идти о двухэлектродных диодах (рисунок 1 а). С точки зрения теории цепей и сигналов, диод — это двухполюсник. Поэтому он может характеризоваться напряже-

нием U , которое можно прикладывать к его электродам; током I , проходящим через него, и активным сопротивлением r , на низких частотах, и комплексным $r \pm jx$ — на высоких частотах. Свойства конкретного диода описываются его вольт-амперной характеристикой (ВАХ): множеством точек в координатной плоскости, где по оси ординат — ток, проходящий через диод I , а по оси абсцисс — напряжение U . Его можно прикладывать как в прямом ($U_{пр}$), так и обратном ($U_{обр}$) направлениях; эти напряжения будут порождать, соответственно, прямой $I_{пр}$ и обратный токи $I_{обр}$ диода.

$$I = f(U) \quad (1)$$

Теоретическая модель ВАХ полупроводникового диода, выполненная на основе кремния, имеет вид:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

где, $kT/q = U_T$ — температурный потенциал, равный 26 мВ при $T = 300$ К; I_0 — обратный ток насыщения диода. В этой модели не учтено суммарное сопротивление базы омических контактов и выводов полупроводникового элемента r_d . С учетом этого сопротивления реальная ВАХ диода представлена уравнением (3), в котором; I — прямой (обратный) его токи; U - напряжение, прикладываемое к его электродам, как в прямом, так и обратном направлениях.

$$I = I_0 \left[e^{\frac{q(U - Ir_d)}{kT}} - 1 \right] \quad (3)$$

На рисунке 2 пунктиром изображена теоретическая ВАХ диода, а сплошной линией — реальная. Из-за существенного различия значений прямого и обратного токов и напряжений прямые и обратные ветви характеристики имеют разный масштаб.

Прямая ветвь реальной характеристики диода (3) (для одного и того же значения тока) сдвинута относительно идеальной характеристики (2) в сторону больших напряжений. При этом, допустимое прямое напряжение р-п перехода кремниевого диода 0,8 В, в то время как теоретически возможное — 0,6 В. Различие идеальной и реальной характеристик в области обратных напряжений и токов обусловлено неучтенной в (2) и (3) генерацией носителей заряда в р-п переходе. $I_{обр}$ медленно возрастает с ростом $U_{обр}$ и начинает резко расти при некотором максимальном обратном напряжении. Это явление

ние называется пробоем диода. Возможны электрический и тепловой пробой диода.

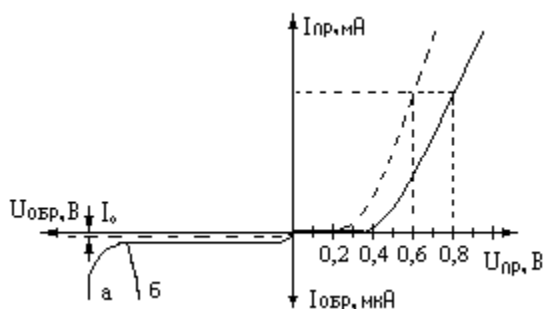


Рисунок 2. - Теоретическая и реальная характеристики диода

В справочной литературе приводятся десятки параметров полупроводникового диода. Среди них имеются основные, это те, на основе которых осуществляется взаимозаменяемость элемента в электрической схеме. К основным параметрам диода следует отнести следующие:

- 1) граничная частота работы диода $f_{гр}$;
- 2) максимальное прямое напряжение диода $U_{пр}$;
- 3) максимальное обратное напряжение диода $U_{обр}$;
- 4) максимальный прямой ток $I_{пр}$;
- 5) максимальный обратный ток $I_{обр}$;

Граничная частота работы диода — максимальная частота, при которой коэффициент его передачи равен 1. Это первый параметр, на который следует обратить внимание при использовании и замене диода. Полупроводниковый прибор с высокой граничной частотой может заменить низкочастотный, если он отвечает требованиям по другим параметрам, но обратная замена недопустима.

Максимальное прямое напряжение диода $U_{пр}$ — это максимально допустимое напряжение, которое можно подавать на электроды диода в его открытом состоянии, т.е. когда на аноде «+», а на катоде «-», и при котором диод сохранит свою нормальную работоспособность. Аналогичное толкование имеют и остальные предельные параметры диода. Например, максимальный обратный ток диода $I_{обр}$, это максимально возможный ток, который протекает между его анодом и катодом в режиме закрытого состояния, т.е. когда на аноде присутствует «-», а на катоде «+». Эти и другие параметры диода могут быть получены экспериментально, если для его исследования использовать схему рисунка 3.

Рассмотрим общие параметры некоторых видов диодов, которые обычно приводятся в справочной литературе: диапазон рабочих температур окружающей среды ΔT , сопротивление диода постоянному и переменному токам.

Диапазон рабочих температур окружающей среды ΔT . На ВАХ диода влияет температура окружающей среды. В инженерных расчетах полагают, что в германиевых диодах I_0 удваивается на каждые 10^0 С, а в кремниевых – на каждые 7^0 С. Температура влияет и на прямое напряжение $U_{пр}$, что характеризуется температурным коэффициентом напряжения (ТКН), которое определяется при $I_{пр} = \text{const}$. Как правило, в расчетах этот коэффициент принимают равным: $-2\text{мВ}/^0\text{С}$.

$$\text{ТКН} = - \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta T} \quad (4)$$

С учетом температуры определяется допустимый прямой ток диода. $I_{пр. \text{ макс}}$ - это такое его значение, которое достигается при температуре $T_{\text{ макс}}$ р-п перехода.

Прямое сопротивление диода $R_{пр}$ и обратное - $R_{обр}$ постоянному току:

$$R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} \quad R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}} \quad (5)$$

Сопротивление диода переменному току: прямое и обратное дифференциальные сопротивления $r_{\text{диф пр}}$ и $r_{\text{диф обр}}$:

$$r_{\text{диф пр}} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}} \quad r_{\text{диф обр}} = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}} \quad (6)$$

Схема рисунка 3 а позволяет получить параметры и характеристики диода, для случаев, когда он работает в открытом состоянии (прямое включение); рисунок 3 б — если диод закрыт (обратное включение). Как правило, параметры диода – это отдельные точки на его характеристиках либо определяются на их основе. При этом разновидность диода (стабилитрон, выпрямительный, туннельный, динистор, тиристор и т. д.) так же определяется видом его вольт-амперной характеристики. Рассмотрим электрические схемы рисунка 3, которые позволяют получить вольт-амперные характеристики конкретных диодов. Эти схемы будут использоваться нами для проведения измерений лабораторной работы.

VD — полупроводниковый диод, подвергающийся исследованию. R — резистор, ограничивающий ток через диод; выбирается на основе максимально допустимого прямого тока диода. А — амперметр, фиксирующий величину тока, проходящего через диод. V — вольтметр, осуществляющий измерение напряжения, прикладываемого к диоду. Е — источник напряжения; его величина определяется максимально допустимым прямым и обратным напряжениями диода.

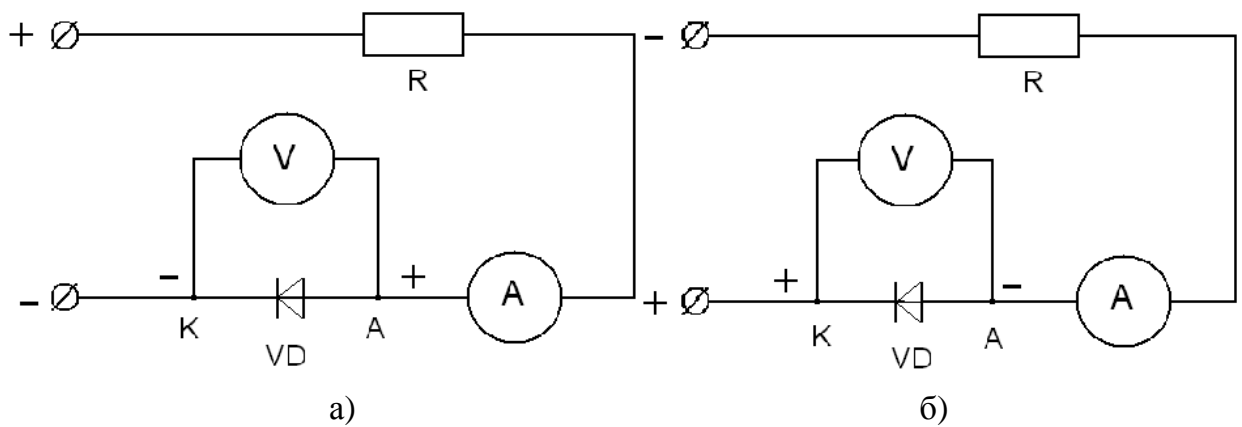


Рисунок 3. - а) электрическая схема для исследования параметров прямого включения диода; б) электрическая схема для исследования параметров обратного включения диода

Остановимся подробнее на особенностях диодов, которые будут исследованы в этой работе.

Выпрямительный диод — это диод, свойства которого описываются вольт-амперной характеристикой, вида рисунка 4. Функциональные возможности диода такого типа гораздо шире, чем выпрямление напряжений и токов, но поскольку он первоначально использовался, в основном, для этих целей, то его, до сих пор называют выпрямительным. Как следует из вольт-амперной характеристики диода, он пропускает ток, когда на его аноде «+», а на катоде «-».

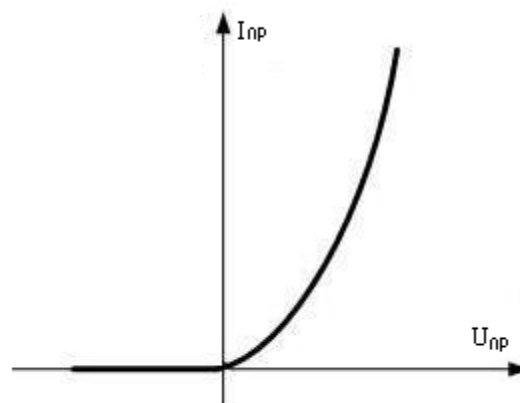


Рисунок 4. - Вольт-амперная характеристика выпрямительного диода

Если полярность напряжения на электродах диода изменить на противоположное (закрытое состояние диода), то ток через него почти не проходит, или проходит, но очень малый. Ввиду малости $I_{обр}$ по сравнению с $I_{пр}$ на графиках ВАХ обратные токи обычно не отражаются.

В связи с тем, что современные источники питания персональных ЭВМ и др. электронной техники, где наиболее широко используются выпрями-

тельные диоды, проектируются на десятки кГц, то для выпрямления высокочастотных напряжений и токов используются и импульсные диоды. Они имеют такие же вольтамперные характеристики, но значительно большую граничную частоту работы $f_{гр}$ и меньшую емкость C р-п перехода.. Выпрямительные свойства диода этого типа (как и других) характеризуются *коэффициентом выпрямления* K_B :

$$K_B = \frac{I_{пр}}{I_{обр}} = e^{\frac{U_{пр}}{U_{обр}}} \quad (7)$$

Выпрямительные диоды делятся на диоды малой, средней и большой мощности. Диоды малой мощности выпрямляют токи до 300 мА, средней – в диапазоне 0,3-10 А; большой – от 10 до 1000 А. В качестве полупроводникового материала выпрямительных диодов чаще всего используют кремний, реже германий, еще реже - арсенид галлия. Преимущества кремниевых диодов в сравнении с германиевыми в том, что они имеют малые обратные токи, способны функционировать при более высоких температурах окружающей среды, допускают большие величины обратных напряжений. Достоинством германиевых диодов является их малое напряжение $U_{пр}$, составляющее 0,3 ... 0,6 В, в то время как аналогичное напряжение открытого кремниевого диода 0,8 ... 1,2 В. Германиевые диоды могут быть использованы при температурах не более 80° С, кремневые и арсенид галлиевые – до 150° С. При работе диодов в радиоэлектронных системах может использоваться воздушное охлаждение (вентиляторы), в мощных электрических - жидкостное (вода, антифриз, трансформаторное масло и др.).

Стабилитрон — полупроводниковый диод, свойства которого описываются вольтамперной характеристикой рисунка 5.

Согласно этой характеристике, при приложении напряжения в прямом направлении, стабилитрон пропускает ток, подобно выпрямительному диоду. Но его характеристика очень разнится с характеристикой выпрямительного диода при обратном включении элемента: вначале стабилитрон закрыт и по достижении некоторого значения на нем появляется постоянное напряжение, которое называют напряжением стабилизации $U_{ст}$, Оно также может изменяться в небольших пределах $\Delta U_{ст}$, но его условно считают постоянным напряжением. При этом ток через стабилитрон изменяется от некоторого минимального значения, которое называется минимальным током стабилизации $I_{ст..мин}$ до некоторого максимального значения $I_{ст. макс}$. Указанные параметры являются основными параметрами стабилитрона. Однако стабилитрон способен поддерживать постоянное напряжение на своих электродах при напряжениях соизмеримых с напряжением стабилизации. Если на элемент подать напряжение по величине значительно превосходящее $U_{ст}$ данного диода, то он выйдет из строя. Таким образом стабилитрон характеризуется и

своими специфическими параметрами : $U_{ст.}$, $I_{ст.мин.}$, $I_{ст. макс.}$. Кроме указанных параметров стабилитрон характеризуется ТКН, дифференциальным и статическим сопротивлениями, имеющими несколько иной смысл, чем у выпрямительного диода.

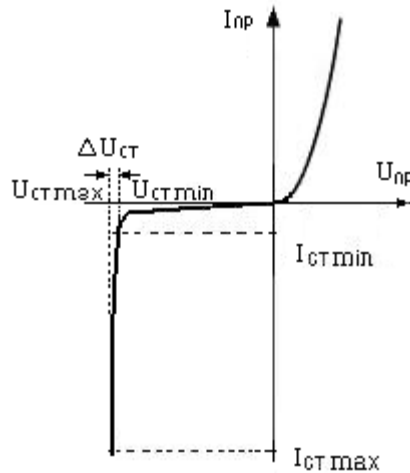


Рисунок 5. - Вольтамперная характеристика стабилитрона

ТКН стабилитрона определяет относительное изменение напряжения стабилизации при изменении температуры окружающей среды на $1^{\circ}C$:

$$TKH = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T} 100\% \quad (8)$$

Дифференциальное сопротивление стабилитрона:

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} \quad (9)$$

Статическое сопротивление:

$$R_0 = \frac{U_{ст ном}}{I_{ст ном}} \quad (10)$$

Динистор— полупроводниковый прибор с двумя чередующимися p-n переходами и двумя электродами, свойства которого описываются вольтамперной характеристикой вида, показанного на рисунке б а.

Похожую характеристику имеет и тиристор. Однако он от динистора отличается наличием дополнительного электрода (рисунок 1 б). Несмотря на такое различие, они имеют сходный принцип работы. При увеличении напряжения на электродах динистора до некоторого значения $U_{откр}$, этот элемент открывается, его внутреннее сопротивление из бесконечно большого

становится маленьким и он может коммутировать электрические цепи. При этом ток динистора может достигать некоторого максимально допустимого значения $I_{\text{макс}}$. Принцип работы тиристора такой же, но в отличие от динистора тиристор откроется лишь в том случае, если будет подтверждающий сигнал на открывание на управляющем электроде $U_{\text{упр}}$. В случае отсутствия такого сигнала по управляющему электроду, тиристор останется в запертом состоянии. Как видим, специфическими параметрами тиристора являются: $U_{\text{откр}}$, $U_{\text{упр}}$.

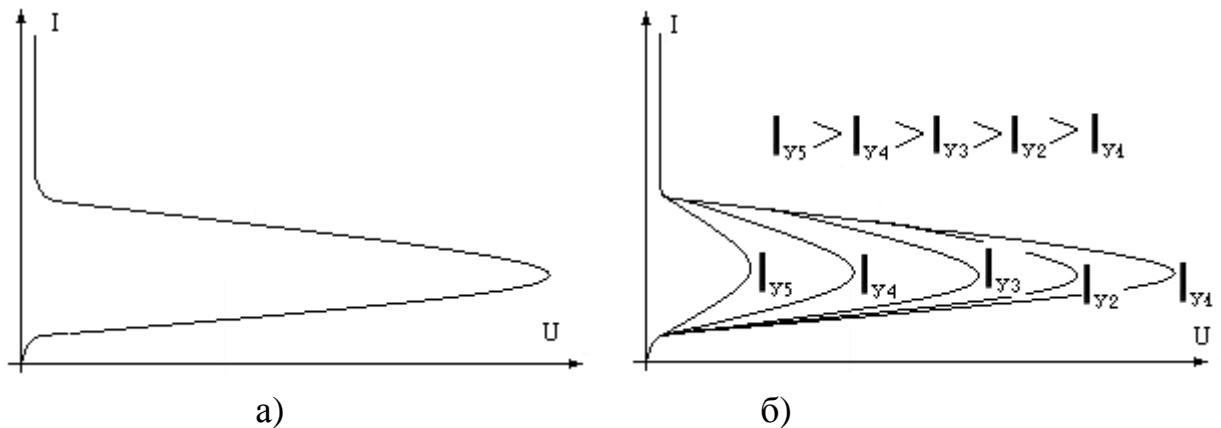


Рисунок 6. - а) вольт-амперная характеристика динистора; б) вольт-амперная характеристика тиристора

При проектировании электрических схем с диодами необходимо так составлять электрические цепи, чтобы ограничивать падение напряжений и токов через диоды до значений, предусмотренных паспортными данными полупроводникового элемента. Это достигается, в первую очередь, включением в электрические цепи резистивных элементов. Регулируя величины сопротивлений резистивных элементов можно регулировать ток через диод и падение напряжения на нем.

II. Стенд для исследования полупроводниковых диодов.

Стенд для исследования характеристик и параметров полупроводниковых диодов выполнен в соответствии электрической схемы рисунка 3. Стоит из объектов исследования: полупроводниковых диодов VD_1 , VD_2 , VD_3 включенных последовательно соответственно с резисторами R_1 , R_2 и R_3 ; вольтметра V и амперметра A (рисунок 7). Резисторы R_1 , - R_3 ограничивают токи, проходящие через диод и подаваемое на них напряжение. Величина тока, проходящего через диод измеряется амперметром A , величина напряжения подаваемого на диод измеряется вольтметром V . Источник напряжения БП (блок питания) используется для питания электрической цепи.

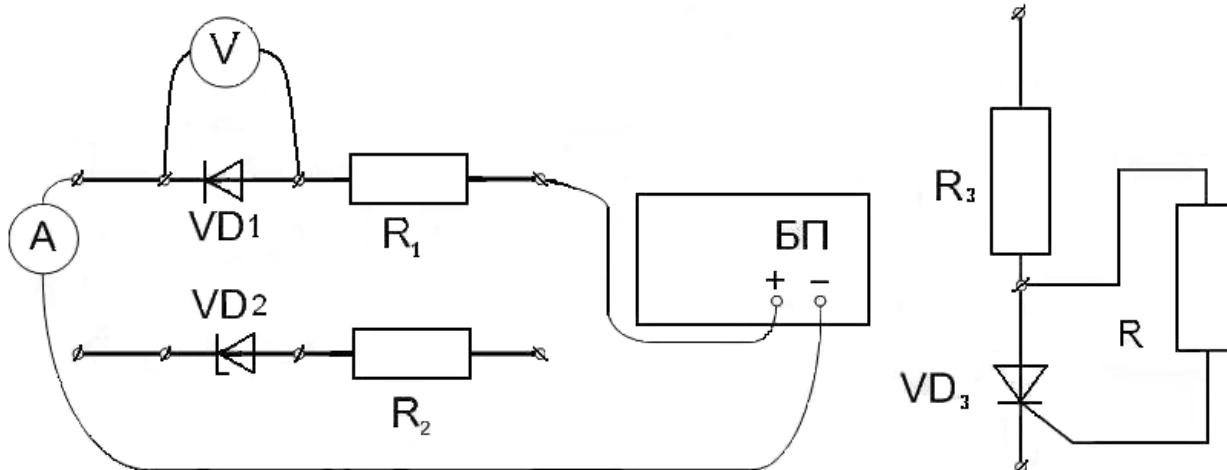


Рисунок 7. Стенд для измерения вольт-амперных характеристик диода

III. Порядок выполнения работы.

Измерение вольт-амперной характеристики выпрямительного диода

Уровень А.

1. Измерение вольт-амперной характеристики любого диода предполагает снятие зависимости $I = f(U)$. Эта процедура проводится в два этапа. Сначала диод включается в прямом направлении и снимаются показания амперметра A и вольтметра V . Затем изменяют полярность подключения источника питания E к стенду на противоположное и опять фиксируют изменение напряжений и токов через диод. Так производится снятие параметров в прямом и обратном включении диода.

2. Убедитесь, что источник питания находится в выключенном состоянии и на схему не подается ток. Если это не так, то выключите его и регулятор напряжения, вращением ручки против часовой стрелки, выведите в левое крайнее положение.

3. Соберите схему в соответствии рисунка 3 а. С помощью регулятора напряжения источника питания БП, плавно вращая его по часовой стрелке, установите напряжение на диоде $0,1$ В. Зафиксируйте полученное значение тока и занесите его в таблицу. Изменяя напряжение через $0,1$ В, от 0 до $0,9$ В занесите данные в таблицу 1. По окончании эксперимента регулятор напряжения выведите в крайнее левое положение и выключите источник питания.

Таблица 1

$U_{пр}, В$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$I_{пр}, мА$										

4. Соберите схему в соответствии рисунка 3 б. С помощью регулятора напряжения источника питания БП, плавно вращая его по часовой стрелке, установите напряжение на диоде 1 В. Зафиксируйте полученное значение тока и занесите его в таблицу. Изменяя напряжение через 1 В, от 0 до 15 В занесите данные в таблицу 2. Уменьшите напряжение до 0 В и выключите питание схемы.

Таблица 2.

$U_{обр}, В$	1	3	5	7	9	11	13	15
$I_{обр}, мА$								

5. На основе полученных данных постройте вольт-амперную характеристику исследованного диода.

Уровень В.

Выполнить задания уровня А и п.6-п.8:

6. Изучите справочные данные диода VD и на их основе и результатов проведенных исследований аппроксимируйте вольт-амперную характеристику этого диода, отражающую его предельно допустимые значения: $U_{пр}$, $U_{обр}$, $I_{пр}$, $I_{обр}$.

7. Определите величину минимально возможного сопротивления R в цепи анода диода, позволившего бы получить предельно возможные его параметры: $U_{пр}$, $U_{обр}$, $I_{пр}$, $I_{обр}$.

8. По построенной характеристике п. 5 определите сопротивление диода $R_{пр}$ и дифференциальное - $r_{диф пр}$, соответствующие току $I_{пр} = 25 мА$.

Уровень С.

Выполнить задания уровня В и п.9:

9. Из числа имеющихся выпрямительных диодов выберите объект для исследования. Изучите его справочные данные, возможности источника питания, магазина сопротивлений и разработайте стенд для снятия его максимально информативной ВАХ. Под максимально информативной ВАХ будем понимать такую, которая отражает предельно допустимые токи и напряжения полупроводникового элемента.

Измерение вольт-амперной характеристики стабилитрона

Уровень А.

1. Соберите схему рисунка 3 а, заменив выпрямительный диод стабилитроном. Снимите его вольт-амперную характеристику для случая прямого включения. Данные исследований занесите в таблицу 3.

Таблица 3

$U_{пр}, В$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$I_{пр}, мА$							

2. Соберите схему в соответствии рисунка 3 б для исследования стабилитрона при обратном включении. Изменяя напряжение от 0 до 6В, снимите показания амперметра и занесите их в таблицу 4.

Таблица 4

$U_{обр}, В$							
$I_{обр}, мА$							

3. По окончании эксперимента выведите регулятор напряжения источника питания на нулевое значение и выключите его.

4. По данным таблиц постройте вольт-амперную характеристику диода. На ней отметьте параметры: $U_{ст}$, $I_{ст.мин}$, $I_{ст. макс}$.

Уровень В.

Выполните задания уровня А и п.5-п.7:

5. Определите дифференциальное $r_{ст}$ и статическое R_0 сопротивления исследованного стабилитрона.

6. Обоснуйте величину резистора R в цепи питания стабилитрона.

7. Оптимизируйте и определите величину оптимизированного значения данного резистора R , учитывая возможности источника питания и справочные данные исследуемого стабилитрона VD .

Уровень С.

Выполнить задания уровня В и п.8:

8. Из числа имеющихся стабилитронов выберите объект для исследования, изучите его справочные данные, возможности источника питания, магазина сопротивлений и разработайте стенд для снятия его максимально информативной ВАХ.

Измерение вольт-амперной характеристики тиристора

Уровень А.

1. Для исследования вольт-амперной характеристики тиристора используем схему рисунка 8. Резистор R_3 ограничивает ток тиристора и предохраняет его от выхода из строя. Управляющий электрод через резистор R подключен к аноду. В таком состоянии взаимосвязь между напряжением на его электродах U и током через тиристор I будет осуществляться в соответствии с вольт-амперной характеристикой. Однако точное определение участка ВАХ, соответствующее отрицательному сопротивлению полупроводникового элемента (рисунок б) затруднено, поскольку открывание тиристора имеет лавинообразный процесс, который в ходе указанной методики исследований зафиксировать невозможно.

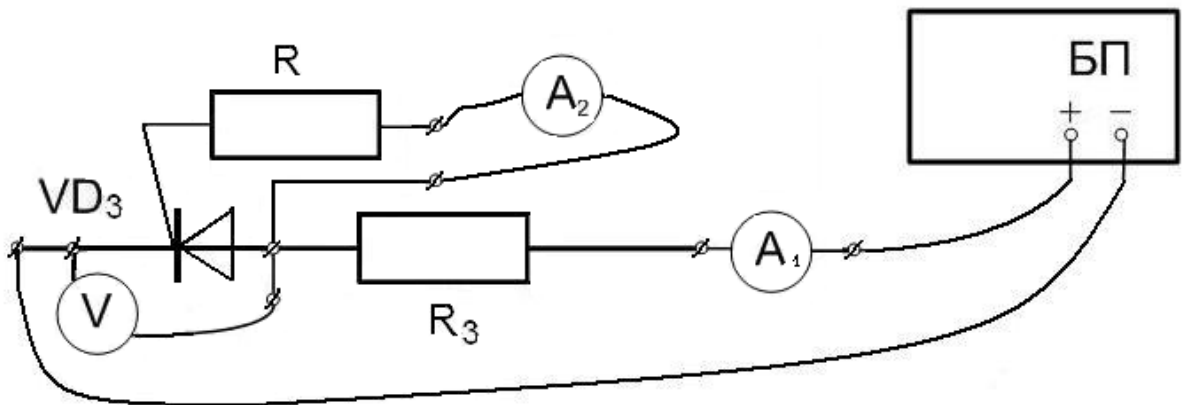


Рисунок 8. - Стенд для исследования тиристора

2. Снимите зависимость: $I = f(U)$ для случая прямого включения тиристора. Для этого плавно изменяя напряжение источника питания БП в пределах от 0 до 30В, занесите данные измерений в таблицу 5.

Таблица 5

$U_{пр}, В$							
$I_{пр}, мА$							

3. По полученным данным постройте характеристики тиристора.

Уровень В.

Выполните задания уровня А и п.4:

4. На рисунке 6 б приведено семейство характеристик тиристора. Изменяя ток управляющего электрода (20 мА, 40 мА, 60 мА) снимите семейство ВАХ исследуемого тиристора. Данные исследований занесите в таблицу 6. Постройте соответствующие графики.

Таблица 6

Ток управляющего электрода I_y	Значения прямых токов и напряжений на электродах тиристора							
	20, мА	$U_{пр}, В$						
$I_{пр}, мА$								
40, мА	$U_{пр}, В$							
	$I_{пр}, мА$							
60, мА	$U_{пр}, В$							
	$I_{пр}, мА$							

Уровень С.

Выполнить задания уровня В и п.5:

5. Из числа имеющихся тиристоров выберите объект для исследования, изучите его справочные данные, возможности источника питания, магазина сопротивлений и разработайте стенд для снятия его максимально информативной ВАХ.

IV. Контрольные вопросы.

1. Основные параметры диодов.
2. Методика измерения вольт-амперных характеристик и параметров выпрямительных и импульсных диодов.
3. Особенности измерения характеристик стабилитронов; определение основных параметров стабилитрона на основе его вольт-амперной характеристики.
4. Особенности измерения характеристик тиристоров; определение его основных параметров на основе вольт-амперной характеристики.

V. Литература:

1. Винокуров, В.И. Электрорадиоизмерения / В.И. Винокуров. – М.: Высшая школа, 1991. – 412 с.

2. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – Мн.: Вышэйшая школа, 2002. – 287 с.
3. Манаев, Е.И. Основы радиоэлектроники / Е.И. Манаев. - М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
4. Горюнов, Н.Н. Полупроводниковые приборы: диоды / Н.Н. Горюнов. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - 401 с.
5. www.ndrpd2.siteedit.ru/diod и др.

Лабораторная работа №5

Измерение физических параметров выпрямленных переменных напряжений и токов

Цель работы: изучить параметры, характеристики и работу выпрямителей вычислительной техники; научиться измерять эти параметры и характеристики.

Приборы и оборудование. Стенд для изучения, измерения выпрямительных схем, генератор, осциллограф.

I. Краткие теоретические сведения.

Для работы электронных устройств, в том числе вычислительной техники, необходимы источники постоянного напряжения. Производство переменных напряжений давно освоено на промышленном уровне; это осуществляют тепловые, гидро, атомные и др. электростанции. Такого производства постоянного напряжения не имеется. В решении этой задачи физики пошли по иному пути: они предложили несколько способов преобразования переменных напряжений в постоянные. Познакомимся с одним из них, который широко используется в технике.

В промышленной сети действует гармоническое напряжение, которое математически отображается так:

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

где: U_m - амплитудное напряжение; ω - циклическая частота, определяемая выражением $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$; T и f - соответственно, период колебаний напряжения и частота сети; φ - начальная фаза; t - текущее время. График постоянного напряжения представляет прямую. Рассмотрим, как переменное напряжение рисунка 1 а можно "привести" к прямой 1 б или квазипрямой.

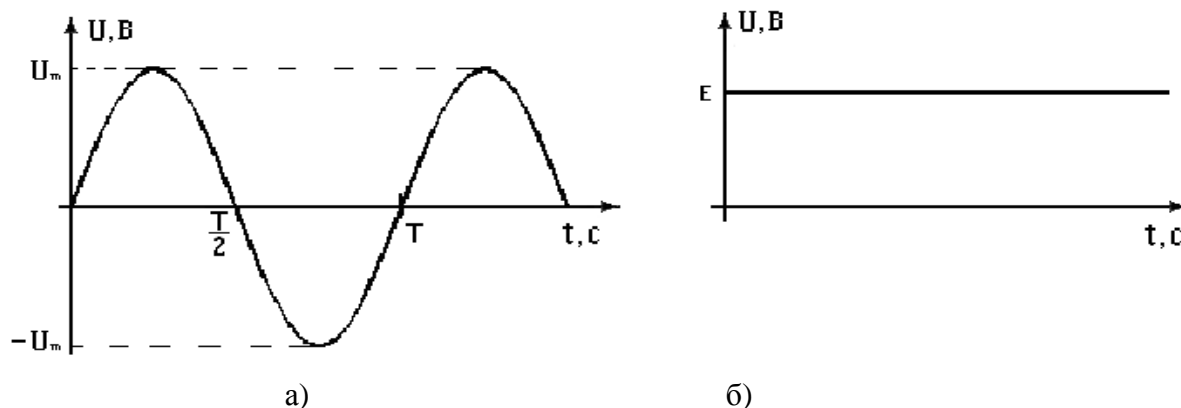


Рисунок 1. - а) график напряжения сети; б) график напряжения источника питания постоянного тока

Простейшим выпрямителем является полупроводниковый диод, принцип работы которого основан на работе р-п перехода. Он имеет два электрода: анод и катод. Его выпрямительные свойства определяются вольт-амперной характеристикой: $I = f(U)$. Типичная вольт-амперная характеристика выпрямительного диода приведена на рисунке 2 а. Как следует из графика, если к аноду диода подключить положительное напряжение, а к катоду " – ", то ток диода отличен от нуля: говорят, что он находится в открытом состоянии. При обратной полярности напряжения на электродах, когда на аноде " – ", а на катоде " + ", диод ток не проводит. В этом случае говорят, что он заперт (рисунок 2 б). Рассмотрим процесс "выпрямления" переменного тока.

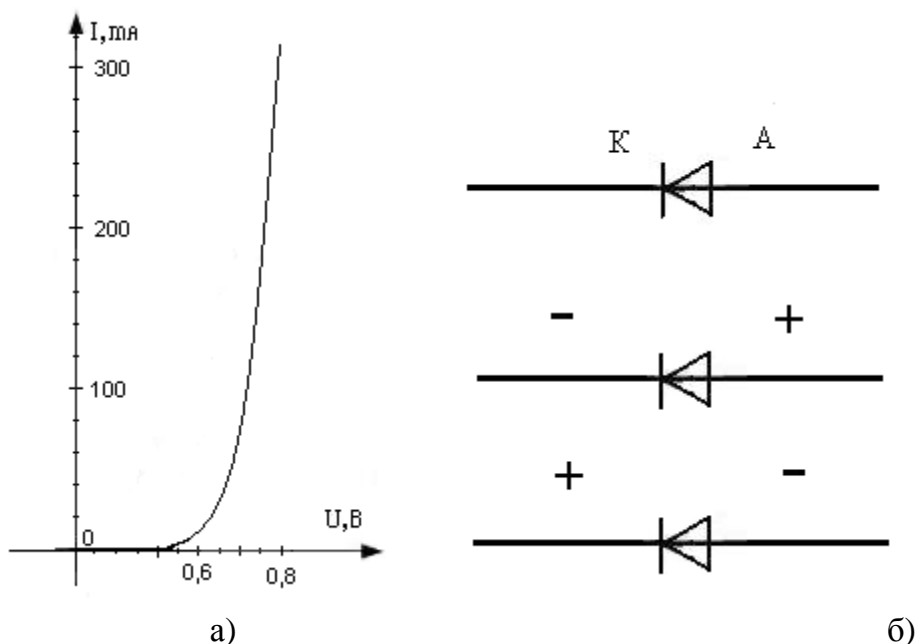


Рисунок 2. - а) вольт-амперная характеристика выпрямительного диода; б) открытое и закрытое состояние диода

Если собрать электрическую цепь в согласно рисунку 3 а и подать на ее вход синусоидальное напряжение (рисунок 1 а), то на выходе схемы (резистор R_H) появится напряжение, изображенное на рисунке 3 б. Эта электрическая схема является схемой однополупериодного выпрямителя.

В полупериоды: $0 - T/2$; $T - 3T/2$ на аноде диода положительное напряжение, а на катоде — отрицательное; диод открыт и пропускает ток. В полупериоды: $T/2 - T$; $3T/2 - 2T$ полярность напряжений на электродах меняется: на аноде появляется " – ", на катоде " + ", диод закрывается. В это время ток через диод равен нулю. Напряжение $U_{\text{вых}}$ является выпрямленным однополярным. Оно далеко не постоянное, в виде графика рисунка 3 б, но его среднее выпрямленное значение $U_{H \text{ ср}}$ отлично от нуля и определяется площадью между графиком функции и осью абсцисс.

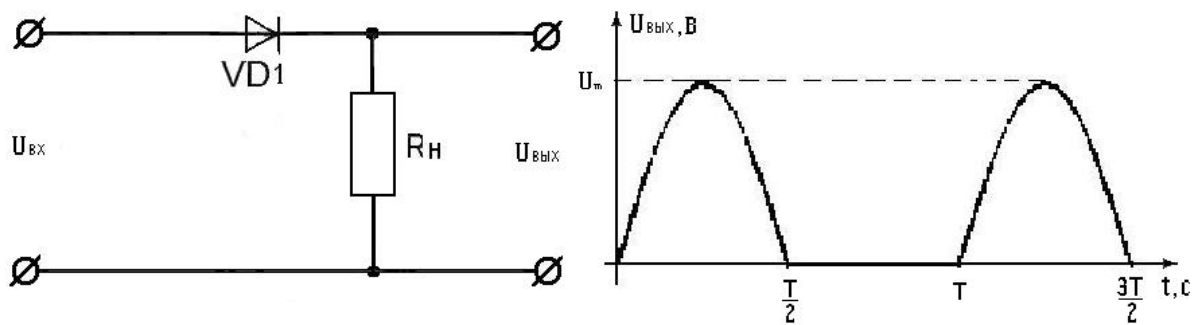


Рисунок 3. - а) электрическая схема однополупериодного выпрямителя; б) график выходного напряжения однополупериодного выпрямителя

Если найти $U_{н\ ср}$ за период времени T для $U_{вх}$ (рисунок 1 а), то оно окажется нулевым, поскольку положительный полупериод синусоидального напряжения будет скомпенсирован отрицательным. Для напряжения рисунка 3 б среднее выпрямленное значение определяется так:

$$U_{н\ ср.} = \frac{1}{2\pi} \int_0^T U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi} \quad (2)$$

Как видим, среднее выпрямленное напряжение $U_{н\ ср}$ рассмотренного выпрямителя есть величина постоянная. Она будет постоянной и различной для других схем выпрямителей, поэтому ее используют для оценки эффективности процесса выпрямления. Это значит, что выпрямленному переменному напряжению можно ставить в соответствие некоторое постоянное $U_{н\ ср}$ и по его величине оценивать свойства выпрямителя.

Однополупериодный выпрямитель выпрямляет ток в течение полупериода входного синусоидального напряжения. Вполне очевидно, что если выпрямление осуществлять и в промежутки времени: $T/2 - T$, $3T/2 - 2T$ и т.д., то возрастет $U_{н\ ср}$, поскольку возрастет площадь, ограниченная графиком выпрямленного напряжения. Эта задача была решена на основе конструирования электрических схем. При построении выпрямителей в соответствии схем рисунков 4 а и 4 б возможно получить двухполупериодное выпрямленное напряжение. На схеме рисунка 4 а представлен мостовой двухполупериодный выпрямитель; на схеме рисунка 4 б — двух- полупериодный выпрямитель со средней точкой. Несмотря на различие обеих схем, они имеют одинаковое по форме выпрямленное напряжение $U_{вх}$ (рисунок 5 в).

При работе мостовой схемы одна диагональ моста входная, на нее подается напряжение, которое следует выпрямить, с другой диагонали снимается выпрямленное напряжение. В полупериоды времени $0 - T/2$, $T - 3T/2$ и т.д. (рисунок 1 а) оказываются открытыми диоды: $VD2$ и $VD3$; диоды $VD1$ и $VD4$ в это время имеют положительное напряжение на своих катодах и поэтому оказываются закрытыми. В полупериоды времени $T/2 - T$, $3T/2 - 2T$ открытыми оказываются диоды $VD1$ и $VD4$; диоды $VD2$ и $VD3$ в это вре-

мя закрыты. Таким образом, диоды попарно оказываются открытыми, либо закрытыми, но в отличие от однополупериодного выпрямителя выпрямление осуществляют в оба полупериода времени.

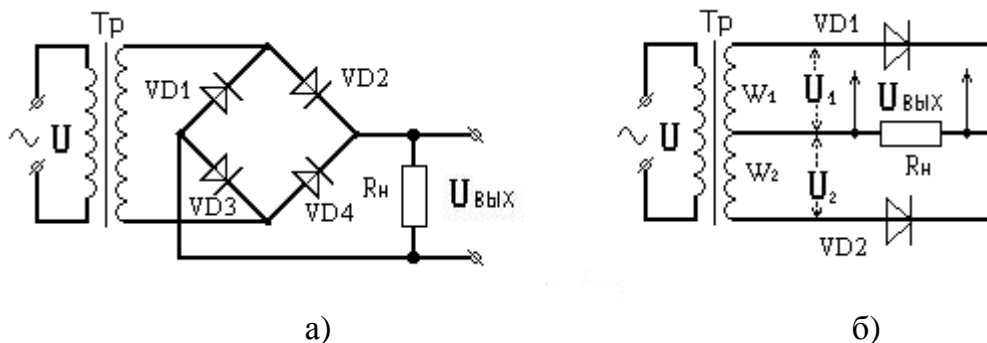


Рисунок 4. - а) мостовой двухполупериодный выпрямитель; б) двух- полупериодный выпрямитель со средней точкой

Для работы выпрямителя со средней точкой необходимо два диода и трансформатор с двумя одинаковыми обмотками. Графики напряжений на обмотках трансформатора w_1 и w_2 с соответствующими напряжениями U_1 и U_2 и выпрямленное переменное напряжение приведены на рисунке 5. В один полупериод времени синусоидального напряжения оказывается открытым диод $VD1$, в другой — $VD2$, в результате на нагрузке R_H появляется напряжение рисунка 5 в.

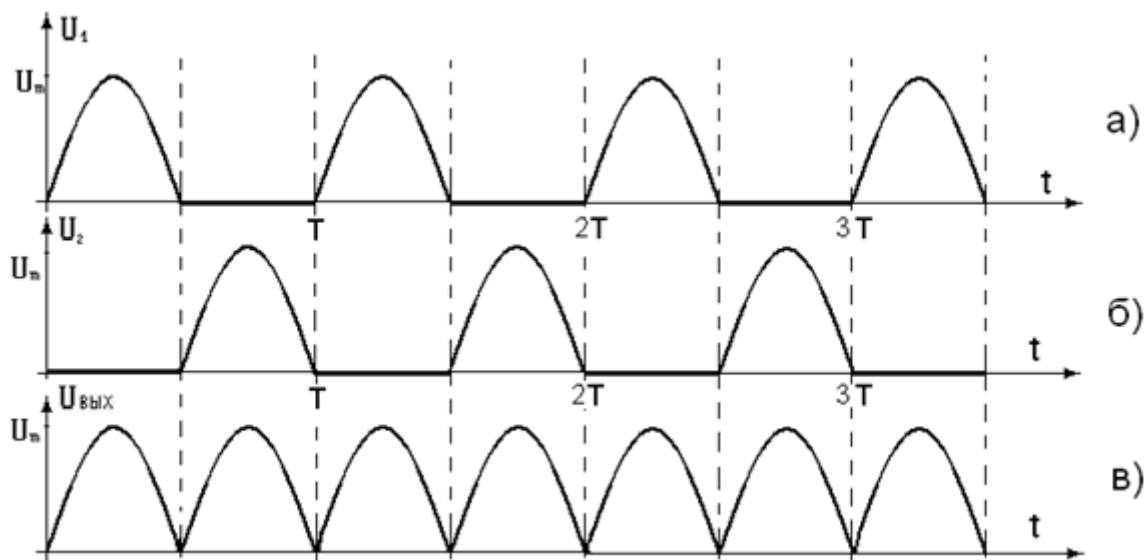


Рисунок 5. - а) напряжение трансформатора обмотки w_1 ; б) напряжение трансформатора обмотки w_2 ; в) выпрямленное напряжение на нагрузке R_H

Выходные напряжения выпрямителей однополярны и далеки от прямой, но являются постоянными пульсирующими. Согласно рисунку 3 б и рисунка 5 в пульсации $U_{\text{ВЫХ}}$ составляют величину U_m . При этом падением напряжения на диодах пренебрегают, так как в открытом состоянии напря-

жение р-п перехода не более 0,8 В; в то время как выпрямители строят для напряжений единиц, десятков, сотен ... вольт. Но в источниках напряжений не ограничиваются таким качеством выпрямления и уменьшают пульсации $U_{\text{вых}}$. Изучим еще один метод, позволяющий повысить качество выпрямляемого напряжения, который используется в компьютерной технике, телевидении и т.д. Суть метода в следующем.

Напряжение сети частотой 50 Гц с помощью электронных устройств с высоким КПД преобразуют в импульсное напряжение частотой 1...60 кГц вида меандр (рисунок 6 б).

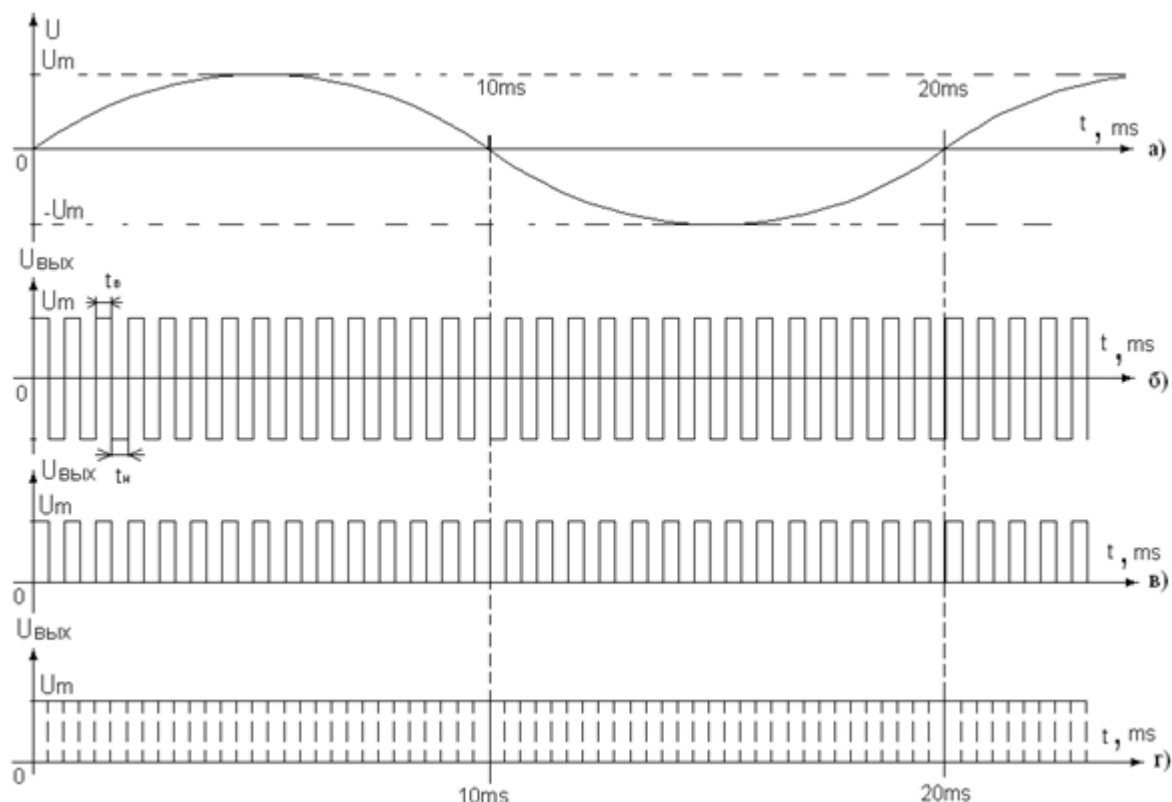


Рисунок 6. - а) выпрямляемое гармоническое напряжение; б) выпрямляемое напряжение-меандр; в) однополупериодное выпрямленное напряжение-меандр; г) двухполупериодное выпрямленное напряжение-меандр.

Меандр — прямоугольные импульсы, у которых длительность высокого напряжения равна длительности низкого ($t_в=t_н$). Это напряжение-меандр выпрямляют традиционными выпрямителями, приведенными на рисунках 3 а, 4 а, 4 б. Чтобы оценить эффективность выпрямления этого метода, рассмотрим графики выпрямления напряжения частотой 50 Гц для синусоидального тока и 1 кГц для импульсного (рисунок 6). Поскольку $f = 1/T$, то период колебаний тока промышленной сети $f = 1/50 \text{ Гц} = 20 \text{ мС}$. Частоте 1 кГц соответствуют импульсы длительностью в 1 мС. На рисунке 6 а приведено одно колебание гармонического напряжения периода $T_{50\text{Гц}} = 20 \text{ мС}$; на рисунке 6 б — импульсное напряжение с периодом $T_{1\text{кГц}} = 1 \text{ мС}$, той же амплитуды. После их выпрямления однополупериодным выпрямителем, полу-

чим напряжения указанные на графиках рисунка 6 в и рисунка 3 б. Нетрудно видеть, что площадь выпрямленного синусоидального напряжения за время 20 мС меньше площади выпрямленного меандра за то же время. Это значит, что при одинаковой амплитуде обоих напряжений $U_{н\text{ ср}}$ прямоугольных импульсов выше, чем у синусоиды; причем оно будет возрастать с повышением частоты выпрямляемых импульсов. Еще более эффективен такой подход при двухполупериодном выпрямлении. Однако, выпрямленное импульсное напряжение и выпрямленное синусоидальное — далеки от идеального постоянного напряжения. Чтобы их приблизить к графику прямой линии, используют фильтры: устройства, на которые подается выпрямленное напряжение, а снимается постоянное, график которого более близок к прямой. В качестве фильтров используют элементы, способные накапливать энергию: катушки индуктивности и конденсаторы. Первые могут накапливать энергию поля магнитного; вторые — электрического. Иногда строят фильтры, одновременно содержащие оба эти элемента. Например, при работе в схеме однополупериодного выпрямителя, в интервалы времени: $0 - T/2$, $T - 3T/2$ фильтр, конденсатор или катушка индуктивности, накапливает энергию; в полупериоды $T/2 - T$, $3T/2 - 2T$ — отдает ее в нагрузку. Рассмотрим процесс фильтрации на основе конденсатора.

Пусть на вход выпрямителя с фильтром (рисунок 7 а) поступают импульсы (рисунок 6 б). Если бы в схеме не было конденсатора C , то напряжение $U_{\text{вых}}$ имело бы вид, изображенный на рисунке 6 в, но фильтр

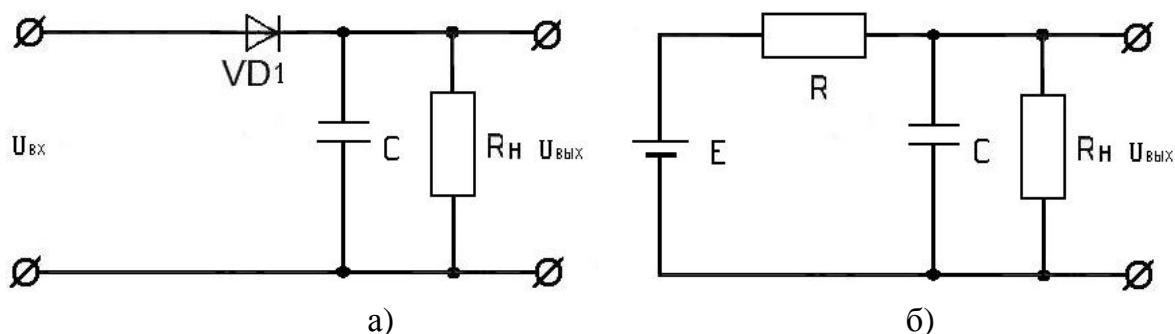
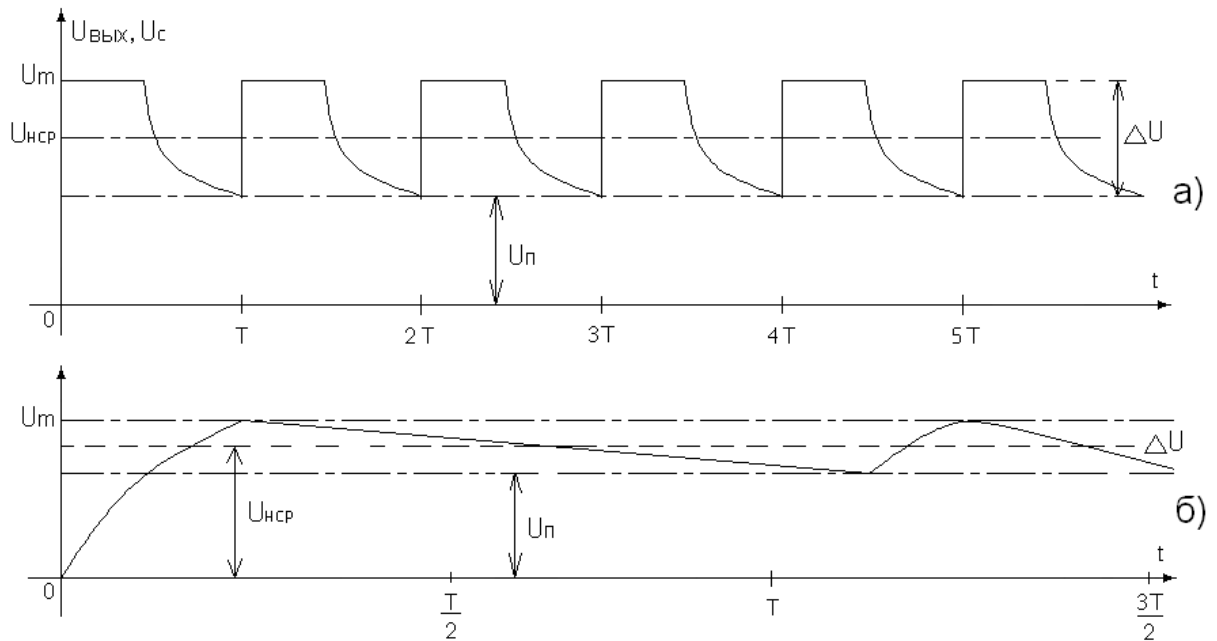


Рисунок 7. - а) выпрямитель с емкостным фильтром; б) эквивалентная схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

изменяет его. Конденсатор заряжается в полупериоды времени $0 - T/2$, $T - 3T/2$ и т.д. и разряжается в течение времени $T/2 - T$, $3T/2 - 2T$ и т. д. Если эти процессы отобразить графически для каждого импульса, то получим выпрямленное напряжение вида, изображенного на рисунке 8 а. Аналогичные процессы происходят при выпрямлении синусоидальных напряжений (рисунок 8 б). Нетрудно заметить, что применение фильтра повышает $U_{н\text{ ср}}$, поскольку площадь выпрямленного напряжения, ограниченная графиком и осью абсцисс увеличивается. При этом уменьшаются пульсации ΔU и появляется область постоянного напряжения $U_{п}$. Таким образом, фильтр на вы-



ΔU – пульсации напряжения; $U_{\text{п}}$ – постоянная составляющая выпрямленного напряжения; $U_{\text{н ср}} = U_{\text{п}} + \Delta U/2$.

Рисунок 8. - а) напряжение на нагрузке $R_{\text{н}}$ выпрямителя импульсов; б) напряжение на нагрузке $R_{\text{н}}$ выпрямителя гармонических токов

ходе выпрямителя отфильтровывает постоянное напряжение и уменьшает пульсации переменного, тем самым, приближая выпрямленное напряжение к идеальному постоянному напряжению. Чем больше величина постоянной составляющей напряжения и меньше пульсации, тем более качественное выпрямленное напряжение. Вполне очевидно, что чем больше емкость конденсатора C , тем более эффективно осуществляется выпрямление переменного тока в постоянный, так как разряд конденсатора большей емкости при прочих равных условиях будет происходить медленнее.

Индуктивные фильтры используют в выпрямителях с большими токами, так как при этом эффективно используются свойство катушки индуктивности – создавать магнитное поле. Выпрямительные устройства характеризуются следующими параметрами и характеристиками:

1. Максимальные входное $U_{\text{вх}}$ и выходное $U_{\text{вых}}$ напряжения выпрямителя.
2. Максимальный входной $I_{\text{вх}}$ и выходной $I_{\text{вых}}$ токи выпрямителя.
3. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения $U_{\text{п}}$.
4. Пульсации выходного напряжения выпрямителя ΔU .
5. Коэффициент пульсаций выходного напряжения: $\Delta U / U_{\text{п}}$.
6. Среднее выпрямленное значение напряжения $U_{\text{н ср}} = U_{\text{п}} + \Delta U/2$.
7. Нагрузочная характеристика выпрямителя: $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{н}})$.
8. Внутреннее дифференциальное сопротивление выпрямителя: $r = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{н}}$

II.1 Стенд для исследования однополупериодного выпрямителя напряжений и токов.

Собран на основе диода VD_1 (рисунок 9). В качестве нагрузки подключен резистор R_H . Для изучения влияния нагрузки на величину выпрямленного напряжения используются резисторы $R_1 - R_5$. Емкости C_1, C_2 и C_3 разных номиналов; позволяют оценить влияние величины емкости фильтра C на уровень пульсаций выходного напряжения. Перемычка Π необходима для подключения амперметра. Перемычка Π отключается и на ее место включается амперметр. Кроме диода-выпрямителя в исследованиях используется генератор гармонических и прямоугольных сигналов, а также осциллограф и амперметр.

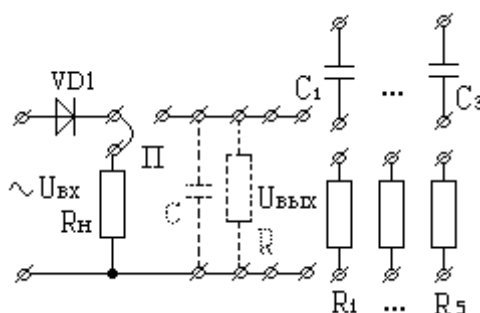


Рисунок 9. – Элементы (VD_1, R, C) для составления цепи однополупериодного выпрямителя

II.2 Стенд для исследования двухполупериодного выпрямителя напряжений и токов.

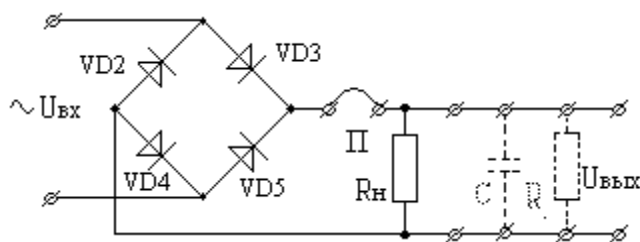


Рисунок 10. – Диодный мост и элементы (R, C) для составления двухполупериодного выпрямителя

Цепь собрана на основе диодов $VD_2 - VD_5$. Как и в предыдущей схеме, R_H – нагрузочный резистор, к которому могут подключаться нагрузочные сопротивления R и емкостный фильтр C на основе конденсаторов. Приборы для измерений те же: генератор гармонических и импульсных сигналов, осциллограф и амперметр.

III. Порядок выполнения работы.

1. Измерение параметров и характеристик однополупериодного выпрямителя.

Уровень А.

1. На вход схемы выпрямителя от генератора гармонических сигналов подайте напряжение $5 \sin 314t$ В. Осциллографом наблюдайте выходное напряжение и измерьте величину его пульсаций. Результаты измерений представьте графиками.

2. Изменяя частоту генератора в соответствии данных таблицы 1, измерьте выходное напряжение для каждого из значений при нагрузке R_H . и для трех других значений сопротивления нагрузки, параллельно подключая к R_H (по согласованию с преподавателем) резисторы из числа имеющихся на стенде. Постройте графики зависимости $U_{\text{вых}} = \psi(f)$ для всех значений R_H .

Таблица 1

$f \cdot 10^3$ Гц		0,05	0,5	1	5	15	40	100	150
$U_{\text{м вых}},$ В	R_H								
	R_{H1}								
	R_{H2}								
	R_{H3}								

3. Подключите емкость C_1 параллельно нагрузке и измерьте параметры выпрямителя в соответствии таблицы 2.

Таблица 2.

С, мкФ	C_1	C_2	C_3
$\Delta U, \text{В}$			
$U_{\text{п}}, \text{В}$			
$(\Delta U / U_{\text{п}})$			
$U_{\text{н ср}} = U_{\text{п}} + \Delta U / 2, \text{В}$			

4. Включите на выходе выпрямителя емкостный фильтр C_1 . Подключая последовательно резисторы $R_1 - R_5$ параллельно нагрузочному резистору R , проведите с помощью амперметра измерение тока нагрузки I_H . Для этого вместо перемычки Π включите амперметр. По полученным данным постройте зависимость $U_{\text{вых}} = f(I_H)$.

Таблица 3

R, Ом	$R_H R_1$	$R_H R_2$	$R_H R_3$	$R_H R_4$	$R_H R_5$
$U_{\text{вых}}$					
I_H					

Уровень В.

Выполните задания уровня А и п. 5.

5. В соответствии плана исследования для однополупериодного выпрямителя на основе электрической цепи, представленной на рисунке 10, разработайте методику и проведите исследование двухполупериодного выпрямителя.

Уровень С.

Выполните задания уровня А, В и п. 6.

6. Выберите основные параметры, на основе которых возможно оценить эффективность выпрямителя переменных токов и напряжений. Осуществите такое сравнение для однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.

IV. Контрольные вопросы.

1. Основные параметры выпрямительных устройств.
2. Методика измерения напряжений выпрямителя ΔU ; $U_{\text{п}}$; $U_{\text{н ср}}$.
3. На основе проведенных измерений, предложите методику измерения внутреннего дифференциального сопротивления диода-выпрямителя г.
4. На основе проведенных измерений обоснуйте эффективность двухполупериодной схемы выпрямления по сравнению с однополупериодной.
5. Возможно ли построить зависимость $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{н}})$, не прибегая к измерениям амперметра, а пользуясь показаниями осциллографа?

V. Литература:

1. Винокуров, В.И. Электрорадиоизмерения / В.И. Винокуров. – М.: Высшая школа, 1991. – 412 с.
2. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – Мн.: Вышэйшая школа, 2002. – 287 с.
3. Манаев, Е.И. Основы радиоэлектроники / Е.И. Манаев. - М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
4. Осциллограф С1-137. Инструкция по эксплуатации.

Учебное издание

Составители: Маркевич К.М., старший преподаватель
Чугунов С.В., ассистент

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ

«Измерение физических характеристик и параметров полупроводниковых диодов» и «Измерение физических параметров выпрямленных переменных напряжений и токов»

по дисциплине

«Метрология, стандартизация и сертификация в информатике
и радиоэлектронике»

Ответственный за выпуск: Маркевич К.М.
Редактор: Строкач Т.В.
Компьютерная вёрстка:
Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано к печати 16.08.2010. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч. изд. л. 1,4. Заказ №_844. Тираж 50 экз. Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный технический университет», 224017, г. Брест, ул. Московская, 267