

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра телевидения и управления (ТУ)

В.А. Шалимов, А.М. Заболоцкий

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ**

Руководство к лабораторной работе

Томск 2023

Шалимов В.А., Заболоцкий А.М. Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов: руководство к лабораторной работе. Учебно-методическое пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2023. – 13 с.

Одобрено на заседании каф. ТУ протокол 3 от 15.02.2023

© Шалимов В.А., Заболоцкий А.М., 2023

© Кафедра Телевидения и управления, ТУСУР, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Общее положение.....	4
2. Описание лабораторного макета.....	8
3. Порядок выполнения работы.....	10
Список литературы.....	13

Введение

Цель работы – исследование статических вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов; оценка статических параметров полупроводниковых диодов при прямом и обратном включении; изучение вентильных свойств диодов.

1. Общие положения

1.1 Разновидности полупроводниковых диодов

В современной радиоэлектронной аппаратуре полупроводниковые диоды – двухэлектродные однопереходные полупроводниковые приборы, которые применяются широко для самых различных целей. Для удовлетворения требований, предъявляемых разработчиками радиоэлектронной аппаратуры к полупроводниковым диодам, отечественная промышленность выпускает: выпрямительные диоды; стабилитроны; импульсные диоды; варикапы; смесительные диоды; светодиоды; фотодиоды; диоды Шоттки; диоды Ганна и другие типы диодов. Условные графические обозначения некоторых типов диодов приведены на рис. 1.1.



Рис. 1.1 – Условные графические обозначения некоторых типов диодов

1.2 Основные сведения из теории

Физика работы $p-n$ перехода подробно описана в [1, 2]. Поэтому воспользуемся известным выражением для вольт-амперной характеристики (ВАХ) идеализированного диода. Обычно ее записывают в следующей форме:

$$I = I_0(e^{U/\varphi_T} - 1), \quad (1.1)$$

$$I_0 = \frac{qD_p\delta S}{L_{p\delta}} p_{0\delta} + \frac{qD_n\delta S}{L_{n\delta}} n_{0\delta}, \quad (1.2)$$

где I_0 – тепловой ток диода (обратный ток насыщения); I – ток, протекающий через диод; U – величина напряжения, подключенного к переходу; $\varphi_T = kT/q$ – температурный потенциал; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; D_p и D_n – коэффициенты диффузии дырок и электронов; S – площадь перехода; $p_{0\delta}$ и $n_{0\delta}$ – равновесные концентрации неосновных носителей в базе (катоде) и эмиттере (аноде) диода.

Одной из важных особенностей характеристики является очень крутая (экспоненциальная) прямая ветвь. Поэтому весьма большие прямые токи (несколько ампер и выше) получаются у полупроводниковых диодов при напряжении не более 1 В, т.е. намного меньшем, чем в случае вакуумных и газонаполненных диодов. В связи с большой крутизной прямой ветви обычно удобнее задавать в качестве аргумента ток, а напряжение считать его функцией и выражение для ВАХ идеализированного диода преобразовать к следующему виду:

$$U = \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right), \quad (1.3)$$

Идеализированный $p-n$ переход обладает вентильными свойствами. При приложении к нему напряжения, смещающего $p-n$ переход в прямом направлении, протекает ток, который при увеличении напряжения увеличивается по экспоненциальному закону. Если приложить напряжение, смещающее $p-n$ переход в обратном направлении, то сопротивление его возрастет. В цепи протекает малый тепловой ток, который не зависит от приложенного напряжения уже при $U_{обр} \geq (3 \div 4)\varphi_T$. На рис. 1.2. приведена ВАХ идеализированного диода, построенная в относительных координатах. Эта характеристика не зависит от типа диода.

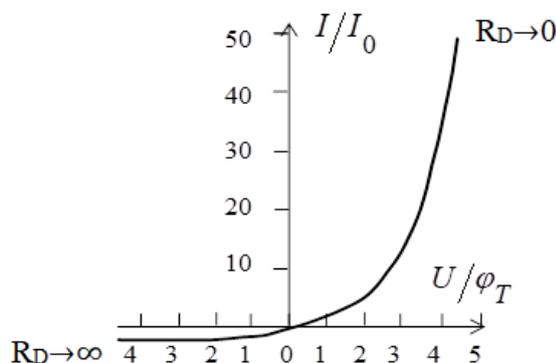


Рис. 1.2 – Статическая ВАХ идеализированного диода

В реальных диодах прямая и обратная ветви ВАХ отличаются от идеализированной. При прямом включении существенное влияние на ход ВАХ оказывает падение напряжения на омическом сопротивлении базы диода, которое начинает проявляться уже при токах, превышающих 2–10 мА. С учетом падения напряжения на омическом сопротивлении базы диода уравнение прямой ветви ВАХ диода описывается выражением

$$U = \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) + I \cdot r_{\delta}, \quad (1.4)$$

где r_{δ} – омическое объемное сопротивление базы диода.

Падение напряжения на диоде U зависит от тока I , протекающего через него, и имеет большее значение у диодов с малым током I_0 . Так как у кремниевых диодов

тепловой ток I_0 мал, то падение напряжения на диоде U в открытом состоянии у них значительно больше, чем у германиевых рис. 1.3. Различие в прямых напряжениях германиевых и кремниевых диодов составляет обычно 0,4 В (так называемая «пятка») и сохраняется вплоть до таких малых токов порядка нескольких $(I_0)_{Ge}$, при которых у германиевых диодов напряжение уже практически равно нулю.

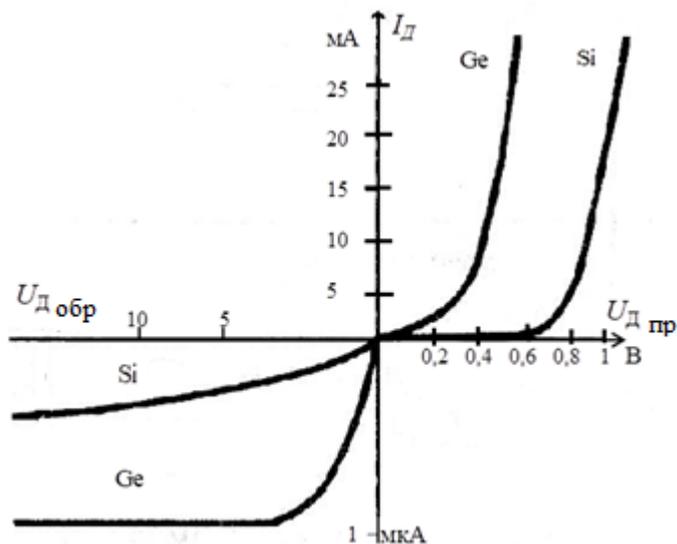


Рис. 1.3 – Реальные ВАХ диодов

При исследованиях реальных $p-n$ переходов наблюдается достаточно сильное увеличение обратного тока при увеличении приложенного напряжения. Поэтому у реальных диодов в качестве одного из основных параметров используют обратный ток $I_{обр}$, который измеряют при определенном значении обратного напряжения. У германиевых диодов $I_{обр} = I_0 + I_{ТГ} + I_{утечки} \approx I_0$, где $I_{ТГ}$ – ток термогенерации. В кремниевых диодах в диапазоне рабочих температур доля теплового тока в полном обратном токе невелика. У них обратный ток в основном определяется генерационно-рекомбинационными явлениями в $p-n$ переходе $I_{обр} \approx I_{ТГ}$. При любой рабочей температуре обратный ток кремниевых диодов в 100–1000 раз меньше обратного тока германиевых диодов. Для инженерных расчетов величины обратного тока в зависимости от температуры окружающей среды можно пользоваться упрощенным выражением

$$I_0(I) \approx I_{обр}(T_0) \cdot 2^{(T-T_0)/T^*} \quad (1.5)$$

где T^* – приращение температуры, при котором обратный ток $I_{обр}(T_0)$ удваивается $T^* \approx 8 \div 10^\circ C$ для германия и $T^* \approx 6 \div 7^\circ C$ для кремния.

1.3 Характеристические сопротивления диода

Нелинейность характеристики диода удобно оценивать, сопоставляя его сопротивления в прямом и обратном направлениях. Как и для других нелинейных элементов, различают дифференциальные сопротивления и сопротивления постоянному току. По ВАХ диода можно определить для точки «А» на характеристике рис. 1.4: сопротивление диода по постоянному току $R_D = U_A / I_A$, а дифференциальное сопротивление диода $r_D = \Delta U_D / \Delta I_D$.

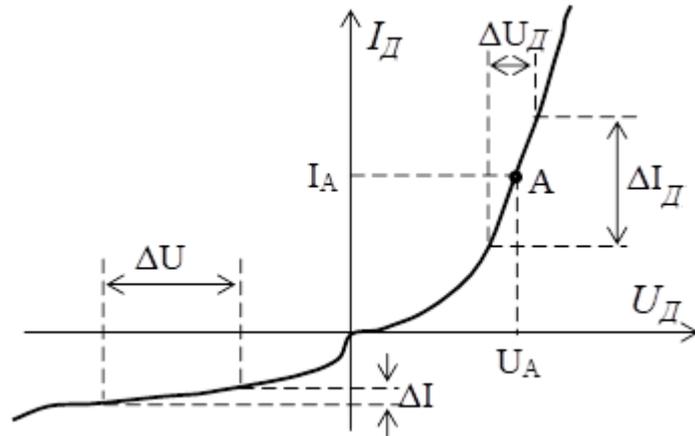


Рис. 1.4 – К определению характеристических сопротивлений диода R_D и r_D

1.4 Методика снятия статических ВАХ диодов

Схема для снятия статических ВАХ диодов представлена на рис. 1.5.

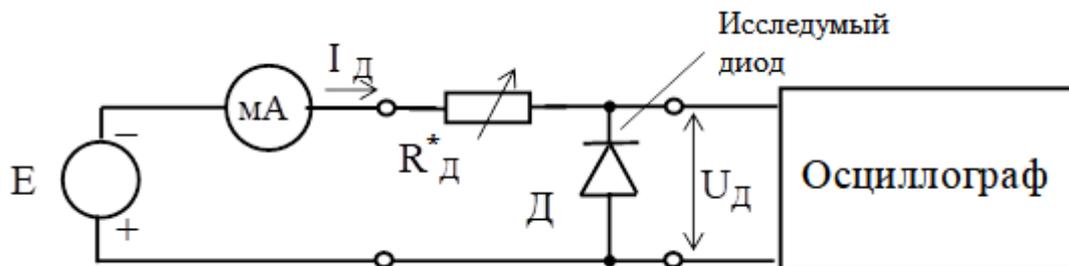


Рис. 1.5 – Структурная схема макета для снятия статических ВАХ

Для этой схемы можно составить систему уравнений:

$$I_D = f(U_D), \quad (1.6)$$

$$|U_D| = |E - R_D^* \cdot I_D|, \quad (1.7)$$

Первое выражение представляет собой статическую ВАХ диода, а второе - нагрузочную прямую для диода.

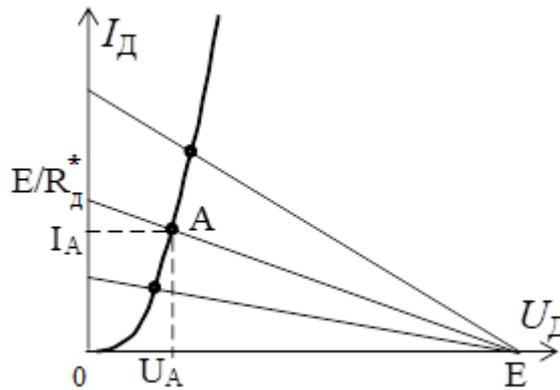


Рис. 1.6 – К построению нагрузочных характеристик диода

Нагрузочная прямая пересекает оси координат в точках с координатами $(U_D=E, I_D=0)$ и $(U_D=0, I_D=E/R_D^*)$. Решением системы уравнений является точка А с координатами U_A и I_A . Изменяя в широких пределах с помощью переменного резистора R_D ток через диод а, следовательно, и напряжение на диоде (рис. 1.6) можно получить достаточное количество точек, по которым строится ВАХ диода.

2. Описание лабораторного макета

Для исследования статических ВАХ диодов используется схема, изображенная в левой части лабораторного макета рис. 2.1. С помощью переключателя П2 выбирается тип исследуемого диода. Измерение тока диода I_D производится стрелочным миллиамперметром, включаемым в исследуемую цепь переключателем П7. Чувствительность прибора устанавливается переключателем П6.

Изменять величину напряжения на диоде можно переключателем П1, меняя величину резистора ($R_{D1} \div R_{D10}$). Напряжение на диоде измеряется осциллографом. Чтобы установить максимальный ток диода $I_{Dмак}$ равным 20÷25 мА, нужно переключатель П1 установить в положение 10 и с помощью переменного резистора $R_{Днод}$ (плавно) выставить требуемое значение тока. Перечень диодов, исследуемых при проведении лабораторной работы, приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Наименование	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5
Тип	Д9	Д18	Д7Е	КС133	КС139

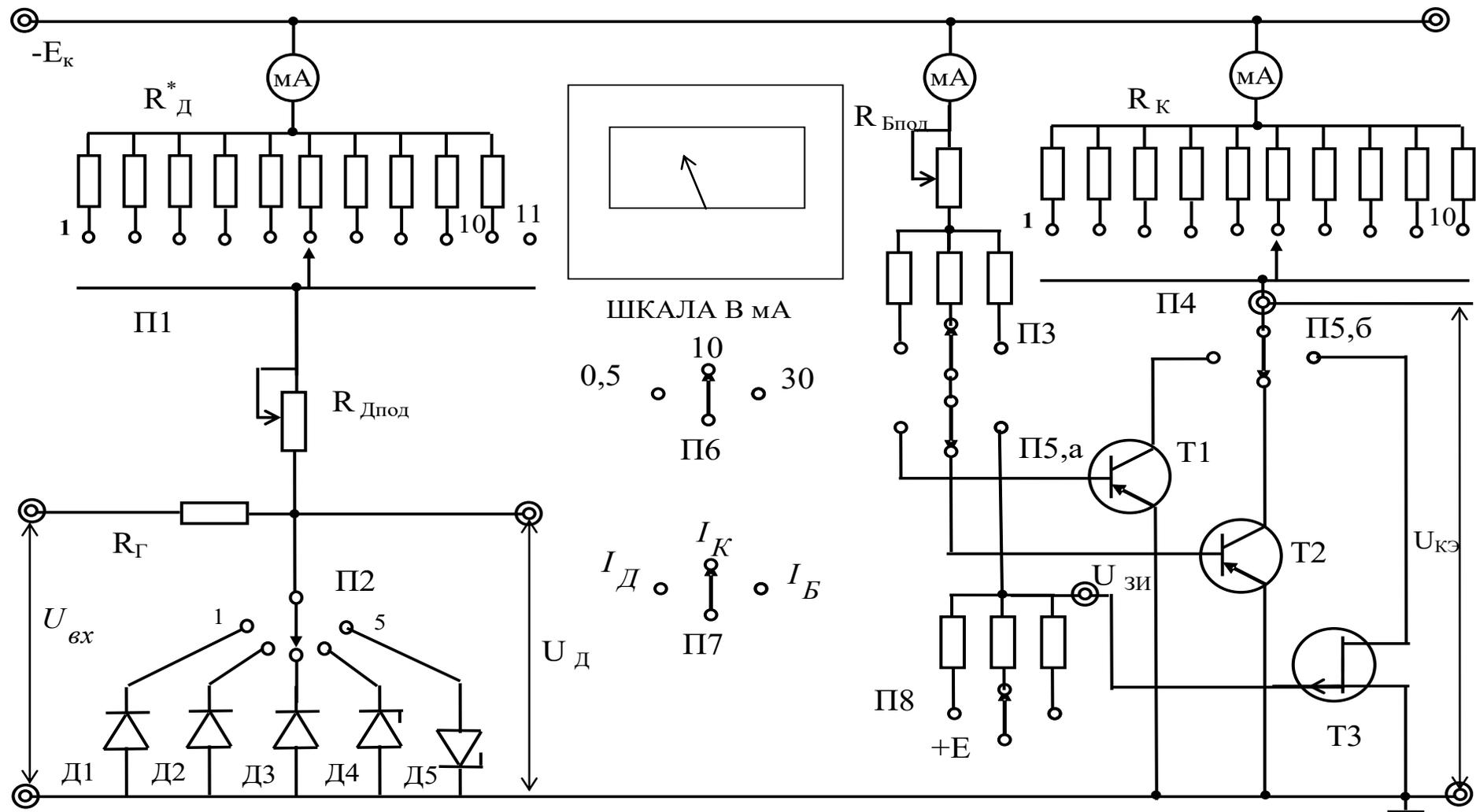


Рис. 2.1 – Лицевая панель макета для исследования диодов и транзисторов

3. Порядок выполнения работы

3.1 Исследование прямых ветвей ВАХ диодов

Для исследования прямых ветвей ВАХ диодов необходимо:

1. Включить источник питания макета;
2. Переключатель П2 установить в положение 1, подключив диод Д1;
3. Переключатель П7 установить в положение I_D ;
4. Переключатель П6 установить в положение 30 мА;
5. Переключатель П1 установить в положение 10 и с помощью переменного резистора $R_{Диод}$ (плавно) установить ток диода $I_{Dмакс}$ равным 20÷25 мА;
6. Вход осциллографа присоединить к диоду для измерения постоянного напряжения U_D ;
7. Изменяя переключателем П1 резисторы ($R_{Д1} ÷ R_{Д10}$) и фиксируя с помощью стрелочного прибора величину тока, протекающего через диод Д1, снять зависимость $I_D=f(U_D)$. Результаты измерений занесите в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

	Положение переключателя П1										Диод
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
I_D , мА											Д1
U_D , В											
I_D , мА											Д2
U_D , В											
I_D , мА											Д3
U_D , В											
I_D , мА											Д4
U_D , В											

- 8) Повторить пункт 7 для диодов Д2, Д3 и Д4.
- 9) Полученные зависимости в виде $I_D=f(U_D)$ представить на одном графике. Пояснить причины отличий прямых ВАХ диодов.
- 10) Для одного из диодов построить зависимости $R_D=f(I_D)$ и $r_D=f(I_D)$. Сделать вывод об их соотношении.

3.2 Исследование обратной ветви ВАХ стабилитрона

Для исследования обратной ветви ВАХ стабилитрона необходимо:

- 1) Переключатель П2 установить в положение 5, подключив диод Д5;
- 2) Изменяя переключателем П1 резисторы ($R_{Д1} \div R_{Д10}$) и фиксируя с помощью стрелочного прибора величину тока, протекающего через диод Д5, снять зависимость $U_{СТ} = f(I_{СТ})$. Результаты измерений занести в таблицу 4.2 вида:

Таблица 4.2

	Положение переключателя П1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{СТ}, \text{мА}$										
$U_{СТ}, \text{В}$										

- 3) Построить ВАХ стабилитрона $U_{СТ} = f(I_{СТ})$.
- 4) Для стабилитрона построить зависимость $r_{Д} = f(I_{Д})$. Сделать выводы о работе.

3.3 Исследование вентильных свойств диодов

Для исследования вентильных свойств диодов используется простейшая схема диодного ограничителя, изображенная на рис. 3.1.

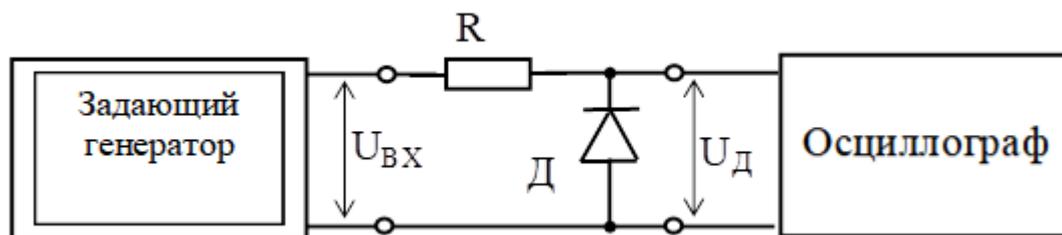


Рис. 3.1 – Схема для исследования вентильных свойств диодов

Для ее получения достаточно на макете переключатель П1 поставить в положение 11, отключив тем самым напряжение источника постоянного питания и подать на вход синусоидальное напряжение от задающего генератора.

При отрицательной полуволне напряжения задающего генератора диод оказывается включенным в прямом направлении и ток I , протекающий через диод, создает на диоде небольшое падение напряжения $U_{пр}$ в соответствии с ВАХ (участок 1 на рис. 3.2). При положительной полуволне напряжения задающего генератора диод оказывается включенным в обратном направлении, ток через диод равен $I_{обр}$, т. е. практически равен нулю, и все падение напряжения выделяется на диоде $U_{обр}$ (участок 2 на рис. 3.2), что видно на экране осциллографа, затем процесс повторяется.

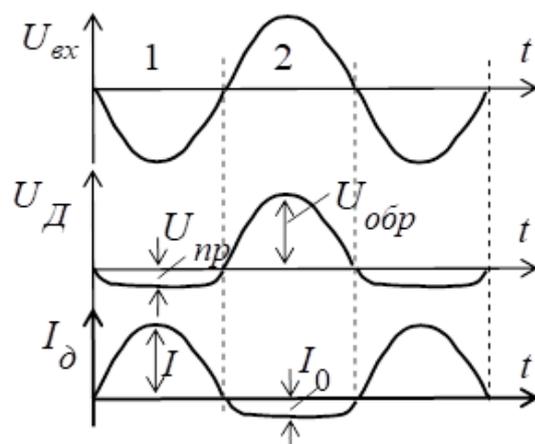


Рис. 3.2 – Временные диаграммы диодного ограничителя

Чем меньше величина U_{np} и чем меньше ток $I_{обр}$, тем лучше вентиляльные свойства диода. Вентильные свойства диодов можно оценить через коэффициент вентильных свойств, который определяется как отношение напряжений при обратном и прямом включениях диода $K_B = U_{обр}/U_{np}$.

Порядок исследования вентиляльных свойств диодов:

1. Соберите схему диодного ограничителя, приведенного на рис. 3.1. Для ее получения достаточно переключатель П1 поставить в положение 11, отключив тем самым напряжение источника питания. Переключатель П2 установить в положение 1, подключив диод Д1;

2. Подайте на вход ограничителя с функционального генератора синусоидальный сигнал U_{ex} с амплитудой 2 В и частотой 1 кГц. Включите установку и получите на экране осциллографа U_{ex} и U_D . Зарисуйте осциллограммы.

3. Замеряйте значения U_{np} и $U_{обр}$ для диода Д1 и занесите в таблицу 4.3 вида:

Таблица 4.3

	Д1	Д2	Д3
U_{np}			
$U_{обр}$			
K_B			

4. Повторите измерения для диодов Д2, Д3. По полученным данным выберите диод с лучшими вентиляльными свойствами.

5. Оформите отчет и сделайте выводы по работе. Отчет должен быть оформлен согласно образовательного стандарта вуза ОС ТУСУР 01-2013. «Работы студенческие» по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. Введен приказом ректора от 03.12.2013 №14103. [Электронный ресурс]. <https://regulations.tusur.ru/documents/70#> (дата обращения 02.05.2018)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
2. Электроника. Часть 1: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 209 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7278> (дата доступа:08.05.2023)
3. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
4. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
5. Электроника. Часть 2: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 120 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7279> (дата доступа:08.05.2023)
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.- 488 с.
7. Учебное пособие «Микроэлектроника» : Для направления подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника». Профиль: «Промышленная электроника» / Легостаев Н.С. - 2013. 172 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/4280> (дата доступа:08.05.2023)
8. Гусев В.Г. Электроника: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с. (73): Библиотека ТУСУР.