

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»*

Часть 1



Могилев 2019

УДК 621.313
ББК 32.85
Э 45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «05» октября 2018 г.,
протокол № 3

Составители: канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов;
ст. преподаватель И. А. Черкасова;
ст. преподаватель И. В. Курлович

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Методические рекомендации предназначены для студентов направления
подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» для выполнения
лабораторных работ по дисциплине «Электроника».

Учебно-методическое издание

ЭЛЕКТРОНИКА

Часть 1

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Технический редактор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать . Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ № .

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2019



Содержание

Введение.....	4
Меры безопасности при проведении лабораторных работ.....	5
1 Лабораторная работа № 1. Изучение лабораторного оборудования	6
2 Лабораторная работа № 2. Изучение программного обеспечения для моделирования работы электронных устройств, сбора и обработки данных	9
3 Лабораторная работа № 3. Исследование параметров постоянных и переменных аналоговых сигналов.....	13
4 Лабораторная работа № 4. Исследование работы выпрямительного диода...16	
5 Лабораторная работа № 5. Исследование работы однофазных неуправляемых выпрямителей.....	21
6 Лабораторная работа № 6. Исследование работы стабилитрона и схемы параметрического стабилизатора напряжения.....	25
7 Лабораторная работа № 7. Исследование работы управляемого выпрямителя.....	30
8 Лабораторная работа № 8. Исследование работы светодиода и оптопары.....	34
9 Лабораторная работа № 9. Исследование характеристик биполярного транзистора	39
10 Лабораторная работа № 10. Исследование характеристик полевых транзисторов с управляющим переходом и изолированным затвором.....	43
Список литературы	48



Введение

Наряду с натурными экспериментами, в настоящее время широкое распространение получили компьютерное проектирование и анализ электрических схем устройств в таких средах схемотехнического моделирования, как Electronics Workbench, DesignLab, Aplac, P-Spice, Micro-Logic, LabVIEW, NI Multisim, Matlab и др. На этапе начального освоения студентами методов проектирования и испытания моделей электронных устройств наиболее приемлемым средством является программная среда NI Multisim корпорации National Instruments. Особенностью среды Multisim является наличие контрольно-измерительных приборов, по внешнему виду и характеристикам приближенных к их промышленным аналогам. Большое количество и разнообразие моделей аналоговых, цифровых или смешанных аналого-цифровых приборов и узлов, средств анализа и виртуальных приборов делает Multisim удобным инструментом для визуализации и демонстрации многих фундаментальных явлений и процессов, происходящих в электрических устройствах.

Наилучшим решением является объединение в лабораторном практикуме виртуальных и реальных компонент с тщательной методической проработкой распределения между ними учебных задач. В настоящее время доступно множество устройств сбора данных, подключаемых к персональному компьютеру по интерфейсам PCI и USB и имеющих стоимость, соизмеримую со стоимостью самого компьютера. Можно объединить виртуальные модели исследуемых объектов с системой сбора и регистрацией данных в изучаемой реальной схеме. Это позволит совершенствовать методику проведения лабораторных работ, добиться более активной работы студентов и более глубокого усвоения ими изучаемого материала.

Лабораторный практикум «Электроника» позволяет на основе расчёта и выбора элементов схемы осуществить моделирование её работы в среде Multisim, далее на специальной макетной плате комплекта лабораторного оборудования производится сборка схемы из реальных компонентов, после осуществляется сбор и обработка сигналов с помощью устройства сбора данных NI USB-6009 и программы LabVIEW, полученные результаты анализируются и сравниваются с результатами моделирования.

Меры безопасности при проведении лабораторных работ

Работа в лаборатории электроники, связанная с эксплуатацией электрооборудования, находящегося под напряжением, требует организации и строгого соблюдения мер безопасности. Вопросы безопасности отражаются в инструкциях по эксплуатации, которыми снабжено поставляемое оборудование. Характерным видом поражения, которому может подвергаться работающий в лаборатории, является поражение электрическим током. Во избежание поражения электрическим током при работе с электрооборудованием необходимо соблюдать следующие *меры безопасности*.

1 К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие обучение мерам безопасности с последующей проверкой знаний и зарегистрированные в соответствующем протоколе.

2 Студенту разрешается выполнение только той лабораторной работы, задание к которой выдал преподаватель.

3 Приступая к работе, студент обязан ознакомиться с методикой ее выполнения.

4 Сборка электрической схемы для лабораторной работы, изменение в схеме производятся при отключении питания лабораторного оборудования и переведении всех выключателей в положение «отключено».

5 Переносное оборудование, необходимое для выполнения данной лабораторной работы (осциллографы, компьютеры, электроизмерительные приборы), обязательно заземляется (согласно требованиям завода-изготовителя), что проверяется преподавателем в обязательном порядке.

6 Включение питания оборудования для выполнения лабораторной работы производится только после разрешения преподавателя.

7 Включение измерительных приборов в цепь производят только одной рукой, не касаясь металлических частей.

При выполнении лабораторных работ в лаборатории *запрещается*:

- без разрешения преподавателя перемещать приборы и аппаратуру, выносить их из лаборатории;
- производить какие-либо работы по устранению неисправностей лабораторного оборудования;
- оставлять без присмотра электроприборы, включенные в сеть;
- загромождать посторонними предметами рабочие места;
- находиться в лаборатории в верхней одежде.

При возникновении любой неисправности студент обязан немедленно отключить лабораторное оборудование от электросети и сообщить об этом преподавателю.



1 Лабораторная работа № 1. Изучение лабораторного оборудования

Цель работы: изучение комплекта лабораторного оборудования.

1.1 Общие сведения

Комплект лабораторного оборудования (рисунок 1.1) состоит из:

- функционального генератора сигнала в Гб-46 1;
- осциллографа GDS-71022 2;
- макетной платы 3;
- устройства сбора данных 4;
- источника постоянного стабилизированного напряжения НУ3002-D2 5;
- ЭВМ со специализированным программным обеспечением 6.

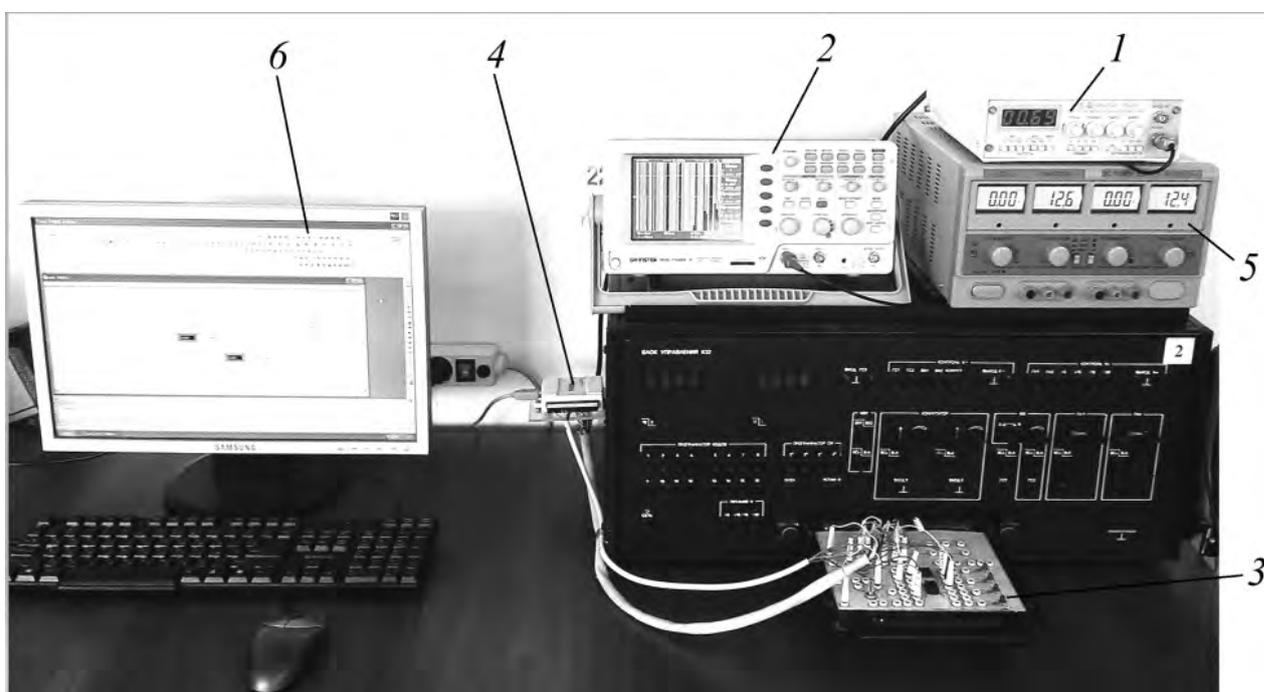


Рисунок 1.1 – Внешний вид комплекта лабораторного оборудования

Генератор сигналов функциональный Гб-46.

Генератор Гб-46 является многофункциональным прибором, формирующим нормированные сигналы пяти форм в широком диапазоне частот, содержит цифровую индикацию частоты. Генератор предназначен для исследования и испытания систем и приборов, используемых в промышленности, науке и образовании.

Основные технические характеристики генератора Гб-46.

Диапазон частот: от 0,1 Гц до 1 МГц.

Погрешность установки частоты: $\pm 1\%$.

Амплитуда сигнала:

- на нагрузке 600 Ом: не менее 5 В (размах 10 В);
- без нагрузки: не менее 10 В (размах 20 В).

Параметры сигнала синусоидальной формы: коэффициент гармоник в диапазоне от 10 Гц до 100 кГц: не более 3 %.

Параметры сигнала прямоугольной формы:

– длительность фронта и среза: не более 100 нс;

– выбросы на вершине: не более 5 %;

– погрешность коэффициента заполнения: не более 5 %.

Параметры сигнала треугольной и пилообразной форм: нелинейность на уровне от 0,1 до 0,9 в диапазоне частот от 1 до 100 Гц: не более 1,5 %.

Осциллограф GDS-71022.

Осциллограф предназначен для исследования формы и измерений амплитудных и временных параметров электрических сигналов. Область применения – контроль параметров, наладка и ремонт радиоэлектронной аппаратуры в лабораторных и производственных условиях.

Основные технические характеристики осциллографа GDS-71022.

Полоса пропускания: 20 МГц.

Количество каналов: 2.

Максимальная частота дискретизации: 250 МГц, эквив. 25 ГГц.

Объем памяти: 4 Кбайт на канал.

Автоматические и курсорные измерения.

Режимы растяжки, самописца и XY.

Синхронизация по длительности импульса и ТВ.

Режимы дискретизации: выборка, пиковый детектор (> 10 нс), усреднение (2 / ... / 256).

Память: 15 осциллограмм, 15 профилей.

Интерфейсы: USB 2.0 для управления.

Слот SD (Secure Digital) для сохранения данных на карты памяти.

Цветной TFT-дисплей с регулируемой яркостью.

Источник постоянного стабилизированного напряжения NY3002-D2.

NY3002-D2 имеет два канала регулируемого напряжения и тока. Прибор оснащён четырёхзначными ЖК-дисплеями. Выходное напряжение и ток отображаются одновременно. Обеспечиваются ограничение тока и защита от короткого замыкания.

Основные технические характеристики NY3002-D2.

Выходное напряжение (регулируемое): (0 ~30 В) x2.

Выходной ток (регулируемый): (0 ~2 А) x2.

Точность индикатора напряжения: $\pm 1\% \pm 2 D^*$.

Точность индикатора тока: $\pm 2\% \pm 2 D^*$ (* D – число значений единицы младшего разряда).

Влияние напряжения сети питания: постоянное напряжение $\leq 0,01\% + 1$ мВ; постоянный ток $\leq 0,2\% + 1$ мА.

Влияние нагрузки: постоянное напряжение $\leq 0,01\% + 3$ мВ; постоянный ток $\leq 0,2\% + 3$ мА.

Уровень пульсаций: постоянное напряжение $\leq 0,5$ мВ; постоянный ток ≤ 3 мА.

Устройство сбора данных (УСД) National Instruments USB-6009.

УСД NI USB-6009 присоединяется к компьютеру посредством интерфейса full-speed USB и содержит восемь каналов ввода аналоговых сигналов (AI), два канала генерации аналоговых сигналов (AO), 12 каналов цифрового ввода/вывода (DIO) и 32-разрядный счетчик.

Устройство сбора данных USB 6009 содержит один аналого-цифровой преобразователь (АЦП – ADC), который выполняет дискретизацию аналогового сигнала, т. е. переводит его в цифровой код. Устройство USB-6009 может выполнять как однократное, так и многократное аналого-цифровое преобразование большого количества выборок. FIFO буфер служит для хранения получаемых данных во избежание их потери во время операции аналогового ввода.

Основные технические характеристики NI USB-6009.

Количество каналов ввода аналоговых сигналов: 8.

Количество каналов вывода аналоговых сигналов: 2.

Количество каналов цифрового ввода/вывода: 12.

Частота оцифровки сигналов: 48 кГц/канал.

Разрешение АЦП: 14 бит.

Диапазон входного напряжения: от ± 1 до ± 10 В.

Шина: USB.

ЭВМ.

В лабораторном практикуме используется стандартный персональный компьютер с операционной системой Windows, установленным программным обеспечением для моделирования работы электронных устройств NI Multisim и сбора, и обработки данных NI LabVIEW или выше.

1.2 Порядок выполнения работы

1.2.1 Изучить устройство, технические характеристики, органы управления и режимы работы генератора Гб-46, осциллографа GDS-71022, источника питания НУ3002-D2, устройства сбора данных NI USB-6009.

1.2.2 По заданию преподавателя осуществить коммутацию выходных разъемов блоков лабораторного оборудования, регулировку органов управления в различных режимах работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, состав комплекта лабораторного оборудования с кратким описанием его составляющих.

Контрольные вопросы

1 Опишите состав комплекта лабораторного оборудования.

2 Приведите основные технические характеристики и режимы работы генератора Гб-46, осциллографа GDS-71022, источника питания НУ3002-D2, устройства сбора данных NI USB-6009.



2 Лабораторная работа № 2. Изучение программного обеспечения для моделирования работы электронных устройств, сбора и обработки данных

Цель работы: получение навыков создания электрических схем и моделирования их работы в среде Multisim; получение навыков создания виртуальных приборов для сбора и обработки данных в среде LabVIEW.

2.1 Общие сведения

Multisim – это редактор схем и приложение для их симуляции, входящее в систему разработки электрических схем, систему средств EDA (*Electronics Design Automation*), которые помогают в выполнении основных шагов в последовательной разработке схемы [1, 2].

Интерфейс Multisim (рисунок 2.1) состоит из следующих элементов.

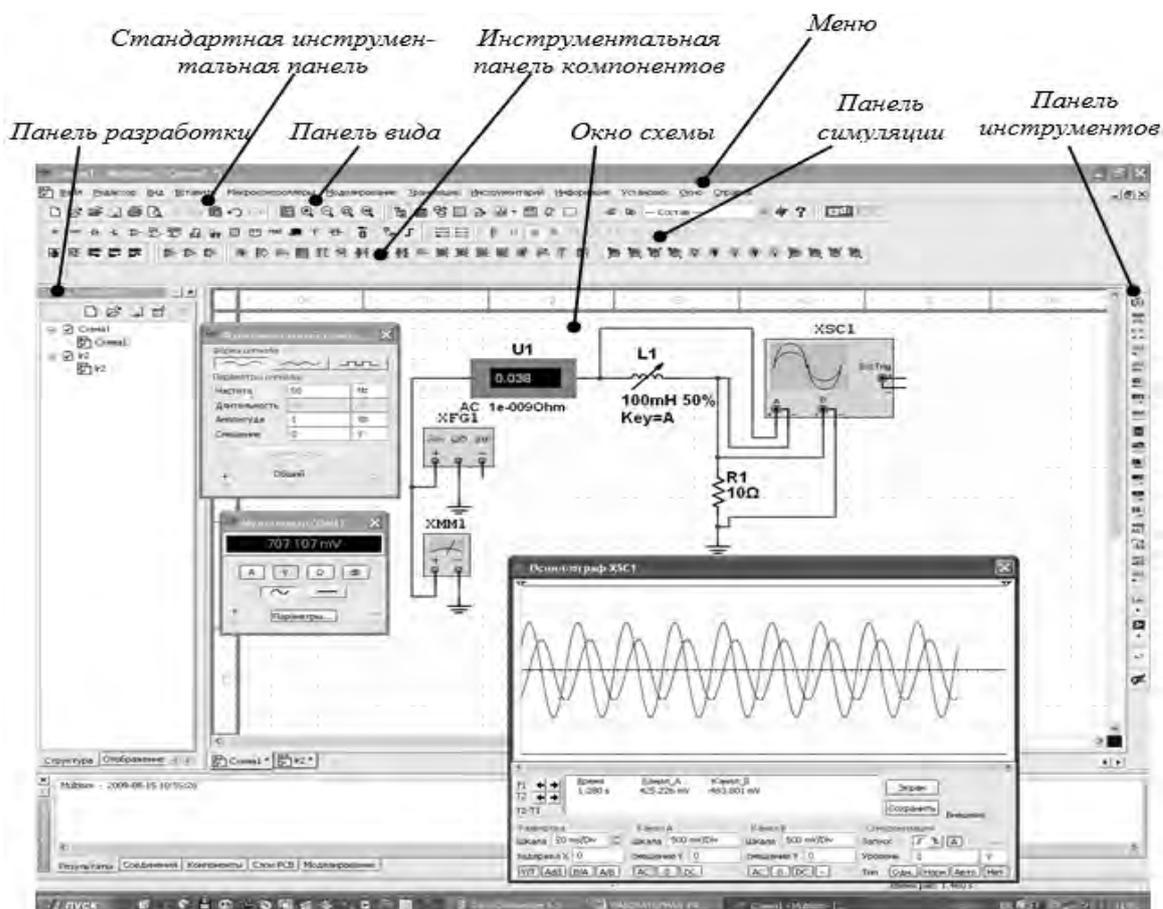


Рисунок 2.1 – Интерфейс среды Multisim

Панель разработки позволяет перемещаться по разным типам файлов проекта (схема, разводка платы, сообщения), видеть иерархию схемы и показывать или скрывать разные слои.

Панель вида ячеек позволяет быстро обозревать и редактировать такие детали, как параметры, включая цоколевку, ссылки, атрибуты и прочее.

Компоненты – это основа любой схемы, это все элементы, из которых она состоит. Multisim оперирует с двумя категориями компонентов: реальными (real) и виртуальными (virtual). У реальных компонентов, в отличие от виртуальных, есть определенное, неизменяемое значение и свое соответствие на печатной плате.

Для задания сигналов и просмотра результатов моделирования используются виртуальные приборы – модельные компоненты Multisim, которые соответствуют реальным приборам. Например, среди виртуальных приборов в Multisim есть осциллографы, генераторы сигналов, сетевые анализаторы и плоттеры бode.

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) представляет собой среду графического программирования, предназначенную для создания прикладного программного обеспечения информационно-измерительных систем, а также различных компьютерных систем сбора и обработки экспериментальных данных [3].

Созданную в среде LabVIEW прикладную программу принято называть *виртуальным прибором* (ВП).

В состав LabVIEW прикладной программы входят две основные составляющие (рисунок 2.2):

- лицевая панель виртуального прибора (Front Panel);
- функциональная панель или диаграмма (Diagram).

При работе с готовыми ВП используются только лицевые панели. Диаграмма нужна исключительно для разработки ВП.

Лицевая панель определяет внешний вид ВП и интерфейс взаимодействия пользователя с прибором. Она содержит различные элементы ввода и управления (выключатели, переключатели, поля ввода и т. д.) и элементы вывода (цифровые индикаторы, графические экраны и т. д.). При создании программ стремятся к тому, чтобы все эти элементы соответствовали аналогичным по назначению элементам, расположенным на лицевой панели традиционных измерительных приборов.

Концепция LabVIEW существенно отличается от системы традиционных языков программирования. Разработчику ВП предоставляется графическая оболочка, включающая в себя весь набор инструментов, необходимых для сбора данных, их анализа и представления полученных результатов. Создаваемая в процессе программирования диаграмма напоминает привычную для инженера блок-схему. Поэтому разработчик даже при отсутствии навыков программирования затратит на решение своих задач в LabVIEW значительно меньше времени и усилий по сравнению с написанием программ по традиционной технологии.

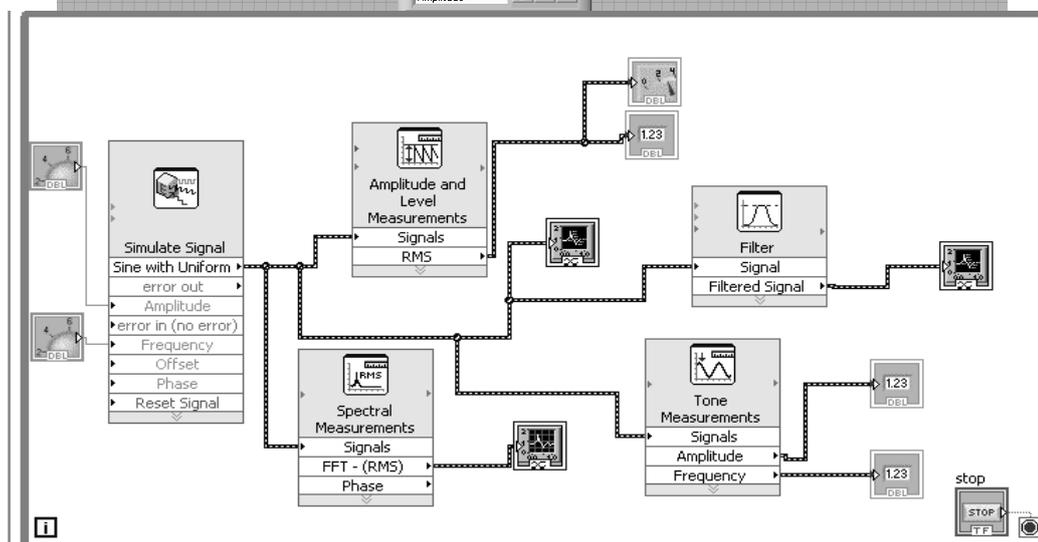
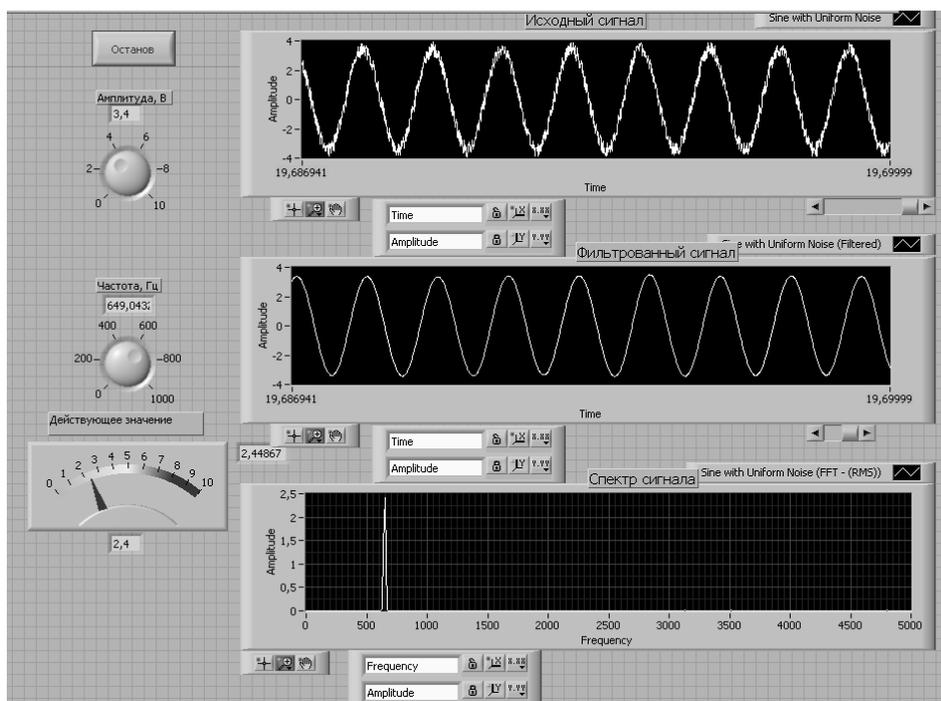


Рисунок 2.2 – Лицевая панель виртуального прибора и его диаграмма в среде LabVIEW

2.2 Порядок выполнения работы

2.2.1 Изучить инструментальные панели среды Multisim, возможности эмуляции. Ознакомиться с набором компонентов и виртуальных приборов [1, 2].

2.2.2 По заданию преподавателя собрать схему в «окне разработок», подключить виртуальные приборы (см. рисунок 2.1). Для этого необходимо:

- выбрать необходимые элементы из инструментальной панели компонентов и вынести их в окно разработки;
- задать свойства элементов схемы (номиналы сопротивлений, индуктивностей и т. д.);
- из панели инструментов выбрать необходимые виртуальные приборы и вынести их в окно разработки (например, функциональный генератор XFG1, мультиметр XMM1, осциллограф XSC1);

– задать параметры виртуальных приборов (частоту и амплитуду генерируемого сигнала, диапазон измеряемых величин и т. д.);

– соединить между собой компоненты, получив электрическую схему.

2.2.3 Запустить моделирование работы схемы, нажав соответствующую кнопку панели симуляции. Зафиксировать показания измерительных приборов, осциллограммы напряжений в контрольных точках.

2.2.4 Изучить панели, палитры меню среды LabVIEW [3].

2.2.5 По заданию преподавателя разработать виртуальный прибор для генерации электрического сигнала и определения его параметров (см. рисунок 2.2). Для этого необходимо:

– на панель блок-диаграммы виртуального прибора из палитры меню вынести блок «Simulate signal»;

– задать параметры генерируемого сигнала (форму, амплитуду, частоту, уровень шумов, количество выборок);

– для измерения и индикации параметров сигнала вынести на панель блок-диаграммы следующие блоки: «Amplitude and Level Measurements» – для определения действующего значения напряжения; «Tone Measurements» – для определения амплитуды и частоты сигнала; «Spectral Measurements» – для определения спектра сигнала; «Filter» – для фильтрации сигнала;

– расположить индикаторы на лицевой панели виртуального прибора; для возможности изменения амплитуды и частоты сигнала в процессе работы предусмотреть соответствующие регуляторы (см. рисунок 2.2).

2.2.6 Запустить разработанный виртуальный прибор, зафиксировать показания индикаторов.

2.2.7 Исследовать влияние параметров генератора на форму выходного сигнала и показание индикаторов лицевой панели.

2.2.8 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, задание к работе, распечатку окна схемы среды Multisim, осциллограммы напряжений в контрольных точках, распечатку лицевой панели и панели блок-диаграммы виртуального прибора в среде LabVIEW, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Охарактеризуйте возможности NI Multisim, его интерфейс.
- 2 Опишите порядок создания виртуального прибора в NI LabVIEW.



3 Лабораторная работа № 3. Исследование параметров постоянных и переменных аналоговых сигналов

Цель работы: приобрести навыки работы с комплектом лабораторного оборудования, научиться измерять основные параметры электрических сигналов.

3.1 Общие сведения

Токи и напряжения, действующие в электрических цепях, как материальные носители информации называются сигналами.

Гармонический сигнал характеризуется амплитудой U_m , периодом повторения T и частотой f . Часто гармонические колебания характеризуются не только мгновенными значениями, но и их действующим и средним значениями.

Наряду с гармоническими сигналами, в электронике широко используются импульсные периодические сигналы; наиболее часто в импульсных электронных схемах используются импульсы прямоугольной (рисунок 3.1, а), линейно изменяющейся (треугольной) (рисунок 3.1, б) формы [4].

Импульсы прямоугольной формы характеризуются следующими параметрами: амплитудой U_m , периодом повторения T , временем импульса и паузы t_u , t_n . Дополнительно импульсы линейно изменяющегося напряжения характеризуются длительностью рабочего t_p и обратного t_o хода.

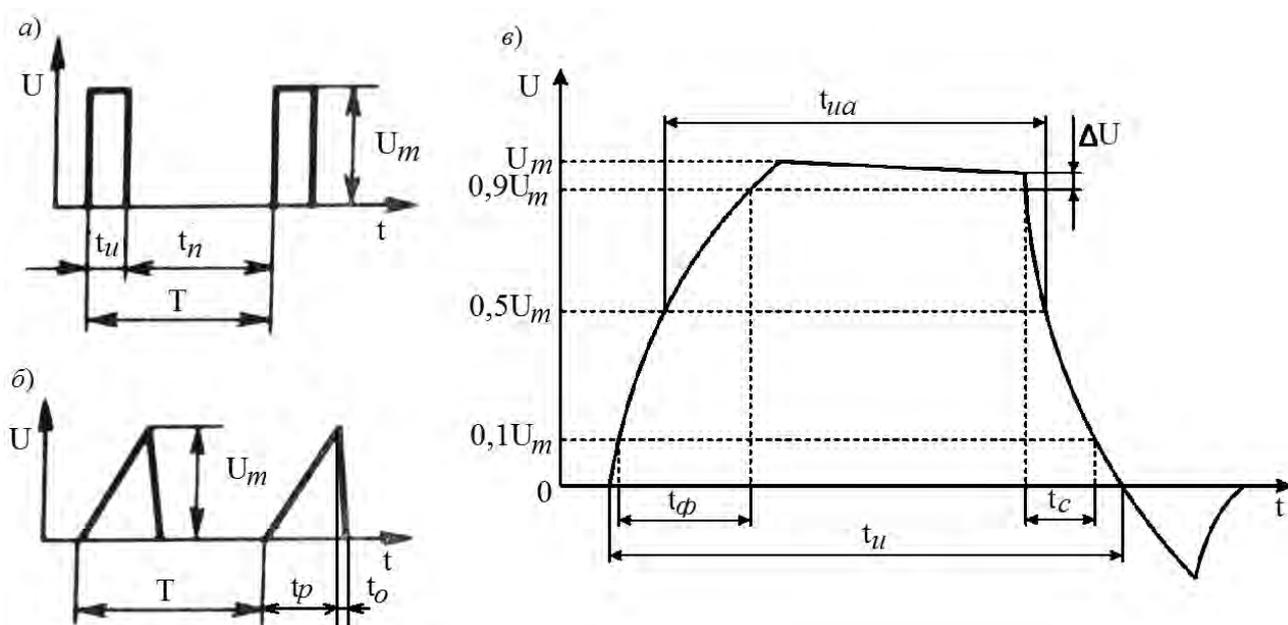


Рисунок 3.1 – Графическое изображение импульсных сигналов

Импульсы, форма которых приведена на рисунке 3.1, а, б, являются идеализированными. Форма реальных импульсов не является геометрически правильной из-за нелинейности характеристик полупроводниковых приборов и влияния реактивных сопротивлений в схемах. Поэтому реальные прямоугольные импульсы, наиболее часто используемые в практических импульсных устройствах, имеют форму, иллюстрируемую рисунком 3.1, в. Участки быстрого

нарастания и спада напряжения или тока называются фронтом и срезом импульса соответственно, а интервал, на котором напряжение или ток изменяются сравнительно медленно, – вершиной импульса.

Активные длительности фронта t_f и среза t_c определяются между уровнями $0,1U_m$ и $0,9U_m$, где U_m – амплитуда импульса. Активная длительность вершины t_{ua} оценивается на уровне $0,5U_m$.

Отношение длительности импульса к периоду повторения называют коэффициентом заполнения $\gamma = \frac{t_u}{T}$. Величину, обратную коэффициенту заполнения, называют скважностью импульсов: $q = \frac{1}{\gamma} = \frac{T}{t_u}$.

3.2 Порядок выполнения работы

3.2.1 В среде Multisim подключить функциональный генератор XPG1 ко входу осциллографа XSC1 (рисунок 3.2).

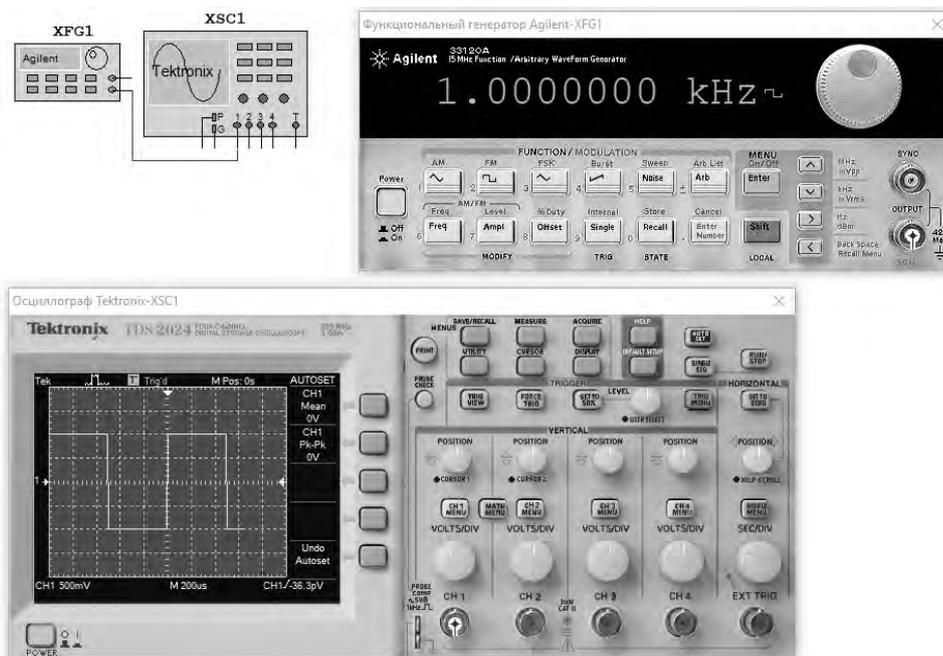


Рисунок 3.2 – Схема для исследования параметров сигналов в среде Multisim

3.2.2 Сформировать сигналы по заданию преподавателя. Полученные сигналы зафиксировать с помощью осциллографа. Определить параметры сигналов. Результаты занести в таблицу 3.1 (моделирование).

3.2.3 Разработать виртуальный прибор для исследования параметров сигналов в среде LabVIEW (рисунок 3.3). Блок-диаграмма виртуального прибора (рисунок 3.4) содержит следующие блоки: «DAQ Assistant» – для обеспечения сбора данных с устройства NI USB-6009, «Amplitude and Level Measurements» – для определения действующего значения и постоянной составляющей напряжения, «Tone Measurements» – для определения амплитуды и частоты сигнала, «Spectral Measurements» – для определения спектра сигнала.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

Тип сигнала	Способ измерения	U_m , В	Тип сигнала	Способ измерения	U_m , В	U , В	T , с	f , Гц
Постоянный	Моделирование		Гармонический	Моделирование				
	Эксперимент			Эксперимент				

Продолжение таблицы 3.1

Тип сигнала	Способ измерения	U_m , В	T , с	t_u , с	q	γ	$t\phi$, с	t_c , с
Импульсный	Моделирование							
	Эксперимент							

Продолжение таблицы 3.1

Тип сигнала	Способ измерения	U_m , В	T , с	t_p , с	t_o , с
Линейно изменяющийся	Моделирование				
	Эксперимент				

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
<http://e.biblio.bru.by/>

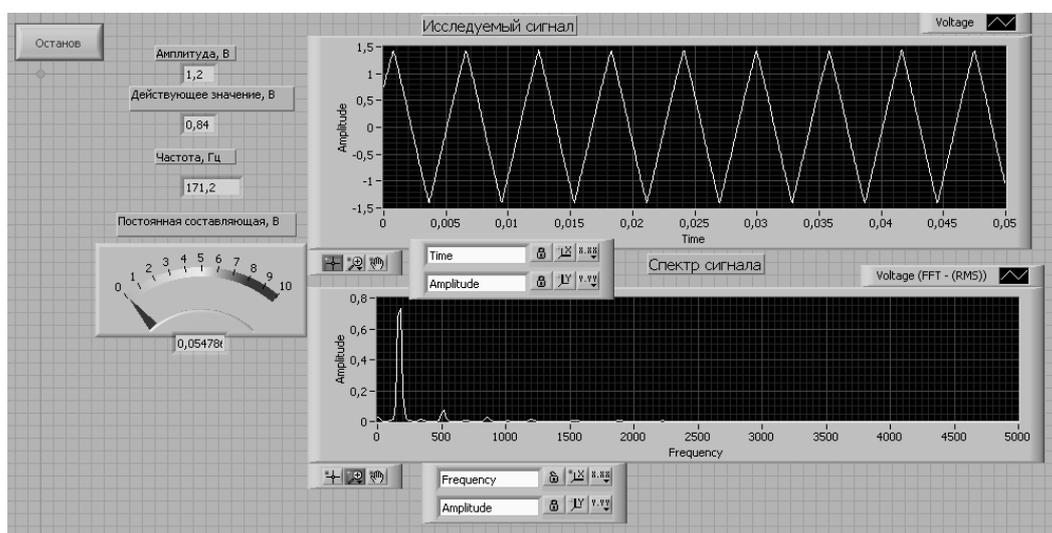


Рисунок 3.3 – Виртуальный прибор для исследования параметров сигналов в среде LabVIEW

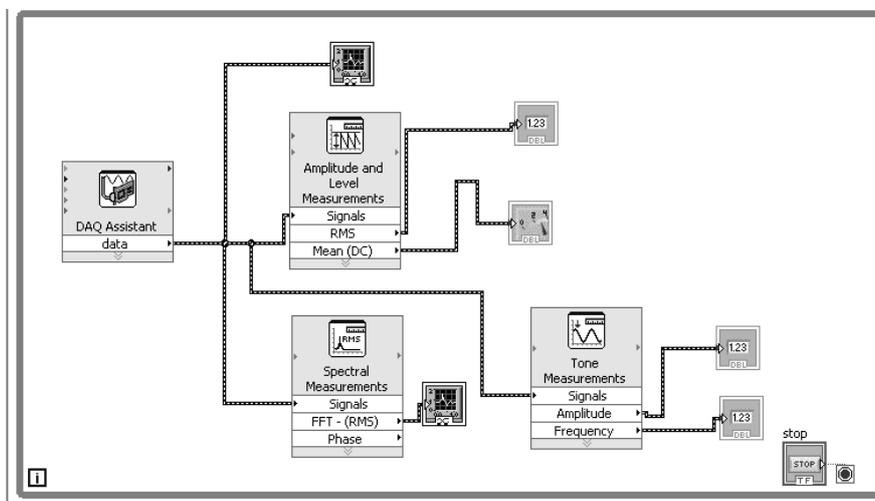


Рисунок 3.4 – Блок-диаграмма для исследования параметров сигналов в среде LabVIEW



3.2.4 С помощью источника питания NY3002-D2 и генератора Г6-46 сформировать сигналы, заданные преподавателем (таблица 3.1). Исследовать полученные сигналы, используя виртуальный прибор. Результаты занести в таблицу 3.1 (эксперимент).

3.2.5 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, задание к работе, распечатку окна схемы среды Multisim, распечатку лицевой панели и панели блок-диаграммы в среде LabVIEW, таблицу с результатами измерений, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 Какими параметрами характеризуются постоянный, гармонический, импульсный и линейно изменяющийся сигнал?

2 Опишите порядок формирования и измерения параметров сигналов с помощью функционального генератора и осциллографа в среде NI Multisim.

3 Опишите порядок создания виртуального прибора в NI LabVIEW для измерения параметров сигналов.

4 Лабораторная работа № 4. Исследование работы выпрямительного диода

Цель работы: изучение принципа функционирования, характеристик и параметров выпрямительных диодов.

4.1 Общие сведения

Полупроводниковый прибор, который имеет два электрода и один (или несколько) $p-n$ -перехода, называется диодом.

На рисунке 4.1, *а* приведено условное графическое обозначение полупроводникового диода на электрических схемах, его структура – на рисунке 4.1, *б*. Электрод диода, подключенный к области p , называют анодом, а электрод, подключенный к области n , – катодом [5-8].

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока в постоянный. Они являются одним из наиболее распространённых типов полупроводниковых диодов. Основное свойство выпрямительных диодов – односторонняя проводимость, наличие которой определяет эффект выпрямления.

Статическая вольт-амперная характеристика диода показана на рисунке 4.1, *в*.



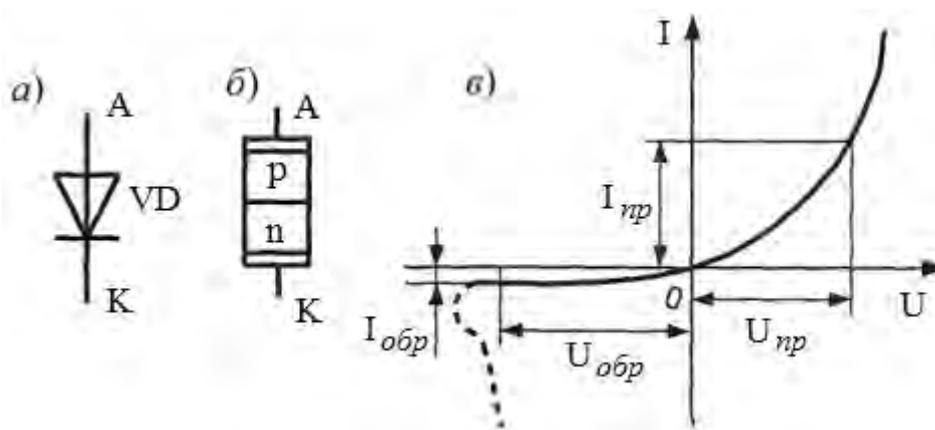


Рисунок 4.1 – Условное обозначение (а), структура (б) и статическая вольт-амперная характеристика (в) полупроводникового диода

Возможности полупроводникового диода как выпрямителя характеризуют следующие электрические параметры:

1) U_{np} – постоянное прямое напряжение на диоде при заданном значении прямого тока (обычно не превышает 1 В для германиевых и 2 В для кремниевых диодов);

2) I_{np} – постоянный выпрямленный ток через диод при заданном прямом напряжении. По величине выпрямленного тока диоды делятся на диоды малой мощности ($I_{np} < 0,3$ А), средней ($0,3 < I_{np} < 10$ А) и большой ($I_{np} > 10$ А) мощности;

3) $I_{обр}$ – обратный ток, протекающий через диод при заданном обратном напряжении, обычно указывается для вполне определённой температуры, т. к. в значительной степени зависит от неё. У германиевого и кремниевого диодов $I_{обр}$ различаются очень сильно, что объясняется различной шириной запрещённой зоны германия и кремния;

4) $R_{диф}$ – дифференциальное сопротивление диода (определяется как отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его малому приращению тока);

Как любой электронный прибор, выпрямительный диод, наряду с электрическими параметрами, характеризуется предельно допустимыми значениями:

1) $I_{np \max}$ – максимальный допустимый прямой ток, значение которого ограничивается разогревом $p-n$ -перехода;

2) $U_{обр \max}$ – максимально допустимое обратное напряжение, которое может выдержать диод в течение длительного времени без нарушения его работоспособности (до наступления пробоя $p-n$ -перехода). Кремниевые диоды позволяют получать более высокие значения $U_{обр \max}$, т. к. удельное сопротивление собственного кремния ($\rho_i \approx 10^5$ Ом.см) намного больше сопротивления собственного германия ($\rho_i \approx 50$ Ом.см);

3) P_{\max} – максимально допустимая мощность, рассеиваемая диодом, зависящая от габаритов, массы диода и его конструкции. У наиболее мощных диодов площадь перехода достигает до 1 см², а масса – до 15... 20 г, у маломощных диодов площадь переходов в 100 раз, а масса в 10 раз меньше;

4) f_{\max} – предельная частота, на которой может работать диод, сохраняя свою работоспособность. Предельная рабочая частота выпрямительного диода напрямую связана с ещё одним важным параметром – ёмкостью диода;

5) C_d – ёмкость диода, как правило, она указывается для высокочастотных выпрямительных диодов и измеряется между выводами диода при заданных напряжении и частоте.

Помимо электрических параметров, в справочной литературе приводятся значения минимальной и максимальной температуры, которые характеризуют тепловые свойства диода, а также его вольт-амперные характеристики при различных температурах окружающей среды. В наибольшей степени от температуры зависят прямое напряжение на диоде U_{np} и обратный ток $I_{обр}$.

4.2 Порядок выполнения работы

4.2.1 Выписать из справочника основные параметры заданного преподавателем выпрямительного диода [9].

4.2.2 Рассчитать параметры и выбрать ограничивающее сопротивление R_1 для исследования параметров выпрямительного диода (рисунок 4.2):

$$R_1 = \frac{E}{I_{np \max} / 2}; \quad P_{R1} = \frac{(E - U_{np})^2}{R1}.$$

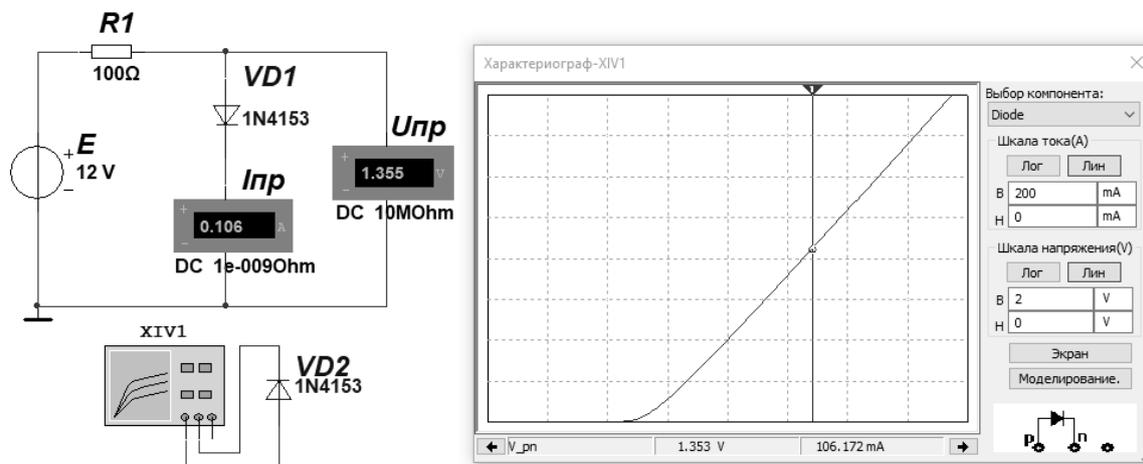


Рисунок 4.2 – Схема для снятия ВАХ в среде Multisim

4.2.3 Для построения вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 4.2 [2, 7]. Осуществить моделирование её работы, изменяя ЭДС источника питания. Для снятия обратной ветви ВАХ необходимо изменить полярность источника питания, ограничивающее сопротивление R_1 взять около 1 кОм.

ВАХ можно получить с помощью характериографа XIV1 (см. рисунок 4.2).

4.2.4 Для экспериментального получения ВАХ диода на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 4.2.

Постоянное напряжение на вход схемы подаётся от источника питания НУ3002-D2. Прямое падение напряжение на диоде U_{np} поступает на дифферен-

циальный канал AI1, а напряжение на ограничивающем резисторе R_1 – на дифференциальный канал AI2 устройства сбора данных NI USB-6009. Для определения тока I_{np} необходимо применить закон Ома

$$I_{np} = \frac{U_{R_1}}{R_1} = \frac{E - U_{np}}{R_1},$$

что реализовано на блок-диаграмме виртуального прибора (рисунок 4.3). Считывание напряжений осуществляется блоком «DAQ Assistant». Выход формируется с помощью блоков «Build XY Graph» и «XY Graph» (см. рисунок 4.3) и отображается в виде, представленном на рисунке 4.4 [3].

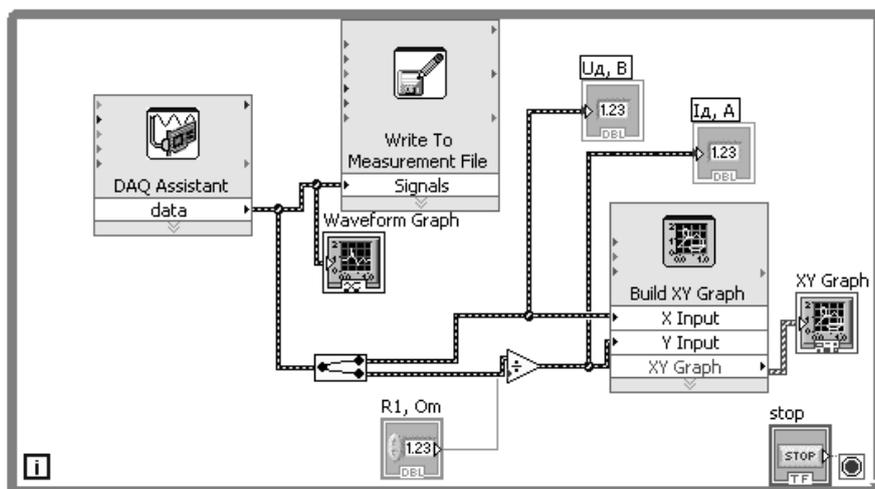


Рисунок 4.3 – Блок-диаграмма виртуального прибора в LabVIEW для экспериментального снятия характеристик

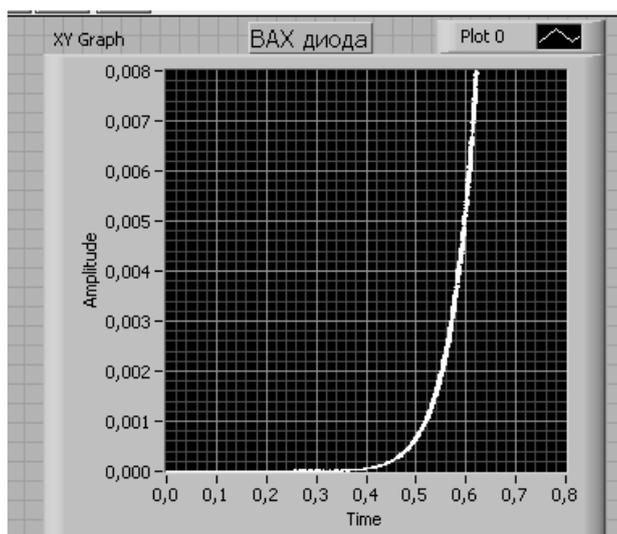


Рисунок 4.4 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования выпрямительного диода в среде LabVIEW

4.2.5 По полученным ВАХ диода определить:

– прямое статическое сопротивление диода при прямом токе, равном $0,5 I_{np \max}$:

$$R_{прст} = \frac{U_{np}}{I_{np}};$$

– обратное статическое сопротивление диода при обратном напряжении, равном $0,5 U_{обр \max}$:

$$R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}};$$

– прямое дифференциальное сопротивление диода

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

Результаты занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры выпрямительного диода

Тип диода 1N4153	Результат измерений						Результат вычислений		
	U_{np} , В	I_{np} , мА	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мА	ΔU_{np} , В	ΔI_{np} , мА	R_{np} , м	$R_{обр}$, Ом	$R_{диф}$, Ом
Моделирование									
Эксперимент									

Сравнить результаты моделирования, экспериментальные результаты со справочными данными.

4.2.6 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схемы для моделирования работы выпрямительного диода в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно, ВАХ диода по результатам моделирования и экспериментальную, основные параметры диода в виде таблицы, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите основные параметры выпрямительного диода
- 2 Опишите порядок получения ВАХ диода по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Как по ВАХ определить статические и динамические сопротивления диода.



5 Лабораторная работа № 5. Исследование работы однофазных неуправляемых выпрямителей

Цель работы: изучение принципа функционирования, методик расчёта, характеристик и параметров неуправляемых выпрямителей.

5.1 Общие сведения

Выпрямителем называется устройство преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямительное устройство, помимо выпрямителя, в который входят один или несколько включенных по определенной схеме вентилях (диодов, тиристоров), содержит в себе силовой трансформатор, сглаживающий фильтр и стабилизатор. В зависимости от условий работы и требований отдельные узлы выпрямительного устройства могут отсутствовать.

Простейшей схемой нерегулируемого выпрямителя является одноконтурная однофазная (рисунок 5.1, а). Графики входного и выходного напряжения, а также тока через вентиль (диод VD1) при резистивной (сплошная линия) и резистивно-емкостной нагрузке (пунктир) показаны на рисунке 5.1, б [8].

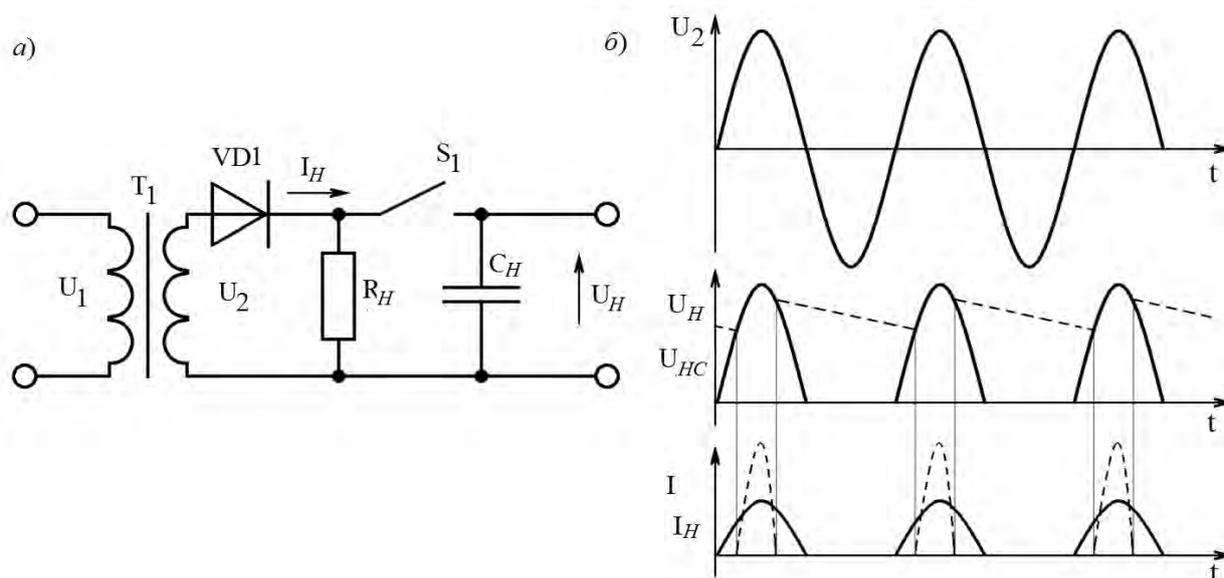


Рисунок 5.1 – Схема и временные диаграммы однофазного однополупериодного выпрямителя

Ток в цепи нагрузки, включенной последовательно с вентилем, протекает только в моменты, когда к нему приложено прямое напряжение (полупериод). В течение следующего полупериода вентиль закрыт. Поэтому ток через нагрузку протекает только в одном направлении и имеет пульсирующий характер. Для сглаживания пульсаций применяют фильтры, чаще всего с емкостной реакцией.

Более эффективное использование трансформатора и вентилях достигается в двухполупериодной мостовой схеме (см. рисунок 5.2, а). Вентили в ней

работают поочередно попарно. Сердечник трансформатора здесь не подмагничивается, а временные диаграммы напряжений и токов приведены на рисунке 5.2, б [8].

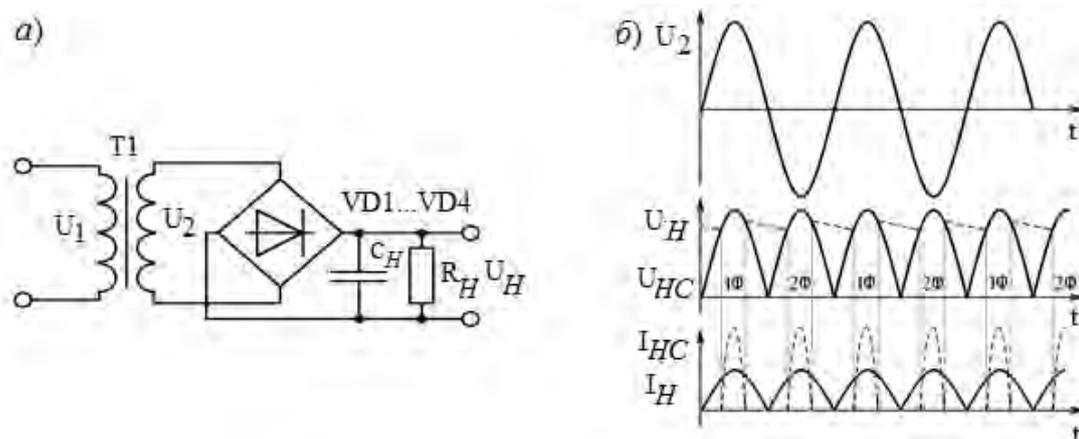


Рисунок 5.3 – Схема и временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя

Сравнительные показатели схем выпрямления приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнительные показатели схем выпрямления

Тип схемы	m	U_2/U_H	I_2/I_H	K_{n1}	S_{mp}/P_H	I_δ/I_H	$U_{обр\ max}/U_H$
Однополупериодная	1	2,22	1,57	1,57	3,1	1	3,14
Мостовая однофазная	2	1,11	1,11	0,667	1,23	0,5	1,57

В таблице 5.1 приняты следующие обозначения:

m – число пульс выпрямленного напряжения за период;

U_2, I_2 – действующее значение напряжения и тока вторичной обмотки;

U_H, I_H – средневыврямленное значение напряжения и тока в нагрузке;

K_{n1} – Коэффициент пульсаций по первой гармонике с амплитудой U_{m1} ,

$$K_{n1} = U_{m1} / U_H = 1,57;$$

S_{mp} – полная мощность трансформатора;

P_H – требуемая мощность нагрузки,

$$P_H = U_H \cdot I_H;$$

I_δ – расчётный прямой ток диода;

$U_{обр\ max}$ – расчётное максимально допустимое обратное напряжение диода.

5.2 Порядок выполнения работы

5.2.1 Рассчитать параметры выпрямителей (однофазного однополупериодного, двухполупериодного мостового (см. рисунки 5.1 и 5.2)), обеспечив заданные преподавателем параметры нагрузки. Заполнить таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Параметры схем выпрямления

Схема выпрямления	Результат измерений						Результат вычислений
	Способ измерения	U_1 , В	U_2 , В	I_2 , мА	U_n , В	I_n , мА	k_n
Однофазная однополупериодная	Моделирование						
	Эксперимент						
Двухполупериодная мостовая	Моделирование						
	Эксперимент						

5.2.2 Для подтверждения правильности расчётов произвести моделирование работы выпрямителей в программе Multisim, построив их модели согласно рисункам 5.3 и 5.4 [2, 7]. Напряжения и токи в схемах отображаются с помощью виртуальных вольтметров, амперметров и осциллографа XSC1.

5.2.3 Снять осциллограммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора U_2 и на выходе выпрямителя U_n при работе на активную и емкостную нагрузки. Подключение сглаживающего фильтра осуществляется замыканием ключа (клавиша «А»).

5.2.4 Измерить значение тока нагрузки I_n , действующего значения тока вторичной обмотки трансформатора I_2 . Определить коэффициент пульсаций нагрузки с фильтром k_n . Для определения амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения U_{m1} воспользоваться анализатором спектра XSA1.

Результаты занести в таблицу 5.2 (моделирование).

5.2.5 Для экспериментального исследования однофазного однополупериодного выпрямителя на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 5.3. При этом трансформатор не используется. Синусоидальное напряжение U_2 подается от генератора сигналов Г6-46. Напряжение U_2 снимается каналом AI1, а напряжение U_n – каналом AI2 устройства сбора данных NI USB-6009. Ток нагрузки I_n снимается каналом AI3 через падение напряжения на сопротивлении нагрузки R_n . Выделение первой гармоники выпрямленного напряжения U_{m1} для определения коэффициента пульсаций k_n осуществляется блоком «Distortion Measurements» [3].

5.2.6 Для экспериментального исследования двухполупериодного выпрямителя на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 5.5 (аналогично п. 5.2.5).

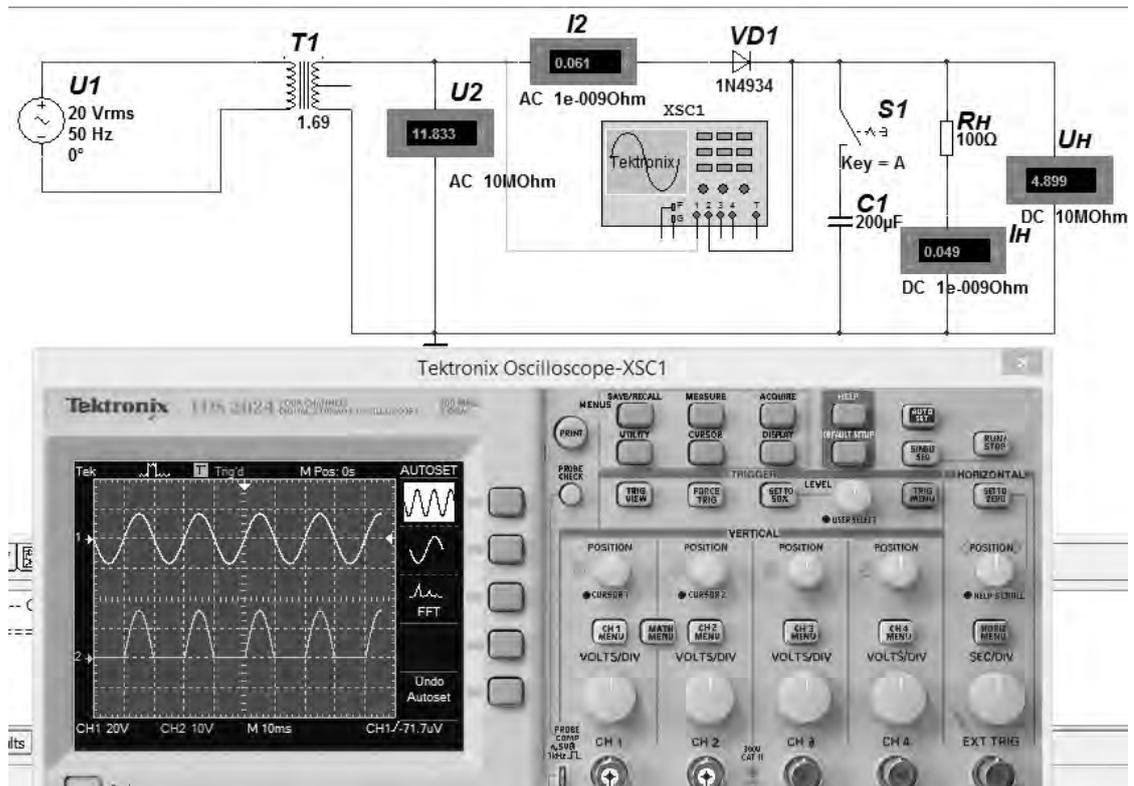


Рисунок 5.4 – Схема однофазного однополупериодного выпрямителя в среде Multisim

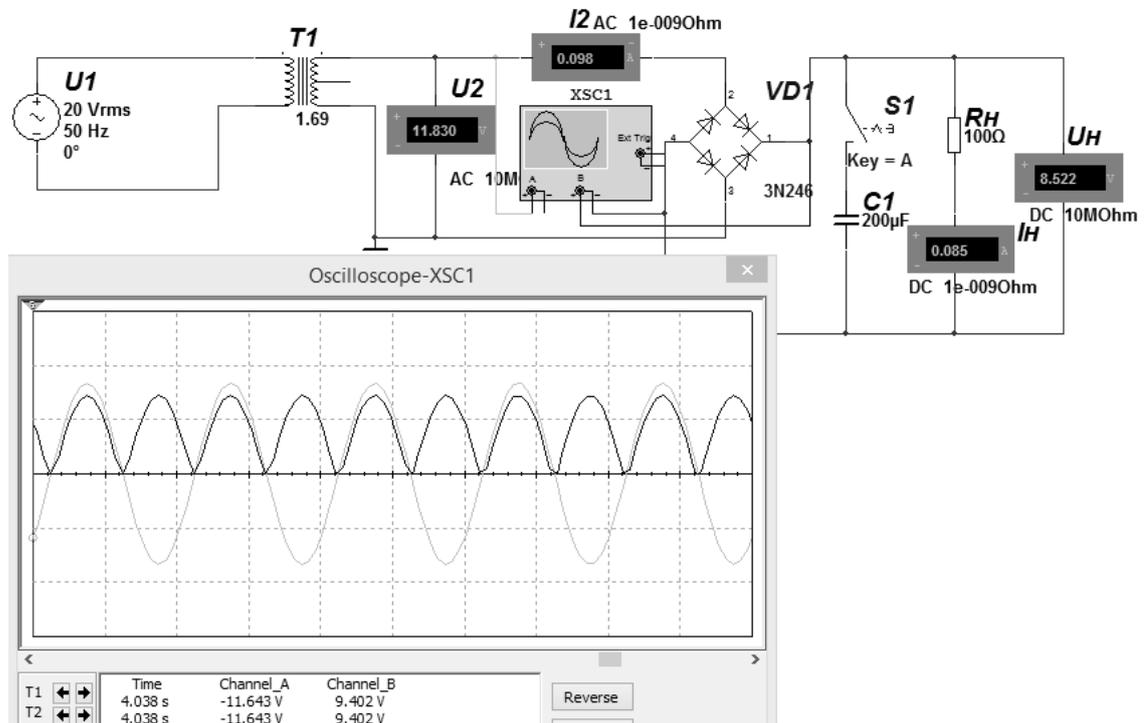


Рисунок 5.5 – Схема однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя в среде Multisim

5.2.7 Определить основные параметры выпрямителей. Результаты занести в таблицу 5.2 (эксперимент). Сравнить результаты моделирования, экспериментальные результаты с расчётными данными.

5.2.8 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, задание к работе, схемы для моделирования работы выпрямителей в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального снятия характеристик и диалоговое окно, осциллограммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора и нагрузке, основные параметры выпрямителей в виде таблицы, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите принцип работы схем однофазных неуправляемых выпрямителей.
- 2 Опишите порядок расчёта схем однофазных неуправляемых выпрямителей.
- 3 Приведите диаграммы входного и выходного напряжения для однофазных неуправляемых выпрямителей.
- 4 Как с помощью моделирования в Multisim и экспериментально определить коэффициент пульсаций выпрямителя?

6 Лабораторная работа № 6. Исследование работы стабилитрона и схемы параметрического стабилизатора напряжения

Цель работы: изучение принципа функционирования, характеристик и параметров стабилитрона; исследование схемы параметрического стабилизатора напряжения.

6.1 Общие сведения

Стабилитронами называют полупроводниковые диоды, на вольт-амперной характеристике которых имеется участок со слабой зависимостью напряжения от протекающего тока. Напряжение стабилизации на таком диоде U_{cm} остаётся почти постоянным при изменении тока в широких пределах от $I_{cm \min}$ до $I_{cm \max}$ (рисунок 6.1, а). Рабочий участок вольт-амперной характеристики стабилитрона выбирают в режиме электрического пробоя $p-n$ -перехода, т. е. пробой является нормальным режимом работы стабилитрона.

В настоящее время стабилитроны изготавливаются из кремния n -типа, обеспечивающего значительную крутизну характеристики в рабочей области, небольшой ток в предпробойной области, а также высокую допустимую температуру $p-n$ -перехода [4, 5].



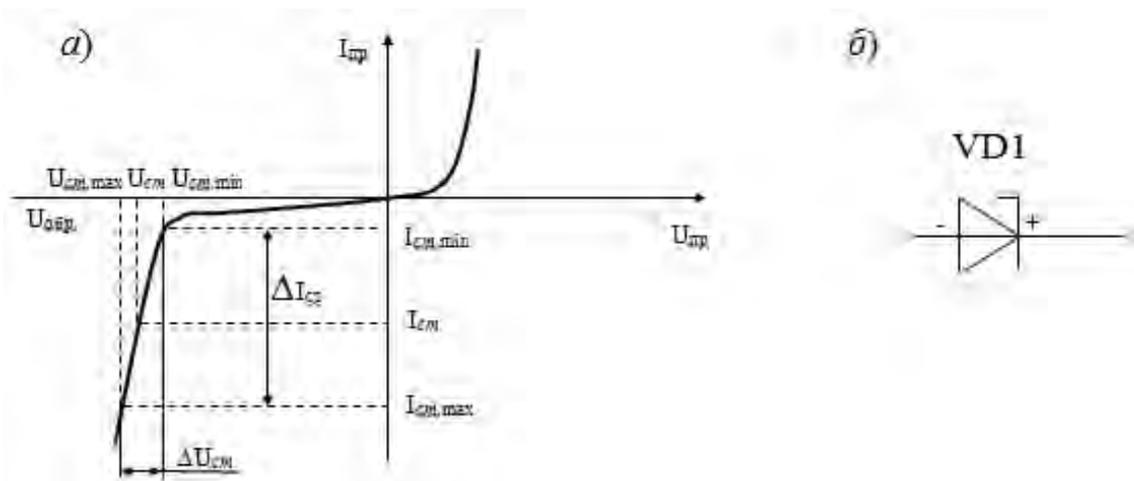


Рисунок 6.1 – Вольт-амперная характеристика стабилитрона (а) и его условное обозначение (б)

Качество стабилитрона характеризует дифференциальное сопротивление $R_{диф}$, т. е. его способность стабилизировать напряжение при изменении проходящего тока. Дифференциальное сопротивление определяется отношением приращения напряжения к вызвавшему его приращению тока на рабочем участке (см. рисунок 6.1, а).

$$R_{диф} = \frac{\Delta U_{ср}}{\Delta I_{ср}} = \frac{\Delta U_{ср}}{I_{ср\ max} - I_{ср\ min}}.$$

Так как для лучшей стабилизации максимальным изменениям тока должны соответствовать минимальные изменения напряжения, то качество стабилитрона тем выше, чем меньше его дифференциальное сопротивление.

Неизменным напряжение на нагрузке можно получить путем его стабилизации с помощью стабилитрона. Схема подключения стабилитрона и нагрузки к источнику ЭДС показана на рисунке 6.2.

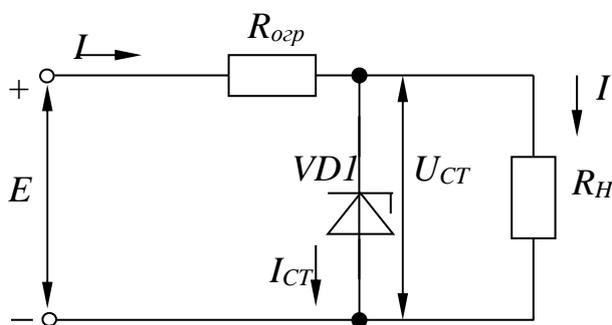


Рисунок 6.2 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

Параметрический стабилизатор обеспечивает поддержание выходного напряжения за счет собственной нелинейности используемого полупроводникового элемента – стабилитрона.

Колебания входного напряжения или тока нагрузки приводят к изменению тока через стабилитрон, однако напряжение на стабилитроне, подключенном параллельно нагрузке, изменяется незначительно. Входное напряжение распределяется между балластным (ограничивающим) резистором $R_{огр}$ и стабилитроном. Сопротивление ограничивающего резистора рассчитывается по формуле

$$R_{огр} = \frac{E_{ср} - U_{см}}{I_{см.ср} + I_H},$$

где $E_{ср}$ и $I_{см.ср}$ – средние значения ЭДС входного источника напряжения и тока стабилизации соответственно.

Мощность, рассеиваемая на этом резисторе, определяется для случая, когда через резистор будет протекать наибольший ток (при $E = E_{\max}$):

$$P_{R_{огр}} = \frac{(E_{\max} - U_{см})^2}{R_{огр}}.$$

Основные параметры стабилизаторов напряжения:

– коэффициент стабилизации

$$K_{см} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} : \frac{\Delta U_H}{U_H} \Bigg|_{R_H = \text{const}};$$

– коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_H}{P_{вх}} = \frac{U_H I_H}{U_{вх} I_{вх}}.$$

Выходное сопротивление параметрического стабилизатора определяется дифференциальным сопротивлением стабилитрона R_D на рабочем участке вольт-амперной характеристики:

$$R_{вых} = R_D = \frac{\Delta U_{см}}{\Delta I_{см}} = \frac{U_{см \max} - U_{см \min}}{I_{см \max} - I_{см \min}}.$$

6.2 Порядок выполнения работы

6.2.1 Выписать из справочника основные параметры заданного преподавателем стабилитрона.

6.2.2 Рассчитать параметры и выбрать ограничивающее сопротивление R_1 для исследования параметров стабилитрона (рисунок 6.3) при заданном преподавателем значении ЭДС источника E :



$$R_1 = \frac{E - U_{cm}}{I_{cm \max}}; \quad P_{R1} = \frac{(E - U_{cm})^2}{R_1}.$$

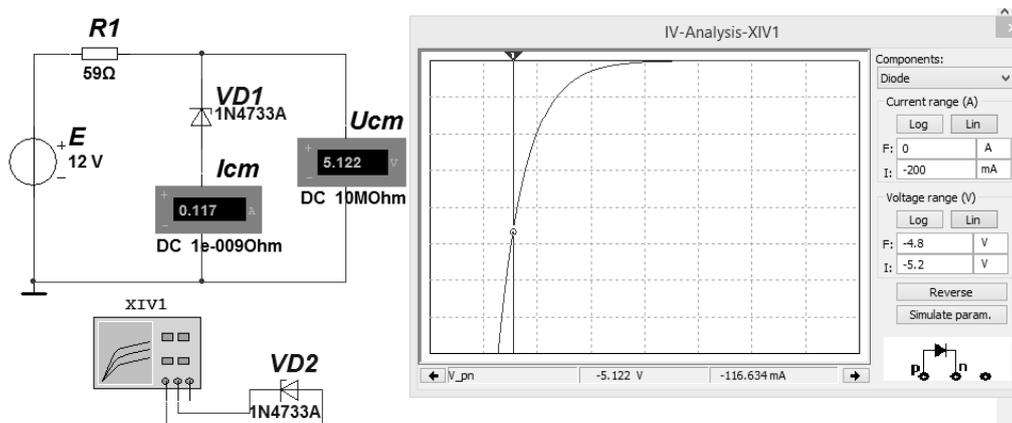


Рисунок 6.3 – Схема для снятия ВАХ в среде Multisim

6.2.3 Для построения вольт-амперной характеристики стабилитрона в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 6.3 [2, 7]. Включение стабилитрона обратное. Осуществить моделирование её работы, изменяя ЭДС источника питания.

ВАХ можно получить с помощью характериографа XIV1 (см. рисунок 6.3).

6.2.4 Для экспериментального получения ВАХ диода на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 6.3. Постоянное напряжение на вход схемы подаётся от источника питания НУ3002-D2 и снимается каналом AI1 устройства сбора данных NI USB-6009. Напряжение стабилитрона U_{cm} поступает на канал AI2 [3]. Для определения тока I_{cm} необходимо применить закон Ома

$$I_{cm} = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{E - U_{cm}}{R_1}.$$

6.2.5 По полученным ВАХ стабилитрона определить U_{cm} , I_{cm} , $U_{cm \min}$, $I_{cm \min}$, $U_{cm \max}$, $I_{cm \max}$, мощность P_{cm} , рассеиваемую на стабилитроне, дифференциальное сопротивление $R_{диф}$ стабилитрона на участке стабилизации. Сравнить результаты моделирования, экспериментальные результаты со справочными данными.

6.2.6 Рассчитать параметры и выбрать элементы схемы параметрического стабилизатора напряжения (см. рисунок 6.2).

6.2.7 На основании выбранных элементов схемы параметрического стабилизатора напряжения осуществить моделирование его работы. На вход подавать переменное напряжение $U_{вх}$ от генератора XFG1. Напряжения и токи в схеме отображаются с помощью виртуальных вольтметров, амперметров и осциллографа XSC1.

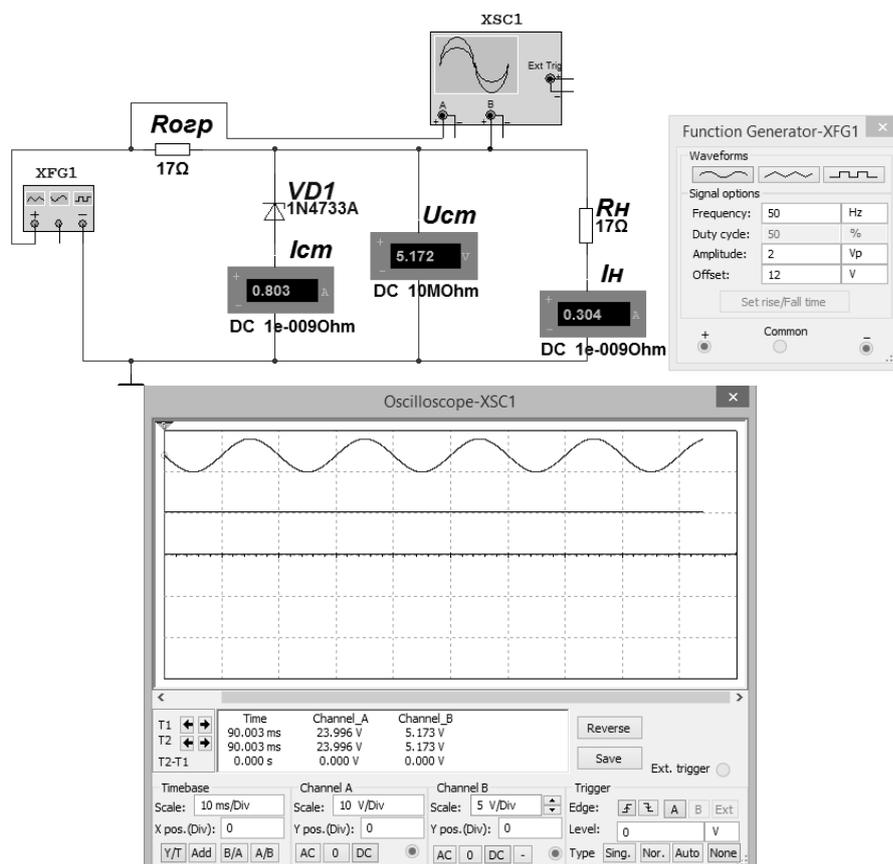


Рисунок 6.4 – Схема для исследования параметрического стабилизатора напряжения в среде Multisim

6.2.8 Измерить входные и выходные сигналы параметрического стабилизатора. Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры параметрического стабилизатора напряжения

Стабилизатор напряжения	Результат измерений						Результат вычислений		
	$U_{вх}$, В	$I_{вх}$, мА	$U_{вых}$, В	I_n , мА	$\Delta U_{вх}$, мВ	ΔU_n , мВ	$K_{ст}$	η , %	$R_{вых}$, Ом
Моделирование									
Эксперимент									

6.2.9 Произвести расчёт коэффициента стабилизации $K_{ст}$, КПД η и выходного сопротивления $R_{вых}$. Результаты расчётов занести в таблицу 6.1.

6.2.10 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схемы для моделирования работы стабилизатора и параметрического стабилизатора в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно, ВАХ стабилизатора по результатам моделирования и экспериментальную, основные параметры стабилизатора, результаты измере-

ний и вычислений параметров схемы параметрического стабилизатора напряжения, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите основные параметры стабилитрона.
- 2 Опишите порядок построения ВАХ стабилитрона и определения его параметров по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Приведите схему параметрического стабилизатора напряжения. Как рассчитываются и измеряются его параметры?

7 Лабораторная работа № 7. Исследование работы управляемого выпрямителя

Цель работы: изучение устройства и принципа действия управляемого выпрямителя на базе тиристора, исследование его характеристик при работе на активную нагрузку.

7.1 Общие сведения

В некоторых практически важных случаях необходимо использовать источники напряжения с изменяемым в процессе работы выходным напряжением. Решением проблемы является использование в качестве управляющего элемента полупроводникового прибора – тиристора, который одновременно является и выпрямляющим элементом.

Тиристор представляет собой полупроводниковый прибор с тремя или более $p-n$ -переходами и тремя выводами. Структура, условное обозначение и вольт-амперная характеристика тиристора приведены на рисунке 7.1. Его основу составляет кристалл кремния, в котором созданы четыре слоя с разными типами электропроводности. Внешний p -слой называют анодом (А), внешний n -слой – катодом (К), а два внутренних слоя – базами. Одна из баз имеет вывод – управляющий электрод (У). При прямом включении (анод положителен по отношению к катоду) переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении и ток I_{np} определяется высоким сопротивлением закрытого перехода П2. До тех пор пока П2 закрыт, прямой ток почти равен нулю. При поступлении на управляющий электрод импульсного сигнала за счет перераспределения зарядов в области баз переход П2 открывается. Сопротивление его уменьшается, и тиристор переходит на рабочую часть характеристики, подобную прямой ветви характеристики диода. Таким образом, тиристор можно считать управляемым диодом, который проводит ток только в одном направлении после поступления разрешающего сигнала на управляющий электрод. Он остается во включенном состоянии, пока протекающий через него ток больше критического, называемого током удержания $I_{уд}$. Как только I_{np} станет меньше $I_{уд}$, тиристор закрывается.



При обратном включении тиристора (анод отрицателен по отношению к катоду) закрыты два перехода П1 и П3 и тиристор тока не проводит. Для нормальной работы тиристора надо, чтобы напряжение на нем не превышало при прямом и при обратном включении допустимых значений $U_{вкл\ max}$ и $U_{обр\ max}$.

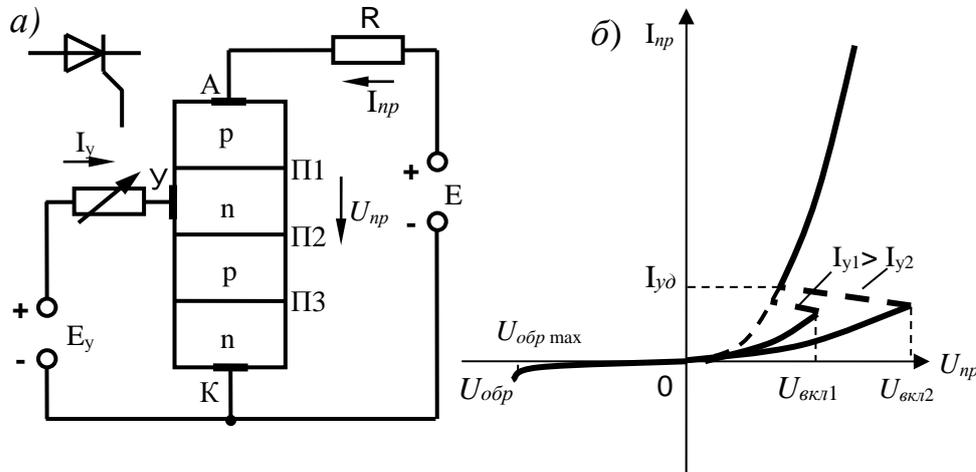


Рисунок 7.1 – Структура и ВАХ тиристора

На рисунке 7.2, а показана схема однополупериодного управляемого выпрямителя.

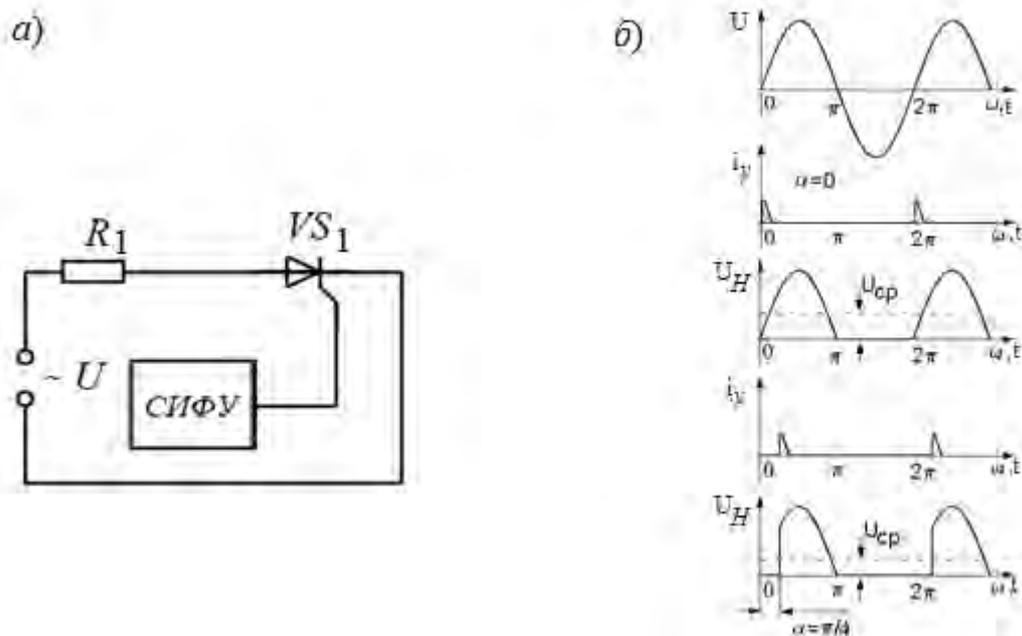


Рисунок 7.2 – Схема однополупериодного управляемого выпрямителя (а) и временные диаграммы его работы (б)

Без управляющего тока i_y тиристор не откроется даже в положительные полупериоды U . Напряжение на нагрузке U_n и ток i_n будут равны нулю. Управляющий ток i_y в виде коротких импульсов формируется и подается на управляющий электрод тиристора с системы импульсно-фазового управления (СИФУ). Эти импульсы синхронизированы с положительными полупериодами напряже-

ния U . Их можно смещать по фазе относительно U на угол α , называемый *углом управления*. Угол α можно изменять в пределах от 0 до 180°.

Если управляющие импульсы приходят на тиристор в начале каждого положительного полупериода ($\alpha = 0^\circ$), то тиристор сразу открывается и ток через нагрузку протекает весь полупериод (рисунок 7.2, б). Среднее напряжение на нагрузке будет такое же, как и при работе неуправляемого выпрямителя:

$$U_{H\text{cp}0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_m \sin\omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U = 0,45 U ,$$

где U_m – амплитуда входного напряжения U .

Если с помощью СИФУ импульсы i_y сместить на угол α относительно напряжения U , то тиристор откроется с запаздыванием и будет пропускать ток только часть полупериода от α до π . В этом случае

$$U_{H\text{cp}} = \frac{1}{2\pi} \int_\alpha^\pi U_m \sin\omega t d\omega t = \frac{U_m}{2\pi} (1 + \cos\alpha) = U_{H\text{cp}0} \left(\frac{1 + \cos\alpha}{2} \right).$$

Таким образом, изменяя α от 0 до 180°, можно плавно регулировать $U_{H\text{cp}}$ от $U_{H\text{cp}0}$ до 0. Ток нагрузки $I_{H\text{cp}}$ повторяет форму U .

Возможности управляемых выпрямителей определяет регулировочная характеристика, представляющая зависимость $U_{H\text{cp}}(\alpha)$ при $R_n = \text{const}$.

7.2 Порядок выполнения работы

7.2.1 Выписать из справочника основные параметры заданного преподавателем тиристора [9].

7.2.2 Для построения ВАХ тиристора в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 7.3 [2, 7]. Осуществить моделирование её работы, изменяя ЭДС источника питания E при фиксированном токе управления I_y .

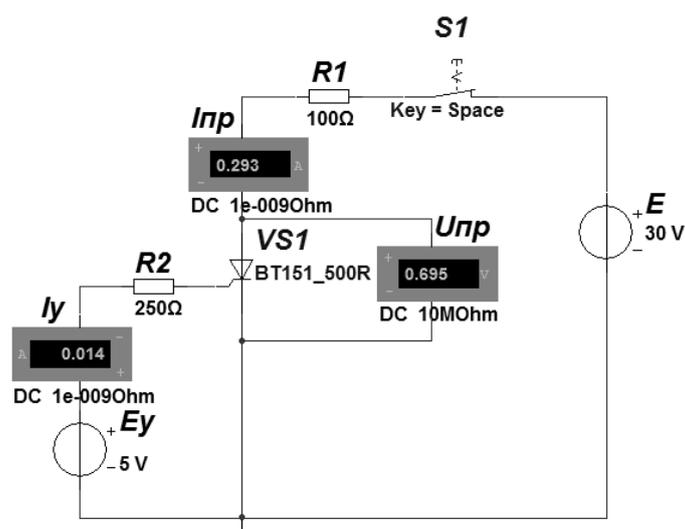


Рисунок 7.3 – Схема для снятия ВАХ в среде Multisim



Для ограничения тока через тиристор последовательно с ним включается резистор R_1 . ВАХ тиристора нельзя получить с помощью характеристики графа XIV1, поэтому необходимо провести ряд измерений и по точкам построить ВАХ для трех значений тока управления I_y .

7.2.3 Для экспериментального получения ВАХ стабилизатора на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 7.3. ЭДС источника питания E и ЭДС управления E_y подаются от двухканального источника питания NY3002-D2. Прямое напряжение U_{np} снимается каналом AI1 устройства сбора данных NI USB-6009, а прямой ток I_{np} снимается каналом AI2 через падение напряжения на резисторе R_1 . Ток управления I_y фиксируется каналом AI3 через падение напряжения на резисторе R_1 [3]. Величина резисторов R_1 и R_2 рассчитывается исходя из ограничения прямого тока I_{np} и тока управления I_y при заданных преподавателем значениях ЭДС.

7.2.4 По полученным ВАХ тиристора определить напряжения включения $U_{вкл}$ для фиксированных значений тока управления. Сравнить результаты моделирования и экспериментальные данные.

7.2.5 Осуществить моделирование работы однополупериодного управляемого выпрямителя. Модель выпрямителя в среде Multisim представлена на рисунке 7.4. Входное переменное напряжение формируется генератором E , импульсы управления формируются источником тока I_y , угол управления изменяется через параметр «Delay Time» импульсного источника тока. Осциллограммы входного напряжения и напряжения на нагрузке можно получить с помощью осциллографа XSC1. Выпрямленное напряжение $U_{H\text{ ср}}$ регистрируется мультиметром XMM1.

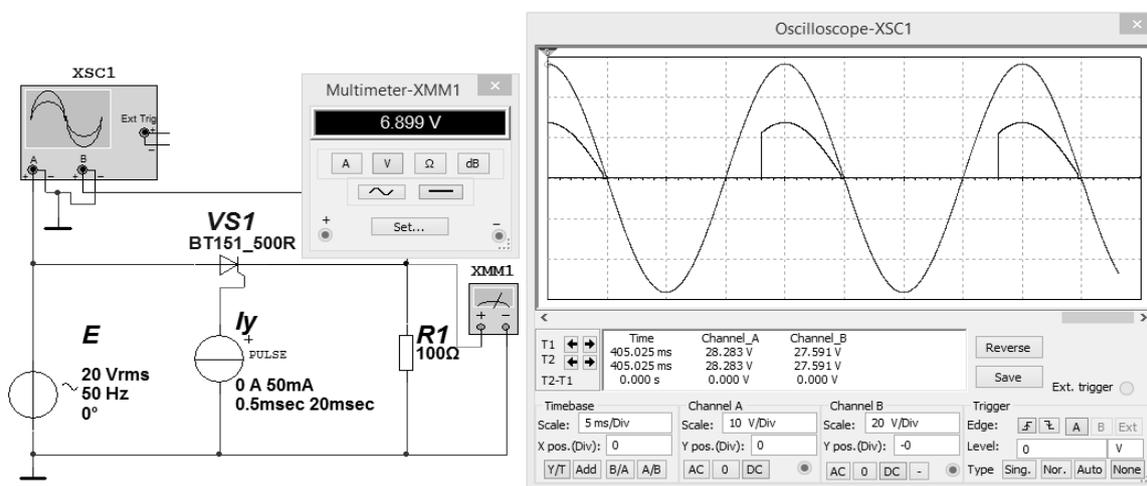


Рисунок 7.4 – Модель однополупериодного управляемого выпрямителя

7.2.6 Построить регулировочную характеристику $U_{H\text{ ср}}(\alpha)$ при заданном преподавателем значении нагрузки R_1 . Определить значения минимального и максимального угла управления α_{\min} и α_{\max} для заданного преподавателем диапазона изменения среднего выпрямленного напряжения.

7.2.7 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему для снятия ВАХ тиристора в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального снятия ВАХ и диалоговое окно, полученные в результате моделирования и экспериментально, ВАХ тиристора, схему и диаграммы работы однополупериодного управляемого выпрямителя, регулировочную характеристику выпрямителя, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите основные параметры тиристора.
- 2 Опишите порядок построения ВАХ тиристора и определения его параметров по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Приведите схему и опишите работу однополупериодного управляемого выпрямителя.
- 4 Приведите характеристику управления и внешнюю характеристику управляемого выпрямителя.

8 Лабораторная работа № 8. Исследование работы светодиода и оптопары

Цель работы: изучение принципа функционирования, характеристик и параметров светодиодов и оптопары.

8.1 Общие сведения

Излучающий диод, работающий в видимом диапазоне волн, называют светодиодом.

Схематическое изображение структуры излучающего диода представлено на рисунке 8.1, а, а его условное графическое обозначение – на рисунке 8.1, б [6, 8].

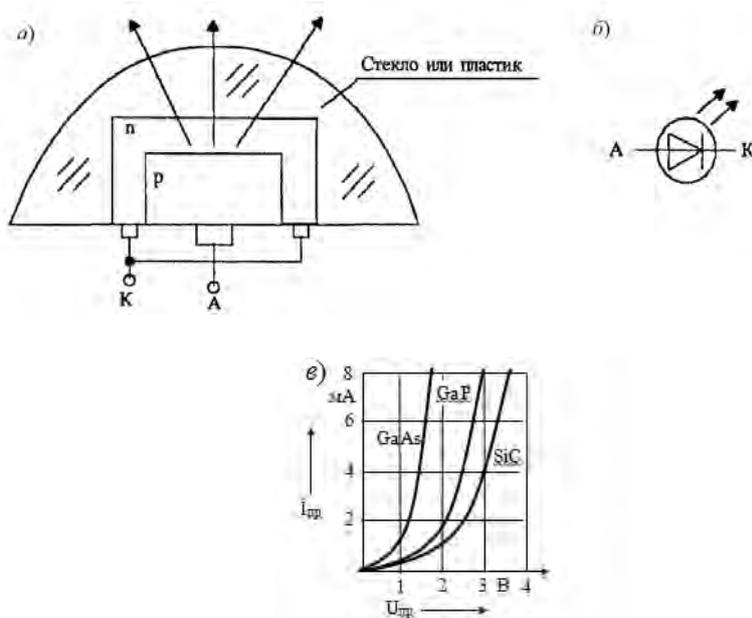


Рисунок 8.1 – Структура и условное графическое изображение светодиода

Излучение возникает при протекании прямого тока диода в результате рекомбинации электронов и дырок в области $p-n$ -перехода и в областях, примыкающих к указанной области. При рекомбинации излучаются фотоны.

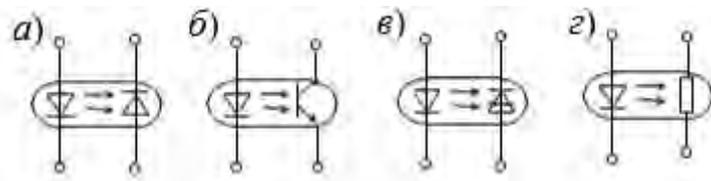
В справочной литературе для светоизлучающих диодов приводятся электрические и световые параметры и характеристики. Электрические параметры отражают работу светодиода как элемента электрической схемы: постоянное прямое напряжение U_{np} , максимально допустимый прямой ток $I_{np \max}$, максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр \max}$, – и физический смысл их тот же, что и для обычных выпрямительных диодов.

Различия прямых ветвей вольт-амперных характеристик светодиодов из разных полупроводниковых материалов связаны с различной шириной запрещённой зоны полупроводника, и все они располагаются правее вольт-амперных характеристик обычных, например, германиевых или кремниевых диодов (рисунок 8.1, в).

Оптроном, или оптопарой, называется полупроводниковый прибор, состоящий из излучающего и фотоприёмного элементов, между которыми имеется оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция. В качестве светоизлучателей в оптронах используются светодиоды (иногда электролюминесцентный порошок или излучатель, миниатюрная лампочка накаливания), обеспечивающие высокое быстродействие оптронов.

Фотоприёмниками являются фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры, которые в основном изготавливаются из кремния (рисунок 8.2) [8]. Спектральные характеристики охватывают при этом весь видимый диапазон спектра излучения и часть ближайшей ИК-области.

В качестве прозрачной среды используют полимерные оптические клеи и лаки, специальное стекло и другие диэлектрические материалы, выполняющие в оптроне и функции изолятора. Оптическая среда должна иметь малый коэффициент поглощения света и показатель преломления, близкий к показателю преломления материала источника и фотоприёмника. Очень важное значение имеет совпадение спектральных характеристик светоизлучателя и фотоприёмника.



a – диодного; *б* – транзисторного; *в* – тиристорного; *з* – резисторного

Рисунок 8.2 – Условное графическое обозначение оптронов

Усиление или просто преобразование сигнала происходит в оптроне следующим образом. Изменение входного тока через светодиод сопровождается изменением яркости его свечения и изменением освещённости фотоприёмника излучения, что приводит к изменению его сопротивления, а, следовательно,

и выходного тока оптрона. Такое двойное преобразование энергии позволяет передавать информацию из одной электрической цепи в другую с помощью электрически нейтральных фотонов. Это свойство определяет ряд преимуществ оптронов, основными из которых являются:

- высокая помехозащищённость электронных схем, т. к. фотоны электро-нейтральны, на них не влияют электрические и магнитные поля;
- отсутствие электрической связи между входом и выходом и обратной связи между приёмником и излучателем. Сопротивление изоляции $R_{из} > 10^{12}$ Ом, а проходная ёмкость не превышает 2 пФ;
- широкая полоса пропускания – означает возможность передачи сигналов с частотой от $10^{13} \dots 10^{14}$ Гц, в то время как в радиоэлектронике освоен диапазон частот до $10^9 \dots 10^{10}$ Гц;
- возможность реализации бесконтактных оптических связей (оптрон с открытым оптическим каналом).

Оптопара является четырёхполюсным прибором, свойства которого определяются прежде всего тремя основными характеристиками – входной, передаточной и выходной. Входной является вольт-амперная характеристика излучателя, а выходной – соответствующая характеристика фотоприёмника (при заданном токе на входе оптопары).

Передаточной характеристикой называют зависимость тока $I_{вых}$ на выходе оптопары от тока $I_{вх}$ на её входе. В общем случае эта зависимость является нелинейной, что приводит к некоторому искажению формы передаваемого сигнала.

Параметром, тесно связанным с зависимостью $I_{вых}(I_{вх})$ и часто используемым на практике, является коэффициент передачи по току

$$k_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}.$$

Для большинства типов оптопар k_i является паспортным параметром и может составлять от 0,5 % (диодные оптопары) до 100 % (транзисторные оптопары).

Суммарное быстродействие оптопары часто характеризуют *временем переключения*:

$$t_n = t_{вкл} + t_{выкл},$$

где $t_{вкл}$ и $t_{выкл}$ – время нарастания и спада сигнала на выходе оптрона.

Время переключения зависит от вида и режимов работы оптопар и составляет от 10^{-9} до 10^{-1} с. Помимо времени переключения, быстродействие некоторых классов оптопар задаётся граничной частотой. В зависимости от типа оптопары $f_{гр} = 0,005 \dots 10$ МГц.

Ещё важными характеристиками оптопары являются сопротивление изоляции $R_{из}$ и проходная ёмкость $C_{пр}$ (ёмкость между входом и выходом оптопары).



8.2 Порядок выполнения работы

8.2.1 Выписать из справочника основные параметры заданного преподавателем светодиода и оптопары [9].

8.2.2 Рассчитать параметры и выбрать ограничивающее сопротивление для исследования параметров светодиода (рисунок 8.3):

$$R_1 = \frac{E}{I_{np \max} / 2}; \quad P_{R1} = \frac{(E - U_{np})^2}{R_1}.$$

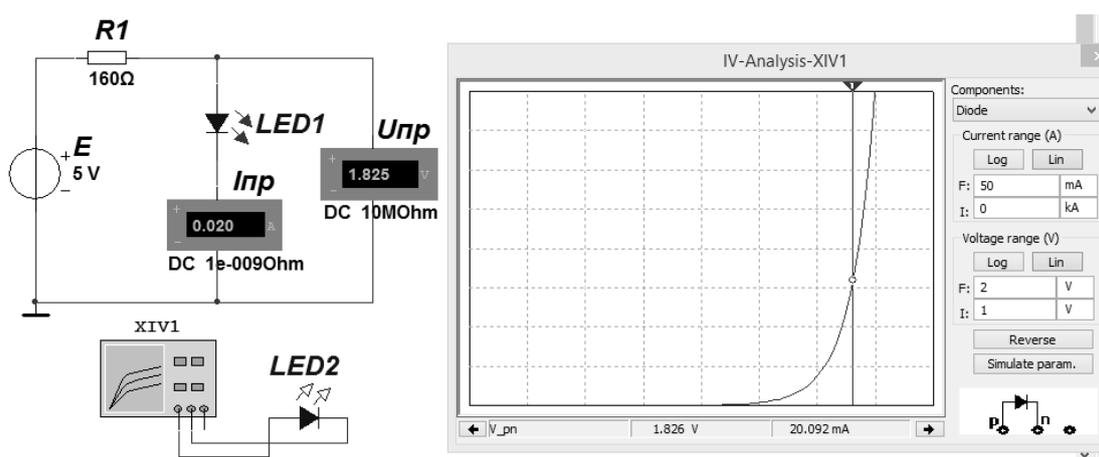


Рисунок 8.3 – Схема для снятия ВАХ светодиода в среде Multisim

8.2.3 Для построения вольт-амперной характеристики светодиода (ВАХ) в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 8.3 [2, 7]. Осуществить моделирование её работы, изменяя ЭДС источника питания E .

ВАХ можно получить с помощью характериографа XIV1.

8.2.4 Для экспериментального получения ВАХ диода на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 8.3. Постоянное напряжение на вход схемы подаётся от источника питания НУ3002-D2. Блок-диаграмма виртуального прибора для снятия ВАХ аналогична представленной на рисунке 4.3 [3].

Сравнить результаты моделирования, экспериментальные значения со справочными данными.

8.2.5 Для исследования оптопары собрать схему согласно рисунку 8.4. Значения ограничивающих сопротивлений R_1 и R_2 принять исходя из величины максимального входного и выходного токов $I_{вх}$, $I_{вых}$ оптопары при заданных преподавателем значениях входной и выходной ЭДС $E_{вх}$, $E_{вых}$.

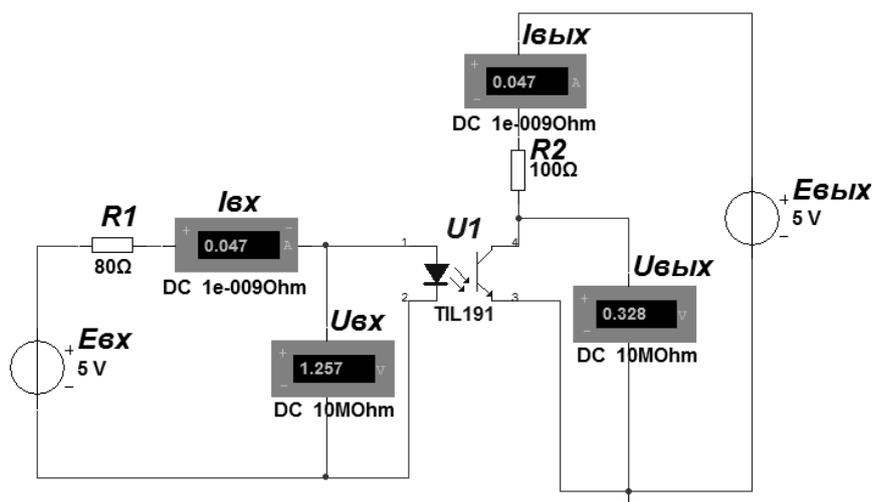


Рисунок 8.4 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования оптопары в среде LabVIEW

8.2.6 Для получения входной и выходной ВАХ оптопары на вход схемы подается ЭДС $E_{вх}$, а для питания выходной цепи подается $E_{вых}$ от источника питания НУ3002-D2. Сигнал, пропорциональный входному току, снимается с резистора R_1 . Сигнал, пропорциональный выходному току, снимается с резистора R_2 .

Построить передаточную характеристику оптопары $I_{вых} = f(I_{вх})$. Определить коэффициент передачи по току K_i .

8.2.7 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, основные параметры светодиода и оптопары, схемы для моделирования работы светодиода и оптопары в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно, ВАХ светодиода и оптопары по результатам моделирования и экспериментальную, передаточную характеристику оптопары, выводы по работе.

Контрольные вопросы

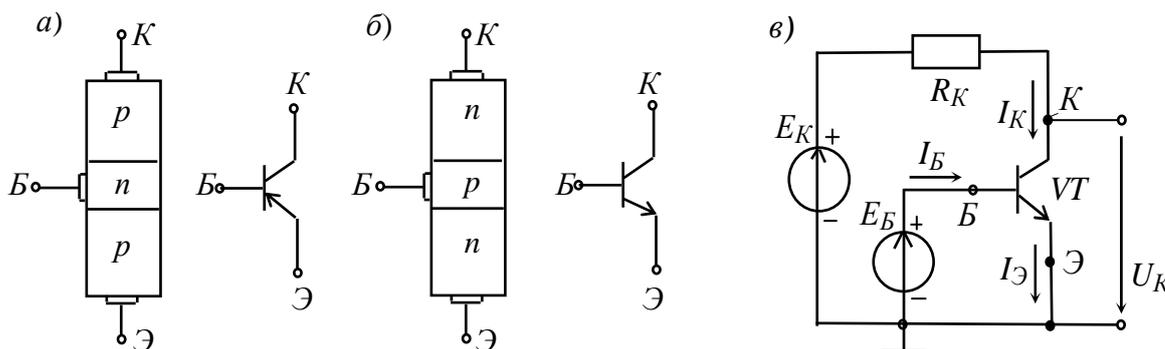
- 1 Приведите основные параметры светодиода, оптопары.
- 2 Опишите порядок получения ВАХ светодиода и исследования работы оптопары по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Приведите передаточную характеристику оптопары.

9 Лабораторная работа № 9. Исследование характеристик биполярного транзистора

Цель работы: получение входных и выходных характеристик биполярного транзистора, определение h -параметров.

9.1 Общие сведения

Биполярный транзистор представляет собой кристалл полупроводника, состоящий из трех слоев с чередующейся проводимостью и снабженный тремя выводами для подключения к внешней цепи (рисунок 9.1, а) [5–8,10].



Э – эмиттер; К – коллектор; Б – база

Рисунок 9.1 – Структура, обозначение биполярных транзисторов разных типов, схема включения с общим эмиттером

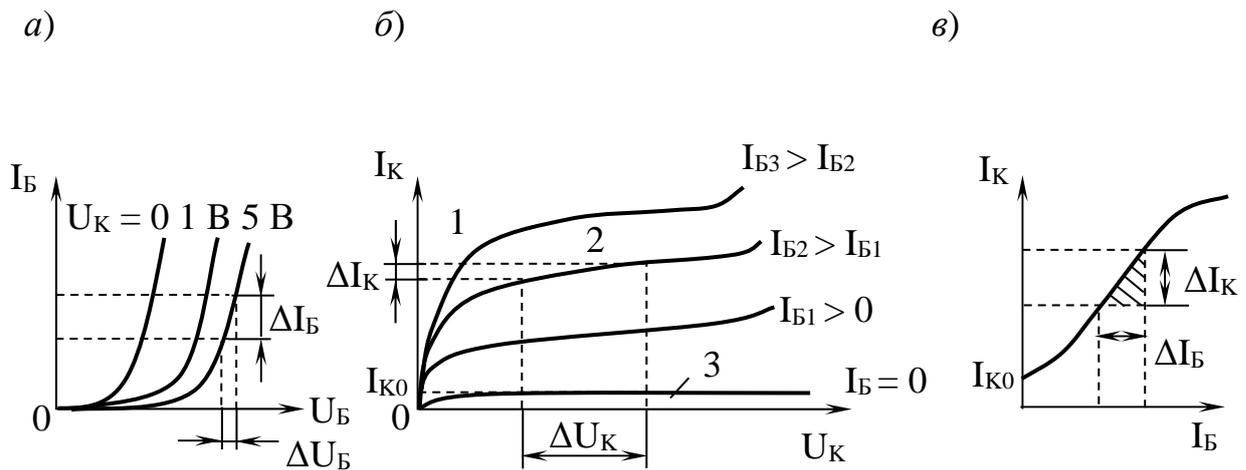
Схема включения транзистора с ОЭ (рисунок 9.1, в) является наиболее распространенной вследствие малого тока базы во входной цепи и усиления входного сигнала как по напряжению, так и по току.

Полярность внешних источников E_B и E_K выбирается так, чтобы на эмиттерном переходе было прямое напряжение, а на коллекторном – обратное.

Важнейшими характеристиками биполярного транзистора являются его входные и выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ). Входные характеристики транзистора с ОЭ (рисунок 9.2, а) отражают зависимость тока базы от напряжения, приложенного между базой и эмиттером, при $U_{кэ} = \text{const}$. Они мало зависят от $U_{кэ}$, поэтому обычно приводят одну характеристику $I_b(U_{бэ})$, которая подобна ВАХ диода. Выходные характеристики отражают зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при $I_b = \text{const}$ (рисунок 9.2, б).

Статические вольт-амперные характеристики транзистора могут быть получены в результате эксперимента или расчёта.

В справочниках (каталогах) транзисторов обычно приводятся входные и выходные характеристики транзистора. Справочники широко используют для анализа работы транзисторов и для расчета схем при больших сигналах.



a – $R_{ax} = \Delta U_B / \Delta I_B$ при $U_K = \text{const}$; *б* – $R_{вых} = \Delta U_K / \Delta I_K$ при $U_B = \text{const}$ (1 – область насыщения; 2 – активная область; 3 – область отсечки); *в* – $h_{21} = \Delta I_K / \Delta I_B$ при $U_K = \text{const}$

Рисунок 9.2 – Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора при включении в режиме с общим эмиттером

В режиме усиления *малых сигналов* транзистор в схеме с ОЭ часто представляют в виде линейного четырехполюсника, входные и выходные параметры которого связаны следующими уравнениями:

$$\Delta U_B = h_{11Э} \Delta I_B + h_{12Э} \Delta U_K;$$

$$\Delta I_K = h_{21Э} \Delta I_B + h_{22Э} \Delta U_K,$$

где $h_{11Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B} \right|_{U_K = \text{const}}$ ($\Delta U_K = 0$) – входное динамическое сопротивление транзистора ($h_{11Э} = 100 \dots 1000 \text{ Ом}$);

$h_{12Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta U_K} \right|_{I_B = \text{const}}$ ($\Delta I_B = 0$) – безразмерный коэффициент внутренней обратной связи по напряжению, значение которого лежит в пределах $0,002 \dots 0,0002$ (при расчётах им часто пренебрегают, т. е. полагают равным нулю);

$h_{21Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_K = \text{const}}$ ($\Delta U_K = 0$) – коэффициент передачи (усиления) тока при постоянном напряжении на коллекторе; его также обозначают K_i или $\beta = 10 \dots 200$;

$h_{22Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_K} \right|_{I_B = \text{const}}$ ($\Delta I_B = 0$) – выходная проводимость транзистора при постоянном токе базы ($h_{22Э} = 10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ См}$).



Величина резисторов R_1 и R_2 рассчитывается исходя из ограничения тока базы I_b и тока коллектора $I_k < 0,5 I_{k \max}$ при заданных преподавателем значениях ЭДС.

Выходную ВАХ можно получить с помощью характериографа XIV1.

9.2.3 Для экспериментального получения характеристик биполярного транзистора на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 9.3.

ЭДС для питания входной и выходной цепи E_b и E_k подаются от двухканального источника питания НУ3002-D2. Входное напряжение $U_{bэ}$ снимается каналом AI1 устройства сбора данных NI USB-6009, а входной ток I_b снимается каналом AI2 через падение напряжения на резисторе R_1 . Выходное напряжение $U_{кэ}$ снимается каналом AI3 устройства сбора данных NI USB-6009, а выходной ток I_k снимается каналом AI4 через падение напряжения на резисторе R_2 [3].

9.2.4 Снять входные и выходные ВАХ биполярного транзистора для нескольких значений тока базы I_b , сравнить их с полученными при моделировании.

9.2.5 Воспользовавшись графиками семейств входных и выходных ВАХ, определить h -параметры биполярного транзистора. Заполнить таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – h -параметры биполярного транзистора

Транзистор 2N2219A	Результат вычислений			
	$h_{11э}$, Ом	$h_{12э}$	$h_{21э}$	$h_{22э}$, См
Моделирование				
Эксперимент				

9.2.6 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему для снятия характеристик биполярного транзистора в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно, характеристики и h -параметры биполярного транзистора по результатам моделирования и экспериментальные, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите основные параметры биполярного транзистора.
- 2 Опишите порядок построения входных и выходных ВАХ транзистора по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Охарактеризуйте h -параметры транзистора и порядок их вычисления.



10 Лабораторная работа № 10. Исследование характеристик полевых транзисторов с управляющим переходом и изолированным затвором

Цель работы: получение стокзатворных, выходных характеристик и параметров полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и изолированным затвором.

10.1 Общие сведения

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, в котором ток стока (C) через полупроводниковый канал n - или p -типа управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором (Z) и истоком (I). Полевые транзисторы производят:

- с управляющим p - n -переходом для использования в высокочастотных (до 12...18 ГГц) преобразовательных устройствах (условное обозначение приведено на рисунке 10.1, a и b);

- с изолированным затвором для использования в устройствах, работающих с частотой до 1...2 ГГц. Их производят или со встроенным каналом в виде МДП-структуры (условное обозначение на рисунке 10.1, $в$ и $г$), или с индуцированным каналом в виде МОП-структуры (условное обозначение на рисунке 10.1, $д$ и $е$) [5–8, 10].

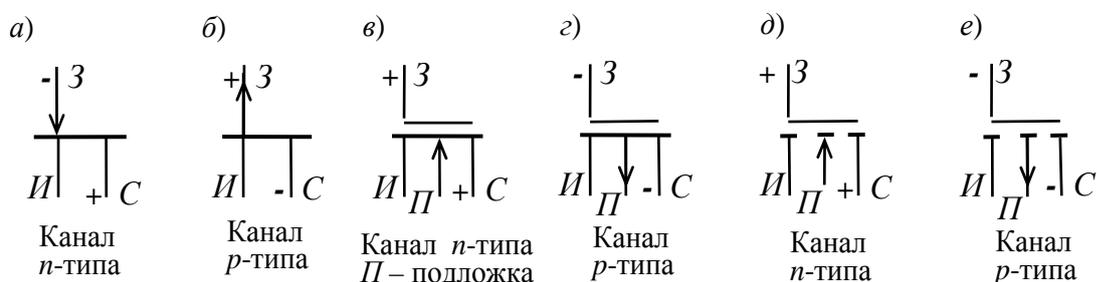


Рисунок 10.1 – Условное обозначение полевых транзисторов

Схема включения полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа, его семейство выходных характеристик $I_C = f(U_C)$, $U_Z = \text{const}$ и стокзатворная характеристика $I_C = f(U_Z)$, $I_C = \text{const}$ изображены на рисунке 10.2.

При подключении выходов стока C и истока I к источнику питания U_n по каналу n -типа протекает начальный ток I_C , т. к. p - n -переход не перекрывает сечение канала (рисунок 10.2, a). При этом электрод, из которого в канал входят носители заряда, называют *истоком*, а электрод, через который из канала уходят основные носители заряда, называют *стоком*. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют *затвором*. С увеличением обратного напряжения $-U_Z$ уменьшается сечение канала, сопротивление увеличивается и уменьшается ток стока I_C (рисунок 10.2, $в$).

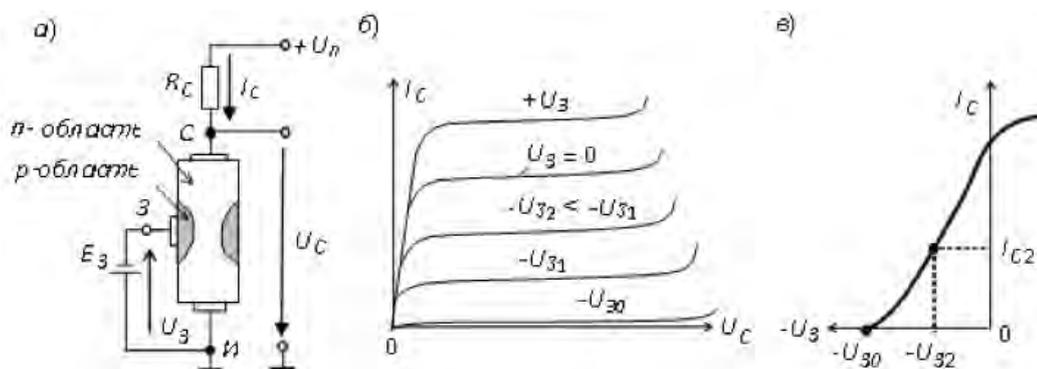


Рисунок 10.2 – Схема включения и характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Итак, управление током стока I_C происходит при подаче обратного напряжения на p - n -переход затвора $З$. В связи с малостью обратных токов в цепи «затвор–исток» мощность, необходимая для управления током стока, оказывается ничтожно малой.

При напряжении $-U_3 = -U_{30}$, называемом *напряжением отсечки*, сечение канала полностью перекрывается обеднёнными носителями заряда барьерным слоем и ток стока I_{C0} (ток отсечки) определяется неосновными носителями заряда p - n -перехода (см. рисунок 10.2, б).

Схематичная структура полевого МДП транзистора с *индуцированным* n -каналом представлена на рисунке 10.3.

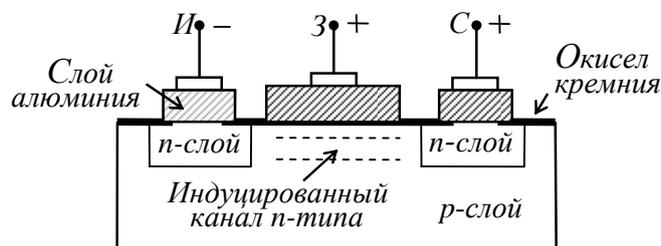


Рисунок 10.3 – Структура МДП транзистора

Электрод затвора изолирован от полупроводникового канала с помощью слоя диэлектрика из двуоксида кремния (SiO_2). Поэтому полевой транзистор с такой структурой называют МОП-транзистором (металл-оксид-полупроводник). Электроды стока и истока располагаются по обе стороны затвора и имеют контакт с полупроводниковым каналом. При напряжении на затворе относительно истока, равном нулю, и при наличии напряжения на стоке ток стока I_C оказывается ничтожно малым. Заметный ток стока появляется только при подаче на затвор напряжения положительной полярности относительно истока, которое больше так называемого *порогового напряжения* $U_{3, \text{пор}}$.

При этом в результате проникновения электрического поля через диэлектрический слой в полупроводник при напряжениях на затворе, больших $U_{3, \text{пор}}$, у поверхности полупроводника под затвором возникает инверсионный слой, который и является каналом, соединяющим исток со стоком. Толщина и попе-

речное сечение канала изменяются с изменением напряжения на затворе, соответственно будет изменяться ток стока.

В полевом транзисторе со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе ток стока имеет начальное значение I_{C0} . Такой транзистор может работать как в режиме обогащения, так в режиме обеднения: при увеличении напряжения на затворе канал обогащается носителями зарядов и ток стока растёт, а при уменьшении напряжения на затворе канал обедняется и ток стока снижается.

Важнейшими особенностями полевых транзисторов являются высокое входное сопротивление (десятки-сотни мегаом) и малый входной ток. Одним из основных параметров полевых транзисторов является *крутизна* $S_i = \Delta I_C / \Delta U_3$ стокзатворной характеристики (см. рисунок 10.2, в).

Крутизна характеристики в общем случае нелинейна во всем диапазоне изменения тока стока и уменьшается с увеличением напряжения между стоком и истоком.

Внутреннее сопротивление полевого транзистора определяется отношением напряжения стока к соответствующему изменению тока стока (напряжение на затворе при определении сопротивления должно оставаться постоянным):

$$R_i = \left. \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_c} \right|_{U_{zu}} = \text{const} .$$

Усилительные свойства транзистора по напряжению характеризуются коэффициентом усиления μ_i :

$$\mu_i = \left. \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta U_{zu}} \right|_{I_c} = \text{const} .$$

Коэффициент усиления связан с крутизной вольт-амперной характеристики и внутренним сопротивлением соотношением

$$\mu_i = S_i R_i .$$

10.2 Порядок выполнения работы

10.2.1 Выписать из справочника основные параметры заданных преподавателем полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом и изолированным затвором [9].

Для построения вольт-амперных стокзатворной и выходной характеристик полевых транзисторов в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 10.4 [2,7].

На затвор подается напряжение от источника ЭДС E_3 , который задает напряжение на затворе U_{zu} . Напряжение сток-исток задается источником ЭДС E_c , ток в цепи стока измеряется амперметром I_c , напряжение – вольтмет-



ром U_{cu} . Величина резистора R_2 рассчитывается исходя из ограничения тока стока $I_c < 0,5 I_{c \max}$ при заданных преподавателем значениях ЭДС.

Выходную ВАХ транзистора можно получить с помощью характеристики графа.

10.2.2 Для экспериментального получения характеристик полевого транзистора на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 10.4.

ЭДС для питания входной и выходной цепи E_3 и E_c подаются от двухканального источника питания NY3002-D2. Входное напряжение U_{3u} снимается каналом AI1 устройства сбора данных NI USB-6009. Выходное напряжение U_{cu} снимается каналом AI2 устройства сбора данных NI USB-6009, а выходной ток I_c – каналом AI3 через падение напряжения на резисторе R_2 [3].

10.2.3 Снять выходные ВАХ полевого транзистора для нескольких значений напряжения на затворе U_{3u} , сравнить их с полученными при моделировании.

10.2.4 Снять стокзатворные ВАХ полевого транзистора для заданного преподавателем тока стока I_c , сравнить их с полученными при моделировании.

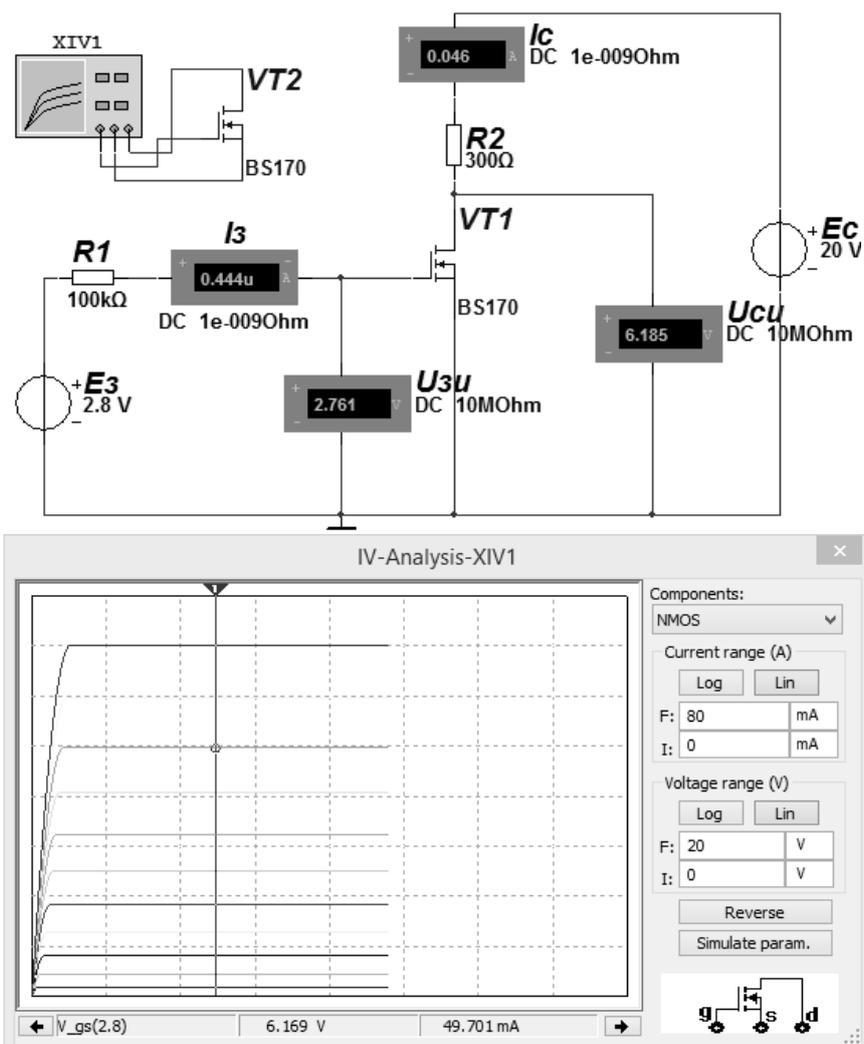


Рисунок 10.4 – Схема для снятия стокзатворной и выходных ВАХ полевого транзистора в среде Multisim

10.2.5 Определить статические параметры полевого транзистора S_i , R_i , μ_i и проверить соотношение между ними. Заполнить таблицу 10.1.

Таблица 10.1 – Параметры полевого транзистора

Транзистор BS170	Результат вычислений		
	S_i , мА/В	R_i , кОм	μ_i
Моделирование			
Эксперимент			

10.2.6 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схемы для снятия характеристик полевых транзисторов в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно, характеристики и параметры полевых транзисторов по результатам моделирования и экспериментальные, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите основные параметры полевого транзистора.
- 2 Опишите порядок построения выходных и стокзатворных характеристик транзистора по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Как определить крутизну стокзатворной характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления полевого транзистора.



Список литературы

1 Введение в Multisim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://of.bsu.ru/e-book/mikroprochess/Manual_multisim_rus.pdf. – Дата доступа: 02.10.2018.

2 **Марченко, А. Л.** Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде MULTISIM: учебное пособие / А. Л. Марченко, С. В. Освальд. – Москва: ДМК Пресс, 2010. – 448 с.

3 **Суранов, А. Я.** LabVIEW 8.20. Справочник по функциям / А. Я. Суранов. – Москва: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.

4 **Браммер, Ю. А.** Импульсные и цифровые устройства: учебник / Ю. А. Браммер, И. Н. Пащук. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2003. – 351 с.

5 **Алехин, В. А.** Электроника: теория и практика. Моделирование в среде TINA-8: учебное пособие / В. А. Алехин. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2017. – 308 с.: ил.

6 **Иванов, В. Н.** Электроника и микропроцессорная техника: учебник / В. Н. Иванов. – Москва: Академия, 2016. – 288 с.

7 **Марченко, А. Л.** Основы электроники: учебное пособие / А. Л. Марченко. – Москва: ДМК Пресс, 2008. – 296 с.

8 **Лачин, В. И.** Электроника: учебное пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 703 с.

9 **Москатов, Е. А.** Справочник по полупроводниковым приборам / Е. А. Москатов. – Москва: Журнал «Радио», 2005. – 208 с.

10 **Бладыко, Ю. В.** Электроника. Практикум: учебное пособие / Ю. В. Бладыко. – Минск: Минфин, 2016. – 190 с.: ил.

