

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальностей  
1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества  
и диагностики состояния объектов»  
дневной и заочной форм обучения*

Часть 1



Могилев 2018



## Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Исследование режимов работы учебного стенда.....	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование параметров постоянных и переменных аналоговых сигналов.....	4
3 Лабораторная работа № 3. Исследование работы выпрямительного диода.....	8
4 Лабораторная работа № 4. Исследование работы стабилитрона.....	12
5 Лабораторная работа № 5. Исследование работы светодиода.....	15
6 Лабораторная работа № 6. Исследование работы биполярного транзистора.....	18
7 Лабораторная работа № 7. Исследование коэффициента усиления и полосы пропускания усилителя.....	21
8 Лабораторная работа № 8. Исследование работы сумматора аналоговых сигналов.....	25
9 Лабораторная работа № 9. Исследование работы интегрирующего и дифференцирующего устройств.....	28
10 Лабораторная работа № 10. Исследование однополупериодного и двухполупериодного прецизионных выпрямителей.....	30
11 Лабораторная работа № 11. Исследование усилителя с дискретной регулировкой коэффициента усиления.....	32
12 Лабораторная работа № 12. Исследование усилителя с автоматической регулировкой коэффициента усиления.....	34
13 Лабораторная работа № 13. Исследование работы компаратора аналоговых сигналов.....	35
14 Лабораторная работа № 14. Исследование аналоговых ключей и коммутатора аналоговых сигналов.....	40
15 Лабораторная работа № 15. Исследование генераторов сигналов прямоугольной и треугольной форм.....	41
16 Лабораторная работа № 16. Исследование работы стабилизатора напряжения.....	43
Список литературы.....	46

## 1 Лабораторная работа № 1. Исследование режимов работы учебного стенда

**Цель работы:** изучение органов управления и характеристик учебного стенда К32 и вспомогательного оборудования, исследование их работы в различных режимах.

### 1.1 Основные теоретические положения

Комплект лабораторного оборудования по электронной технике К32 предназначен для использования в качестве учебного оборудования при проведении лабораторных занятий по основным элементам электронной техники.

### 1.2 Порядок выполнения работы

Изучить инструкции по эксплуатации учебного стенда К32, устройств, которыми он укомплектован, и вспомогательных приборов: генератора сигналов, осциллографа, мультиметра, приобрести навыки их практического использования.

### Контрольные вопросы

- 1 Каково назначение блока управления К32?
- 2 Что входит в состав комплекта лабораторного оборудования по электронной технике К32?
- 3 Назовите функциональные возможности генератора Л31?
- 4 Какой диапазон частот обеспечивает генератор Л31?
- 5 Какие физические величины и в каком диапазоне можно измерять мультиметром?
- 6 Назовите основные органы управления осциллографом.

## 2 Лабораторная работа № 2. Исследование параметров постоянных и переменных аналоговых сигналов

**Цель работы:** приобретение навыков использования лабораторных и виртуальных измерительных приборов при исследовании работы электронных устройств.

### 2.1 Основные теоретические положения

В работе приобретаются практические навыки использования лабораторного и виртуального оборудования для измерения параметров постоянных и переменных электрических сигналов.



Виртуальными приборами для исследования электронных устройств укомплектована программа Multisim. Она предназначена для ввода схем устройств, моделирования их работы. Интерфейс Multisim показан на рисунке 2.1.

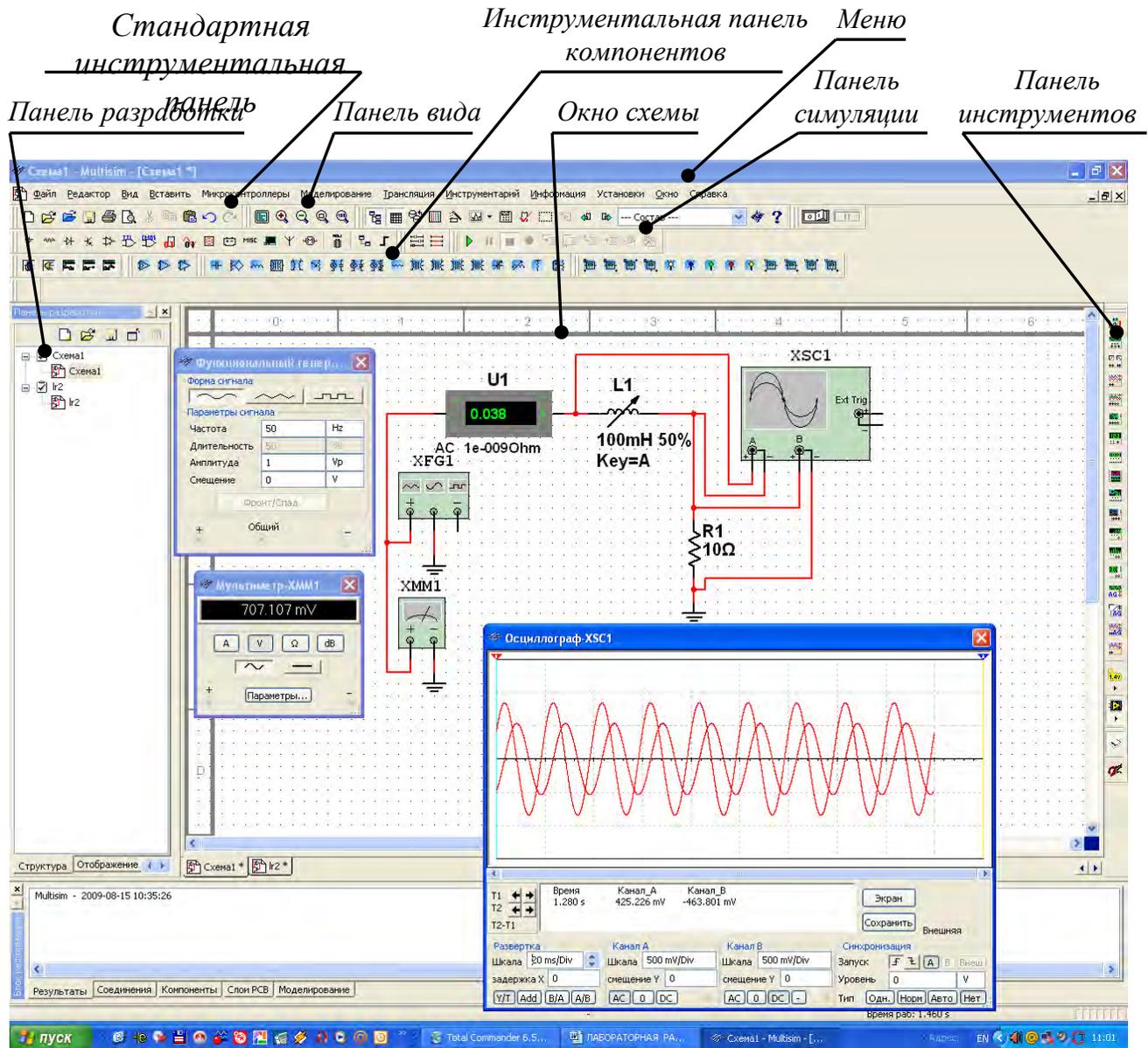


Рисунок 2.1 – Интерфейс Multisim

*Меню.* Здесь находятся команды для всех функций.

*Стандартная инструментальная панель* содержит кнопки для наиболее употребительных функций (создание, открытие, сохранение файла, копирования, печати схемы и т. д.).

*Панель симуляции* имеет кнопки для старта, остановки и других функций симуляции.

*Панель инструментов* имеет кнопки для каждого инструмента.

*Инструментальная панель компонентов* имеет кнопки, которые позволяют выбрать компоненты из базы данных Multisim для размещения в схеме.

*Окно схемы* (или рабочего пространства) – место, где ведётся разработка схемы.

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

*Вид 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. Виртуальные компоненты нужны только для эмуляции, пользователь может назначить им произвольные параметры. Например, сопротивление виртуального резистора может быть произвольным, даже 3,86654 Ом.

В Multisim есть и другая классификация компонентов: аналоговые, цифровые, смешанные, анимированные, интерактивные, цифровые с мультिवыбором, электромеханические и радиочастотные.

Изменение этих элементов сразу отражается на результатах эмулирования. Компоненты управляются с помощью клавиш, указанных под каждым элементом.

Для задания сигналов и просмотра результатов моделирования используются виртуальные приборы – модельные компоненты Multisim, которые соответствуют реальным приборам: осциллографам, генераторам сигналов, сетевым анализаторам и др.

## 2.2 Порядок выполнения работы

2.2.1 Включить блок управления (БУ) К32, генератор Л31, мультиметр и осциллограф.

2.2.2 В разъем, расположенный на передней панели блока управления, вставить сменное устройство УС4.

2.2.3 Соединить кабелем гнезда «ВЫХОД~» БУ и вход мультиметра.

2.2.4 Измерить напряжение постоянного тока в гнездах XS3, XS4, XS5, XS6, XS7, поочередно подключая их с помощью проводника к гнезду «ВХОД 1» коммутатора БУ, предварительно нажав кнопки: «+5, +15-15, -30» в группе кнопок «ПИТАНИЕ V», кнопку «ВХ 1» в группе кнопок «КОНТРОЛЬ V~» и кнопку « $\overline{ВСВ} \overline{ВНК}$ », относящуюся к гнездам «ВХОД 1» в блоке «КОММУТАТОР». Полученные результаты занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Напряжения, измеренные в гнездах устройства сменного УС4

Измеряемый параметр	Номер гнезда устройства УС4						
	XS3	XS4	XS5	XS6	XS7	XS2	XS1
$U, В$							



2.2.5 Подключить мультиметр с помощью кабеля к гнездам «ВЫХОД V» БУ. Нажать кнопку «ГН1» в группе кнопок «КОНТРОЛЬ V» и, установив левую ручку в блоке «ГН1» сначала в левое крайнее положение, а затем в правое крайнее положение, плавно вращая правую ручку в блоке «ГН1», измерить, в каком диапазоне изменяется напряжение на гнездах «ВЫХОД V». Результаты измерений записать.

2.2.6 Нажав кнопку «ГН2» в группе кнопок «КОНТРОЛЬ V», проделать то же самое с блоком «ГН2». Результаты измерений записать.

2.2.7 Выставить на выходе генератора ГН1 напряжение « $U = \quad В$ », на выходе ГН2 – напряжение « $U = \quad В$ » (по заданию преподавателя).

2.2.8 С помощью мультиметра измерить напряжение на сменном устройстве УС4 в гнездах XS1 и XS2 по методике, изложенной в п. 2.2.4. Результаты записать в таблицу 2.1.

2.2.9 Кабелем соедините генератор ЛЗ1 с гнездом «ВХОД ГС1». Вторым кабелем гнездо «ВЫХОД V» БУ соединить с входом А осциллографа. Нажать кнопку на передней панели генератора ЛЗ1 « $\sim$ » в группе кнопок «МНОЖИТЕЛЬ». На экране осциллографа получить устойчивое изображение синусоиды. Измерить период и амплитуду сигнала на выходе генератора с помощью осциллографа. Зная период, рассчитать частоту.

2.2.10 Изучить инструментальные панели среды Multisim, возможности эмуляции. Ознакомиться с набором компонентов и виртуальных приборов.

2.2.11 Собрать схему в Multisim в соответствии с рисунком 2.2. Для этого:

- выбрать необходимые элементы из «инструментальной панели компонентов»;
- задать параметры элементов схемы;
- из «панели инструментов» выбрать виртуальные приборы;
- задать параметры виртуальных приборов (частоту и амплитуду генерируемого сигнала, диапазон и род измеряемых величин и т. д.);
- соединить между собой компоненты, получив электрическую схему.

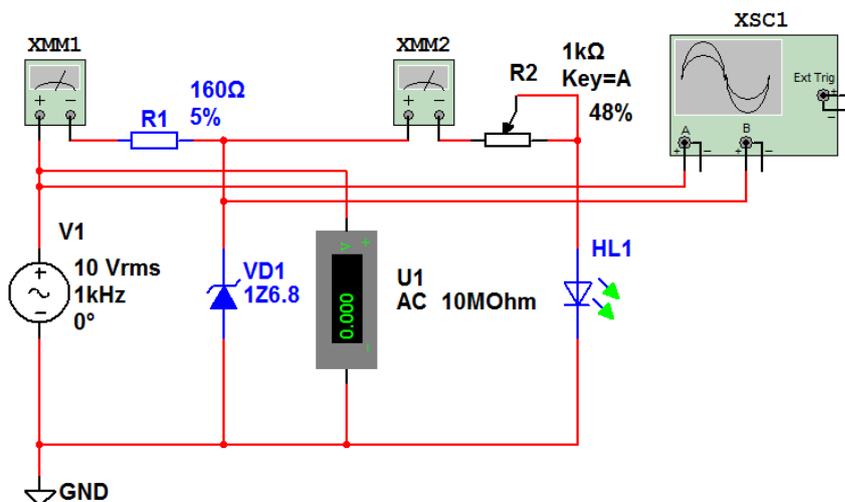


Рисунок 2.2 – Измерение электрических сигналов виртуальными приборами в Multisim



2.2.12 Запустить моделирование работы схемы. Зафиксировать показания измерительных приборов в отчете в виде таблицы 2.2.

Таблица 2.2 – Показания виртуальных измерительных приборов

Прибор	XMM1	XMM2	U1
Измеренная величина			
при R2, кОм			

2.2.13 Исследовать осциллограммы напряжений в контрольных точках с помощью осциллографа XSC1 и зарисовать их в отчете.

2.2.14 Исследовать по заданию преподавателя влияние параметров элементов схемы на параметры выходных сигналов.

### ***Содержание отчета***

Отчет о проделанной работе должен содержать название лабораторной работы, цель работы, таблицы с результатами измерений, осциллограммы сигналов, выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Сигналы каких форм можно наблюдать с помощью осциллографа?
- 2 К каким гнездам подключается к блоку управления генератор, мультиметр?
- 3 Для чего предназначены кнопки под надписью «КОНТРОЛЬ V~»?
- 4 Какие величины можно измерять мультиметром?
- 5 Каково назначение органов управления виртуального осциллографа?

## **3 Лабораторная работа № 3. Исследование работы выпрямительного диода**

***Цель работы:*** исследование работы выпрямительного диода и устройств на его основе.

### ***3.1 Основные теоретические положения***

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.

Обычно выпрямительный полупроводниковый диод нормально работает при напряжениях, лежащих в диапазоне до 1000 В.



Возможности полупроводникового диода как выпрямителя характеризуют следующие основные электрические параметры:

–  $U_{np}$  – постоянное прямое напряжение на диоде при заданном значении прямого тока, обычно не превышает 1 В для германиевых и 2 В для кремниевых диодов. Эта величина связана с величиной контактной разности потенциалов, которая у кремния выше, чем у германия;

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

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

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

–  $U_{обр.max}$  – 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 ( $\rho_i \approx 105$  Ом·см) много больше сопротивления собственного германия ( $\rho_i \approx 50$  Ом·см);

–  $P_{max}$  – максимально допустимая мощность, рассеиваемая диодом, зависит от габаритов, массы диода и его конструкции. У наиболее мощных диодов площадь перехода достигает до 1 см<sup>2</sup>, а масса – до 15...20 г, у маломощных диодов площадь переходов в 100 раз, а масса в 10 раз меньше;

–  $f_{max}$  – предельная частота, на которой может работать диод, сохраняя свою работоспособность.

### 3.2 Порядок выполнения работы

3.2.1 На основании заданного преподавателем типа диода и ЭДС  $E$  источника питания необходимо заполнить таблицу 3.1, взяв параметры диода из справочника.

Таблица 3.1 – Параметры диода и ограничивающего резистора

Тип диода	Параметры источника ЭДС	Параметры диода (справочные)						Параметры резистора	
	$E$ , В	$I_{np.max}$ , мА	$U_{np.max}$ , В	$U_{обр.max}$ , В	$I_{обр.max}$ , мкА	$T$ , °С	$f_{max}$ , кГц	$R1$ , Ом	$P_{R1}$ , Вт



3.2.2 Рассчитать параметры и выбрать из ряда E24 сопротивление ограничивающего резистора  $R_1$  для исследования параметров выпрямительного диода в Multisim (рисунок 3.1):

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

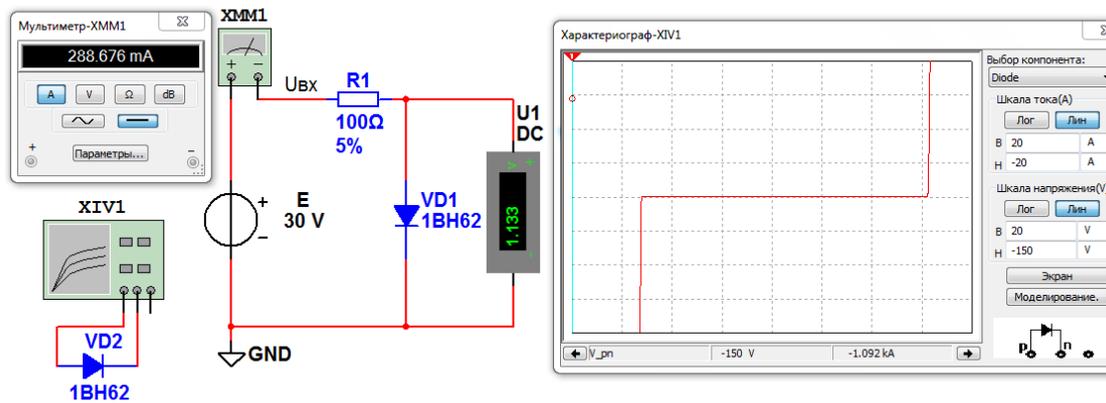


Рисунок 3.1 – Схема для исследования выпрямительного диода в Multisim

Полученные значения параметров  $R_1$  записать в таблицу 3.1.

3.2.3 Для построения вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода в среде Multisim собрать схему, показанную на рисунке 3.1, выполнить моделирование её работы, изменяя ЭДС источника питания. Результаты моделирования записать в отчет в виде таблицы 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры диода по результатам моделирования в Multisim

Тип диода	ЭДС источника	Параметры диода		Параметры резистора	
	$E$ , В	$I_{np}$ , мА	$U_{np}$ , В	$R_1$ , Ом	$P_{R_1}$ , Вт

Для снятия обратной ветви ВАХ необходимо в схеме, показанной на рисунке 3.1, изменить полярность источника питания, а ограничивающее сопротивление  $R_1$  выбрать около 1 кОм.

3.2.4 Исследовать ВАХ диода заданного типа с помощью характериографа XIV1. Результаты моделирования записать в отчет в виде таблицы 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры диода по результатам моделирования в Multisim его ВАХ

Тип диода	Параметры диода					
	$I_{np.min}$ , мА	$U_{np.min}$ , В	$I_{np.max}$ , мА	$U_{np.max}$ , В	$U_{обр.max}$ , В	$I_{обр.max}$ , мкА

3.2.5 Собрать схему в Multisim в соответствии с рисунком 3.2 для исследования работы однополупериодного выпрямителя, запустить моделирование. Измерить ток прибором XMM1 и напряжение на нагрузке  $U_H$  прибором  $U1$  при  $R2 = 0$  кОм и 1 кОм. Осциллограммы входного напряжения  $U_{вх}$  и напряжения на нагрузке  $U_H$  отобразить в отчете.

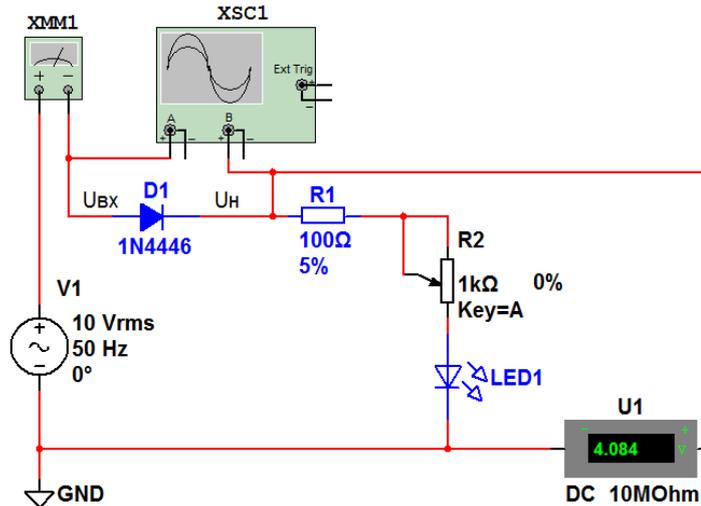


Рисунок 3.2 – Схема для исследования работы однополупериодного выпрямителя в Multisim

3.2.6 Собрать схему в Multisim в соответствии с рисунком 3.3 для исследования работы двухполупериодного выпрямителя, запустить моделирование. Измерить напряжение на нагрузке  $U_H$  прибором  $U1$  при  $R2 = 0$  кОм и 1 кОм. Осциллограммы входного напряжения  $U_{вх}$  и напряжения на нагрузке  $U_H$  отобразить в отчете.

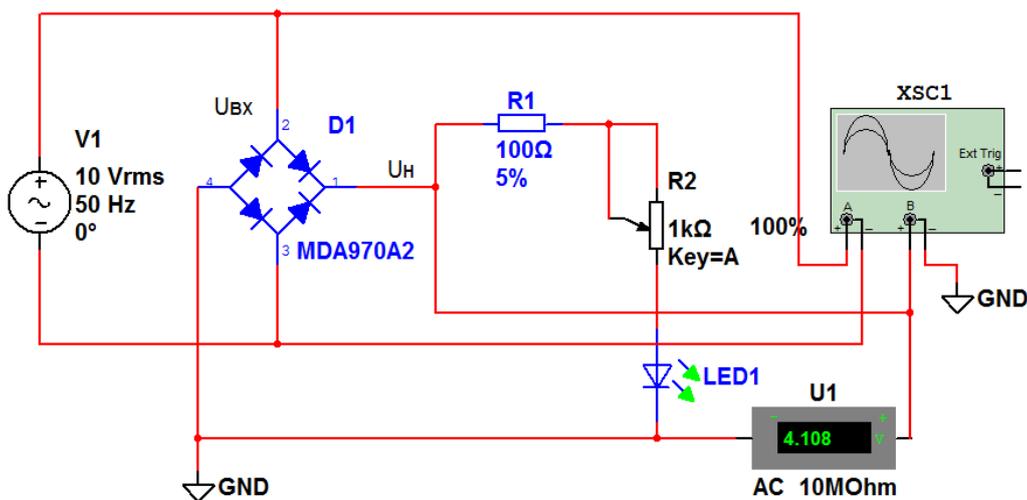


Рисунок 3.4 – Схема для исследования работы двухполупериодного выпрямителя в Multisim

## Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схемы и результаты моделирования работы выпрямительного диода и выпрямительных устройств в среде Multisim, ВАХ диода и таблицы с результатами, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

- 1 Назовите основные параметры полупроводниковых диодов.
- 2 Какие полупроводники применяются для изготовления полупроводниковых диодов?
- 3 В чем недостатки однополупериодного выпрямителя?
- 4 Какие схемы выпрямителей на полупроводниковых диодах Вы знаете?

## 4 Лабораторная работа № 4. Исследование работы стабилитрона

**Цель работы:** исследование характеристик и параметров стабилитрона.

### 4.1 Основные теоретические положения

Стабилитронами называют полупроводниковые диоды, на вольт-амперной характеристике (ВАХ) которых имеется участок со слабой зависимостью напряжения от протекающего тока. Напряжение на таком диоде  $U_{cm}$  остаётся почти постоянным при изменении тока в широких пределах от  $I_{cm.min}$  до  $I_{cm.max}$ . Рабочий участок ВАХ 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.

Возможности стабилитрона характеризуют следующие его электрические параметры:

–  $U_{cm.ном}$  – напряжение стабилизации, являющееся напряжением пробоя, обычно определяется для некоторого среднего значения тока в диапазоне от  $I_{cm.min}$  до  $I_{cm.max}$  и может несколько меняться в этих пределах. Напряжение пробоя стабилитрона, а значит, и напряжение стабилизации зависит от ширины  $p-n$ -перехода или от концентрации примесей в базе диода. Поэтому различные стабилитроны имеют напряжение стабилизации от 3 до 400 В;

–  $I_{cm.min}$  – минимальный ток стабилизации, определяет точку на ВАХ, где пробой приобретает устойчивый характер (обычно доли – единицы миллиампер);



–  $I_{cm.max}$  – максимальный ток стабилизации, определяется допустимой для данного прибора мощностью рассеяния, зависит от толщины  $p-n$ -перехода и от конструкции прибора (несколько миллиампер – несколько ампер);

–  $R_{диф}$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона, характеризует качество стабилитрона, то есть его способность стабилизировать напряжение при изменении проходящего тока. Дифференциальное сопротивление определяется отношением приращения напряжения к вызвавшему его приращению тока на рабочем участке:

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

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

Для различных стабилитронов  $R_{диф}$  лежит в пределах от десятых долей Ома (низковольтные) до 100...200 Ом (высоковольтные);

–  $TKH$  – температурный коэффициент напряжения стабилизации.  $TKH$  характеризует температурные изменения напряжения стабилизации и численно равен относительному изменению напряжения стабилизации при изменении температуры на 1 °С.

$$TKH = \frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm} \Delta T}.$$

Значения этого параметра у разных стабилитронов различны.  $TKH$  имеет положительные значения для относительно высоковольтных стабилитронов и отрицательные для низковольтных.

## 4.2 Порядок выполнения работы

4.2.1 На основании заданного преподавателем типа стабилитрона, параметров источника входного напряжения ( $E_{min}$  и  $E_{max}$ ), необходимо рассчитать сопротивление и мощность ограничивающего резистора  $R1$ ,  $P_{R1}$  (рисунок 4.1):

$$R1 = \frac{E_{max} - U_{cm.ном.}}{I_{cm.max}};$$

$$P_{R1} = \frac{(E_{max} - U_{cm.ном.})^2}{R1}.$$



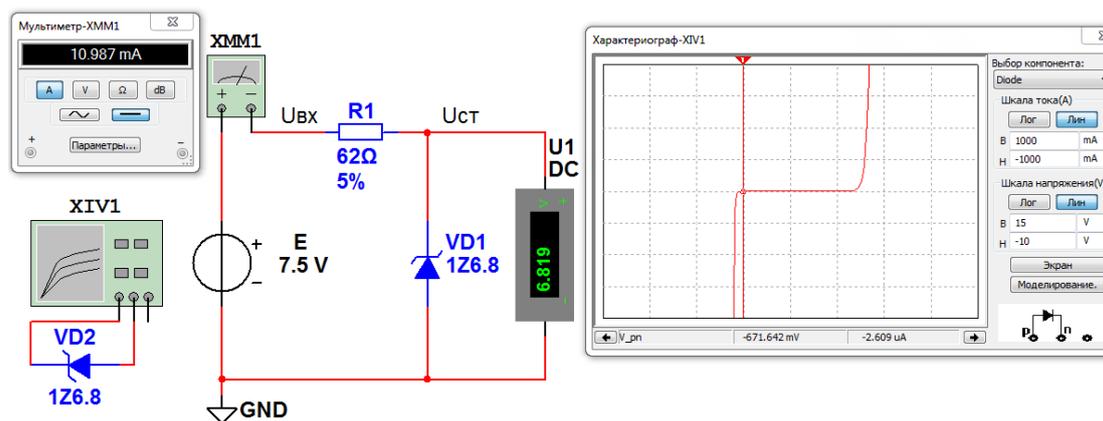


Рисунок 4.1 – Схема для исследования ВАХ стабилитрона в среде Multisim

Выбрать стандартное значение сопротивления  $R1$  из ряда E24. Результаты записать в отчет в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные для исследования стабилитрона

Тип стабилитрона	Параметры источника ЭДС		Параметры стабилитрона (справочные)						
	$E_{\min}$ , В	$E_{\max}$ , В	$I_{ст.ном.}$ , мА	$U_{ст.ном.}$ , В	$I(U)_{ст.min}$ , мА(В)	$I(U)_{ст.max}$ , мА(В)	ТКН	$R_{диф}$ , Ом	$P_{рас}$ , Вт

4.2.2 Для построения вольт-амперной характеристики стабилитрона в программе Multisim собрать схему, показанную на рисунке 4.1. Осуществить моделирование её работы, изменяя ЭДС источника питания. Результаты моделирования записать в отчет в виде таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры стабилитрона по результатам моделирования в Multisim

Тип стабилитрона	ЭДС источника	Параметры стабилитрона		Параметры резистора	
	$E$ , В	$I_{ст.}$ , мА	$U_{ст.}$ , В	$R1$ , Ом	$P_{R1}$ , Вт

4.2.3 Исследовать ВАХ стабилитрона заданного типа с помощью характериографа XIV1. Результаты моделирования записать в отчет в виде таблицы 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры стабилитрона по результатам моделирования в Multisim его ВАХ

Тип стабилитрона	$U_{ст.min}$ , В	$U_{ст.max}$ , В	$I_{ст.min}$ , мА	$I_{ст.max}$ , мА	$U_{ст.ном.}$ , В	$I_{ст.ном.}$ , мА	$P_{рас}$ , Вт	$R_{диф}$ , Ом

4.2.4 По полученным данным стабилитрона определить мощность, рассеиваемую на стабилитроне  $P_{рас}$ , дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке стабилизации  $R_{диф}$  и записать полученные результаты в таблицу 4.3.

### **Содержание отчёта**

Отчёт по работе должен содержать цель работы, задание к работе с расчётом и выбором элементов, схему для исследования ВАХ стабилитрона в среде Multisim, его ВАХ и результаты исследований в виде таблиц, выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Назовите основные параметры стабилитрона.
- 2 Какие полупроводники применяются для изготовления стабилитронов?
- 3 Какие схемы включения стабилитронов Вы знаете?

## **5 Лабораторная работа № 5. Исследование работы светодиода**

**Цель работы:** исследование характеристик и параметров светодиода, моделирование работы светодиода в среде Multisim.

### **5.1 Основные теоретические положения**

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

Излучение возникает при протекании прямого тока через светодиод 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  $U_{пр}$ , максимально допустимый прямой ток  $I_{пр.макс}$ , максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр.макс}$ , и физический смысл их тот же, что и для обычных выпрямительных диодов.

Световые параметры и характеристики светодиодов характеризуют их излучательные свойства.

**Сила света**  $I_v$  – излучаемый диодом световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучающего кристалла. Указывается при заданном значении прямого тока и измеряется в канделах.



*Яркость излучения*  $L$  – величина, равная отношению силы света к площади светящейся поверхности. Измеряется в канделах на квадратный метр при заданном значении прямого тока через диод.

Характеристикой диода как источника света является зависимость яркости от прямого тока  $L = f(I_{np})$  – *яркостная характеристика* или зависимость силы света от прямого тока  $I_v = f(I_{np})$  – *световая характеристика*.

Для серийных типов светодиодов часто приводится зависимость силы света от прямого тока в относительных единицах, которая показывает, насколько снижается или увеличивается сила света от значения, указанного в параметрах для данного прибора, при изменении тока через диод.

*Спектральная характеристика светодиода* – зависимость интенсивности излучения от длины волны излучаемого света или от энергии излучаемых квантов. В первом приближении спектральный состав излучения можно характеризовать цветом свечения.

Длина волны светового излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики светодиода, является световым параметром и указывается как максимум спектрального разделения  $\lambda_{max}$ .

Излучение диода также характеризуется диаграммой направленности, которая определяется конструкцией диода, наличием линзы, оптическими свойствами защищающего кристалл материала. Диаграммы, приводимые для прибора в справочных данных, показывают снижение силы света в зависимости от угла, под которым ведётся наблюдение излучения.

Светоизлучающие диоды характеризуются высоким быстродействием. Излучение нарастает за время менее  $10^{-8}$  с после подачи импульса прямого тока.

## 5.2 Порядок выполнения работы

5.2.1 На основании заданного преподавателем типа светодиода необходимо рассчитать сопротивление и мощность ограничивающего резистора  $R1$  (рисунок 5.1):

$$R1 = \frac{E}{I_{np \max} / 2}; \quad (5.1)$$

$$P_{R1} = \frac{(E - U_{np})^2}{R1}. \quad (5.2)$$

Параметры светодиода взять из электронного справочника, выбрать стандартное значение сопротивления из ряда E24, заполнить таблицу 5.1.



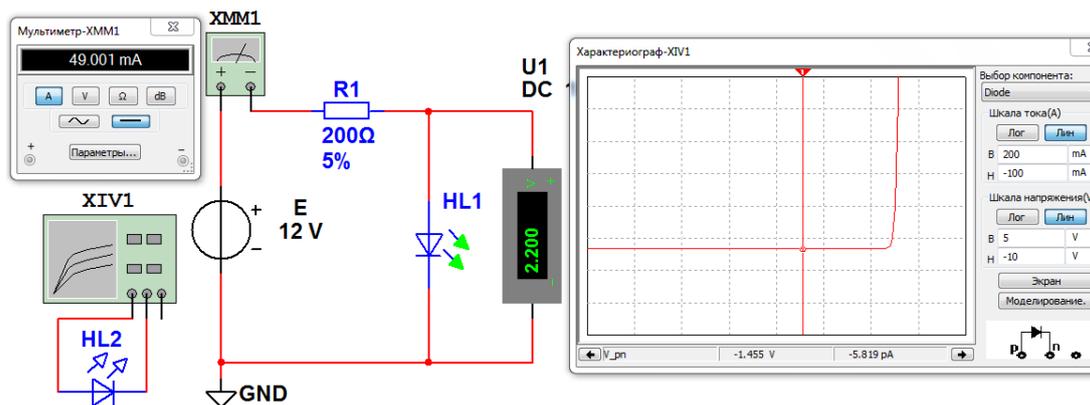


Рисунок 5.1 – Схема для исследования ВАХ светодиода в среде Multisim

Таблица 5.1 – Исходные данные для исследования светодиода

Тип светодиода	ЭДС источника	Параметры светодиода (справочные)				Параметры резистора	
	$E, В$	$\lambda_{max}, МКМ$	$I_{np,max}, mA$	$U_{np.}, В$	$U_{обр,max}, В$	$R1, Ом$	$P_{R1}, Вт$

5.2.2 Для построения вольт-амперной характеристики светодиода в программе Multisim собрать схему, показанную на рисунке 5.2. Осуществить моделирование её работы, изменяя ЭДС источника питания. Результаты моделирования записать в отчет в виде таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Параметры светодиода по результатам моделирования в Multisim

Тип светодиода	ЭДС источника	Параметры светодиода		Параметры резистора	
	$E, В$	$I_{np.}, mA$	$U_{np.}, В$	$R1, Ом$	$P_{R1}, Вт$

5.2.3 Исследовать ВАХ светодиода заданного типа с помощью характериографа XIV1. Результаты моделирования записать в отчет в виде таблицы 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры светодиода по результатам моделирования в Multisim его ВАХ

Тип светодиода	ЭДС источника	Параметры светодиода			
	$E, В$	$I_{np,min}, mA$	$I_{np,max}, mA$	$U_{np,min}, В$	$U_{np,max}, В$

## Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, задание к работе с расчётом и выбором элементов, схему для исследования ВАХ светодиода в среде Multisim, его ВАХ и параметры по результатам исследований в виде таблиц, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

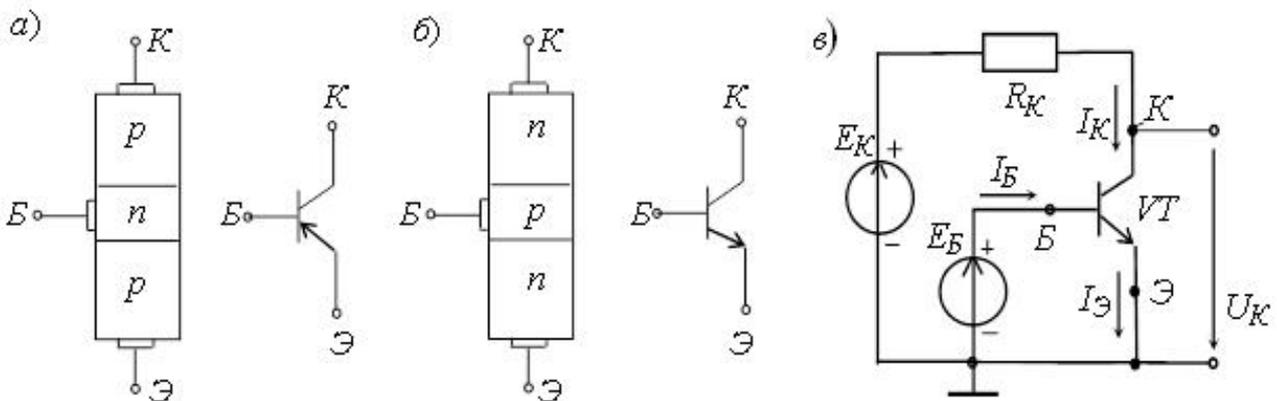
- 1 Назовите основные электрические параметры светодиода.
- 2 Назовите основные световые параметры светодиода.
- 3 Что такое спектральная характеристика светодиода?
- 4 Что такое диаграмма направленности светодиода?
- 5 Какова схема включения светодиода?

## 6 Лабораторная работа № 6. Исследование работы биполярного транзистора

**Цель работы:** исследование характеристик биполярного транзистора, моделирование его работы в Multisim.

### 6.1 Основные теоретические положения

Биполярный транзистор представляет собой кристалл полупроводника, состоящий из трех слоев с чередующейся проводимостью и снабженный тремя выводами для подключения к внешней цепи (рисунок 6.1, а, б).



Э – эмиттер, К – коллектор, Б – база

Рисунок 6.1 – Структура и обозначение биполярных транзисторов разных типов (а, б), схема включения с общим эмиттером (в)

Как видно из рисунка, в каждой из этих структур существуют два  $p-n$ -перехода – эмиттерный и коллекторный.



Схема включения транзистора с ОЭ (рисунок 6.1, 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. Напряжения между коллектором и базой, коллектором и эмиттером, базой и эмиттером обозначаются  $U_{KB}$ ,  $U_{KЭ}$ ,  $U_{БЭ}$  соответственно.

Биполярный транзистор в процессе работы может находиться в одном из трех состояний: **отсечки**, **активном** и **насыщения**. В состоянии отсечки биполярный транзистор закрыт, он имеет большое внутреннее сопротивление, прямые токи через него не протекают. В состоянии насыщения биполярный транзистор полностью открыт, имеет минимальное внутреннее сопротивление и максимальный ток, протекающий через него, ограничиваемый внешними резисторами (резистором). Состояние насыщения наступает тогда, когда входной сигнал (ток, протекающий через базу транзистора) перестает влиять на ток коллектора. Активное состояние транзистора характеризуется тем, что он открыт и ток, протекающий через него, зависит и изменяется под воздействием входного сигнала (тока базы):

$$I_K = h_{21Э} \cdot I_Б,$$

где  $I_K$  – ток коллектора;

$I_Б$  – ток базы;

$h_{21Э}$  – коэффициент передачи тока базы.

Коэффициент усиления усилителя

$$K_{yc} = U_{вых} / U_{вх}.$$

## 6.2 Порядок выполнения работы

6.2.1 Собрать схему, изображенную на рисунке 6.2, в Multisim, выбрав из библиотеки Multisim биполярный транзистор  $n-p-n$ -типа по заданию преподавателя. В справочнике найти его основные параметры и записать в отчет в виде таблицы 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры исследуемого транзистора

Тип транзистора	$I_{K.max}$ , мА	$U_{KЭ.max}$ , В	$U_{KB.max}$ , В	$U_{БЭ.max}$ , В	$P_{K.max}$ , Вт	$h_{21Э}$



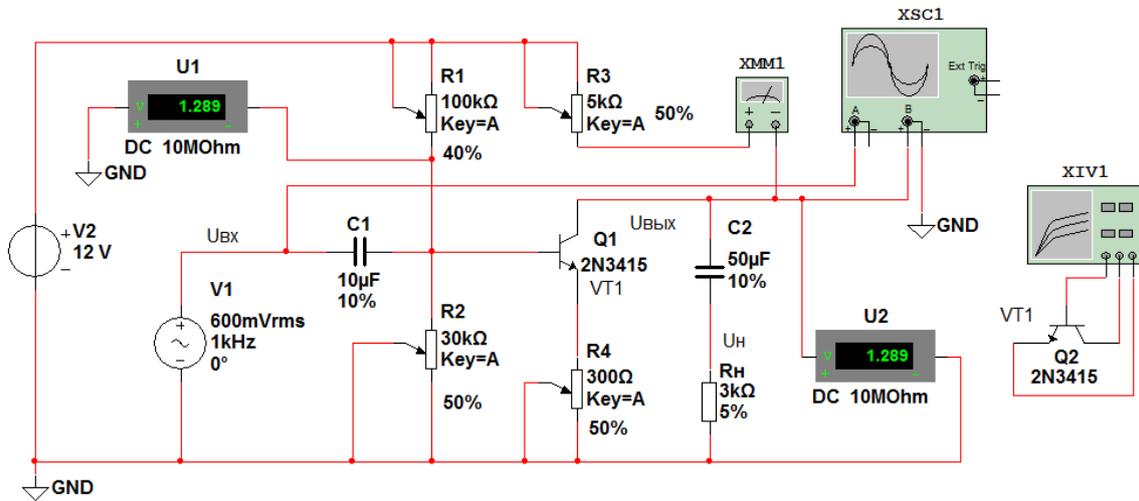


Рисунок 6.2 – Схема для исследования биполярного транзистора в Multisim

6.2.2 Подключив исследуемый транзистор к характериографу XIV1, получить и зарисовать в отчете семейство его выходных ВАХ.

6.2.3 Выставив значения сопротивлений  $R3$  и  $R4$ , как показано на рисунке 6.2, исследовать влияние резисторов  $R1$  и  $R2$  на потенциал базы транзистора VT1 и, как следствие, на форму и амплитуду выходного сигнала  $U_{вых}$ . Входной сигнал  $U_{вх}$  и выходной сигнал  $U_{вых}$  наблюдать с помощью осциллографа XSC1. За постоянной составляющей напряжения на базе и на коллекторе транзистора наблюдать с помощью вольтметров  $U1$  и  $U2$ . Ток коллектора регистрируется амперметром XMM1. Результаты исследований записать в отчет в виде таблицы 6.2.

Таблица 6.2 – Параметры исследуемого усилителя

$R1$ , кОм	$R2$ , кОм	$R3$ , кОм	$R4$ , Ом	$U_{б}$ , В	$U_{к}$ , В	$I_{к}$ , мА	$U_{вх}$ , В	$U_{вых}$ , В	$K_{yc}$

Записать значения сопротивлений  $R1$  и  $R2$ , при которых форма выходного сигнала претерпевает наибольшие изменения.

6.2.4 Выставив значения сопротивлений  $R1$  и  $R2$ , при которых сигнал  $U_{вых}$  имеет минимальные искажения и максимальное усиление, исследовать влияние резисторов  $R3$  и  $R4$  на форму и амплитуду выходного сигнала  $U_{вых}$ .

6.2.5 Рассчитать коэффициент усиления  $K_{yc}$  входного сигнала.

6.2.6 Повторить эксперимент, описанный в п. 6.2.3, выставив  $U_{вх} = 300$  мВ, затем  $U_{вх} = 3$  В. Объяснить появление среза вершины сигнала  $U_{вых}$ .

## **Содержание отчёта**

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему для моделирования характеристик биполярного транзистора в среде Multisim, результаты исследований, выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

- 1 В каких состояниях может находиться транзистор?
- 2 Какой режим работы транзистора называется режимом покоя?
- 3 Как определяется коэффициент усиления усилителя на биполярном транзисторе?
- 4 Когда появляются искажения формы усиливаемого переменного сигнала синусоидальной формы?
- 5 Какими формулами описываются соотношения базового, коллекторного и эмиттерного токов в биполярном транзисторе?

## **7 Лабораторная работа № 7. Исследование коэффициента усиления и полосы пропускания усилителя**

**Цель работы:** исследование параметров и характеристик электронного усилителя на основе операционного усилителя.

### **7.1 Основные теоретические положения**

Операционные усилители (ОУ), как и обычные усилители, используются для усиления напряжения или мощности входного сигнала. В схему его включают одним из трех способов: с инвертирующим, неинвертирующим или дифференциальным входами.

Схема включения ОУ с инвертирующим входом изображена на рисунке 7.1.

Коэффициент усиления по напряжению усилителя с инвертирующим входом

$$K_{УИ} = -U_{ВЫХ}/U_{ВХ} = -R2/R1. \quad (7.1)$$

Знак «минус» показывает, что знак  $U_{ВЫХ}$  по отношению к  $U_{ВХ}$  меняется на противоположный.



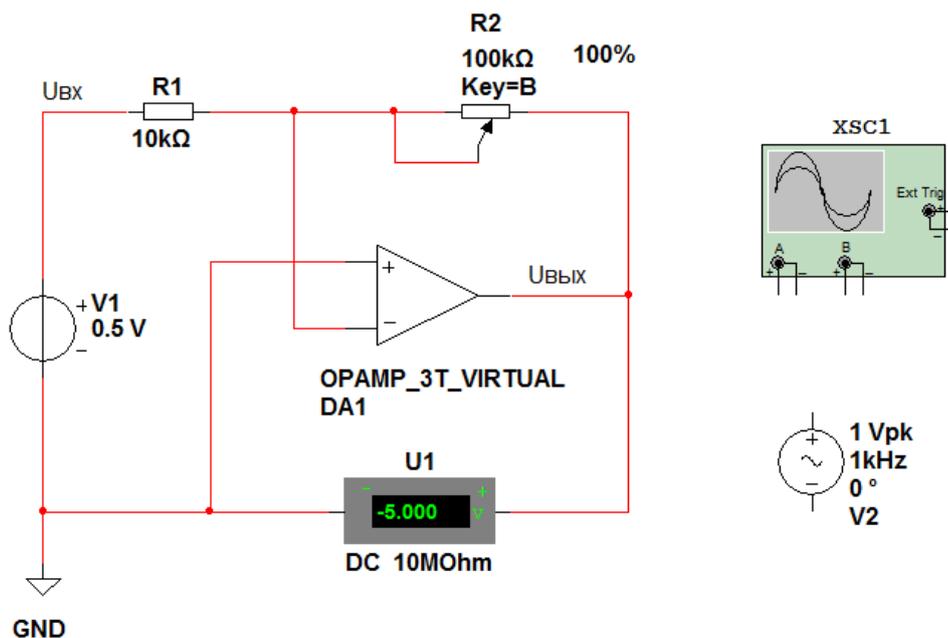


Рисунок 7.1 – Усилитель с инвертирующим входом на ОУ

Схема включения ОУ с неинвертирующим входом изображена на рисунке 7.2.

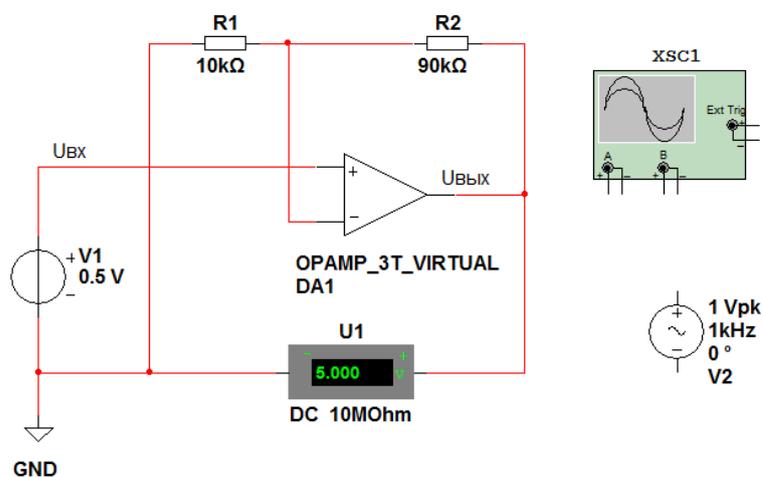


Рисунок 7.2 – Усилитель с неинвертирующим входом на ОУ

Коэффициент усиления по напряжению усилителя с неинвертирующим входом

$$K_{UH} = \frac{U_{BЫX}}{U_{BХ}} = \frac{R1 + R2}{R1}. \quad (7.2)$$

Полоса пропускания усилителя определяется его амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) (рисунок 7.3).

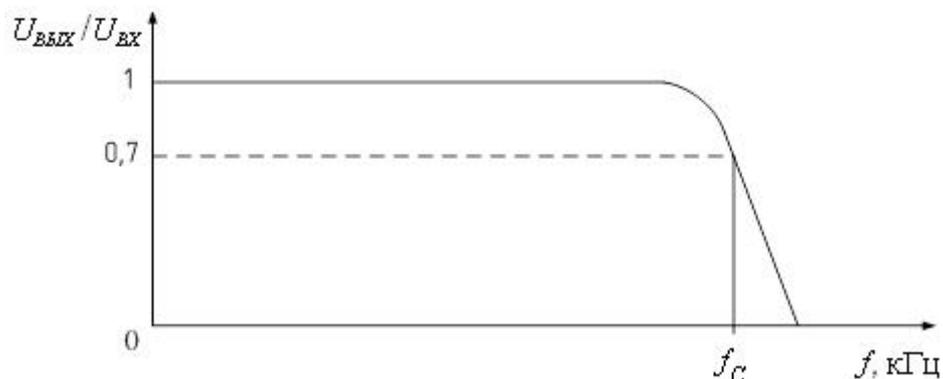


Рисунок 7.3 – Амплитудно-частотная характеристика усилителя

В паспорте каждого ОУ указывается частота, при которой его коэффициент усиления становится равным единице.

## 7.2 Порядок выполнения работы

7.2.1 Составить схему в среде Multisim инвертирующего усилителя в соответствии с рисунком 7.1. Выходное напряжение усилителя  $U_{ВЫХ}$  регистрируется вольтметром  $U1$ . По его показаниям и известному значению  $U_{ВХ}$  определить  $K_{УИ}$  по формуле (7.1) при  $R2$ , равном 100, 50, 20 кОм. Рассчитать  $K_{УИ}$  по формуле (7.1) через сопротивления  $R1$  и  $R2$ . Результаты исследований записать в отчет в виде таблицы 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты исследований инвертирующего усилителя на ОУ

$R1$ , кОм	$R2$ , кОм	$U_{ВХ}$ , В	$U_{ВЫХ}$ , В	$K_{УИ} (R2 / R1)$	$K_{УИ} (U_{ВЫХ} / U_{ВХ})$

Заменить источник  $V1$  (см. рисунок 7.1) на  $V2$ . Канал А осциллографа XSC1 подключить к выходу  $V2$ , канал В – к выходу ОУ DA1. По временным диаграммам напряжений  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}$ , полученным с помощью осциллографа для  $R2$ , равного 80 и 40 кОм, определить  $K_{УИ}$ . Рассчитать  $K_{УИ}$  через сопротивления  $R1$  и  $R2$ . Сопоставить полученные результаты. Почему синусоиды на экране осциллографа формируются в противофазе?

7.2.2 Составить в среде Multisim схему неинвертирующего усилителя в соответствии с рисунком 7.2. Выходное напряжение усилителя  $U_{ВЫХ}$  регистрируется вольтметром  $U1$ . По его показаниям и известному значению  $U_{ВХ}$  определить  $K_{УИ}$  по формуле (7.2) при  $R2$ , равном 90, 40, 10 кОм. Рассчитать  $K_{УИ}$  по формуле (7.2) через сопротивления  $R1$  и  $R2$ . Результаты исследований записать в отчет в виде таблицы 7.2.

Таблица 7.2 – Результаты исследований неинвертирующего усилителя на ОУ

$R1$ , кОм	$R2$ , кОм	$U_{BX}$ , В	$U_{ВЫХ}$ , В	$K_{УН}$ ( $1 + R2 / R1$ )	$K_{УН}$ ( $U_{ВЫХ} / U_{BX}$ )

Заменить источник V1 (см. рисунок 7.2) на V2. Канал А осциллографа XSC1 подключить к выходу V2, канал В – к выходу ОУ DA1. По временным диаграммам напряжений  $U_{BX}$  и  $U_{ВЫХ}$ , полученным с помощью осциллографа для  $R2$ , равного 70 и 20 кОм, определить  $K_{УН}$ . Рассчитать  $K_{УН}$  через сопротивления  $R1$  и  $R2$ . Сопоставить полученные результаты. Почему синусоиды на экране осциллографа формируются синфазно?

7.2.3 Исследовать АЧХ усилителя на микросхеме ОУ HA2-2529-5 (рисунок 7.4), взяв его из базы данных Multisim. У такого ОУ по паспортным данным на частоте 20 МГц коэффициент усиления становится равным единице независимо от параметров внешних элементов.

Для исследования по временным диаграммам напряжений  $U_{BX}$  и  $U_{ВЫХ}$ , полученным с помощью осциллографа XSC1 для частот 5, 50, 500 кГц, 1, 10, 20, 50 МГц источника V1, рассчитать  $K_{УН}$ . Определить для этого ОУ частоту среза  $f_C$ , при которой  $U_{ВЫХ}/U_{BX} = 0,7$ . Результаты исследований записать в отчет в виде таблицы 7.3.

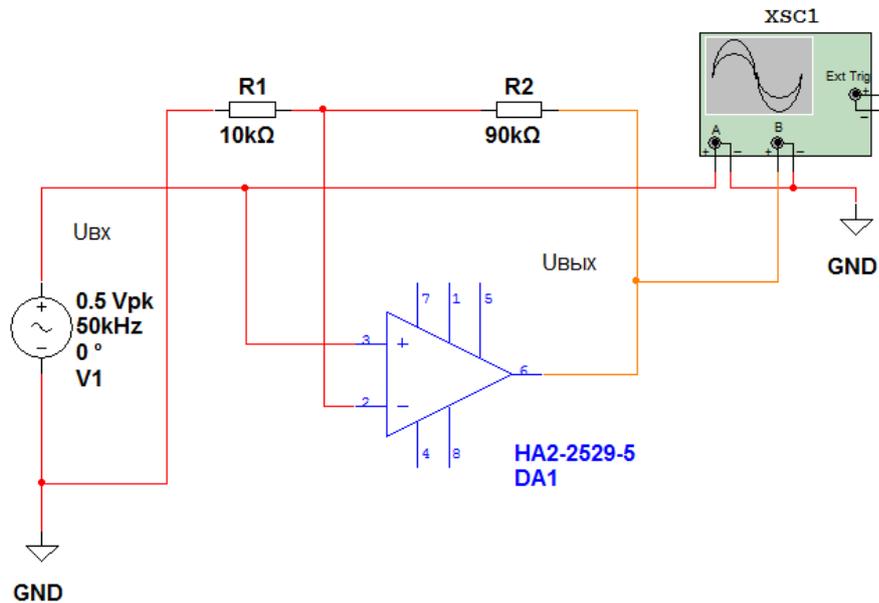


Рисунок 7.4 – Усилитель на ОУ HA2-2529-5

Таблица 7.3 – Результаты исследований полосы пропускания усилителя на ОУ

Исследуемый параметр	$U_{BX}$ , В	$U_{ВЫХ}$ , В							$f_C$ , МГц
		$f = 5$ кГц	$f = 50$ кГц	$f = 500$ кГц	$f = 1$ МГц	$f = 10$ МГц	$f = 20$ МГц	$f = 50$ МГц	
$K_{УН}$									



## Содержание отчета

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схемы для моделирования усилителей в среде Multisim, результаты исследований, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

- 1 Параметры каких элементов влияют на коэффициент усиления усилителя на ОУ?
- 2 Каким способом можно изменять коэффициент усиления усилителя на ОУ?
- 3 Какая зависимость называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)?
- 4 В чем разница между инвертирующим и неинвертирующим усилителями на ОУ?

## 8 Лабораторная работа № 8. Исследование работы сумматора аналоговых сигналов

**Цель работы:** исследование работы сумматора аналоговых сигналов на основе операционного усилителя.

### 8.1 Основные теоретические положения

На базе ОУ может быть создан сумматор напряжений, как постоянных, так и переменных (рисунок 8.1).

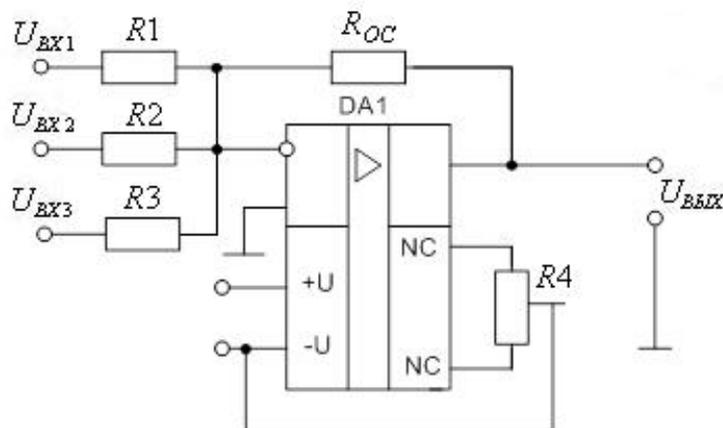


Рисунок 8.1 – Схема инвертирующего сумматора на ОУ

Выходное напряжение сумматора

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{OC}} \left( \frac{U_{\text{BX1}}}{R1} + \frac{U_{\text{BX2}}}{R2} + \frac{U_{\text{BX3}}}{R3} \right). \quad (8.1)$$

Или

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{V1}} U_{\text{BX1}} + K_{\text{V2}} U_{\text{BX2}} + K_{\text{V3}} U_{\text{BX3}}, \quad (8.2)$$



где  $K_{V1} = -\frac{R_{OC}}{R1}$ ;

$$K_{V2} = -\frac{R_{OC}}{R2};$$

$$K_{V3} = -\frac{R_{OC}}{R3}.$$

## 8.2 Порядок выполнения работы

8.2.1 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 8.2.

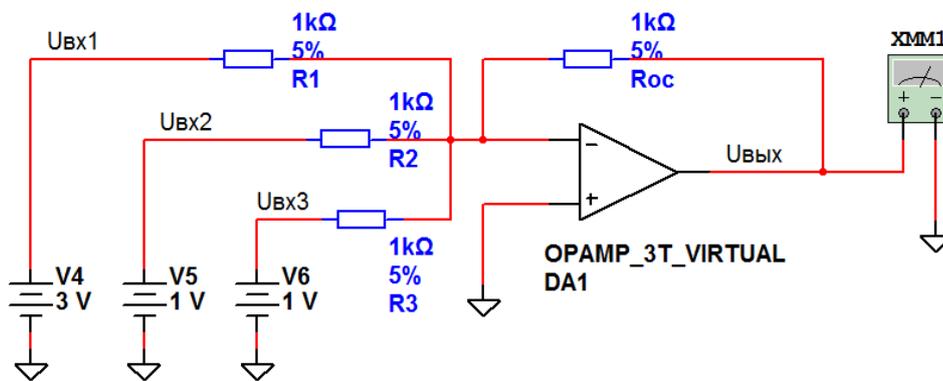


Рисунок 8.2 – Схема для исследования инвертирующего сумматора постоянных напряжений на ОУ в Multisim

Рассчитать  $U_{ВЫХ}$  по формуле (8.1), подставив в неё параметры, указанные на рисунке 8.2.

Включить моделирование. Измерить выходное напряжение сумматора  $U_{ВЫХ}$  вольтметром XMM1. Результаты расчетов и измерений занести в отчет в виде таблицы 8.1.

Таблица 8.1 – Результаты исследований инвертирующего сумматора постоянных напряжений

Результат	$U_{ВХ1}$ , В	$U_{ВХ2}$ , В	$U_{ВХ3}$ , В	$K_{V1}$	$K_{V2}$	$K_{V3}$	$U_{ВЫХ}$ , В
Вычислено							
Измерено							

Сделать замену  $R_{OC}$  на 3 кОм. Повторить расчет  $U_{ВЫХ}$  и моделирование. Почему изменились результаты расчета и эксперимента?

8.2.2 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 8.3.

Рассчитать  $U_{ВЫХ}$  по формуле (8.1), подставив в неё параметры, указанные на рисунке 8.3.

Включить моделирование. Через канал А осциллографом XSC1 регистрируется сигнал  $U_{ВХ1}$  (сигналы  $U_{ВХ2}$  и  $U_{ВХ3}$  по параметрам такие же,

как и  $U_{BX1}$ ), через канал В – сигнал  $U_{BЫX}$ . Почему сигналы  $U_{BX1}$  и  $U_{BЫX}$  на экране осциллографа находятся в противофазе?

Определить с помощью осциллографа амплитуду  $U_{BЫX}$  и сравнить полученное значение с расчетным.

Измерить выходное напряжение сумматора  $U_{BЫX}$  вольтметром ХММ1.

Результаты расчетов и измерений занести в отчет в виде таблицы 8.2.

Сделать замену  $R1$  на 3 кОм. Повторить расчет  $U_{BЫX}$  и моделирование. Почему изменились результаты расчета и эксперимента?

Таблица 8.2 – Результаты исследований инвертирующего сумматора переменных напряжений

Результат	$U_{BX1}$ , В	$U_{BX2}$ , В	$U_{BX3}$ , В	$K_{y1}$	$K_{y2}$	$K_{y3}$	$U_{BЫX}$ , В
Вычислено							
Измерено XSC1							
Измерено ХММ1							

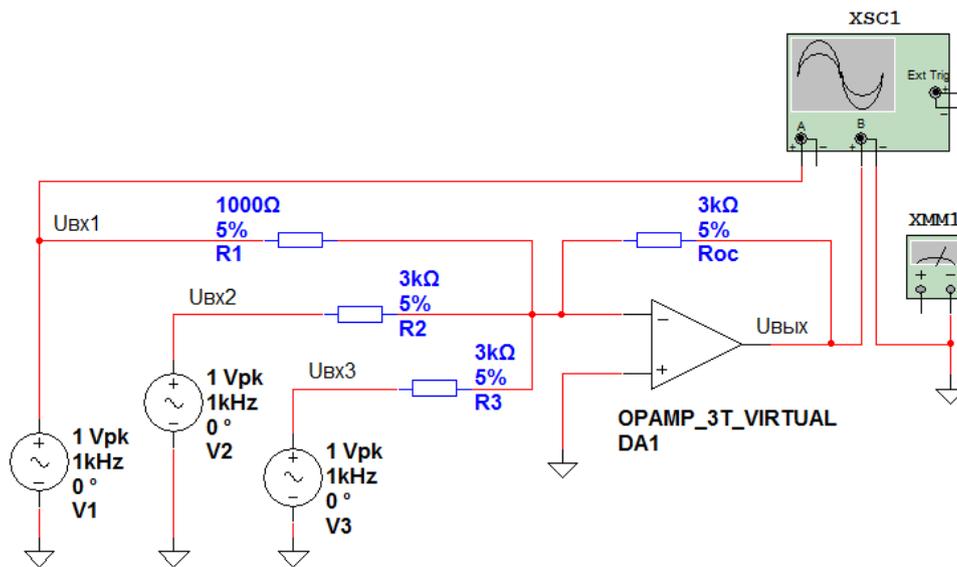


Рисунок 8.3 – Схема для исследования инвертирующего сумматора переменных напряжений на ОУ в Multisim

### Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать название работы, цель работы, схему сумматора, временные диаграммы сигналов, результаты расчетов и экспериментов, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1 Параметры каких элементов влияют на коэффициенты усиления входов сумматора на ОУ?

2 Каким образом можно изменить коэффициент усиления сумматора на ОУ по каждому входу?

3 Как можно получить сумму входных сигналов без усиления?

## 9 Лабораторная работа № 9. Исследование работы интегрирующего и дифференцирующего устройств

**Цель работы:** исследование работы интегрирующего и дифференцирующего устройств на основе операционного усилителя.

### 9.1 Основные теоретические положения

Включение конденсатора в цепь обратной связи ОУ позволяет получить интегрирующее устройство (рисунок 9.1), выходное напряжение которого

$$U_{\text{вых}}(t) = U_c = \frac{1}{C} \int_0^t I_c dt = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}} dt. \quad (9.1)$$

Замена местами элементов  $R$  и  $C$  на рисунке 9.1 позволяет получить дифференцирующее устройство, выходное напряжение которого

$$U_{\text{ВЫХ}} = -RC dU_{\text{ВХ}} / dt. \quad (9.2)$$

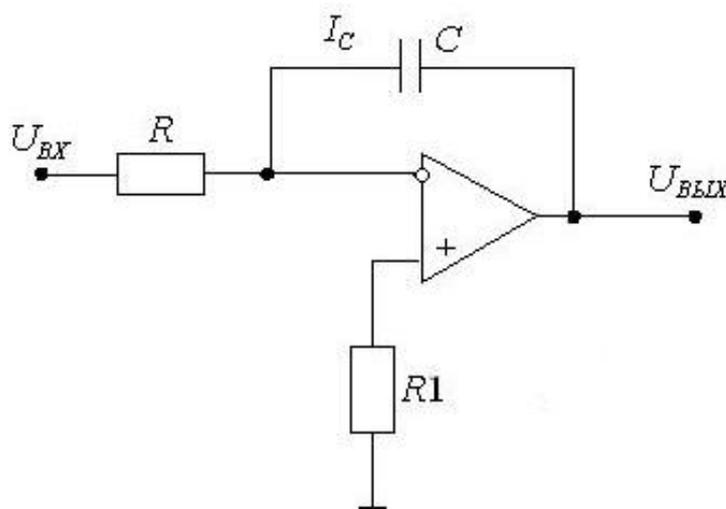


Рисунок 9.1 – Схема интегрирующего устройства на ОУ

## 9.2 Порядок выполнения работы

9.2.1 В отчете нарисовать схему аналогового интегратора на ОУ DA2, схему аналогового дифференциатора на ОУ DA3 (из схемы УС9 учебного стенда К32). По известным параметрам  $R$ ,  $C$ ,  $U_{BX}$ ,  $\Delta t$  рассчитать  $U_{ВЫХ}(t)$  по формулам (9.1) и (9.2).

9.2.2 В разъем, расположенный на передней панели учебного стенда К32, вставить сменное устройство УС 9.

9.2.3 Включить учебный стенд К32, генератор Л31 и осциллограф, нажав кнопки «СЕТЬ».

9.2.4 Исследовать схему интегратора, для чего подать на вход DA2 (гнездо XS4) последовательность прямоугольных импульсов от ГС1. Частота импульсов 200...400 Гц. Изменяя с помощью отвертки величину сопротивления  $R_{11}$ , получить на экране осциллографа последовательность импульсов треугольной формы. Полученную осциллограмму зарисовать в отчете и объяснить работу интегратора на ОУ. Результаты расчетов и эксперимента занести в отчет в виде таблицы 9.1.

Таблица 9.1 – Результаты исследований интегратора на ОУ

Результат	$C$ , Ф	$R$ , Ом	$U_{BX}$ , В	$\Delta t$ , с	$U_{ВЫХ}$ , В
Вычислено					
Измерено					

9.2.5 Исследовать схему аналогового дифференциатора на ОУ DA3, подав на его вход (гнездо XS5) последовательность прямоугольных импульсов частотой 0,2...2 кГц. Изменяя с помощью отвертки величину сопротивления  $R_{15}$ , наблюдать на экране осциллографа форму сигнала на выходе дифференциатора. Результаты расчетов и эксперимента занести в отчет в виде таблицы 9.2.

Таблица 9.2 – Результаты исследований дифференциатора на ОУ

Результат	Параметры				
	$C$ , Ф	$R$ , Ом	$U_{BX}$ , В	$\Delta t$ , с	$U_{ВЫХ}$ , В
Вычислено					
Измерено					

С помощью проводников соединить сначала гнезда XS7 и XS9, потом гнезда XS8 и XS10. Какие изменения происходят на экране осциллографа? Зарисовать наблюдаемые осциллограммы.

Исследовать зависимость выходного напряжения дифференциатора от входного, изменяя  $U_{BX}$  от 0 до 10 В. Объяснить наблюдаемые на экране осциллографа процессы.

## Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать название работы, цель работы, схемы электрические принципиальные, временные диаграммы сигналов, результаты расчетов и экспериментов, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1 Нарисуйте схему интегрирующего операционного усилителя и выведите расчетную формулу для выходного напряжения через входное.

2 Нарисуйте схему дифференцирующего ОУ. Запишите формулу зависимости выходного напряжения от входного для дифференцирующего ОУ.

## 10 Лабораторная работа № 10. Исследование однополупериодного и двухполупериодного прецизионных выпрямителей

**Цель работы:** исследование работы однополупериодного и двухполупериодного прецизионных выпрямителей на основе операционного усилителя.

### 10.1 Основные теоретические положения

В прецизионных выпрямителях на основе операционных усилителей на величину выходного сигнала падение напряжения на выпрямительных диодах влияния не оказывает. Выпрямление начинается практически с 0 В.

### 10.2 Порядок выполнения работы

10.2.1 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 10.1.

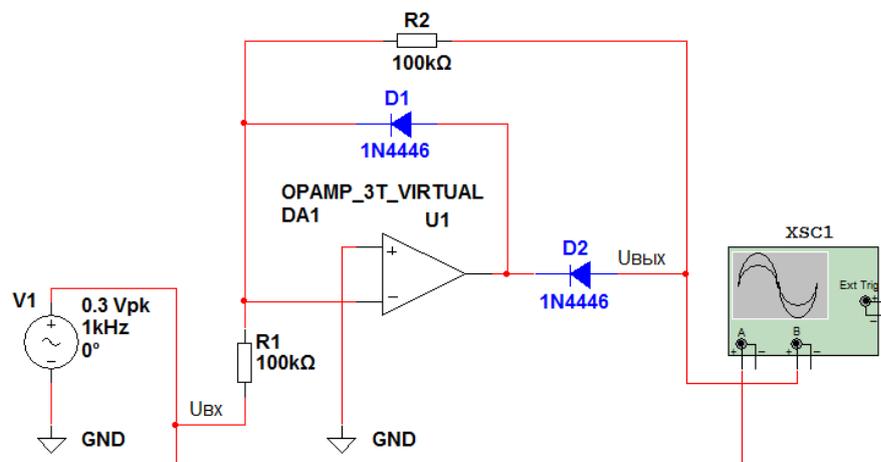


Рисунок 10.1 – Схема для исследования однополупериодного прецизионного выпрямителя на ОУ в Multisim

Включить моделирование. Через канал А осциллографом XSC1 регистрируется сигнал  $U_{BX}$ , через канал В – сигнал  $U_{ВЫХ}$ . Определить с помощью осциллографа амплитуды  $U_{BX}$  и  $U_{ВЫХ}$ . Зарисовать в отчет полученные с помощью осциллографа временные диаграммы  $U_{BX}$  и  $U_{ВЫХ}$ .

Повторить эксперимент, изменив параметры источника сигнала V1:  $U = 0,1$  В,  $f = 500$  Гц.

10.2.2 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 10.2.

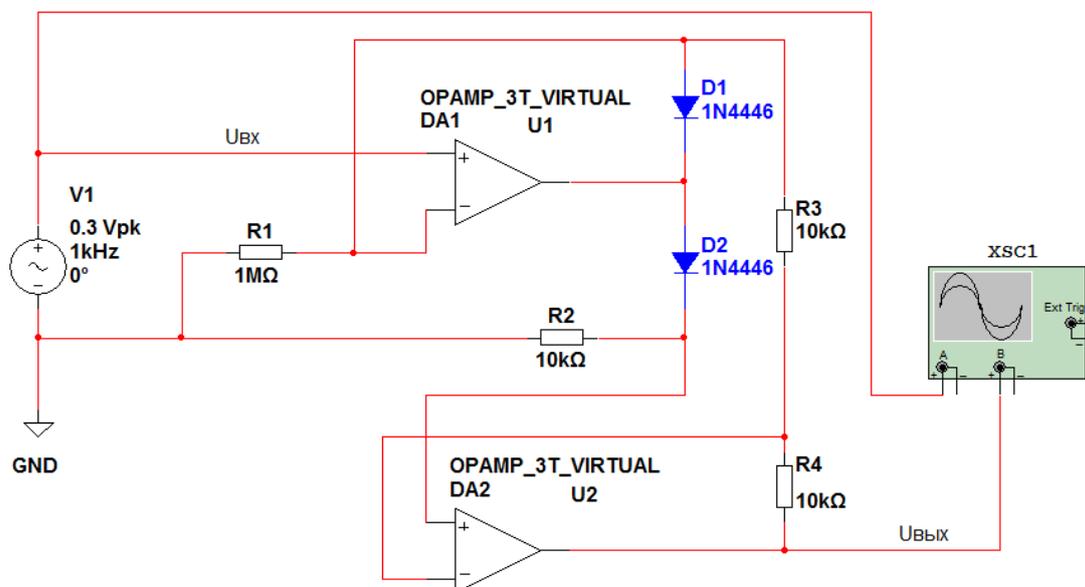


Рисунок 10.2 – Схема для исследования двухполупериодного прецизионного выпрямителя на ОУ в Multisim

Включить моделирование. Через канал А осциллографом XSC1 регистрируется сигнал  $U_{BX}$ , через канал В – сигнал  $U_{ВЫХ}$ . Определить с помощью осциллографа амплитуды  $U_{BX}$  и  $U_{ВЫХ}$ . Зарисовать в отчет полученные с помощью осциллографа временные диаграммы  $U_{BX}$  и  $U_{ВЫХ}$ .

Повторить эксперимент, изменив параметры источника сигнала V1:  $U = 0,1$  В,  $f = 500$  Гц.

### **Содержание отчета**

Отчет о проделанной работе должен содержать название работы, цель работы, схемы прецизионных выпрямителей, временные диаграммы сигналов, выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1 Какой полупериод входного сигнала выпрямляется однополупериодным выпрямителем?

2 Почему выпрямители на основе ОУ называют прецизионными?

## 11 Лабораторная работа № 11. Исследование усилителя с дискретной регулировкой коэффициента усиления

**Цель работы:** исследование схемы усилителя на основе операционного усилителя с дискретным управлением коэффициента усиления.

### 11.1 Основные теоретические положения

Коэффициент усиления схемы, представленной на рисунке 11.1, определяется отношением

$$K_{y1} = -(R3 + R4) / (R1 + R2). \quad (11.1)$$

Если резисторы  $R2$  и  $R4$  поочередно или одновременно шунтировать с помощью электромагнитных реле  $K1$  и  $K2$ , управляемых клавишами  $J1$  и  $J2$ , то можно получить коэффициенты усиления:

$$K_{y2} = -(R3 + R4) / (R1); \quad (11.2)$$

$$K_{y3} = -(R3) / (R1 + R2); \quad (11.3)$$

$$K_{y4} = -(R3) / (R1). \quad (11.4)$$

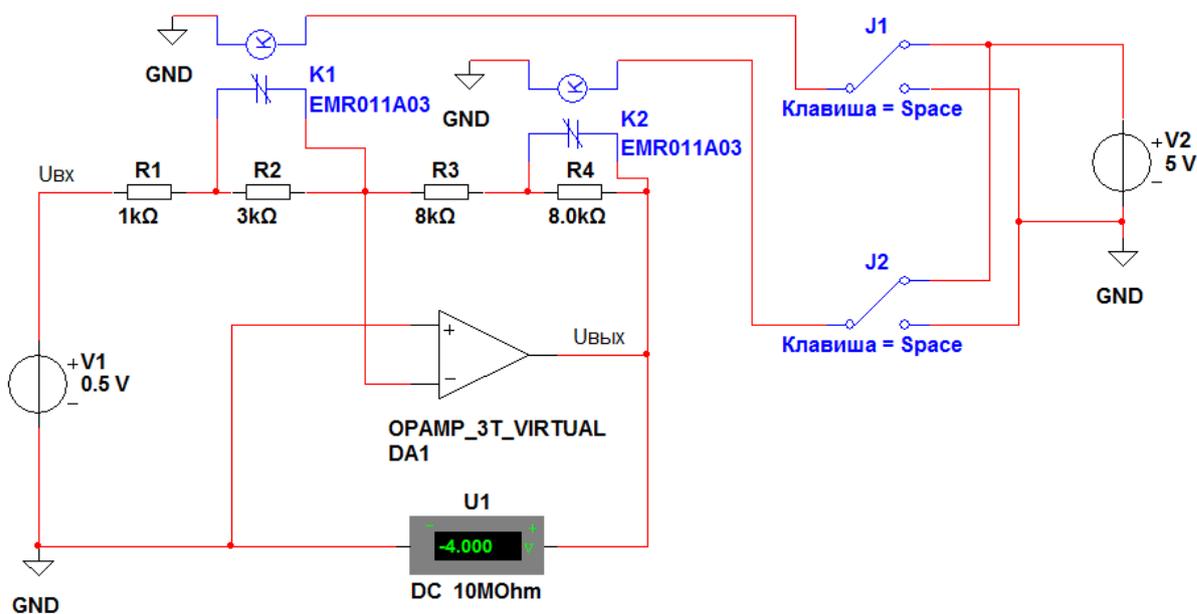


Рисунок 11.1 – Схема в Multisim для исследования инвертирующего ОУ с дискретным управлением коэффициента усиления



## 11.2 Порядок выполнения работы

11.2.1 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 11.1.

11.2.2 В соответствии с параметрами резисторов и величиной входного напряжения  $U_{BX}$ , указанных на схеме (см. рисунок 11.1), рассчитать коэффициенты усиления  $K_{y1}...K_{y4}$  и выходные напряжения  $U_{ВЫХ}$  усилителя и занести их в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Результаты исследований

Параметры	Положение клавиш J1 и J2			
	J1 отжата, J2 отжата	J1 нажата, J2 отжата	J1 отжата, J2 нажата	J1 нажата, J2 нажата
$U_{BX}, В$				
$U_{ВЫХ}, В$				
$K_y = U_{ВЫХ} / U_{BX}$				
$K_{y1}$				
$K_{y2}$				
$K_{y3}$				
$K_{y4}$				

11.2.3 Включить моделирование. Изменяя положение клавиш J1 и J2 в соответствии с таблицей 11.1, зарегистрировать показания вольтметра U1, рассчитать коэффициенты усиления для каждого случая по формуле  $K_y = U_{ВЫХ} / U_{BX}$  и записать полученные результаты в таблицу. Сравнить полученные результаты.

11.2.4 Заменить в схеме реле K1 и K2 клавишами J1 и J2 и повторить действия, изложенные в п. 11.2.3.

### Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать название работы, цель работы, схемы усилителя с дискретной регулировкой коэффициента усиления, расчетные формулы, результаты исследований и вычислений, представленные в табличной форме, выводы.

### Контрольные вопросы

1 Перечислите известные способы управления коэффициентом усиления схемы на ОУ.

2 Как реализуется на практике способ управления коэффициентом усиления с помощью реле?

3 Как реализуется на практике способ управления коэффициентом усиления с помощью клавиш?

## 12 Лабораторная работа № 12. Исследование усилителя с автоматической регулировкой коэффициента усиления

**Цель работы:** исследование работы усилителя на ОУ с автоматической регулировкой коэффициента усиления.

### 12.1 Основные теоретические положения

Схемы усилителей с автоматической регулировкой усиления (АРУ) для изменения коэффициента  $K_y$  используют элементы с электрически изменяемым сопротивлением, например, биполярные или полевые транзисторы. Общая структурная схема системы АРУ приведена на рисунке 12.1.

Переменный сигнал  $U_{ВЫХ}$  с выхода основного усилителя 1 подается на усилитель АРУ 2 для усиления, а затем выпрямляется выпрямителем 3, фильтруется фильтром нижних частот 4 и с помощью усилителя постоянного тока 5 согласуется с передаточной характеристикой нелинейного элемента и подается на управляющий вход основного усилителя.

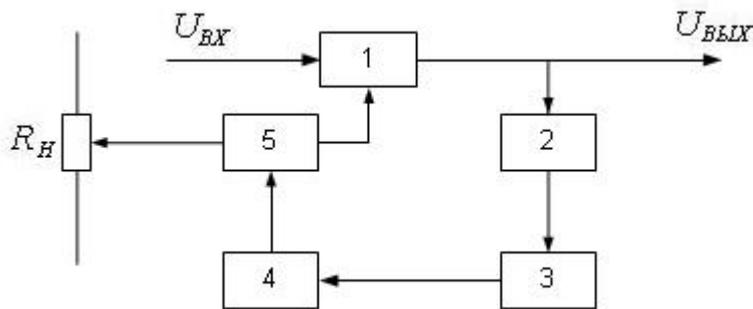


Рисунок 12.1 – Структурная схема усилителя с АРУ

В исследуемой схеме при отсутствии входного сигнала транзистор VT1 находится в режиме отсечки, определяемом постоянным напряжением +15 В, приложенным к затвору. Автоматическая регулировка коэффициента усиления отсутствует до тех пор, пока амплитуда напряжения на выходе усилителя DA3 не достигнет 2 В, после чего открываются переходы база–эмиттер VT2 и VT3, что приводит к уменьшению обратного напряжения смещения на затворе VT1. При этом уменьшается динамическое сопротивление канала VT1, что эквивалентно ослаблению входного сигнала.

### 12.2 Порядок выполнения работы

12.2.1 В отчете нарисовать схему усилителя с автоматической регулировкой усиления на ОУ DA3, транзисторах VT1, VT2, VT3 в соответствии со схемой электрической принципиальной устройства сменного УС1.

12.2.2 В разъем, расположенный на передней панели учебного стенда К32, вставить сменное устройство УС1.

12.2.3 Включить генератор ЛЗ1, мультиметр и К32, нажав кнопку «СЕТЬ» и кнопку «+15–15» в блоке «ПИТАНИЕ V».

12.2.4 Соединить кабелями выход генератора ЛЗ1 с БУ и БУ со входом осциллографа. При помощи проводника подать сигнал с генератора ГС2 на Вход 2 блока «КОММУТАТОР». Нажать кнопки  $V_{C_{в}}$  |  $V_{нК}$  над этими гнездами.

12.2.5 Получить на экране осциллографа сигналы на входе и на выходе усилителя ДАЗ. Выполнить изменение его амплитуды с помощью ручки « $\curvearrowright$ » от  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$ .

12.2.6 Изменяя амплитуду сигнала на входе усилителя наблюдать за изображением выходного сигнала. Зарисовать осциллограммы напряжений для разных значений амплитуды входного сигнала. Сделать выводы по результатам исследований. Объяснить принцип работы схемы, обеспечивающей автоматическую регулировку усиления.

### ***Содержание отчета***

Отчет о проделанной работе должен содержать: название работы, цель работы, осциллограммы наблюдаемых сигналов, выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Как определяется коэффициент усиления усилителя?
- 2 За счет чего удается заставить коэффициент усиления?
- 3 Как работает автоматическая регулировка коэффициента усиления?

## **13 Лабораторная работа № 13. Исследование работы компаратора аналоговых сигналов**

***Цель работы:*** исследование работы компаратора аналоговых сигналов на основе операционного усилителя.

### ***13.1 Основные теоретические положения***

Компараторами называют устройства, предназначенные для сравнения двух напряжений, поступающих на его входы. Одно из сравниваемых напряжений, называемое опорным, может быть постоянным или медленно меняющимся, другое обычно имеет большую скорость изменения. На выходе компаратора в зависимости от знака разности входных напряжений устанавливается максимальный уровень напряжения  $+U_{ВЫХ \max}$  или  $-U_{ВЫХ \max}$ . Большой коэффициент усиления интегральных ОУ обеспечивает установление высокого уровня или низкого уровня выходного напряжения при незначительном отличии входных напряжений.



Различают компараторы напряжений без гистерезиса и с гистерезисом. В компараторах без гистерезиса входное напряжение подается на инвертирующий вход, а опорное – на неинвертирующий вход (рисунок 13.1). Если  $U_{BX} < U_{ОП}$ , то  $U_{ВЫХ} = K_{ОУ}(U_{ОП} - U_{BX}) = U_{ВЫХ \max}$ .

При  $U_{BX} > U_{ОП}$   $U_{ВЫХ} = K_{ОУ}(U_{ОП} - U_{BX}) = -U_{ВЫХ \max}$ . Полярность выходного напряжения изменяется при переходе  $U_{BX}$  через значение  $U_{ОП}$  и ввиду большого значения коэффициента усиления ОУ ( $K_{ОУ} \cong 10^4 \dots 10^5$ ). Если поменять местами источники  $U_{BX}$  и  $U_{ОП}$  или изменить их полярность, то произойдет инверсия передаточной характеристики.

Компараторы напряжений с гистерезисом иначе называют триггером Шмитта (рисунок 13.2).

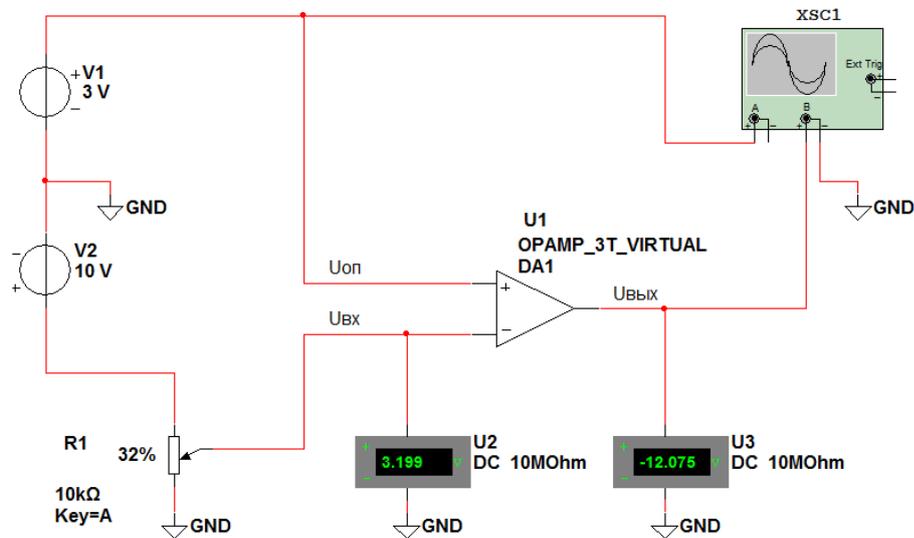


Рисунок 13.1 – Схема в Multisim для исследования компаратора напряжений на ОУ без гистерезиса

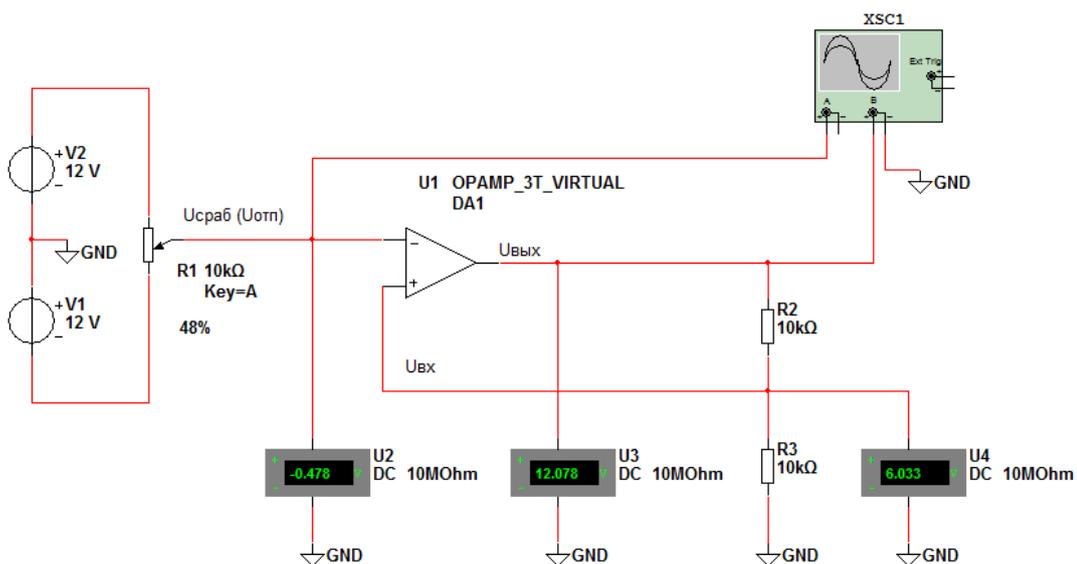


Рисунок 13.2 – Схема в Multisim для исследования компаратора напряжения на ОУ с гистерезисом



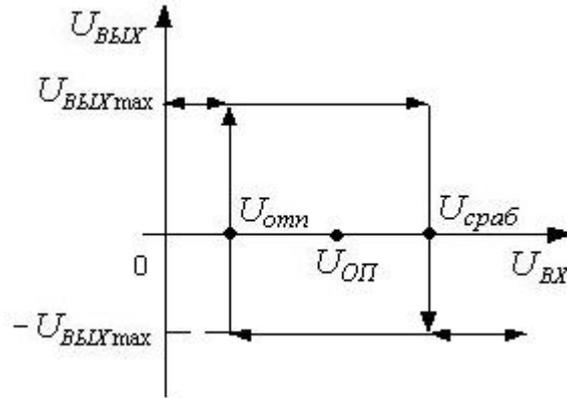


Рисунок 13.5 – Передаточная характеристика компаратора с гистерезисом и источником опорного напряжения

На основе компаратора на ОУ с гистерезисом можно получить преобразователь синусоидального напряжения в последовательность прямоугольных импульсов (рисунок 13.6).

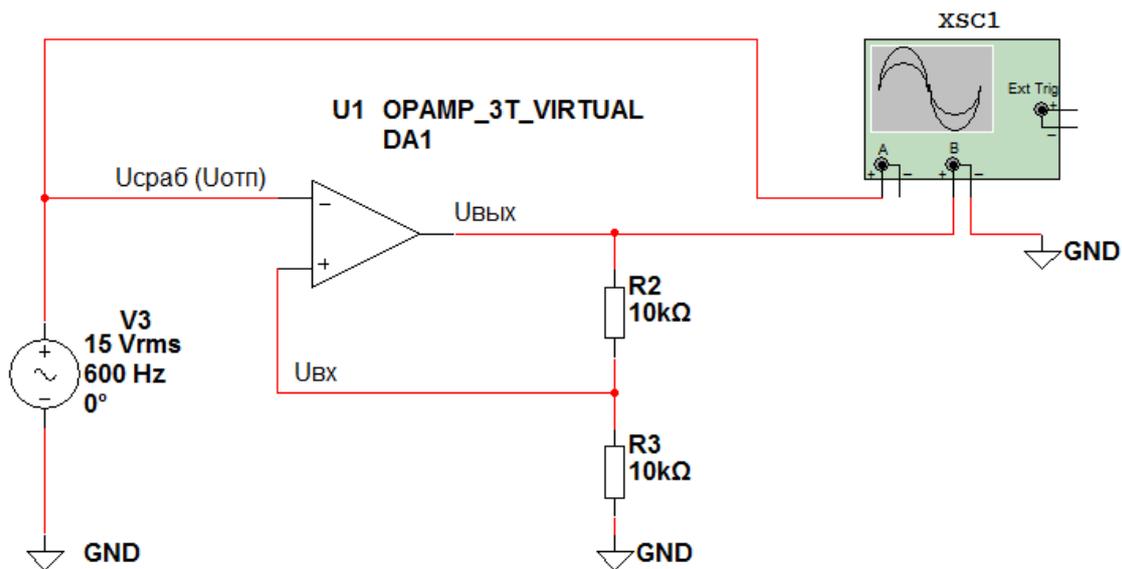


Рисунок 13.6 – Схема в Multisim для исследования компаратора на ОУ с гистерезисом для преобразования синусоидального напряжения в последовательность прямоугольных импульсов

## 13.2 Порядок выполнения работы

13.2.1 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 13.1.

13.2.2 Включить моделирование. Через канал А осциллографом XSC1 регистрируется сигнал  $U_{ОП}$ , через канал В – сигнал  $U_{ВЫХ}$ . Изменять величину напряжения  $U_{ВХ}$  с помощью потенциометра  $R1$  и следить за изменением его величины с помощью вольтметра XMM1 U2. С помощью вольтметра XMM1 U3 и осциллографа определить амплитуду  $U_{ВЫХ}$  при  $U_{ВХ} < U_{ОП}$ . и амплитуду

$U_{ВЫХ}$  при  $U_{ВХ} > U_{ОП}$ . При достижении какого значения напряжения  $U_{ВХ}$  происходит срабатывание компаратора?

13.2.3 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 13.2.

13.2.4 Включить моделирование. Через канал А осциллографом XSC1 регистрируется сигнал  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ), через канал В – сигнал  $U_{ВЫХ}$ . Изменять величину напряжения  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ) с помощью потенциометра R1 и следить за изменением его величины с помощью вольтметра ХММ1 U2. С помощью вольтметра ХММ1 U3 и осциллографа исследовать амплитуду  $U_{ВЫХ}$ . При достижении какого значения напряжения  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ) происходит срабатывание компаратора? Как формируется  $U_{ВХ}$ ? При достижении какого значения напряжения  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ) изменяется знак  $U_{ВЫХ}$ ?

13.2.5 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 13.4.

13.2.6 Включить моделирование. Через канал А осциллографом XSC1 регистрируется сигнал  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ), через канал В – сигнал  $U_{ВЫХ}$ . Изменять величину напряжения  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ) с помощью потенциометра R1 и следить за изменением его величины с помощью вольтметра ХММ1 U2. С помощью вольтметра ХММ1 U3 и осциллографа исследовать амплитуду  $U_{ВЫХ}$ . При достижении какого значения напряжения  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ) происходит срабатывание компаратора? Как формируется  $U_{ВХ}$ ? При достижении какого значения напряжения  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ) изменяется знак  $U_{ВЫХ}$ ? Сравнить полученные результаты с результатами п. 13.2.4.

13.2.7 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 13.6.

13.2.8 Включить моделирование. Через канал А осциллографом XSC1 регистрируется сигнал  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ), через канал В – сигнал  $U_{ВЫХ}$ . На инвертирующий вход ОУ подается сигнал синусоидальной формы от источника V3.

С помощью осциллографа исследовать амплитуду  $U_{ВЫХ}$ . При достижении какого значения напряжения  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ) происходит срабатывание компаратора? Как формируется  $U_{ВХ}$ ? При достижении какого значения напряжения  $U_{сраб}$  ( $U_{omn}$ ) изменяется знак  $U_{ВЫХ}$ ? Зарисовать полученные временные диаграммы выходных сигналов источника V3 и компаратора.

### ***Содержание отчета***

Отчет должен содержать название работы, цель работы, схемы электрические принципиальные исследуемых компараторов, диаграммы напряжений, выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Что такое компаратор?
- 2 Опишите принцип работы компаратора напряжений без гистерезиса.
- 3 Опишите принцип работы компаратора с гистерезисом.
- 4 Какой сигнал формируется на выходе компаратора?



## 14 Лабораторная работа № 14. Исследование аналоговых ключей и коммутатора аналоговых сигналов

**Цель работы:** исследование работы аналоговых ключей и коммутатора аналоговых сигналов на основе операционного усилителя.

### 14.1 Основные теоретические положения

ОУ могут выполнять роль аналоговых ключей (см. схему блока УС8). Когда транзистор VT1 закрыт, ОУ DA2 выполняет роль повторителя напряжения, подаваемого на инвертирующий вход. Аналогично работает ОУ DA3 с транзистором VT2. Когда эти транзисторы открыты, на выход 10 DA2 поступает сумма входных сигналов DA2 и DA3. Поочередное включение транзисторов VT1 и VT2 обеспечивает появление на выходе DA2 одного из входных сигналов, т. е. ОУ DA2 и DA3 совместно с транзисторами VT1 и VT2 выполняют роль коммутатора аналоговых сигналов.

### 14.2 Порядок выполнения работы

14.2.1 В отчете нарисовать схему аналоговых ключей на микросхемах DA2 и DA3 в соответствии со схемой электрической принципиальной УС8.

14.2.2 В разъем, расположенный на передней панели учебного стенда К32, вставить сменное устройство УС8.

14.2.3 Включить К32, генератор ЛЗ1 и мультиметр, нажав кнопки «СЕТЬ», « $\pm 15 В$ ».

14.2.4 Исследовать работу аналогового ключа на ОУ DA2, подав на его вход сигнал определенной формы, амплитуды и частоты (по заданию преподавателя). Управляя транзистором VT1 кнопкой Н1, наблюдать с помощью осциллографа сигнал на выходе DA2. Результаты исследований отразить в отчете.

14.2.5 Исследовать работу аналогового ключа на ОУ DA3 аналогично п. 14.2.4. Выходной сигнал DA3 наблюдать на выходе DA3.

14.2.6 Поочередно включая транзисторы VT1 и VT2, исследовать работу схемы на DA2 и DA3 в качестве коммутатора аналоговых сигналов. Результаты исследований отразить в отчете.

### Содержание отчета

Отчет должен содержать название работы, цель работы, схему электрическую принципиальную исследуемых аналоговых ключей и коммутаторов аналоговых сигналов, выводы.



### Контрольные вопросы

- 1 В каком режиме работает транзистор при передаче аналогового сигнала с входа на выход?
- 2 Как осуществляется выбор входа (канала) при передаче сигнала от нескольких источников на один?
- 3 Какое устройство называют коммутатором?

## 15 Лабораторная работа № 15. Исследование генераторов сигналов прямоугольной и треугольной форм

**Цель работы:** исследование работы генераторов сигналов прямоугольной и треугольной форм.

### 15.1 Основные теоретические положения

Исследуется работа генератора сигналов прямоугольной и треугольной форм на основе микросхемы таймера 555. Одно из классических применений этой микросхемы – регулируемый генератор прямоугольных импульсов (рисунок 15.1).

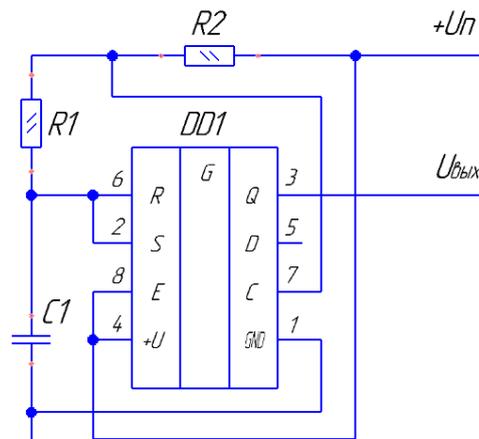


Рисунок 15.1 – Схема генератора прямоугольных импульсов на таймере 555

Резисторы  $R1$ ,  $R2$  и конденсатор  $C1$  задают период следования импульсов. Изменяя параметр одного из этих элементов, можно плавно или дискретно изменять частоту следования импульсов.

Работа генератора описывается выражением

$$F_{\Gamma} = \frac{0,7}{(2 \cdot R1 + R2) \cdot C1}. \quad (15.1)$$

С такой же частотой на конденсаторе  $C1$  формируется последовательность импульсов треугольной формы. Их амплитуда в три раза меньше амплитуды



прямоугольных импульсов. При необходимости они могут быть усилены, например, неинвертирующим усилителем на ОУ (рисунок 15.2).

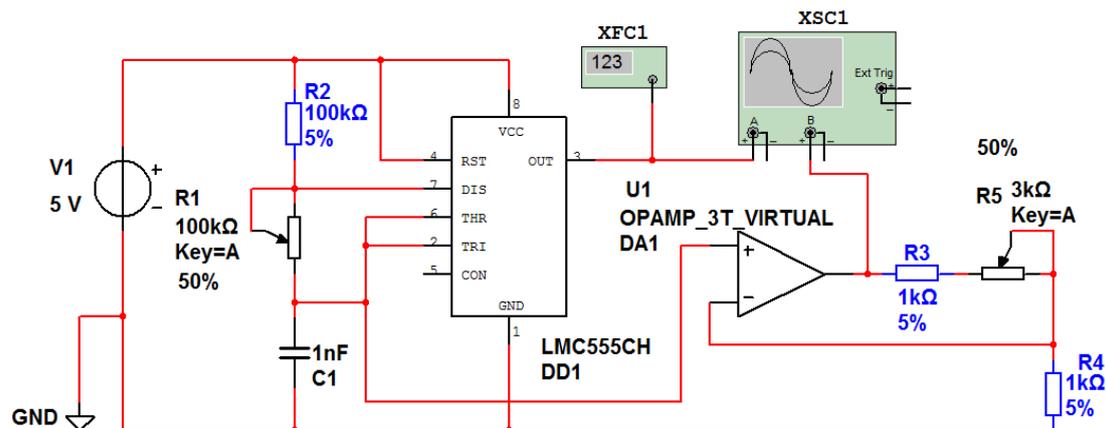


Рисунок 15.2 – Схема в Multisim для исследования генератора прямоугольных и треугольных импульсов

## 15.2 Порядок выполнения работы

15.2.1 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 15.2.

15.2.2 Включить моделирование. Через канал А осциллографом XSC1 регистрируются импульсы прямоугольной формы, через канал В – импульсы треугольной формы. Изменить сопротивление  $R2$  и наблюдать за изменением частоты импульсов с помощью осциллографа XSC1 и частотомера XFC1. Записать, в каком диапазоне изменяется частота. Изменять сопротивление  $R5$  и наблюдать за изменением амплитуды импульсов с помощью осциллографа XSC1. Амплитуда каких импульсов регулируется  $R5$ ? Записать диапазон изменения амплитуды импульсов. По параметрам резисторов  $R3$ ,  $R4$  и  $R5$  определить диапазон регулирования коэффициента усиления усилителя на DA1.

15.2.3 Повторить исследование генератора, увеличив емкость конденсатора  $C1$  в десять раз. Какой параметр генератора изменился?

### Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать название работы, цель работы, схему электрическую генератора сигналов прямоугольной и треугольной форм, временные диаграммы выходных сигналов генераторов, результаты расчетов и измерений, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

- 1 От каких параметров зависит частота выходного сигнала генератора?
- 2 Предложите способ дискретного регулирования частоты импульсов генератора на микросхеме 555.

## 16 Лабораторная работа № 16. Исследование работы стабилизатора напряжения

**Цель работы:** исследование работы стабилизаторов напряжения.

### 16.1 Основные теоретические положения

Для питания многих электронных устройств требуются источники со стабильным напряжением, не зависящим от изменения напряжения питающей сети и от тока нагрузки. Его получают путем включения между выпрямителем и нагрузкой специального устройства, называемого электронным стабилизатором напряжения.

Неизменное напряжение на нагрузке можно получить путем его стабилизации с помощью стабилитрона. Схема подключения стабилитрона и нагрузки к источнику ЭДС показана на рисунке 16.1. Такой стабилизатор называют параметрическим.

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.

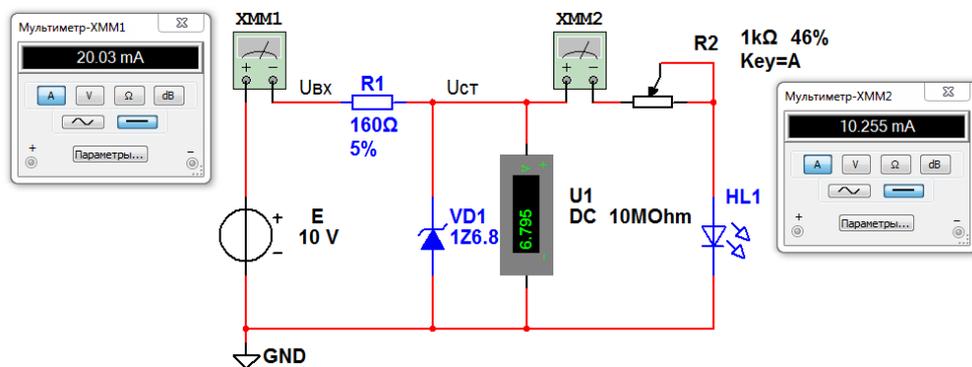


Рисунок 16.1 – Схема в Multisim для исследования параметрического стабилизатора напряжения

Входное напряжение распределяется между ограничивающим резистором  $R_1$  и стабилитроном  $VD_1$ :

$$E = U_{R_1} + U_{CT},$$

где  $U_{R_1} = (I_{CT} + I_H)R_1$ . Так как напряжение на стабилитроне  $U_{CT}$  в соответствии с вольт-амперной характеристикой почти не зависит от тока стабилитрона в пределах участка от  $I_{CTmin}$  до  $I_{CTmax}$ , то приращение входного напряжения  $\Delta U_{BX}$

равно приращению напряжения  $\Delta U_{R_{\text{огр}}}$ . Если ток нагрузки  $I_H = U_H / R_H = U_{CT} / R_H$  остается при этом неизменным, то

$$\Delta U_{BX} = \Delta U_{R1} = \Delta I_{CT} \cdot R1,$$

т. е. при изменении входного напряжения на значение  $\Delta U_{BX}$  ток стабилитрона изменяется на значение  $\Delta U_{BX} / R1$ .

При изменении тока нагрузки изменяется и ток стабилитрона в противоположном направлении, т. к. при неизменном входном напряжении сохраняется постоянство входного тока  $I_{BX} = I_{CT} + I_H = \text{const}$ .

Сопротивление ограничивающего резистора рассчитывается по формуле

$$R1 = \frac{E_{cp} - U_{CT}}{I_{CTcp} + I_H}.$$

где  $E_{cp}$  и  $I_{CTcp}$  – средние значения ЭДС входного источника напряжения  $E$  и тока стабилизации соответственно.

Мощность, рассеиваемую на этом резисторе, рассчитывают для случая, когда через него будет протекать наибольший ток (при  $E = E_{\text{max}}$ ):

$$P_{R1} = \frac{(E_{\text{max}} - U_{CT})^2}{R1}.$$

Широко используются в электронных устройствах компенсационные стабилизаторы напряжения. Принцип их работы состоит в том, что в процессе стабилизации с помощью измерительного устройства ИУ осуществляется сравнение выходного напряжения с опорным, вырабатываемым источником опорного напряжения (ИОН), например, стабилитроном (рисунок 16.2).

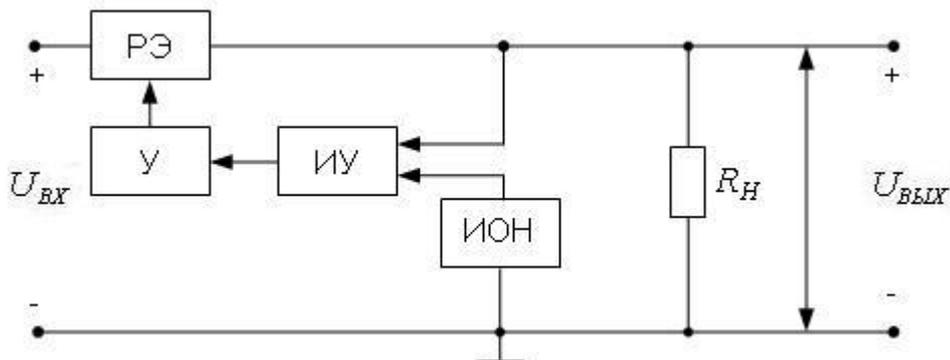


Рисунок 16.2 – Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения

Разностное напряжение усиливается усилителем  $U$  и подается на регулирующий элемент  $RЭ$ , изменяя его сопротивление так, чтобы выходное напряжение оставалось неизменным.

В работе исследуется компенсационный стабилизатор напряжения в интегральном исполнении LM338K (рисунок 16.3).

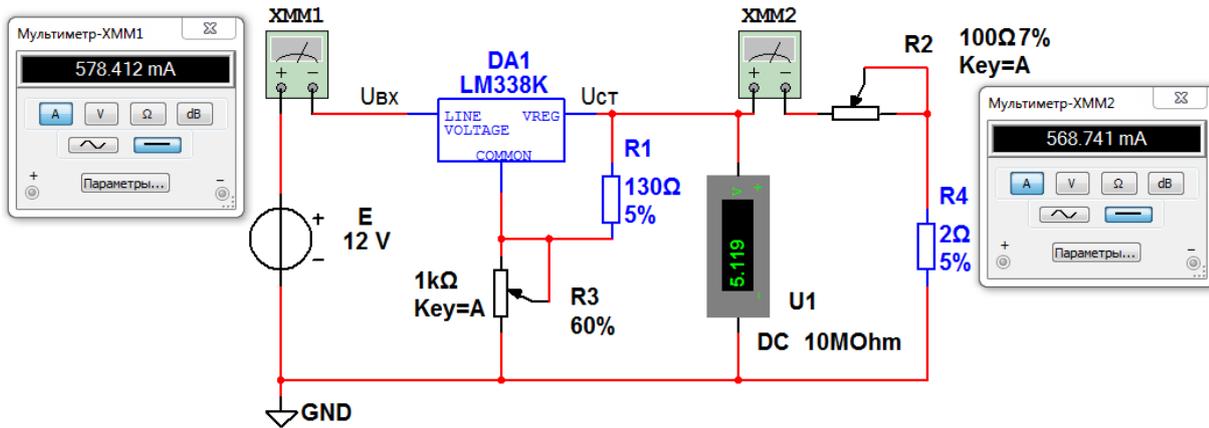


Рисунок 16.3 – Схема в Multisim для исследования компенсационного стабилизатора напряжения

Необходимое значение выходного напряжения устанавливается с помощью регулируемого делителя  $R1, R3$ . Резистором  $R2$  регулируется ток нагрузки, измеряемый мультиметром XMM2. Напряжение  $U_{CT}$  на выходе стабилизатора измеряется вольтметром U1. Ток, потребляемый от источника  $E$ , измеряется мультиметром XMM1.

Основным параметром стабилизаторов напряжения является коэффициент стабилизации

$$K_{CT} = \frac{U_{BX \max} - U_{BX \min}}{U_{ВЫХ CT1} - U_{ВЫХ CT2}} \quad (16.1)$$

## 16.2 Порядок выполнения работы

16.2.1 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 16.1.

16.2.2 Включить моделирование. Изменяя ЭДС источника  $E$  в диапазоне 8...12 В, записать показания приборов. Рассчитать  $K_{CT}$  по результатам моделирования.

16.2.3 Составить схему в среде Multisim в соответствии с рисунком 16.3.

16.2.4 Включить моделирование. Изменяя ЭДС источника  $E$  в диапазоне 12...20 В для тока в нагрузке 0,5 А, затем 5 А, записать показания приборов. Рассчитать  $K_{CT}$  по результатам моделирования. Какой ток потребляет микросхема стабилизатора напряжения DA1?

## Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать название работы, цель работы, схему электрическую принципиальную исследуемого стабилизатора напряжения, результаты экспериментальных данных, выводы.

## Контрольные вопросы

- 1 По какому принципу работают параметрические стабилизаторы напряжения?
- 2 По какому принципу работают компенсационные стабилизаторы напряжения?
- 3 Какой полупроводниковый элемент используется для стабилизации напряжения?
- 4 В каком диапазоне регулируется  $U_{CT}$  стабилизатора напряжения DA1?

## Список литературы

- 1 **Иванов, В. Н.** Электроника и микропроцессорная техника : учебник / В. Н. Иванов, И. О. Мартынова. – Москва : Академия, 2016. – 288 с.
- 2 **Титов, В. С.** Проектирование аналоговых и цифровых устройств : учебное пособие / В. С. Титов, В. И. Иванов, М. В. Бобырь. – Москва : ИНФРА-М, 2016. – 143 с.
- 3 **Миленина, С. А.** Электротехника, электроника и схемотехника : учебник и практикум для академ. бакалавриата / С. А. Миленина ; под ред. Н. К. Миленина. – Москва : Юрайт, 2015. – 399 с.
- 4 **Бладыко, Ю. В.** Электроника. Практикум: учебное пособие / Ю. В. Бладыко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2016. – 190 с.: ил.
- 5 **Horowitz, P.** The art of electronics. Third Edition / P. Horowitz, W. Hill. – New York (Cambridge): University Press, 2015. – 1192 с.

