

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
по курсу «Основы электроники»
для студентов специальности
152 «Метрология и информационно-измерительная техника»
в том числе иностранных студентов**

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 2 от 24.05.2018

Харьков
НТУ «ХПИ»
2018

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Основи електроніки», для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» у тому числі іноземних студентів

/ Уклад. І.В. Григоренко, М.В. Трохін, Є.А. Борисенко – Харків: НТУ «ХП», 2018.– 87 с.– Рос. мовою

Укладачі: І.В. Григоренко
 М.В. Трохін
 Є.А. Борисенко

Рецензент проф. Лазуренко О.П.

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій і систем

ВСТУПЛЕНИЕ

Предметом учебной дисциплины «Основы электроники» являются физические принципы, лежащие в основе работы приборов полупроводниковой микроэлектроники. Научно-методической основой дисциплины являются общая физика, математика, теоретические основы электротехники, теория электромагнитного поля, теория работы полупроводников. Дисциплина «Основы электроники» является не только одной из базовых дисциплин для подготовки бакалавров специальности 152 «Метрология и информационно-измерительная техника», она интегрирует знания, полученные студентами при изучении общенаучных дисциплин, и имеет своей целью достичь понимания студентами взаимосвязи между физическими закономерностями электронных процессов в твердых телах с конечными эксплуатационными характеристиками электронных приборов.

Значительное внимание во время изучения дисциплины отводится усвоению студентами контактных явлений в полупроводниковых материалах современной микроэлектроники, а также процессам генерации и рекомбинации неравновесных носителей заряда, поверхностным эффектам, исследованию физических принципов современной опто- и фотоэлектроники. Важным является умение студентов использовать возможности современной вычислительной микропроцессорной техники, а также информационных технологий (поиск необходимой информации в Интернете, пользование современным программным обеспечением и ЭВМ).

Данные методические указания предназначены для проведения лабораторного практикума по этой дисциплине.

Все лабораторные работы выполняются с применением компьютерного моделирования в среде Multisim. Multisim – средство разработки

и моделирования электронных схем. Multisim позволяет создать схему и эмулировать поведение интегральной схемы с помощью стандартного промышленного симулятора SPICE. Эта среда имеет обширную библиотеку моделей разнообразных по назначению аналоговых и цифровых электронных компонентов и позволяет составлять и исследовать принципиальные схемы практически неограниченной сложности.

Работа с электронной системой моделирования Multisim включает в себя три основных этапа: создание схемы, выбор и подключение измерительных приборов, и, наконец, активация схемы – расчет процессов, протекающих в исследуемом устройстве. В общем случае процесс создания схемы начинается с размещения на рабочем поле Multisim компонентов из библиотеки программы. Четырнадцать разделов библиотеки программы Multisim поочередно могут быть вызваны с помощью иконок, расположенных на панели инструментов.

Использование данного программного продукта способствует закреплению теоретических знаний, приобретению практических навыков решения задач расчета простых и сложных электрических схем, расчета усилителей на базе транзисторов, оценке качества функционирования электрических схем. Лабораторный практикум состоит из восьми лабораторных работ, которые постепенно усложняясь, создают у студентов базис, необходимый для освоения следующего электрического курса – «Аналоговая схемотехника».

Лабораторная работа 1

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С СИСТЕМОЙ MULTISIM

СОЗДАНИЕ СХЕМ В MULTISIM

Цель работы: обучить пользователя работе с программным пакетом Multisim.

Порядок выполнения работы:

1.1 Запустите программу Multisim.

2.2 Подготовьте новый файл для работы.

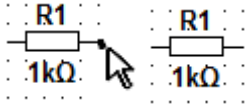



Для этого необходимо выполнить следующие операции из меню: **File/New/Design** и **File/Save as...** При выполнении операции **Save as...** будет необходимо указать имя файла и каталог, в котором будет храниться схема. Рекомендуется для создания каталога использовать следующий путь: **D:\USERS\APxxx\Ivanov\Filename**, где **APxxx** – индекс группы, например **AP42A**

2.3 Перенесите необходимые элементы для заданной схемы в рабочую область Multisim. Для этого необходимо выбрать раздел на панели инструментов (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog, TTL, CMOS, Master Database, Mixed, Indicators, Power, Misc., RF, Electro_Mechanical, NI_Components, Place(Junction), Place(Bus)), в котором находится нужный вам элемент. Затем перенести его на рабочую область (щёлкнуть левой клавишей мышки (ЛКМ) на нужном элементе и, не отпуская кнопки, перенести в нужное место схемы).

2.4 Соедините контакты элементов и расположите элементы в рабочей области для получения необходимой вам схемы. Для соединения двух контактов необходимо щёлкнуть по одному из контактов левой кнопкой мыши и, не отпуская клавишу, довести курсор до второго контакта (см. табл.1.1).

Нажатием на элементе правой кнопкой мыши можно получить быстрый доступ к простейшим операциям над положением элемента, таким как вращение (**90 Clockwise, 90 CounterCW**), разворот (**flip**), копирование / вырезание (**copy/cut**), вставка (**paste**), изменение цвета элемента (**Change color...**),

Таблица 1.1 – Выполнение соединения двух контактов в пошаговом режиме

1.		<p>Наведём курсор мыши на вывод элемента так, чтобы появилась чёрная точка контакта.</p>
2.		<p>Нажмем левую клавишу мыши, и, не отпуская её, проводим проводник к элементу, с которым надо наладить соединение.</p>
3.		<p>Когда проводник достигнет вывода другого элемента, появится его точка контакта, тогда кнопку мыши надо опустить.</p>
4.		<p>Два элемента электрически соединены.</p>

2.5 Проставьте необходимые номиналы и свойства каждому элементу. Для этого нужно дважды щелкнуть ЛКМ на элементе, после чего откроется окно свойств элемента (рис.1.1).

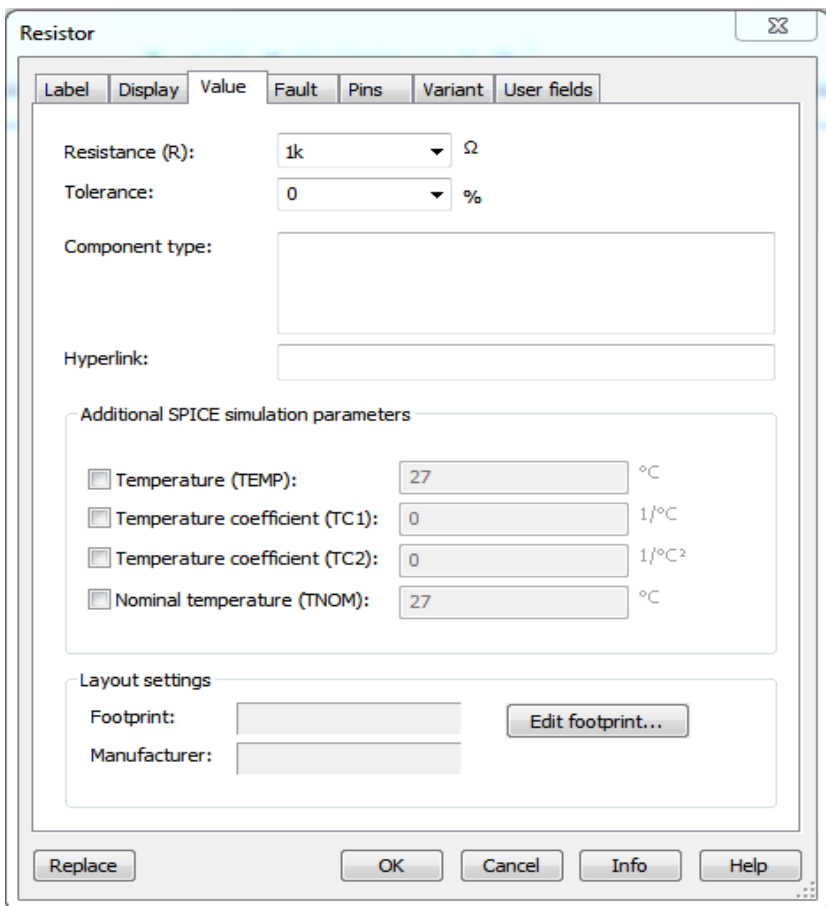



Рисунок 1.1 – Окно установки параметров элемента R

2.6 Когда схема собрана и готова к запуску, нажмите кнопку включения питания на панели инструментов. 

В случае серьезной ошибки в схеме (замыкание элемента питания накоротко, отсутствие нулевого потенциала в схеме) будет выдано предупреждение.

2.7 Произведите анализ схемы, используя инструменты индикации. Вывод передней панели прибора осуществляется двойным нажатием ЛКМ на элементе (рис.1.2).

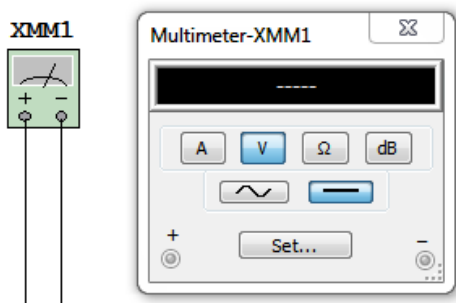



Рисунок 1.2 – Передняя панель мультиметра

В случае надобности можно пользоваться кнопкой .

Эксперимент 1. Измерение напряжения источника постоянного напряжения

Собрать схему в соответствии с рис.1.3.

Источник питания +12V и заземление (обязательное в большинстве схем) переносится при помощи манипулятора мышь с панели источника (**Sources**), а мультиметр – с панели инструментов.

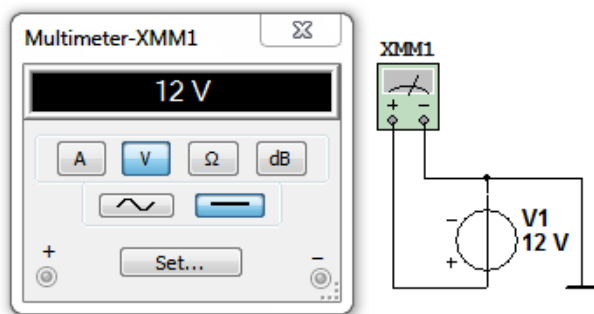


Рисунок 1.3 – Режим измерения напряжения

Соединения элементов выполняются мышью. Щелчок на элементе раскрывает его панель управления и индикации (у мультиметра) или ряд параметров элемента (у источника – величина и полярность напряжения, другие параметры).

Мультиметр должен быть включен в режиме измерения напряжений (V) постоянного тока (-). Включение питания производится тумблером, расположенным в правом верхнем углу рабочего окна программы. При включении питания вольтметр должен показать величину напряжения источника питания +12 V.

Изменить значение напряжения в соответствии с заданием (табл.1.2) и проконтролировать ее при помощи мультиметра. Результат измерения привести в отчете.

Таблица 1.2 – Величина напряжения источника питания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
U, В	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	1	3	5	7	9	11

Эксперимент 2. Измерение силы постоянного тока

Собрать схему в соответствии с рис.1.4. Мультиметр должен быть включен в режиме измерения силы тока (A).

Получить значение величины постоянного тока $I = 12.00$ mA.

Изменить значение напряжения источника питания и значение сопротивления резистора в соответствии с заданием (табл.1.3).

Снять показания мультиметра. Результат измерения привести в отчете.

Таблица 1.3 – Величина напряжения источника питания и сопротивления резистора

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U, В	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	1	3	5	7	9
R, кОм	1.5	2.4	3.2	4.6	5.7	3.1	4.2	3.4	5.9	7.3	0.8	1.7	2.2	2.7	3.8

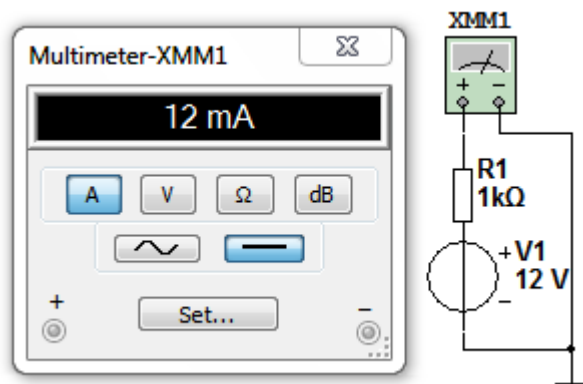


Рисунок 1.4 - Режим измерения тока

Эксперимент 3. Измерение сопротивления омметром

Собрать схему в соответствии с рис 1.5. Мультиметр в режиме измерения сопротивлений (Ω).

Получить заданное значение сопротивления $R1=1\text{ кОм}$

Изменить величину сопротивления в соответствии с заданием (табл.1.4) и замерить ее. Результат измерения привести в отчете.

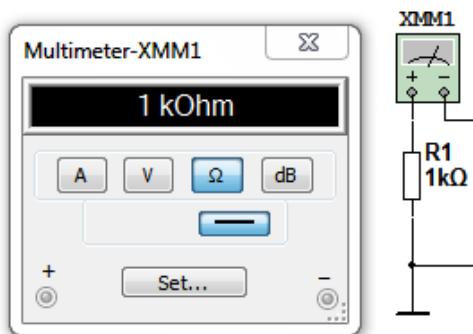


Рисунок 1.5 – Режим измерения сопротивления

Таблица 1.4 – Величина сопротивления резистора

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R, кОм	3.5	8.4	9.2	7.6	4.7	5.2	3.2	9.4	7.4	2.3	3.8	2.7	2.1	9.7	4.8

Эксперимент 4. Измерение напряжения и тока при помощи тестера

Собрать схему в соответствии с рис 1.6. Тестер (Measurement Probe)



находиться в панели приборов.

С помощью тестера можно измерять ток и напряжения в точке, которая вас интересует, не подключая никаких дополнительных приборов.

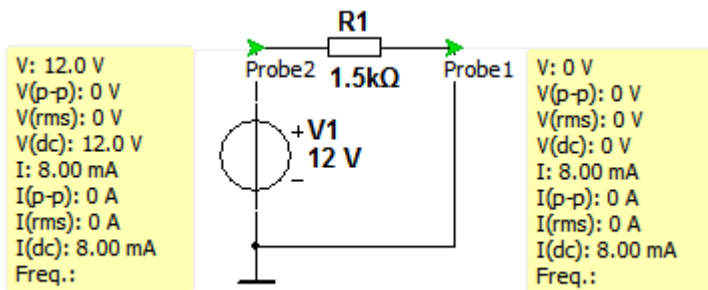


Рисунок 1.6 – Режим измерения напряжения и тока при помощи тестера

Измерить значения напряжения и силы тока в соответствии заданием (табл.1.5) Результат измерения привести в отчете.

Таблица 1.5 – Значения сопротивления резистора и напряжения источника питания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R , кОм	3.5	8.4	9.2	7.6	4.7	5.2	3.2	9.4	7.4	2.3	3.8	2.7	2.1	9.7	4.8
U , В	8	7	12	12	15	13	6	15	10	4	5	8	4	20	7

Содержание отчета

В отчете необходимо привести:

- цель работы;
- схемы экспериментов;
- результаты измерений;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Каким образом можно поместить необходимый компонент на рабочем поле? Как задать его характеристики?
2. Каким образом можно подключить вывод компонента к проводнику? Каким образом разорвать соединение?
3. Как проставить необходимые номиналы и свойства каждому элементу?
4. Какие параметры можно измерить с помощью мультиметра?
5. Каким образом изменяются параметры мультиметра?
6. Каким образом можно настроить мультиметр на измерения переменного и постоянного тока и сопротивления?
7. Каким образом можно настроить мультиметр на измерения переменного и постоянного напряжения?
8. Каким образом можно настроить мультиметр на измерения сопротивления?

Лабораторная работа 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: ознакомиться с делителями напряжения как примером четырехполюсников, и исследовать характеристики резистивных делителей напряжения при различных сопротивлениях нагрузки.

Краткие сведения из теории

Одним из видов преобразований сигнала является изменение его амплитуды. Обычно это получение данного напряжения $U_{\text{вых}}$ из большего по величине $U_{\text{вх}}$. Эта операция выполняется делителями напряжения.

Делители напряжения предназначены для получения определённого соотношения между входным U_1 и выходным U_2 напряжениями ($U_2 < U_1$). Выполняются они на параметрических элементах: резисторах, конденсаторах и индукторах (рис. 2.1).

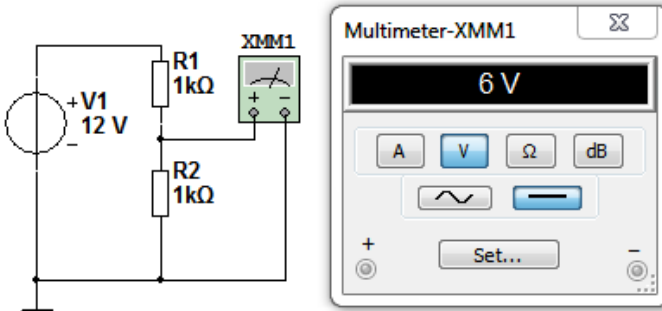


Рисунок 2.1 – Схема простейшего резистивного делителя напряжения

Делители напряжения широко используются в тех случаях, когда требуется ступенчатое изменение напряжения с постоянным или переменным шагом.

Если выход делителя не нагружен (холостой ход), то уравнение преобразования (коэффициент преобразования КП) на постоянном токе имеет вид

$$S = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + (R_1/R_2)}. \quad (2.1)$$

Применяют также понятие коэффициента деления $n = 1/S$.

В качестве сопротивления резистора R_1 может выступать выходное сопротивление первого каскада (устройства), а в качестве сопротивления R_2 – входное сопротивление следующего каскада (устройства). В этом случае, воспользовавшись уравнением для делителя напряжения, можно определить, какая часть выходного напряжения поступит на вход последующего каскада (в соответствии с теоремой об эквивалентном преобразовании схем).

Делители используются для расширения пределов измерения приборов с высоким сопротивлением (таких как ламповые и цифровые вольтметры, компенсаторы).

Относительная погрешность делителя

$$\delta_S = (1 - S) \cdot (\alpha_{R_2} - \alpha_{R_1}), \quad (2.2)$$

где α_{R_1} и α_{R_2} – относительные погрешности соответствующих участков резисторов R_1 и R_2 , т.е. отклонение действительных значений их сопротивлений от номинальных.

Если на выходе делителя включена нагрузка R_H , то выражение для КП принимает вид

$$S_H = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_H}\right)}. \quad (2.3)$$

Делитель напряжения может быть и регулируемым (рис.2.2).

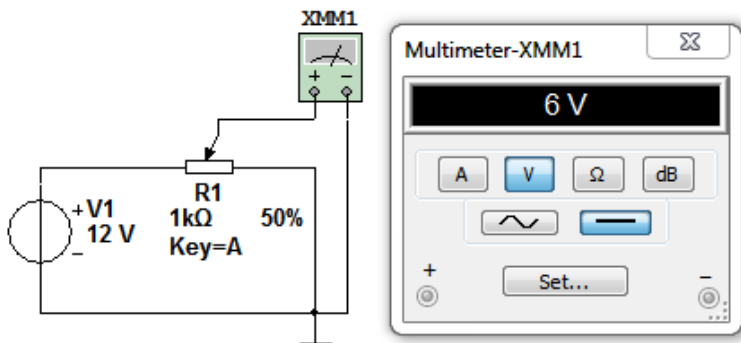


Рисунок 2.2 – Схема регулируемого резистивного делителя напряжения

Входное напряжение U_1 подводится к зажимам, при этом через резистор протекает ток I_1 , создающий на нем падение напряжения, равное U_1 . Выходное напряжение U_2 снимается с той части резистора, которая заключена между движком (подвижной частью переменного резистора) и общей точкой делителя, т.е. с сопротивления r .

Если движок находится в нижнем положении, то сопротивление r между движком и нижней общей точкой, а также выходное напряжение U_2 и КП равны нулю. Если движок установлен в верхнее положение (т.е. $r = R$), то $U_2 = U_1$, а КП = 1.

Таким образом, в делителях напряжения, собранных по схеме рис. 2.2, КП может плавно меняться от 0 до 1.

В реальных устройствах к выходным зажимам делителя подключают резистивную нагрузку. Сопротивление этой нагрузки является входным сопротивлением нагрузочного устройства, на вход которого подается напряжение, снимаемое с делителя (рис. 2.3).

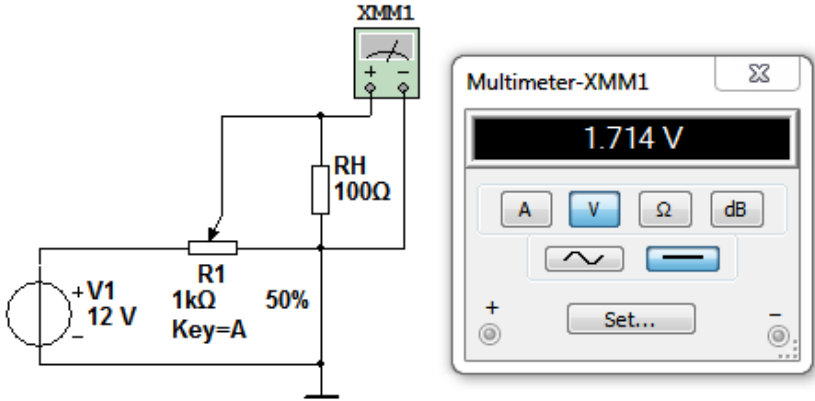


Рисунок 2.3 – Схема регулируемого делителя напряжения с нагрузкой r

Определим зависимость КП плавно регулируемого делителя напряжения, нагруженного на резистор сопротивлением R_H (рис. 2.3), в зависимости от коэффициента $\alpha = r/R$.

КП равен отношению выходного сопротивления $R_{\text{ВЫХ}} = \frac{r \cdot R_H}{r + R_H}$ к

входному $R_{\text{ВХ}} = R - r + \frac{r \cdot R_H}{r + R_H}$, после несложных преобразований получаем

$$K = \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{r R_H}{R r - r^2 + R R_H} = \frac{\frac{r}{R} \cdot \frac{R_H}{R}}{\frac{r}{R} - \frac{r^2}{R^2} + \frac{R_H}{R}} = \frac{\alpha \cdot \frac{R_H}{R}}{\alpha - \alpha^2 + \frac{R_H}{R}} \quad (2.4)$$

Если $R_H = \infty$ (режим холостого хода), то $K = r/R$. В этом случае КП изменяется линейно с изменением коэффициента α и для переменных резисторов с линейной функциональной характеристикой пропорционален углу поворота движка резистора.

Если сопротивление R_H сравнимо с сопротивлением делителя r , то КП изменяется непропорционально углу поворота. Происходит это потому, что выходное сопротивление делителя $R_{\text{ВЫХ}} = \frac{r \cdot R_H}{r + R_H}$ при повороте движка растет медленнее, чем увеличивается сопротивление r , выходное же напряжение и КП зависят от выходного сопротивления делителя. Поэтому выходное напряжение нарастает сначала медленно, а затем резко увеличивается.

Делители напряжения изготавливаются промышленностью из манганинового провода или микропровода в стеклянной изоляции. Они обычно имеют несколько дискретных значений коэффициентов преобразования. Различают делители с постоянным входным сопротивлением, в которых переменным является выходное сопротивление и, следовательно, выходное напряжение при постоянном входном, а также с постоянным выходным сопротивлением при переменном входном.

Эксперимент 1. Исследование резистивного делителя напряжения

1. Соберите схему делителя напряжения, представленную на рис. 2.1. при $R_1 = R_2 = 10$ кОм. Подайте на него напряжение $U_{\text{ВХ}}$ (варианты напряжений приведены в табл.2.1). Включите режим моделирования. Измерьте с помощью вольтметра выходное напряжение схемы без нагрузки (холостой ход х.х.).

Таблица 2.1 – Величина напряжения источника питания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{\text{ВХ}}$, В	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

2. Добавьте нагрузку 10 кОм и проведите измерения выходного напряжения. Запишите показания в раздел «Результаты экспериментов».

3. Замкните нагрузку накоротко ($R_H=0$) и измерьте ток в схеме (ИЗ). По этому значению и по значению напряжения на выходе ненагруженной схемы (на холостом ходу) рассчитайте эквивалентную схему делителя (рис.2.4).

Вспомните теорему об эквивалентном преобразовании схем, которая утверждает, что всякую схему, состоящую из источников напряжения и имеющую 2 вывода, можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из одного резистора $R_{\text{ЭКВ}}$, последовательно подключённого к одному источнику напряжения $U_{\text{ЭКВ}}$. Как же определить эквивалентные параметры $R_{\text{ЭКВ}}$ и $U_{\text{ЭКВ}}$ для заданной схемы?

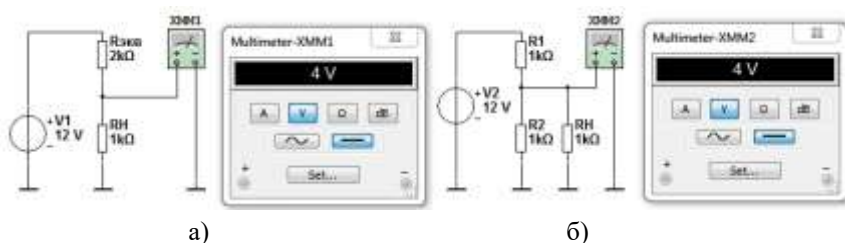


Рисунок 2.4 – Эквивалентная схема делителя напряжения

$U_{\text{ЭКВ}}$ – это напряжение между выводами эквивалентной схемы в её разомкнутом (ненагруженном) состоянии; поэтому, так как обе схемы работают одинаково, это напряжение совпадает с напряжением между выводами данной схемы в её разомкнутом состоянии (его можно определить путём вычислений, если схема известна, или измерить). После этого можно определить $R_{\text{ЭКВ}}$, если учесть, что ток в эквивалентной схеме, при условии, что она замкнута, равен $U_{\text{ЭКВ}}/R_{\text{ЭКВ}}$. Иными словами

$$U_{\text{ЭКВ}} = U_{\text{ХХ}},$$

где $U_{\text{ХХ}}$ – напряжение холостого хода.

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{U_{\text{ХХ}}}{I_{\text{КЗ}}},$$

где $I_{\text{КЗ}}$ – ток короткого замыкания.

Применяя данный метод к делителю напряжения, имеем:

1. Напряжение при разомкнутой цепи:

$$U_{XX} = U_{BX} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

2. Ток замкнутой накоротко цепи

$$I_{K3} = \frac{U_{BX}}{R_1}.$$

Эквивалентная схема представляет собой источник напряжения

$$U_{\text{ЭКВ}} = U_{BX} \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$
 к которому, последовательно подключён ре-

зистор с сопротивлением $R_{\text{ЭКВ}} = R_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$.

Соберите полученную эквивалентную схему, используя стабилизированный источник питания с изменяемым напряжением. Проверьте соответствие расчётных значений выходного напряжения на холостом ходу и тока в режиме короткого замыкания. Запишите показания в раздел «Результаты экспериментов». Добавьте нагрузку 10 кОм, как и для исходного делителя и убедитесь, что схема ведёт себя точно так же.

Содержание отчета

В отчете необходимо привести:

- цель работы;
- схемы экспериментов;
- результаты экспериментов;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Для чего можно использовать делители напряжения?
2. Что дает применение теоремы об эквивалентном генераторе?
3. Какой вклад в погрешность выходного напряжения вносят погрешности каждого из резисторов делителя напряжения?
4. Можно ли рассчитать делитель напряжения, у которого нижний (по схеме) вывод резистора R_2 (рис 2.4, б) подключен не к земле, а к источнику постоянного напряжения? Постарайтесь обосновать свои выводы.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ В ПРОСТЫХ ЦЕПЯХ

Цель работы: анализ амплитудно-фазовых соотношений для тока и напряжения в резисторе, конденсаторе и катушке индуктивности при гармоническом воздействии. Исследование амплитудно-фазовых соотношений для токов и напряжений в цепях содержащих резистор, конденсатор и катушки индуктивности. Получение временных диаграмм токов и напряжений при гармоническом воздействии.

Краткие сведения из теории

1. Комплекс емкостного сопротивления

$$\dot{X}_C = -jx_C = x_C e^{-j90^\circ}, \quad (3.1)$$

где x_C – модуль емкостного сопротивления вычисляется по формуле

$$x_C = 1/(2\pi fC); \quad (3.2)$$

C – емкость; f – частота гармонического сигнала.

2. Комплекс индуктивного сопротивления

$$\dot{X}_L = jx_L = x_L e^{j90^\circ}, \quad (3.3)$$

где x_L – модуль индуктивного сопротивления вычисляется по формуле

$$x_L = 2\pi fL; \quad (3.4)$$

L – величина индуктивности; f – частота гармонического сигнала.

3. Полное комплексное сопротивление двухполюсника

$$\dot{Z} = R + j(x_L - x_C) = z e^{j\varphi}, \quad (3.5)$$

где z – модуль комплексного сопротивления, равный

$$z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad (3.6)$$

x – реактивное сопротивление двухполюсника, равное

$$X = x_L - x_C. \quad (3.7)$$

4. Закон Ома в комплексной форме

$$\dot{U} = \dot{I} \dot{Z}. \quad (3.8)$$

5. Комплексное значение амплитуды напряжения

$$\dot{U} = U_m \cdot e^{j\varphi_U}. \quad (3.9)$$

6. Комплексное значение амплитуды тока

$$\dot{I} = I_m \cdot e^{j\varphi_I}. \quad (3.10)$$

Эксперимент 1. Резистор на переменном токе

Исходные данные: Частота $f = 50$ Гц, $R_2 = 1$ Ом. Действующее значение напряжения E , В и величину сопротивления R_1 , Ом взять из табл.3.1.

1.1 Измерение действующего значения тока в цепи.

Рассчитайте действующее значение тока в цепи. Соберите схему (рис.3.1). Подключите амперметр и проверьте правильность расчета.

1.2 Измерение фазы тока.

Подключите осциллограф и проверьте соответствие экспериментального значения фазы тока теоретическому.

1.3 Результаты эксперимента и расчетные значения занести в табл. 3.2.

Таблица 3.1 – Значения напряжения и величина сопротивления резистора

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
E , В	100	105	110	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
R_1 , Ом	99	104	109	119	124	129	134	139	144	149	154	159	164	169	174

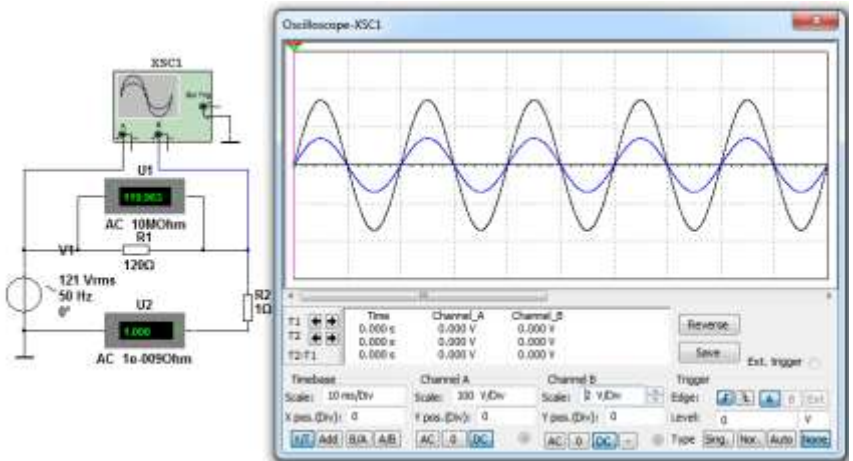


Рисунок 3.1 – Схема к эксперименту 1

Таблица 3.2 – Результаты эксперимента 1

	Расчет	Измерение
Ток, протекающий через $R2$	I , А	
Падение напряжения на $R2$	U , В	
Фаза тока, протекающего через $R2$	φ , град	
Комплекс тока	\dot{i} , А	

Эксперимент 2. Конденсатор на переменном токе

Исходные данные: Частота $f = 50$ Гц, $R2 = 1$ Ом. Действующее значение напряжения E , В и величину емкости $C1$, мкФ взять из табл.3.3.

2.1 Измерение действующего значения тока в цепи.

Рассчитайте действующее значение тока в цепи. Соберите схему (рис.3.2).

Подключите амперметр и проверьте правильность расчета.

2.2 Измерение фазы тока.

Подключите осциллограф и проверьте соответствие экспериментального значения фазы тока теоретическому.

2.3 Результаты эксперимента и расчетные значения занести в табл. 3.4.

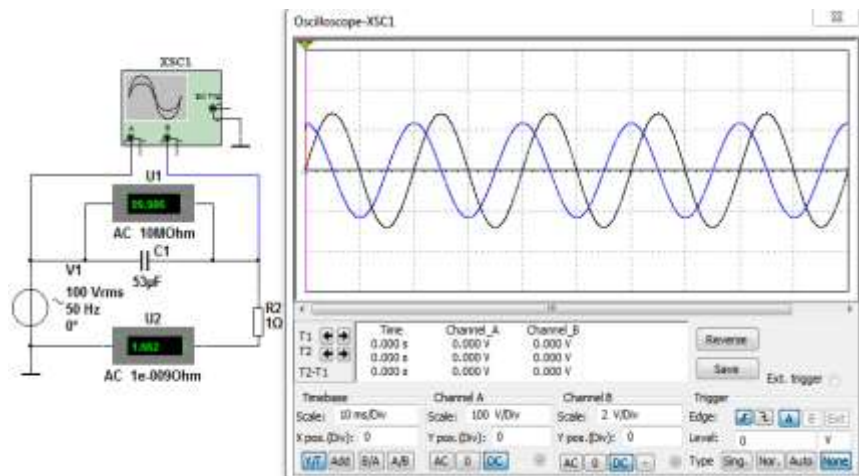


Рисунок 3.2 – Схема к эксперименту 2

Таблица 3.3 – Значения напряжения и величина емкости конденсатора

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
E , В	100	105	110	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
$C1$, мкФ	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64

Таблица 3.4 – Результаты эксперимента 2

	Теоретическое значение	Измерение	Расчет по результатам измерений
Ток, протекающий через C , I , А			
Период тока T , с		-	
Запаздывание тока ΔT , с	-		-
Фаза тока φ , град		-	
Комплекс тока \dot{I} , А		-	

Эксперимент 3. Катушка индуктивности на переменном токе

Исходные данные: Частота $f = 50$ Гц, $R1 = 1$ Ом. Действующее значение напряжения E , В и величину индуктивности $L1$, мГн взять из табл.3.5.

3.1 Измерение действующего значения тока в цепи.

Рассчитайте действующее значение тока в цепи. Соберите схему (рис.3.3).

Подключите амперметр и проверьте правильность расчета.

3.2 Измерение фазы тока.

Подключите осциллограф и проверьте соответствие экспериментального значения фазы тока теоретическому.

3.3 Результаты эксперимента и расчетные значения занести в табл. 3.6.

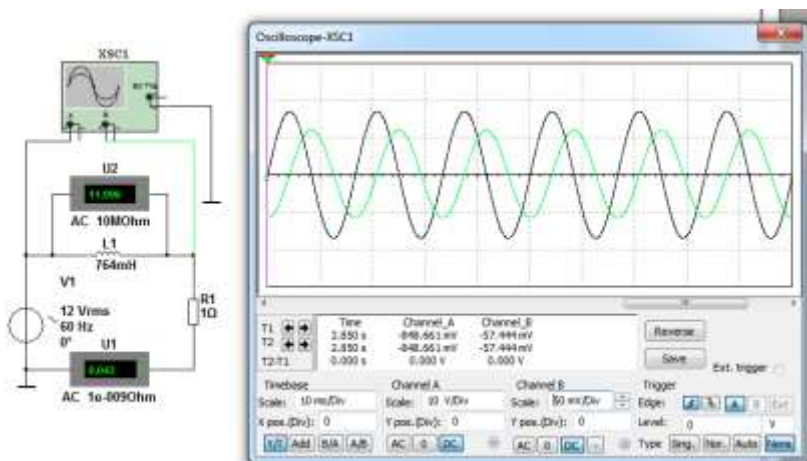


Рисунок 3.3 – Схема к эксперименту 3

Таблица 3.5 – Значения напряжения и величина индуктивности катушки

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$E, В$	100	105	110	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
$L1, мГн$	725	730	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780	785	790	795

Таблица 3.6 – Результаты эксперимента 3

	Теоретическое значение	Измерение	Расчет по результатам измерений
Ток, протекающий через $L, А$			
Период тока $T, с$			
Запаздывание тока, $\Delta T, с$			
Фаза тока $\varphi, град$			
Комплекс тока, $\dot{I}, А$			

Эксперимент 4. RC-цепь на переменном токе

Исходные данные: Частота $f = 50$ Гц, $R_2 = 1$ Ом. Действующее значение напряжения $E, В$, величину сопротивления $R_1, Ом$ и величину емкости $C_1, мкФ$ взять из табл.3.7.

4.1 Измерение действующих значений токов и напряжений в цепи. Для схемы рис. 3.4 рассчитайте входное комплексное сопротивление, комплекс тока в контуре, напряжения на каждом компоненте, используя формулы (3.1), (3.5), (3.8). Соберите схему (рис. 3.4). Результаты расчета проверьте экспериментально с помощью вольтметров и амперметра.

4.2 Измерение фазовых углов напряжений в цепи. Рассчитайте комплексы напряжений. Подключите осциллограф и проверьте соответствие экспериментальных значений фазовых сдвигов этих напряжений расчетным.

4.3 Результаты эксперимента и расчетные значения занести в табл. 3.8.

По результатам эксперимента постройте топографические векторные диаграммы

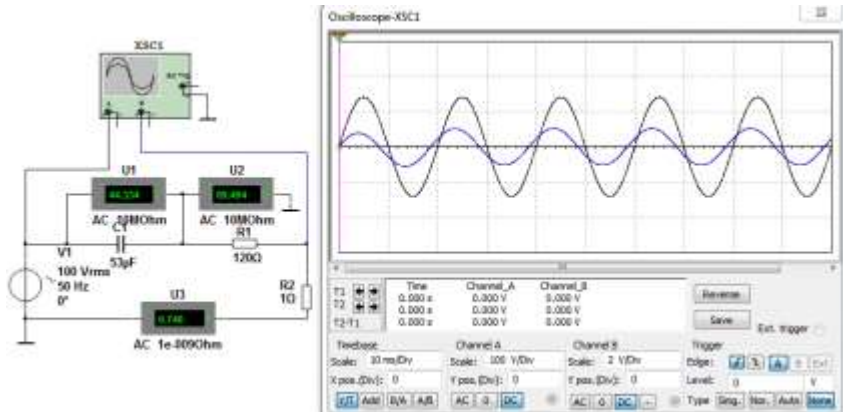


Рисунок 3.4 – Схема к эксперименту 4

Таблица 3.7 – Значения напряжения и величина емкости конденсатора

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$E, В$	100	105	110	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
$R1, Ом$	119	124	129	134	139	144	149	154	159	164	169	174	179	184	190
$C1, мкФ$	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64

Таблица 3.8 – Результаты эксперимента 4

	Расчет	Измерение
Входное комплексное сопротивление $\dot{Z}, Ом$		
Действующее значение тока в контуре $I, А$		
Действующее значение напряжения на резисторе $U_R, В$		
Действующее значение напряжения на конденсаторе $U_C, В$		
Период напряжения $T, с$		
Запаздывание напряжения $\Delta T, с$	-	
Фаза напряжения на C $\varphi, град$		-

Эксперимент 5. RL -цепь на переменном токе

Исходные данные: Частота $f = 50$ Гц, $R2 = 1$ Ом. Действующее значение напряжения $E, В$, величину сопротивления $R1, Ом$ и величину индуктивности $L1, мГн$ взять из табл.3.9.

5.1 Измерение действующих значений токов и напряжений в цепи.

Для схемы рис. 3.5 рассчитайте входное комплексное сопротивление, комплекс тока в контуре, напряжения на каждом компоненте, используя формулы (3.3), (3.5), (3.8). Соберите схему (рис. 3.5). Результаты расчета проверьте экспериментально с помощью вольтметров и амперметра.

5.2 Измерение фазовых углов напряжений в цепи.

Подключите осциллограф и проверьте соответствие экспериментальных значений фазовых сдвигов расчетным.

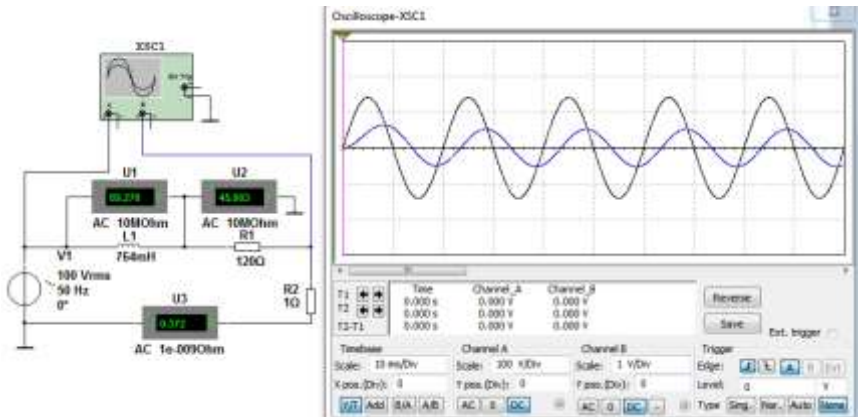


Рисунок 3.5 – Схема к эксперименту 5

5.3 Результаты эксперимента и расчетные значения занести в табл. 3.10. По результатам эксперимента постройте топографические векторные диаграммы.

Таблица 3.9 – Значения напряжения и величина емкости конденсатора

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
E , В	100	105	110	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
$R1$, Ом	60	65	70	75	80	85	90	100	105	110	115	120	125	130	135
$L1$, мГн	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325

Таблица 3.10 – Результаты эксперимента 5

	Расчет	Измерение
Входное комплексное сопротивление \dot{Z} , Ом		
Действующее значение тока в контуре I , А		
Действующее значение напряжения на резисторе U_R , В		
Действующее значение напряжения на индуктивности U_L , В		
Период напряжения T , с		
Запаздывание напряжения ΔT , с		
Фаза напряжения на C φ , град		

Содержание отчета

В отчете необходимо привести:

- цель работы;
- схемы экспериментов;
- результаты измерений и вычислений;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики гармонического сигнала?
2. Напишите выражение для связи между действующим, средним и амплитудным значениями гармонического сигнала?
3. Как сдвинуты друг относительно друга векторы тока и напряжения для резистора, конденсатора и катушки индуктивности?
4. Как изображаются гармонические токи и напряжения в комплексной форме (алгебраическая и показательная форма)?
5. Что такое комплексное сопротивление конденсатора и катушки индуктивности, как записать его в алгебраической и показательной форме?
6. Как измерить фазовый сдвиг между двумя сигналами?

Лабораторная работа 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Цель работы: исследование напряжения и тока диода при прямом и обратном смещении p - n перехода; построение и исследование вольт-амперной характеристики (ВАХ) для полупроводникового диода; исследование сопротивления диода при прямом и обратном смещении по вольтамперной характеристике; анализ сопротивления диода (прямое и обратное смещение) на переменном и постоянном токе; измерение напряжения изгиба вольтамперной характеристики.

Краткие сведения из теории

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на явлениях, происходящих на границе двух полупроводников с различными видами проводимости: p -типа и n -типа.

Переход между двумя полупроводниками разного типа проводимости называется электронно-дырочным переходом или p - n переходом.

В полупроводниках p -типа концентрация дырок Pp значительно выше концентрации электронов Pn

$$Pp \gg Pn ,$$

а в полупроводниках n -типа концентрация электронов np значительно выше концентрации дырок nr

$$np \gg nr.$$

Введём в соприкосновение эти два полупроводника и рассмотрим процессы на границе их соприкосновения (рис.4.1).

Вследствие разности концентраций электронов и дырок в n и p областях будет происходить процесс выравнивания концентраций зарядов путём диффузии (проникновения) электронов из n -области в p - область, а дырок из p - области в n - область.

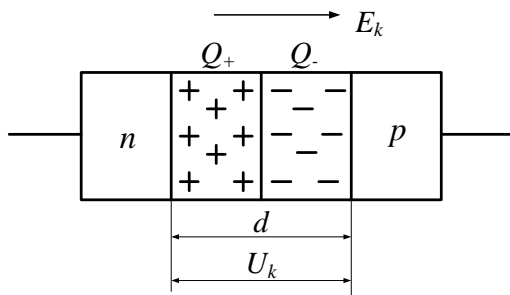


Рисунок 4.1 – Образование электронно-дырочного перехода

В пограничном слое в p - области образуется объёмный отрицательный заряд электронов Q_- , а приграничном слое n - области – положительный заряд дырок Q_+ . Наличие этих зарядов толщиной d , приводит к появлению между n - и p - областями контактной разности потенциалов U_k и электрического поля E_k . Контактная разность потенциалов U_k создаёт потенциальный барьер, препятствующий дальнейшему переходу электронов из n -области в p - область и переходу дырок из p - области в n - область. Величина U_k равна десятым долям вольта, а толщина слоя зарядов Q_- и Q_+ очень мала и лежит в пределах межатомных расстояний. Сопротивление приконтактной зоны очень велико, поэтому слой зарядов называют запирающим слоем, или электронно-дырочным переходом, или p - n -переходом.

Рассмотрим процессы в p - n переходе при подключении к нему внешнего источника напряжения $U_{ВН}$.

Если $U_{ВН}$ подключено плюсом к p - области, а минусом к n -области (рис. 4.2,а), то электрическое поле $E_{ВН}$, созданное внешним источником $U_{ВН}$, скомпенсирует тормозящее действие запирающего поля E_k , в результате чего суммарное электрическое поле в p - n - переходе $E_{\Sigma} = E_{ВН} - E_k$ будет иметь направление от p - области к n -области.

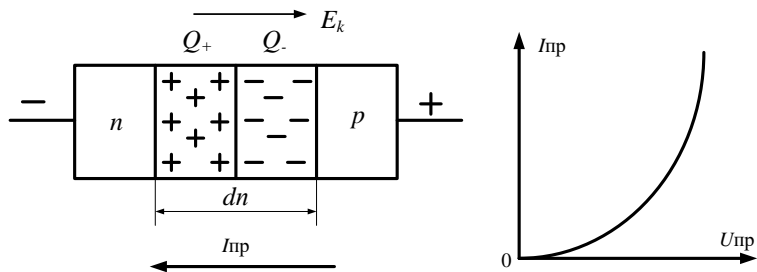


Рисунок 4.2 – Прямое включение $p-n$ перехода

Такое включение $p-n$ перехода называется прямым, а ток в цепи – прямым током $I_{пр}$. При прямом включении толщина dn запирающего слоя уменьшается по сравнению с толщиной d (рис.4.1), сопротивление $p-n$ перехода при прямом включении $R_{пр}$ становится малым и составляет десятые доли Ома. Прямой ток $I_{пр}$ тем больше, чем больше приложенное к $p-n$ переходу прямое напряжение $U_{пр}$ (рис. 4.2,б). Зависимость $I_{пр} = f(U_{пр})$ на рис. 4.2,б является вольтамперной характеристикой $p-n$ перехода при прямом включении.

Если источник внешнего напряжения $U_{вн}$ подключен плюсом к n -области, а минусом к p - области (рис. 4.3,а), то электрическое поле $E_{вн}$, созданное внешним источником $U_{вн}$, будет совпадать по направлению с тормозящим полем E_k $p-n$ перехода, увеличивая суммарное электрическое поле в $p-n$ переходе $E_{\Sigma} = E_{вн} + E_k$.

Запирающий слой $d_{обр}$ расширяется, потенциальный барьер увеличивается на величину $U_{вн}$. Переход основных носителей через переход затрудняется. Сопротивление $R_{обр}$ $p-n$ перехода при обратном включении велико и через него протекает малый обратный ток $I_{обр}$ (участок 0 - 1 на рис. 4.3,б), обусловленный неосновными носителями.

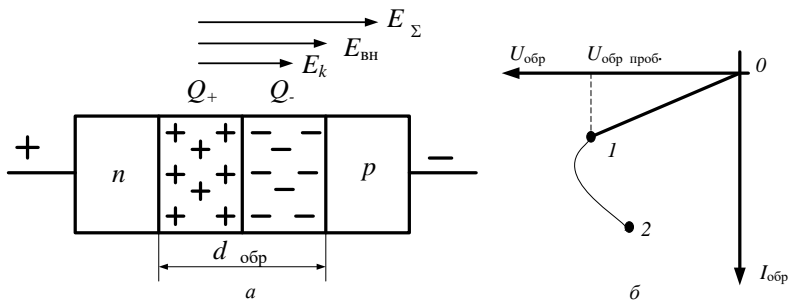


Рисунок 4.3 – Обратное включение $p-n$ перехода

При увеличении обратного напряжения $U_{обр}$ до некоторого значения $U_{обр\ проб}$ обратный ток резко возрастает (участок 1 - 2 на рис. 4.3,б). Лавинообразный процесс увеличения тока $I_{обр}$, начавшийся в точке 1, приводит на участке 1-2 к пробое $p-n$ перехода.

Обратное напряжение, при котором происходит пробой, называется обратным напряжением пробоя $U_{обр\ проб}$. Для различных $p-n$ переходов величина его лежит в пределах единицы – сотни вольт. Обратное сопротивление $R_{обр}$ составляет на участке 0 - 1 от десятков – сотен кОм до 1 МОм. Пробой может быть тепловым или электрическим. При тепловом пробое кристалл с $p-n$ переходом разрушается, а при электрическом пробое, не перешедшем в тепловой, кристалл не разрушается, свойства $p-n$ перехода обратимы и при снятии обратного напряжения $U_{обр}$ восстанавливаются.

Электронно-дырочный переход обладает емкостными свойствами. Ёмкость $p-n$ перехода складывается из барьерной $C_{бар}$ и диффузионной

$C_{диф}$:

$$C = C_{бар} + C_{диф}.$$

Диффузионная ёмкость $C_{\text{диф}}$ проявляется при прямом подключении p - n перехода. Её величина зависит от величины прямого напряжения $U_{\text{пр}}$, она обусловлена изменением зарядов слева и справа от p - n перехода в результате протекания диффузионного тока через него. Значение диффузионной ёмкости во много раз больше значения барьерной ёмкости и может быть до нескольких тысяч пикофарад.

Барьерная ёмкость $C_{\text{бар}}$ проявляется при обратном включении p - n перехода. Во всех электронных схемах практическое значение имеет именно $C_{\text{бар}}$. Величина барьерной ёмкости зависит от ширины и площади p - n перехода. Поэтому переход можно условно рассматривать как плоскопараллельный конденсатор. С ростом обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ ширина p - n перехода увеличивается, поэтому барьерная ёмкость уменьшается (рис. 4.4).

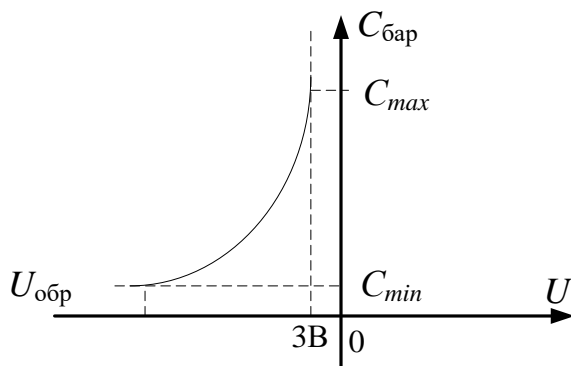


Рисунок 4.4 – Зависимость барьерной ёмкости от обратного напряжения.

Из рассмотренных свойств p - n перехода можно сделать главный вывод: он обладает односторонней проводимостью электрического тока

и вентильными свойствами. Это свойство p - n перехода легло в основу создания полупроводникового диода.

Полупроводниковым диодом называется полупроводниковый прибор с одним p - n переходом и двумя выводами. По конструкции диоды подразделяются на точечные и плоскостные.

Точечный диод представляет собой контакт пластинки полупроводника с металлической иглой. Из-за малой площади контакта прямой ток $I_{пр}$ и барьерная ёмкость $C_{бар}$ таких диодов малы, поэтому они применяются на высоких частотах.

Плоскостный диод представляет пластинку полупроводника n -типа, с одной стороны которой вплавляется капля трёхвалентного индия. Атомы индия диффундируют в пластинку и образуют у её поверхности p -область. Между областями p - и n -типов образуется p - n переход. Вывод от индия является анодом, а вывод от пластин катодом (рис. 4.5).

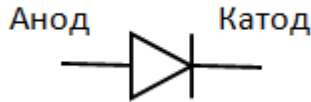


Рисунок 4.5 – Условное графическое обозначение диода.

Одним из достоинств Multisim является возможность смоделировать ситуации, возникающие при самых различных уровнях приборной оснащённости исследователя, и освоить методики измерения, соответствующие этим уровням. Рассмотрим эти ситуации на примере измерения вольтамперной характеристики полупроводникового диода. Проще всего в этом случае измерять напряжение на диоде в схеме рис. 4.6, подсоединяя к диоду через резистор источники напряжения различной величины. Ток диода при этом можно вычислять из выражения:

$$I_{пр} = (E - U_{пр})/R, \quad (4.1)$$

где $I_{пр}$ – ток диода в прямом направлении,

E – напряжение источника питания,

$U_{пр}$ – напряжение на диоде в прямом направлении.

Изменив полярность включения диода в той же схеме рис. 4.7, можно снять ВАХ диода по той же методике и в обратном направлении

$$I_{\text{обр}} = (E - U_{\text{обр}})/R, \quad (4.2)$$

где $I_{\text{обр}}$ – ток диода в обратном направлении,

$U_{\text{обр}}$ – напряжение на диоде в обратном направлении.

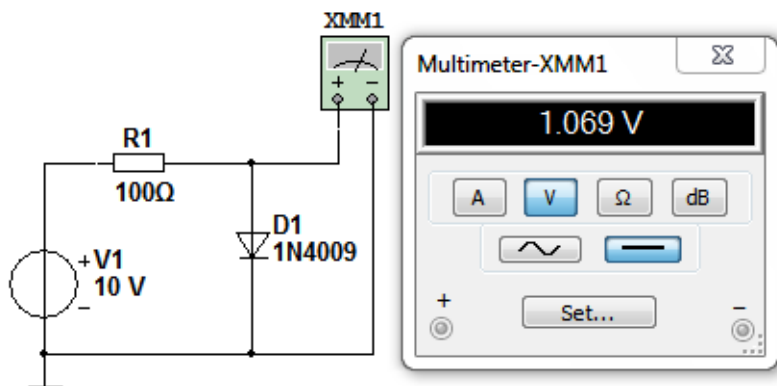


Рисунок 4.6 – Схема для измерения напряжения на диоде

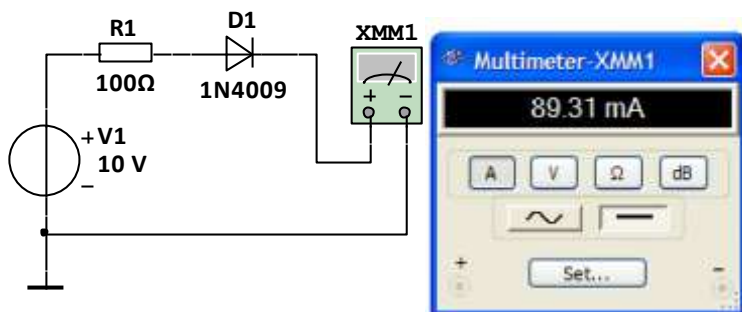


Рисунок 4.7 – Схема для измерения тока через диод

Точность при таких измерениях невысокая из-за разброса сопротивлений у резисторов одного номинала. И если необходимо получить более точную характеристику, используя только один мультиметр, необходимо сначала измерить напряжение в схеме рис. 4.6, а затем ток в схеме рис. 4.7. При этом можно пользоваться по-прежнему только мультиметром, подключая его то, как вольтметр, то, как амперметр. Гораздо быстрее можно выполнить эту работу, если у Вас имеется и вольтметр и амперметр. Тогда, включив их по схеме рис. 4.8, можно сразу видеть ток и напряжение на табло этих приборов.

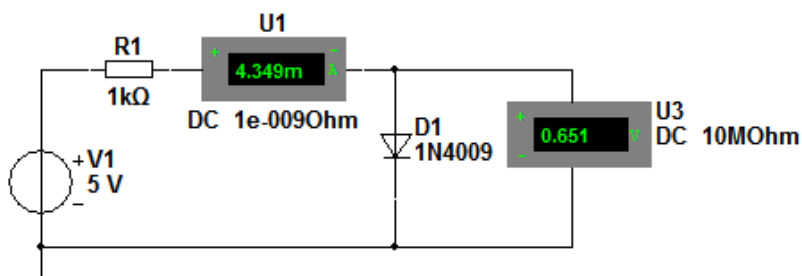


Рисунок 4.8 – Схема для снятия ВАХ диода с помощью амперметра и вольтметра

Вольтамперная характеристика (ВАХ) может быть получена путем измерения напряжений на диоде при протекании различных токов за счет изменения напряжения источника питания V_s . И наконец, наиболее быстро и удобно можно исследовать ВАХ, непосредственно наблюдая ее на экране осциллографа (рис. 4.9).

При таком подключении координата точки по горизонтальной оси осциллографа будет пропорциональна напряжению, а по вертикальной – току через диод. Поскольку напряжение в вольтах на резисторе $R1 = 1 \text{ Ом}$ численно равно току через диод в амперах ($I = U/R = U/1 = U$), по вертикальной оси можно непосредственно считывать значения тока. Если на осциллографе выбран режим В/А, то величина, пропорциональная току через диод (канал В), будет откладываться по вертикаль-

ной оси, а напряжение (канал А) – по горизонтальной. Это и позволит получить вольтамперную характеристику непосредственно на экране осциллографа.

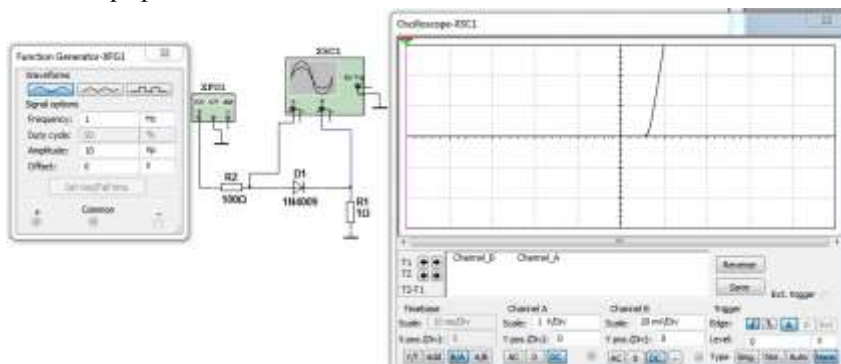


Рисунок 4 9 – Схема для снятия ВАХ диода с помощью осциллографа

Для более точного измерения напряжения можно измерять ток с помощью датчика тока. Из-за нелинейности диода его нельзя охарактеризовать величиной сопротивления, как линейный резистор. Отношение напряжения на диоде к току через него U/I , называемое статическим сопротивлением, зависит от силы тока. В ряде применений на существенную постоянную составляющую тока диода накладывается небольшая переменная составляющая (обычно при этом говорят, что элемент работает в режиме малых сигналов). В этом случае интерес представляет дифференциальное (или динамическое) сопротивление dU/dI . Величина динамического сопротивления зависит от постоянной составляющей тока диода, которая определяет рабочую точку на характеристике.

Эксперимент 1. Измерение напряжения и вычисление тока через диод

1. Соберите схему, представленную на рис. 4.6. Включите режим моделирования
2. Запишите показания в раздел «Результаты экспериментов».

3. Вычислите ток диода при прямом $I_{пр}$ и обратном $I_{обр}$ смещении согласно формулам (4.1) и (4.2).

Тип диода, для соответствующего варианта представлен в табл. 4.1.
Для всех экспериментов использовать выбранный тип диода.

Таблица 4.1 – Типы диодов, для соответствующего варианта

Вариант	1	2	3	4	5	6
Тип диода	MBR340M	1N4009	BA221	BA118	BAS20	BAW56

Эксперимент 2. Измерение тока

1. Соберите схему, представленную на рис. 4.7.
2. Включите режим моделирования. Мультиметр покажет ток диода $I_{пр}$ при прямом смещении. Переверните диод и снова запустите схему. Теперь мультиметр покажет ток $I_{обр}$ диода при обратном смещении.
3. Запишите показания в раздел «Результаты экспериментов».

Эксперимент 3. Измерение статического сопротивления диода

1. Измерьте сопротивление диода в прямом и обратном подключении, используя мультиметр в режиме омметра. Малые значения сопротивления соответствуют прямому подключению.

Эксперимент 4. Снятие вольтамперной характеристики диода

1. Прямая ветвь ВАХ.
Соберите схему, представленную на рис. 4.8. Включите режим моделирования. Последовательно устанавливая значения ЭДС источника E , V из табл. 4.2, запишите полученные значения напряжения $U_{пр}$ и тока $I_{пр}$ диода в соответствующие графы табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Прямая ветвь ВАХ

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

2. Обратная ветвь ВАХ.

Подключите диод в обратном направлении. Последовательно устанавливая значения ЭДС источника равными $E, В$ из табл. 4.3, запишите полученные значения напряжения $I_{обр}$ и напряжения $U_{обр}$ в табл.4.3.

Таблица 4.3 – Обратная ветвь ВАХ

$E, В$	0	5	10	15
$U_{обр} мВ$				
$I_{обр}, мА$				

3. По полученным данным постройте графики $I_{пр} (U_{пр})$ и $I_{обр} (U_{обр})$.

4. Постройте касательную к графику прямой ветви ВАХ при $I_{пр} = 4 мА$ и оцените дифференциальное сопротивление диода по наклону касательной. Проведите ту же процедуру для $I_{пр} = 0.4 мА$ и $I_{пр} = 0.2 мА$.

5. Аналогично п.3, оцените дифференциальное сопротивление диода при обратном напряжении 5 В.

6. Вычислите сопротивление диода на постоянном токе $I_{пр} = 4 мА$ по формуле $R_{обр} = U_{пр}/I_{пр}$.

7. Определите напряжение в точке перегиба ВАХ. Напряжение перегиба определяется из вольтамперной характеристики диода, смещенного в прямом направлении.

Эксперимент 5. Получение ВАХ на экране осциллографа

Получение ВАХ на экране осциллографа. Соберите схему, представленную на рис. 4.9. Включите режим моделирования. На ВАХ, появившейся на экране осциллографа, по горизонтальной оси считывается напряжение на диоде в милливольтх (канал А), а по вертикальной – ток

в миллиамперах (канал В, 1мВ соответствует 1мА). Обратите внимание на изгиб ВАХ. Измерьте величину напряжения, соответствующую точке изгиба.

Эксперимент 6. Получения ВАХ с помощью IV-Analysis

Получить диаграмму ВАХ с помощью IV-Analysis представленную на рис.4.10.

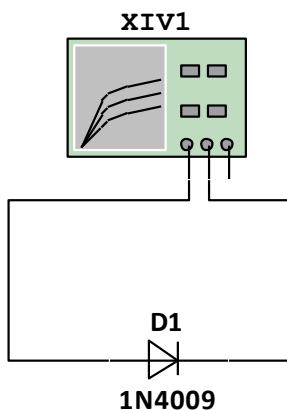
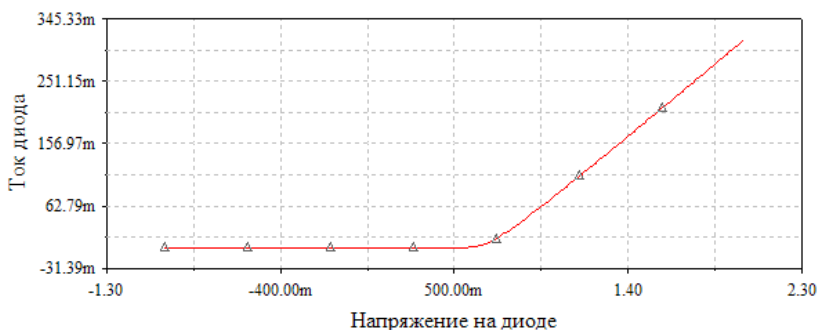


Рисунок 4 10 – Диаграмма ВАХ диода и схема для эксперимента 6

Содержание отчета

В отчете необходимо привести:

- цель работы;
- схемы экспериментов;
- результаты измерений и вычислений;
- графики, построенные по результатам работы;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Сравните напряжения на диоде при прямом и обратном смещении по величине. Почему они различны?
2. Сравнимы ли измеренные значения тока при прямом смещении с вычисленными значениями?
3. Сравнимы ли измеренные значения тока при обратном смещении с вычисленными значениями?
4. Сравните токи через диод при прямом и обратном смещении по величине. Почему они различны?
5. Что такое ток насыщения диода?
6. Намного ли отличаются прямое и обратное сопротивления диода при измерении их мультиметром в режиме омметра? Можно ли по этим измерениям судить об исправности диода?
7. Существует ли различие между величинами сопротивления диода на переменном и постоянном токе?
8. Совпадают ли точки изгиба ВАХ, полученные с помощью осциллографа и построенные по результатам вычислений?

Лабораторная работа 5 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИТРОНА

Цель работы: построение обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона и определение напряжения стабилизации; вычисление тока и мощности, рассеиваемой стабилитроном; определение дифференциального сопротивления стабилитрона по вольтамперной характеристике; исследование изменения напряжения стабилитрона при изменении входного напряжения в схеме параметрического стабилизатора; исследование изменения напряжения на стабилитроне при изменении сопротивления в схеме параметрического стабилизатора.

Краткие сведения из теории

Стабилитроном называют кремниевый полупроводниковый диод, ВАХ которого имеет участки малой зависимости напряжения от тока (рис. 5.1).

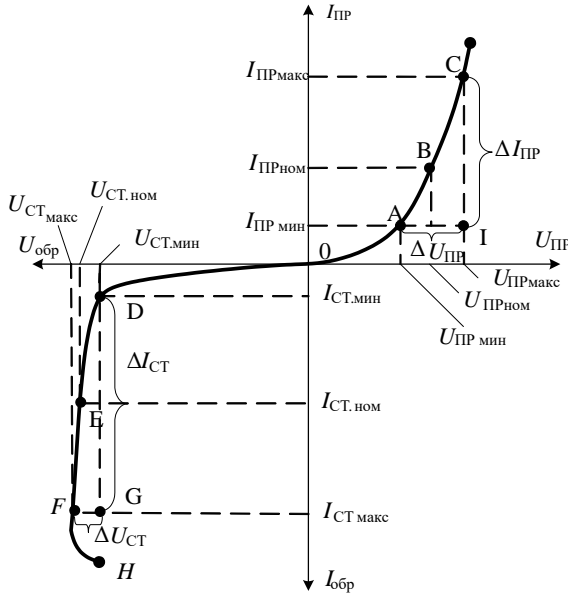


Рисунок 5.1 – Вольтамперная характеристика стабилитрона

На обратной ветви таким участком является участок $D-F$. При значительных изменениях напряжения $U_{\text{обр}}$ напряжение на стабилитроне изменяется незначительно от $U_{\text{ст.мин}}$ до $U_{\text{ст.макс}}$. При этом обратный ток через стабилитрон изменяется от $I_{\text{ст.мин}}$ до $I_{\text{ст.макс}}$. На участке $D-F$ стабилитрон работает в режиме неразрушающего электрического пробоя; при этом электрический пробой в тепловой не переходит. Он наступает на участке $F-H$.

Основными параметрами стабилитронов являются: $U_{\text{ст.ном}}$ – номинальное напряжение стабилизации, соответствующее номинальному току стабилизации $I_{\text{ст.ном}}$; $\Delta U_{\text{ст}}$ – разброс напряжения стабилизации – это интервал напряжения стабилизации $U_{\text{ст}}$, в пределах которого оно находится

$$\Delta U_{\text{ст}} = U_{\text{ст.макс}} - U_{\text{ст.мин}}.$$

$\Delta I_{\text{ст}}$ – интервал тока стабилизации

$$\Delta I_{\text{ст}} = I_{\text{ст.макс}} - I_{\text{ст.мин}},$$

где $I_{\text{ст.макс}}$ – максимально допустимый ток стабилизации, при превышении которого наступает разрушающий тепловой пробой (точка F на рис. 5.1);

$I_{\text{ст.мин}}$ – минимально допустимый ток стабилизации, ниже которого сопротивление стабилитрона $R_{\text{ст}}$ резко возрастает и уменьшается $U_{\text{ст}}$ (точка D на рис. 5.1);

$\alpha_{U_{\text{ст}}}$ – средний температурный коэффициент напряжения стабилизации, показывающий, на сколько процентов изменяется $U_{\text{ст}}$ при изменении температуры на 1°C .

$$\alpha_{U_{\text{ст}0}} \% = \frac{\Delta U_{\text{ст}} \cdot 100\%}{U_{\text{ст}} \Delta t};$$

$R_{\text{диф}}$ – дифференциальное сопротивление, определяющее стабилизирующие свойства стабилитрона и показывающее, в какой степени $U_{\text{ст}}$ зависит от $I_{\text{ст}}$

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

Определение дифференциального сопротивления стабилитрона производится путём построения треугольника в районе точки E с $U_{\text{ст.ном}}$. Чем меньше размеры треугольника DFG (рис.5.1), тем точнее определяется $R_{\text{диф}}$. Треугольник, с помощью которого вычисляются нужные параметры на вольтамперных характеристиках, называется характеристическим.

В первом квадранте ВАХ на рис 5.1 приведена прямая ветвь стабилитрона. Видно, что при значительных изменениях прямого напряжения $U_{\text{пр}}$ – прямое напряжение на диоде изменяется незначительно от $U_{\text{пр.мин}}$ до $U_{\text{пр.макс}}$, при этом прямой ток через диод изменяется от $I_{\text{пр.мин}}$ до $I_{\text{пр.макс}}$. Дифференциальное сопротивление диода при прямом включении вычисляется с помощью характеристического треугольника ACI (рис. 5.1)

$$R_{\text{пр}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}} .$$

Диоды, обладающие малой зависимостью $U_{\text{пр}}$ от $I_{\text{пр}}$, применяются для стабилизации малых напряжений и называются стабисторами.

Стабилитроны применяются для стабилизации напряжения в широких пределах. Стабилизаторы напряжения на основе стабилитронов называются параметрическими стабилизаторами (рис. 5.2).

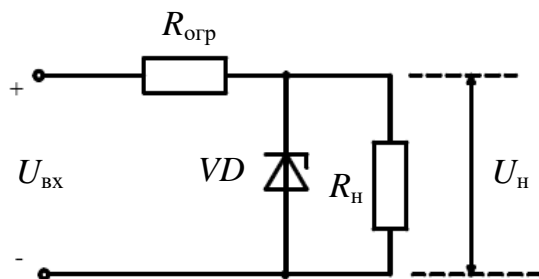


Рисунок 5.2 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

Основным параметром параметрического стабилизатора напряжения является коэффициент стабилизации $K_{ст}$, представляющий отношение относительного изменения входного напряжения $U_{вх}$ к относительному изменению выходного напряжения $U_{н}$

$$K_{ст} = \frac{\frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}}}{\frac{\Delta U_{н}}{U_{н}}}$$

При подключении стабилитрона к источнику постоянного напряжения через резистор получается простейшая схема параметрического стабилизатора (рис. 5.3). Ток $I_{ст}$ стабилитрона может быть определен вычислением падения напряжения на резисторе R

$$I_{ст} = (E - U_{ст})/R, \quad (5.1)$$

где E – напряжение источника питания.

Напряжение стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона определяется точкой на вольтамперной характеристике, в которой ток стабилитрона резко увеличивается. Мощность рассеивания стабилитрона $P_{ст}$ вычисляется как произведение тока $I_{ст}$ на напряжение $U_{ст}$

$$P_{ст} = I_{ст} \cdot U_{ст} .$$

Дифференциальное сопротивление стабилитрона вычисляется так же, как для диода, по наклону вольтамперной характеристики.

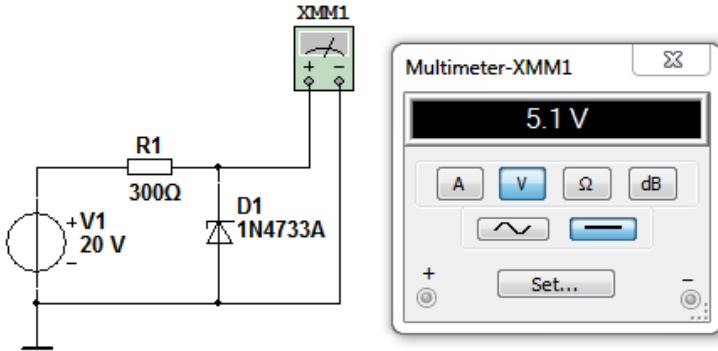


Рисунок 5.3 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

Эксперимент 1. Измерение напряжения и вычисление тока через стабилитрон

Соберите схему, представленную на рис. 5.3. Тип стабилитрона, для соответствующего варианта представлен в таблице 5.1.

Для всех экспериментов использовать выбранный тип диода.

Таблица 5.1 – Типы стабилитронов, для соответствующего варианта

Вариант	1	2	3	4	5	6
Тип стабилитрона	1N4733A	1N4750A	1N4370A	1N4467	BZV55C10	MZPY24

1. Измерьте значение напряжения $U_{ст}$ на стабилитроне при значениях ЭДС источника, приведенных в табл. 5.2, и занесите в таблицу результаты измерений.

2. Вычислите ток $I_{\text{ст}}$ стабилизатора для каждого значения напряжения $U_{\text{ст}}$. Результаты вычислений занесите в табл. 5.2.
3. По данным таблицы постройте вольтамперную характеристику стабилизатора.
4. Оцените по вольтамперной характеристике стабилизатора напряжение стабилизации.
5. Вычислите мощность $P_{\text{ст}}$, рассеиваемую на стабилизаторе при напряжении $E = 20$ В.
6. Измерьте наклон ВАХ в области стабилизации напряжения и оцените дифференциальное сопротивление стабилизатора в этой области.

Таблица 5.2 – Данные для построения ВАХ стабилизатора

$E, \text{В}$	0	4	6	10	15	20	25	30	35
$U_{\text{ст}}, \text{МВ}$									
$I_{\text{ст}}, \text{мА}$									

Эксперимент 2. Получение нагрузочной характеристики параметрического стабилизатора

Соберите схему, представленную на рис. 5.3.

1. Подключите резистор $R_L = 75$ Ом параллельно стабилизатору. Значение источника ЭДС установите равным 20 В. Включите режим моделирования. Запишите значение напряжения $U_{\text{ст}}$ на стабилизаторе в таблицу 5.3.
2. Повторите п. 1 при коротком замыкании и при сопротивлениях резистора R_L из табл.5.3.
3. Рассчитайте ток I_1 через резистор R , включенный последовательно с источником, ток I_L через резистор R_L , и ток стабилизатора $I_{\text{ст}}$ для каждого значения R_L из таблицы 5.3.
4. Рассчитайте напряжение стабилизатора $U_{\text{ст}}$ и значения $I_1, I_L, U_{\text{ст}}$ при $E = 20$ В.

Таблица 5.3 – Измерение точек нагрузочной характеристики параметрического стабилизатора.

R_L , Ом	75	100	200	300	600	1000	к.з.
$U_{ст}$, В							
I_1 , мА							
I_L , мА							
$I_{ст}$, мА							

Эксперимент 3. Получение ВАХ стабилитрона на экране осциллографа

Соберите схему, представленную на рис. 5.4. Включите режим моделирования. Запишите в экспериментальные данные напряжение стабилизации, полученное из графика на экране осциллографа.

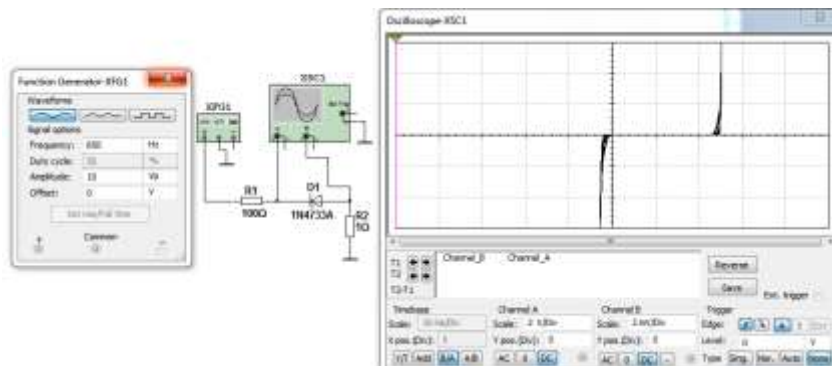


Рисунок 5.4 – Схема для измерения напряжения стабилизации

Содержание отчета

В отчете необходимо привести:

- цель работы;
- схемы экспериментов;

- результаты измерений и вычислений;
- графики, построенные по результатам работы;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Сравните относительное изменение напряжения на стабилитроне с относительным изменением питающего напряжения. Оцените степень стабилизации.
2. Влияет ли значение сопротивления нагрузки на степень стабилизации выходного напряжения стабилизатора?
3. Как изменяется напряжение стабилитрона $U_{ст}$, когда ток стабилитрона становится ниже 20 мА?
4. Каково значение тока стабилитрона $I_{ст}$ при входном напряжении 15 В?
5. Каково значение тока стабилитрона $I_{ст}$ при значении сопротивления $R = 200$ Ом?
6. Как изменяется напряжение $U_{ст}$ на выходе стабилизатора, при уменьшении сопротивления R ?

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: исследование работы выпрямителей переменного напряжения на примере схем: однополупериодной, двухполупериодной со средней точкой, однофазной мостовой. Ознакомиться с принципом действия и основными характеристиками сглаживающих фильтров

Краткие сведения из теории

Для преобразования переменного напряжения в постоянное напряжение применяют выпрямительные устройства. В выпрямительное устройство обычно входят трансформатор, один или несколько диодов, сглаживающий фильтр, электронный стабилизатор постоянного напряжения. В зависимости от условий работы отдельные элементы выпрямительного устройства могут отсутствовать.

Выбор той или иной схемы источника напряжения вторичного питания обусловлен параметрами питающей сети, требованиями к выходным электрическим параметрам, конструктивным особенностями устройства, температурным диапазоном работы, сроком службы, гарантированной надежностью и перечнем разрешенных к применению элементов.

В большинстве случаев для питания измерительных приборов используется однофазная сеть, с действующим значением напряжения 220 В, 50 Гц.

Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис. 6.1.

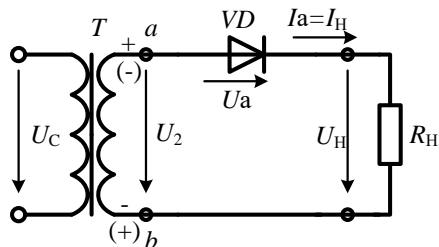


Рисунок 6.1 – Схема однополупериодного выпрямителя

Для упрощения анализа будем считать диод идеальным, т.е. будем полагать, что его сопротивление в прямом направлении равно нулю, а в обратном – бесконечности. Тогда в течение первого полупериода входного напряжения, когда на аноде диода VD будет положительный относительно катода потенциал, диод будет открыт. Напряжение U_2 на вторичной обмотке трансформатора будет непосредственно приложено к нагрузке R_H и в ней возникнет ток i_H (рис. 6.2), который будет повторять форму напряжения на вторичной обмотке трансформатора. В течение второго полупериода входного напряжения на аноде диода VD будет отрицательный относительно катода потенциал, диод будет закрыт, а ток в нагрузке окажется равным нулю

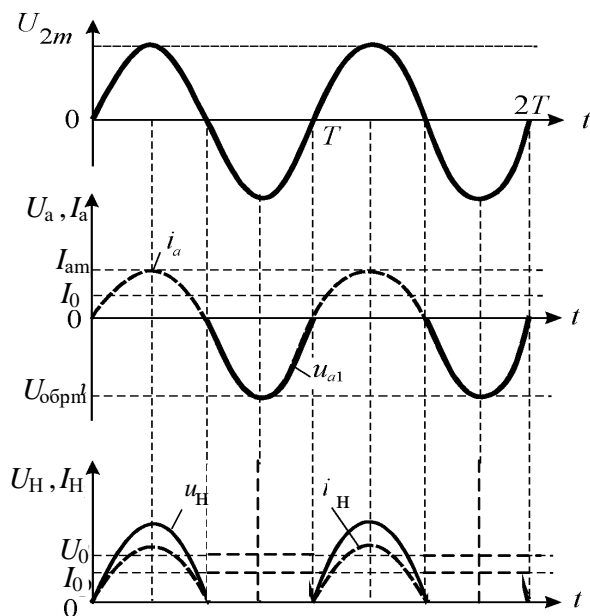


Рисунок 6.2 – Временные диаграммы работы однополупериодного выпрямителя

Постоянная составляющая выходного напряжения однополупериодной схемы выпрямителя

$$u_{\text{н.ср}} = u_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} u_{2m} \sin \omega t \, dt = \frac{u_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}u_2}{\pi}, \quad (6.1)$$

где u_2 – действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Из переменных составляющих максимальную амплитуду u_{1m} имеет составляющая с частотой ω , которая может быть легко найдена из разложения выходного напряжения в ряд Фурье. В однополупериодной схеме выпрямителя $u_{1m} = 1,57 u_0$, т.е. пульсации выходного напряжения велики, что является ее существенным недостатком.

При проектировании однополупериодных выпрямителей важно правильно выбрать тип диода, который удовлетворительно работал бы в такой схеме. Этот выбор проводят на основе двух соображений. Во-первых, допустимый ток диода должен превышать величину i_m . Во-вторых, диод должен обладать определенной электрической прочностью. Последняя связана с тем, что в течение тех полупериодов, когда диод закрыт, к нему приложено напряжение, равное напряжению на вторичной обмотке трансформатора, причем это напряжение имеет обратную для диода полярность («минус» на аноде). Максимальная величина этого напряжения, называемая обратным напряжением $u_{\text{обр}}$, в нашем случае равна амплитуде напряжения на вторичной обмотке трансформатора, т. е. в однополупериодной схеме выпрямителя

$$u_{\text{обр}} = u_{2m}, \quad (6.2)$$

Допустимое обратное напряжение диода должно быть больше u_{2m} .

Один из вариантов двухполупериодного выпрямителя, собранного по мостовой схеме, приведен на рис. 6.3,а. Здесь переменное напряжение подводится к одной диагонали моста, а выпрямленное напряжение снимается с другой.

Рассмотрим работу схемы. Пусть в некоторый момент времени переменное напряжение на вторичной обмотке трансформатора таково,

что потенциал точки а выше потенциала точки в. Тогда от точки а («+» источника напряжения) ток будет проходить через диод $VD1$ к точке г, далее через нагрузку к точке б и через диод $VD3$ к точке в («-» источника напряжения). В течение следующего полупериода, когда потенциал точки в выше потенциала точки а, ток от точки в будет проходить через диод $VD4$ на нагрузку и диод $VD2$ к точке а. Для первого полупериода направление тока показано сплошными стрелками, для второго полупериода – пунктирными стрелками. В любой полупериод ток через нагрузку проходит в одном направлении.

Временные диаграммы напряжений и токов для мостовой схемы выпрямителя приведены на рис. 6.3,б.

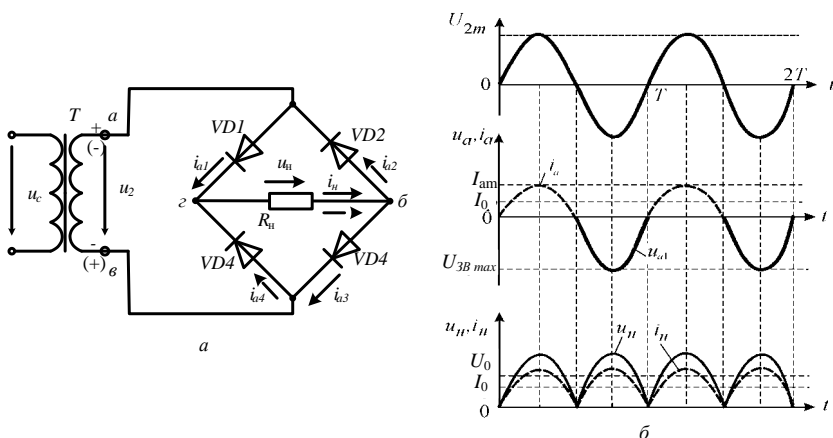


Рисунок 6.3 – Схема (а) и временные диаграммы (б) двухполупериодного выпрямителя

Отношение действующего значения напряжения вторичной обмотки к среднему значению выпрямленного напряжения равно коэффициенту формы синусоидального напряжения, поэтому

$$u_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} u_n \approx 1,11 u_n. \quad (6.3)$$

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле равно амплитудному значению приложенного напряжения, так как в один из полупериодов, когда ток проходит через диоды 1 и 3, диоды 2 и 4 оказываются включенными параллельно и к ним приложено напряжение u_2 , а в следующий полупериод напряжение u_2 приложено к параллельно включенным диодам 1 и 3. Таким образом,

$$u_{\text{обр. max}} = u_{2m} = \sqrt{2}u_2 = \frac{\pi}{2}u \approx 1,57 u_{\text{н}}. \quad (6.4)$$

Среднее значение тока вентиля

$$I_{\text{а. ср}} = 0,5 I_{\text{н}}. \quad (6.5)$$

Емкостной фильтр $C_{\text{ф}}$ включают параллельно нагрузочному резистору $R_{\text{н}}$ (рис. 6.3,а). При таком включении конденсатор $C_{\text{ф}}$ заряжается через диод до амплитудного значения напряжения u_{2m} за время, когда напряжение u_2 на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение $u_{\text{с}}$ на конденсаторе (рис.6.3,б).

Этому режиму соответствует интервал времени $t_1 \dots t_2$. В течение интервала времени $t_2 \dots t_3$ напряжение $u_{\text{с}} > u_2$, диод закрыт, а конденсатор разряжается через нагрузочный резистор $R_{\text{н}}$ с постоянной времени $t = C_{\text{ф}} \cdot R_{\text{н}}$. При этом напряжение $u_{\text{н}}$ снижается до некоторого наименьшего значения. Начиная с момента времени t_3 , напряжение $u_{\text{с}}$ на конденсаторе становится меньше напряжения u_2 . Диод открывается, конденсатор $C_{\text{ф}}$ начинает заряжаться, и процессы повторяются. Как показывают временные диаграммы (рис. 6.3,б), при включении емкостного фильтра напряжение $u_{\text{н}}$ не уменьшается до нуля, а пульсирует в некоторых пределах, увеличивая среднее значение выпрямленного напряжения.

Временные диаграммы работы двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостным фильтром (рис. 6.3, в) приведены на рис. 6.3, г.

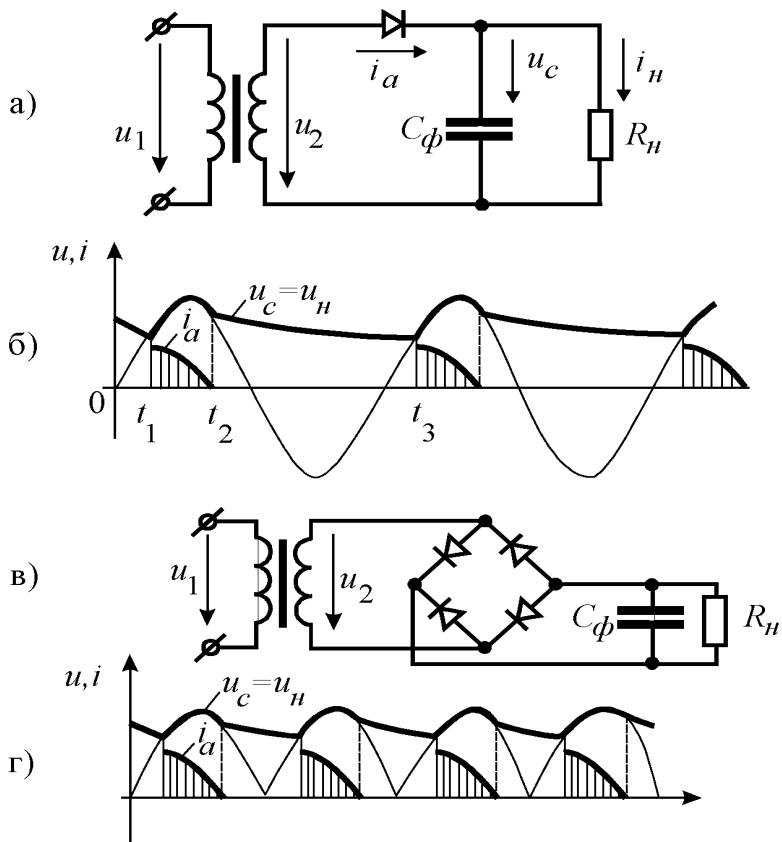


Рисунок 6.3 – Схемы емкостных фильтров с однополупериодным (а) и мостовым (в) выпрямителями; временные диаграммы напряжений и токов однополупериодного (б) и мостового (г) выпрямителей с емкостным фильтром

Емкость конденсатора C_ϕ выбирают такой, чтобы для основной гармоники выпрямленного напряжения сопротивление конденсатора было много меньше R_H , т.е.

$$\frac{1}{2\pi f_{\text{осн.гарм.}} C_{\phi}} \ll R_{\text{н}} \quad \text{или} \quad C_{\phi} \gg \frac{1}{2\pi f_{\text{осн.гарм.}} R_{\text{н}}} . \quad (6.6)$$

При таком выборе емкости конденсатора постоянная времени разряда $\tau_{\text{раз}}$ значительно больше периода изменения выпрямленного напряжения

$$\tau_{\text{раз}} = C_{\phi} R_{\text{н}} \gg \frac{1}{2\pi f_{\text{осн.гарм.}}} = T , \quad (6.7)$$

и конденсатор C_{ϕ} разряжается сравнительно медленно, т.е. напряжение на нем уменьшается незначительно. Это приводит к увеличению среднего значения напряжения на нагрузочном резисторе и, по сравнению с величиной $u_{\text{н ср}}$ при отсутствии фильтра и уменьшению переменной составляющей, а, следовательно, к снижению коэффициента пульсаций ε .

При использовании емкостных фильтров следует иметь в виду, что импульсы тока при открытом диоде определяются сопротивлениями диода

Такие скачки тока могут привести к выходу диода из строя. Это особенно опасно для полупроводниковых диодов, так как их сопротивления при прямом включении имеют небольшую величину. Для ограничения величины тока через диод последовательно с ним следует включать добавочный резистор.

Применение емкостного фильтра более эффективно при высокоомном нагрузочном резисторе, так как выпрямленное напряжение и коэффициент сглаживания имеют большие величины, чем при низкоомном нагрузочном резисторе.

Оценка сглаживающего действия фильтра производится по коэффициенту фильтрации p , под которым понимают отношение коэффициента пульсации по основной гармонике на входе фильтра ε_{x} к коэффициенту пульсации на его выходе

$$p = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} . \quad (6.8)$$

Для практических расчетов обычно под коэффициентом пульсации понимают отношение

$$\varepsilon = \frac{\Delta u_{m-}}{u_{cp}}, \quad (6.9)$$

где Δu_{m-} – амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения;

u_{cp} – среднее значение выпрямленного напряжения, равное постоянной составляющей ряда Фурье.

Пример определения коэффициента пульсации напряжения на входе выпрямителя с фильтром приведен на рис. 6.4.

При работе выпрямительного устройства часть выпрямленного напряжения падает на активном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора и на прямом сопротивлении открытого диода. Следовательно, с ростом величины выпрямленного тока i_n ср увеличивается падение напряжения на этих сопротивлениях и напряжение на нагрузочном устройстве u_n уменьшается. Зависимость $u_n = f(in)$ называется внешней характеристикой. Эта характеристика является одной из важнейших характеристик выпрямительного устройства. Сопротивление открытого диода зависит от силы тока, поэтому и зависимость $u_n = f(in)$ нелинейна (рис. 6.5, кривая 1). Если в выпрямительное устройство включен фильтр, то зависимость $u_n = f(in)$ изменится. Емкостному фильтру соответствует кривая 2. Помимо емкостных фильтров, для фильтрации выпрямленного напряжения можно использовать индуктивность (дроссель), включаемую последовательно с сопротивлением нагрузки

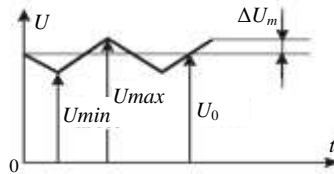


Рисунок 6.4 – Определение пульсаций выпрямителя

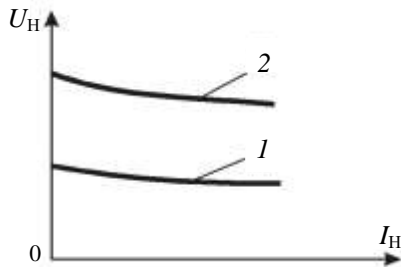


Рисунок 6.5 – Внешние характеристики выпрямителей

Эксперимент 1. Исследование однополупериодного выпрямителя

Однополупериодная схема, представленная на рис. 6.6, является простейшей схемой выпрямителя. Она характеризуется низким коэффициентом использования трансформатора и большой амплитудой пульсаций выпрямленного напряжения. Требуется использование сглаживающего фильтра.

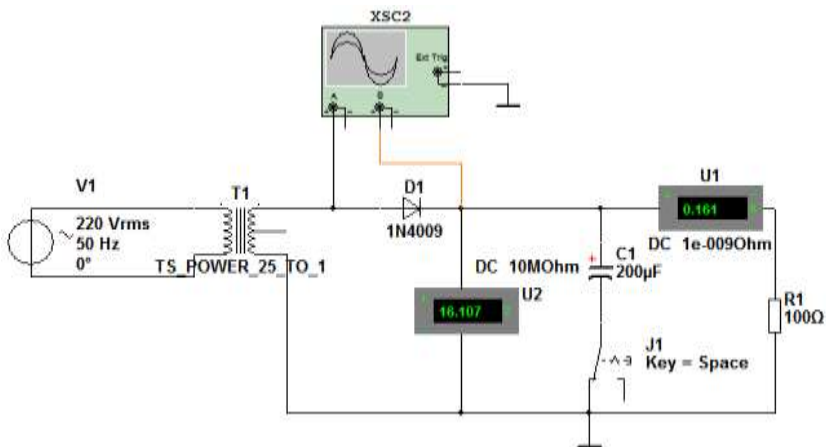


Рисунок 6.6 – Схема к эксперименту 1

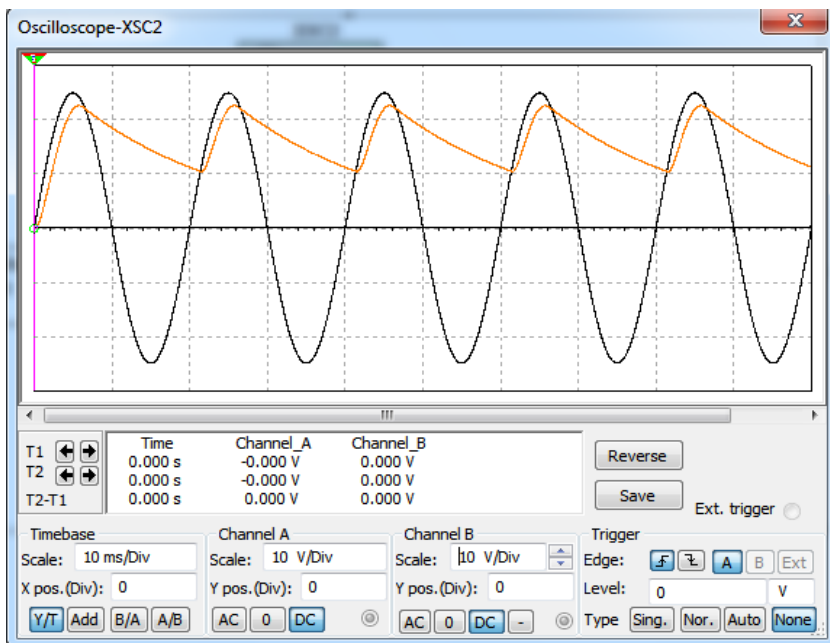


Рисунок 6.7 – Осциллограмма к эксперименту 1

1. Соберите схему рис. 6.6. Используйте диод 1N4009. Сначала следует исследовать работу выпрямителя без емкостного фильтра, отключив его. На вход А осциллографа подается входной сигнал, а на вход В – выходной. Сохраните осциллограммы.

2. Измерьте максимальные входные и выходные напряжения. Устанавливая различные значения сопротивления нагрузки выпрямителя (резистор $R1$), снимите показания вольтметра и амперметра, занеся их в табл. 6.1.

Снимите характеристику однополупериодного выпрямителя, работающего без емкостного фильтра. Затем подключите емкостный фильтр и снимите и характеристику выпрямителя с фильтром.

Сохраните осциллограммы напряжений при двух различных значениях емкостей фильтрующего конденсатора.

Таблица 3.1 – Внешняя характеристика однополупериодного выпрямителя

Параметр	Без фильтра				С емкостным фильтром			
$u_{н}, \text{В}$								
$i_{н}, \text{мА}$								

Вычислите для этих значений емкостей конденсатора фильтра среднее значение напряжения и коэффициент пульсаций.

Эксперимент 2. Исследование двухполупериодного выпрямителя с отводом от средней точки трансформатора

Двухполупериодная схема с отводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора, изображена на рис. 6.7, обеспечивает больший коэффициент использования трансформатора и меньший, по сравнению с однополупериодным выпрямителем, уровень пульсаций. Соберите схему рис. 6.8.

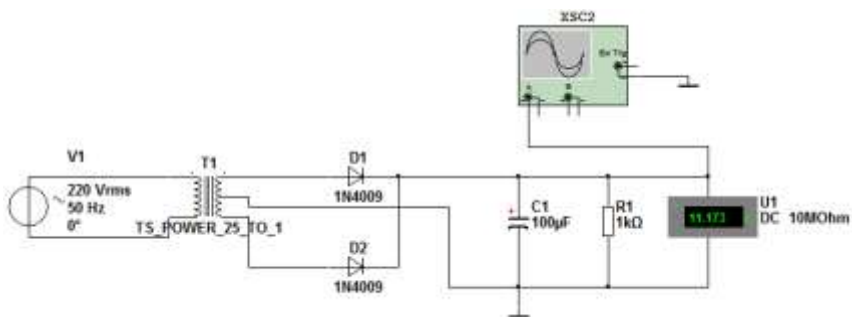


Рисунок 6.8 – Схема к эксперименту 2

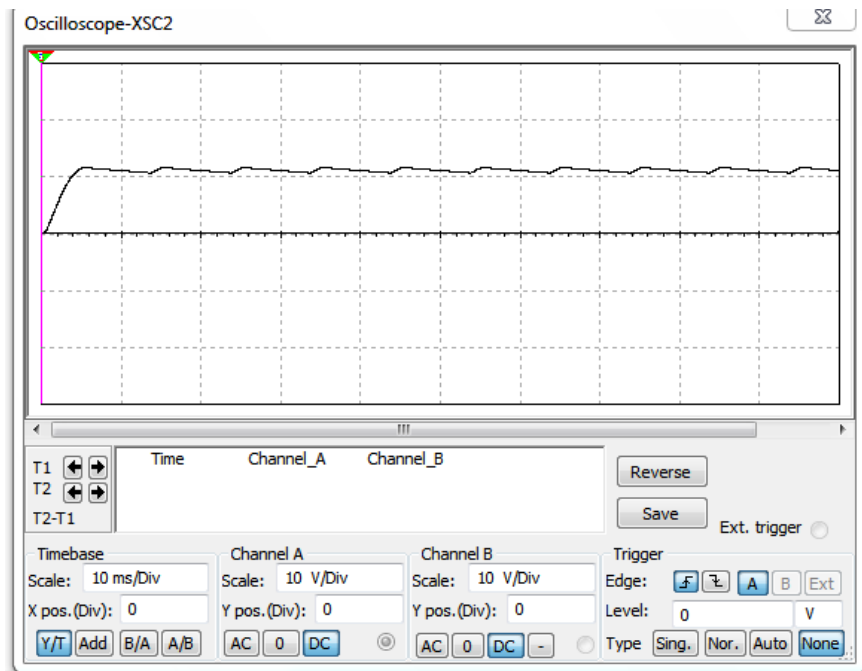


Рисунок 6.9 – Осциллограмма к эксперименту 2

1. Сначала следует исследовать работу выпрямителя без емкостного фильтра, отключив его с помощью выключателя. На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В – входной. Сохраните полученные осциллограммы.

2. Измерьте максимальные входные и выходные напряжения. Устанавливая различные значения сопротивления нагрузки выпрямителя (резистор $R1$), снимите показания вольтметра и амперметра, занеся их в табл. 6.2.

Постройте внешнюю характеристику двухполупериодного выпрямителя, работающего без фильтра. Затем подключите фильтр, снимите и построьте внешнюю характеристику выпрямителя аналогично ранее описанному.

Также сохраните осциллограммы напряжений при двух различных значениях фильтрующих емкостей.

Таблица 6.2 – Внешняя характеристика двухполупериодного выпрямителя с отводом от средней точки трансформатора

Параметр	Без фильтра				С емкостным фильтром					
$u_{н}, В$										
$i_{н}, МА$										

Эксперимент 3. Исследование мостового выпрямителя

Мостовая схема находит наиболее широкое применение при питании от однофазной сети, рис. 6.10. Обратное напряжение, приходящееся на каждый диод и напряжение вторичной обмотки трансформатора при этой схеме примерно в два раза меньше, чем в двухполупериодной схеме. Соберите схему рис. 6.10.

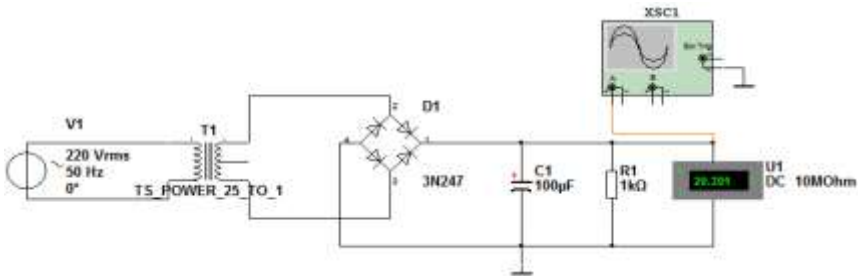


Рисунок 6.10 – Схема к эксперименту 3

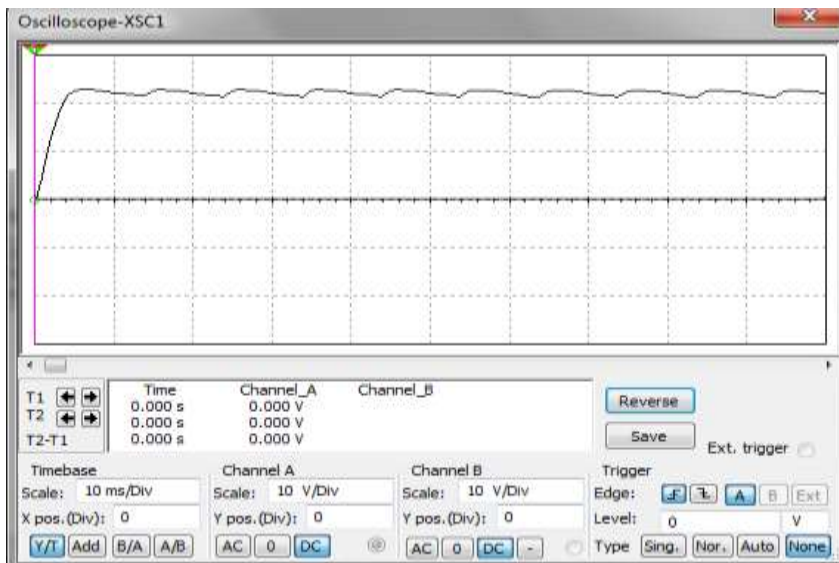


Рисунок 6.11 – Осциллограмма к эксперименту 3

1. Сначала следует исследовать работу выпрямителя без емкостного фильтра. На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В – входной. Сохраните осциллограммы напряжений.

2. Измерьте максимальные входные и выходные напряжения. Устанавливая различные значения сопротивления нагрузки выпрямителя (резистор R_1), снимите показания вольтметра и амперметра, занеся их в табл. 6.3.

3. Постройте внешнюю характеристику двухполупериодного выпрямителя, работающего без емкостного фильтра.

4. Затем подключите емкостный фильтр, снимите и построьте внешнюю характеристику выпрямителя аналогично ранее описанному.

Также сохраните осциллограммы напряжений при двух различных значениях емкостей фильтрующего конденсатора.

Таблица 3.2 – Внешняя характеристика мостового выпрямителя

Параметр	Без фильтра				С емкостным фильтром					
$u_{н}, В$										
$i_{н}, мА$										

Содержание отчета

В отчете необходимо привести:

- цель работы;
- схемы выпрямителей;
- осциллограммы напряжения на входе и выходе выпрямителей, значения выпрямленного напряжения на выходах выпрямителей, результаты измерений и расчетов, графики;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое выпрямители и для чего они нужны?
2. Какие виды выпрямителей вы знаете?
3. В чем отличие между двухполупериодной со средней точкой и мостовой схемами?
4. В какой схеме выпрямителя при одном и том же среднем токе нагрузки течет больший ток через проводящий диод: в двухполупериодной мостовой, в однополупериодной, в двухполупериодной со средней точкой и двумя диодами?
5. Как зависит напряжение пульсаций выпрямителя с фильтром от тока нагрузки: напряжение пульсаций падает, растет, остается неизменным?
6. Одинаковы ли частоты входного и выходного сигналов в схемах одно- и двухполупериодного выпрямителей?
7. Каковы различия между входным и выходным сигналами одно- и двухполупериодных выпрямителей?
8. Какие факторы влияют на величину коэффициента пульсаций выпрямителя с емкостным фильтром на выходе?

Лабораторная работа 7 ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы: изучение принципа работы, статических и динамических характеристик, экспериментального исследования биполярных и полевых транзисторов, закрепление навыка создания и исследования схем в Multisim

Краткие сведения из теории

Транзистор – полупроводниковый элемент с тремя электродами, который служит для усиления или переключения сигнала. Транзистор – активный элемент, усиливающий мощность электрического сигнала. Это усиление происходит за счет энергии внешних источников питания. Изменяя ток во входной цепи по определенному закону, можно получить усиленный сигнал на выходе той же формы. Транзисторы делятся на две большие группы: биполярные и полевые.

Биполярные транзисторы.

Различают кремниевые и германиевые транзисторы. Они бывают $p-n-p$ и $n-p-n$ типа, на рис. 7.1 показаны их обозначения. Биполярный транзистор можно рассматривать как два противоположно включенных диода, которые обладают одним общим n - или p -слоем. Электрод связанный с ним называется Базой. Два других электрода называются эмиттером и коллектором. Основная особенность транзистора состоит в том, что его коллекторный ток является кратным базовому току. Их отношение $K = I_K/I_B$ называют коэффициентом усиления по току, рис. 7.2

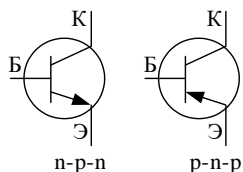


Рисунок 7.1 – Обозначение биполярных транзисторов

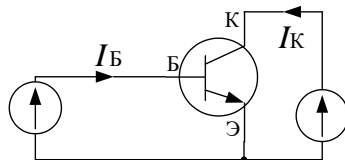


Рисунок 7.2 – Полярность включения *n-p-n* транзистора

Другой особенностью является то, что малое изменение входного напряжения оказывается достаточно для того, чтобы вызвать относительно большое изменение коллекторного тока.

В электрическую цепь транзистор включают таким образом, что один из его выводов (электродов) является входным, второй – выходным, а третий – общим для входной и выходной цепи, рис. 7.3.



Рисунок 7.3 – Схемы включения биполярных транзисторов

Полевые транзисторы

Полевой транзистор управляется электрическим полем, практически без затраты мощности управляющего сигнала. Среди полевых транзисторов различают шесть типов, их условные обозначения в электрических принципиальных схемах представлены на рис. 7.4.

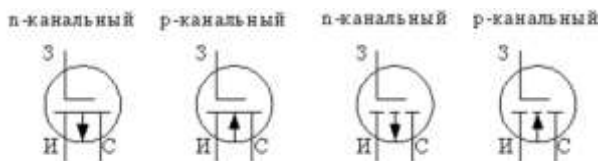


Рисунок 7.4 – Обозначение полевых транзисторов

Полевой транзистор с управляющим *p-n* переходом.

Виды МОП транзисторов представлены на рис.7.5.

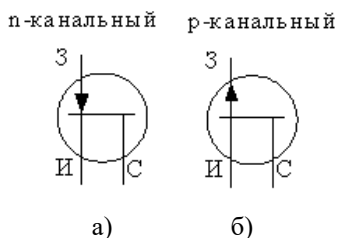


Рисунок 7.5 – МОП транзистор: обедненного типа (а), обогащенного типа (б)

Управляющим электродом транзистора является затвор З. Он позволяет управлять величиной сопротивления между стоком С и истоком И. Управляющим напряжением является напряжение $U_{зи}$. Большинство полевых транзисторов являются симметричными, т.е. их свойства не изменяются если электроды И и С поменять местами. Через полевой транзистор с управляющим переходом при напряжении $U_{зи} = 0$ протекает наибольший ток стока. Такие транзисторы называют нормально открытыми. Аналогичные свойства имеют МОП транзисторы обедненного типа. Наоборот, МОП транзисторы обогащенного типа запираются при величинах $U_{зи}$ близких к нулю. Их называют нормально закрытыми.

Эксперимент 1. Определение зависимости выходного напряжения от входного для схемы с общим эмиттером

Соберите схему, представленную на рис. 7.6.

Изменяя входное напряжение от 0 до 4 вольт с шагом 0,2 вольта занесите в табл. 2.1 значения выходного напряжения, по полученным данным постройте зависимость $U_{вых} = f(U_{вх})$.

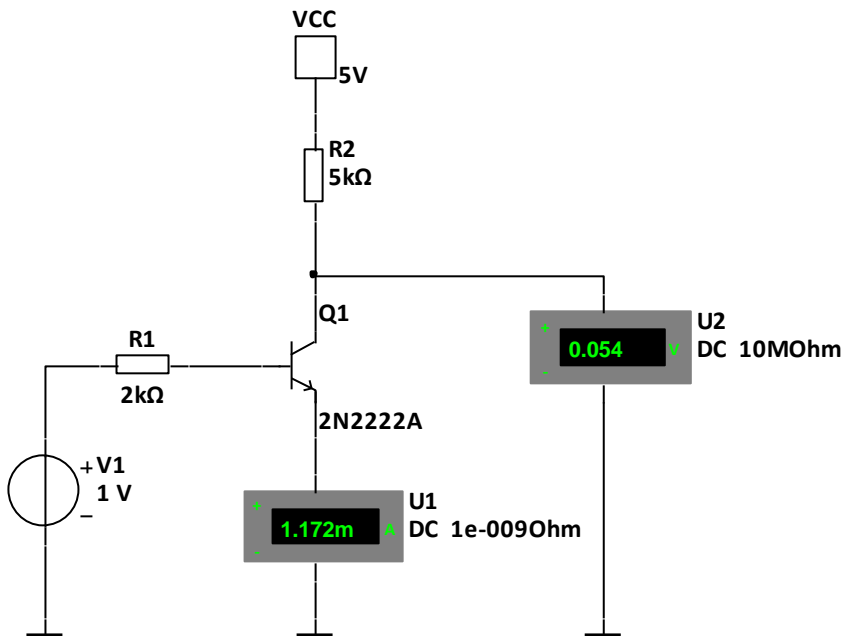


Рисунок 7.6 – Схема с общим эмиттером к эксперименту 1

Таблица 7.1 – Результаты эксперимента 1

$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$	0	0,2	...	4
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$				

Эксперимент 2. Измерение коэффициента усиления схемы с общим эмиттером и отрицательной обратной связью по току

Соберите схему, представленную на рис. 7.7.

Изменяя входной сигнал от 0 до 10 Вольт с шагом 1 Вольт, занесите в табл. 7.2 значения выходного напряжения, по полученным данным постройте график зависимости выходного напряжения от входного.

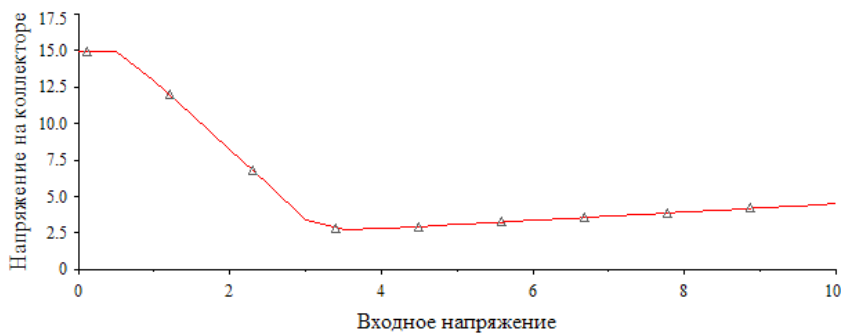
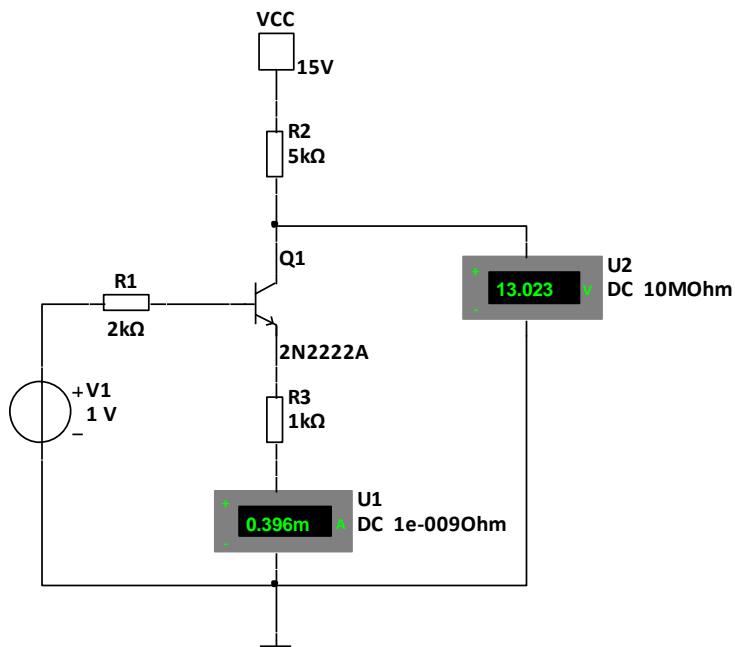


Рисунок 7.7 – Схема с общим эмиттером к эксперименту 2

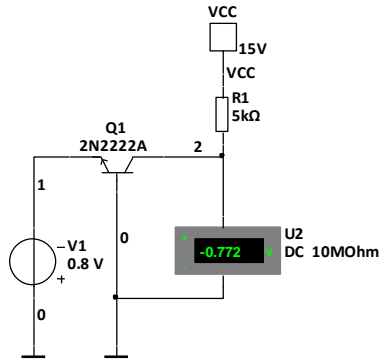
Таблица 7.2 – Результаты эксперимента 2

$U_{ВХ}$, В	0	1	...	10
$U_{ВЫХ}$, В				

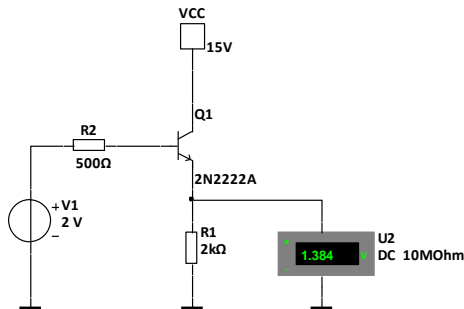
Эксперимент 3. Определение зависимости выходного напряжения от входного для схем с общей базой и общим коллектором

Соберите схемы, представленные на рис. 7.8.а, б.

Повторите операции из опыта 1 для схем с общей базой и общим коллектором, по результатам исследований, постройте графики.



а)



б)

Рисунок 7.8 – Схемы к эксперименту 3

Эксперимент 4. Транзистор как источник стабильного тока

Идеальный источник тока обеспечивает в нагрузке ток, который не зависит от сопротивления нагрузки. Схема источника тока изображен-

ного на рис. 7.9, построена на основе схемы с общим эмиттером и отрицательной обратной связью по току. Нагрузка включается последовательно с транзистором. Выходной ток остается неизменным, пока транзистор насыщен.

Соберите схему, представленную на рис.7.9, изменяя сопротивление нагрузки от 10 Ом до 5 кОм, убедитесь в неизменности показаний амперметра.

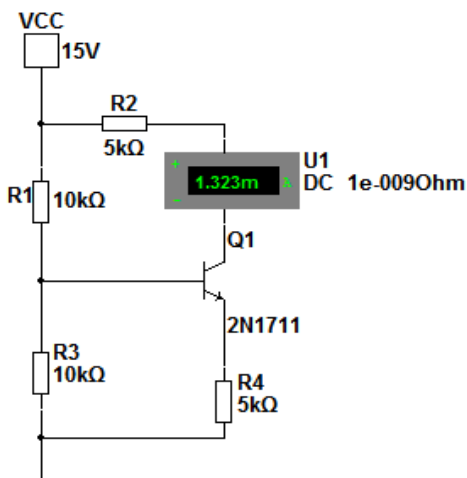
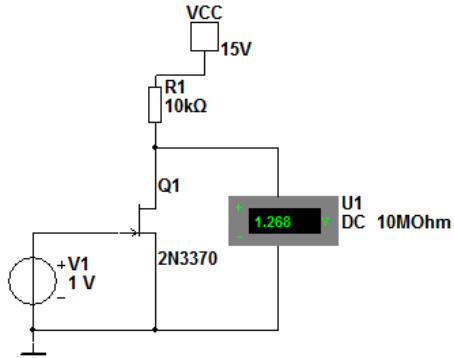


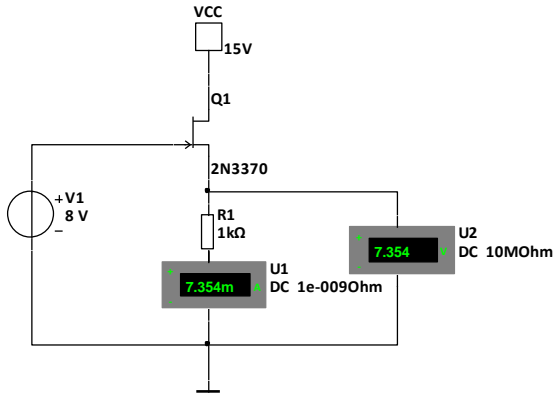
Рисунок 7.9 – Источник тока на транзисторе

Эксперимент 5. Определение зависимости выходного напряжения от входного для схемы с общим истоком и истокового повторителя

Схема с общим истоком соответствует схеме с общим эмиттером для биполярного транзистора. Схема с общим истоком (истоковый повторитель) обладает значительно большим сопротивлением, чем схема с общим истоком, кроме того, она существенно уменьшает входную емкость каскада (рис. 7.10).



а)



б)

Рисунок 7.10 – Схема с общим истоком (а) и истоковый повторитель (б)

Изменяя входное напряжение от 0 до 14 вольт с шагом 1 вольт, занесите в табл. 2.3 значения выходного напряжения, по полученным данным постройте зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$.

Таблица 2.3 – Результаты эксперимента 5

$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$	0	1	...	14
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$				

Эксперимент 6. Управляемый делитель напряжения

При малых напряжениях сток-исток вольт-амперная характеристика такая же, как и у омического сопротивления, величину которого можно менять в широких пределах путем изменения напряжения затвор-исток. Минимальное напряжение получится при $U_{зс} = 0$.

Соберите схему, представленную на рис. 7.11. Изменяя напряжение, подаваемое на затвор транзистора в пределах от 0 до 12 вольт, измерьте выходное напряжение и постройте график полученной зависимости.

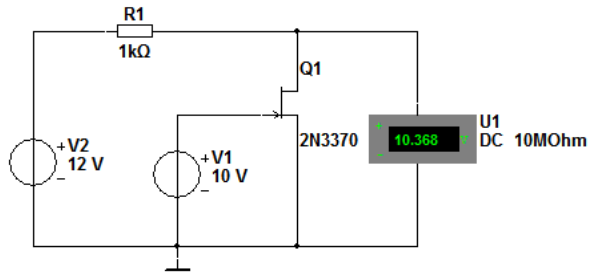


Рисунок 7.11 – Управляемый делитель напряжения

Содержание отчета

В отчете необходимо привести:

- цель работы;
- схемы экспериментов;
- результаты измерений;
- графики, построенные по результатам работы;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое транзистор и для чего он нужен?
2. Какие виды транзисторов вы знаете?
3. Чем отличаются биполярные транзисторы от полевых?
4. Где используются биполярные транзисторы?

Лабораторная работа 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРИРУЮЩИХ И ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ

Цель работы: ознакомиться с практическими схемами дифференцирующих и интегрирующих цепей, исследовать временные характеристики динамических звеньев.

Краткие сведения из теории

Интегрирующие и дифференцирующие цепочки широко применяются в импульсной технике для следующих целей:

Интегрирующая цепочка:

- для получения сигналов, пропорциональных интегралу от входных сигналов (с определенной погрешностью);
- для фильтрации высокочастотных составляющих;
- для удлинения фронтов импульсов;
- для увеличения длительности импульсов;
- для формирования линейно-изменяющихся напряжений.

Дифференцирующая цепочка:

- для получения сигналов, пропорциональных производной от входных сигналов (с определенной погрешностью);
- для устранения постоянной составляющей сигнала;
- для уменьшения длительности импульса;
- для получения двухполярных импульсов из однополярных.

Сложные эквивалентные схемы реальных импульсных устройств после упрощения импульсных устройств часто сводятся к дифференцирующим и интегрирующим цепочкам.

Основные понятия радиоэлектронных цепей.

Радиоэлектронное устройство независимо от конструкции и технологии его изготовления представляет собой некоторое соединение элементов – резисторов, конденсаторов, диодов, источников электрической энергии и др. Совокупность соединенных определенным образом элементов устройства называется радиоэлектронной цепью.

Элементы цепи подразделяются на активные и пассивные. Основным признаком активного элемента – это его способность отдавать электрическую энергию. К пассивным элементам относятся потребители и накопители электрической энергии.

В теории цепей рассматриваются идеализированные элементы, обладающие каким-нибудь одним свойством, – это, например, сопротивление, емкость, индуктивность, источники тока и напряжения.

Сопротивление – идеализированный элемент, в котором электрическая энергия преобразуется в тепловую, механическую или световую. Сила тока в сопротивлении связана с напряжением на нем законом Ома:

$$U = R \cdot I.$$

Величину $\frac{1}{R} = G$ называют проводимостью.

Форма тока, проходящего через сопротивление, всегда совпадает с формой приложенного к нему напряжения, поэтому всегда положительна мгновенная мощность

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 = G \cdot U^2.$$

Емкость – идеализированный элемент, обладающий свойством запасать энергию электрического поля. Ток в емкости и напряжение на ее зажимах связаны соотношением

$$I = C \frac{dU}{dt}.$$

Мгновенная мощность

$$P = U \cdot I = U \cdot C \frac{dU}{dt}$$

может быть как положительной (когда знаки напряжения и его производной одинаковы), так и отрицательной. Если мощность положительна, то емкость накапливает энергию, а заряд $q = C \cdot U$ на ней увеличивается. Если же мощность отрицательна, то емкость разряжается и отдает энергию.

Индуктивность – идеализированный элемент, обладающий способностью запасать энергию магнитного поля.

Ток в индуктивности с напряжением на её зажимах связаны соотношением $U = L \frac{dI}{dt}$. Мгновенная мощность на индуктивности $P = UI = LI \frac{dI}{dt}$, как и для ёмкости, может быть положительной и отрицательной.

Каждый элемент к цепи подключается двумя выводами – полюсами, поэтому простейшая электрическая цепь является двухполюсником.

Цепь, в которой выделены вход и выход и, таким образом имеет четыре полюса, называется четырёхполюсником. Цепи, размеры которых значительно меньше длины волны электрических сигналов, считают цепями с сосредоточенными параметрами. В таких цепях сопротивления, ёмкости и индуктивности сосредоточены в отдельных элементах.

Цепи, размеры которых соизмеримы с длиной волны электрических сигналов или больше её, относятся к цепям с распределенными параметрами. Каждый элемент конструкции такой цепи обладает сопротивлением, емкостью, индуктивностью.

По признаку зависимости параметров элементов цепи от приложенных напряжений и протекающих токов различают линейные и нелинейные цепи.

Радиоэлектронная цепь считается линейной, если параметры ее элементов не зависят от токов и напряжений. Примером линейной цепи может быть цепь, состоящая из идеализированных элементов ни один из которых не зависит от протекающих токов и напряжений.

Цепь считается нелинейной, если параметры ее элементов зависят от токов и напряжений. Такими являются цепи, содержащие элементы сопротивления с нелинейными вольтамперными характеристиками, а также цепи с диодами, транзисторами и конденсаторами в виде *p-n* перехода.

Цепи, параметры элементов которых меняются во времени по заданному закону, считаются параметрическими. Такие цепи чаще всего создаются из нелинейных элементов, параметры которых изменяются с помощью управляющих сигналов.

По признаку наличия или отсутствия источников электрической энергии внутри цепи различают активные или пассивные цепи. Активная – это цепь, содержащая внутренние источники энергии, например усилитель. Пассивная – это цепь, не содержащая внутренних источников энергии, например цепь, состоящая только из пассивных элементов – резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности.

Задачи теории цепей делятся на две группы: задачи анализа и задачи синтеза.

Цель анализа – исследование процессов в цепи с заданной структурой и заданными характеристиками всех элементов цепи, например расчёт реакции заданной цепи на известные воздействия.

Цель синтеза – отыскание структуры цепи и параметров её элементов, при которых электрический процесс будет удовлетворять заданным требованиям. Синтез цепей основывается на общих свойствах электрических цепей. Эти свойства выясняются в процессе анализа, поэтому синтезу должен предшествовать анализ.

Задача синтеза значительно более сложная и трудоёмкая по сравнению с задачей анализа, поэтому в инженерной практике часто используют нестрогий синтез, заключающийся в выборе нужной цепи из множества подробно исследованных.

Интегрирующие и дифференцирующие цепи.

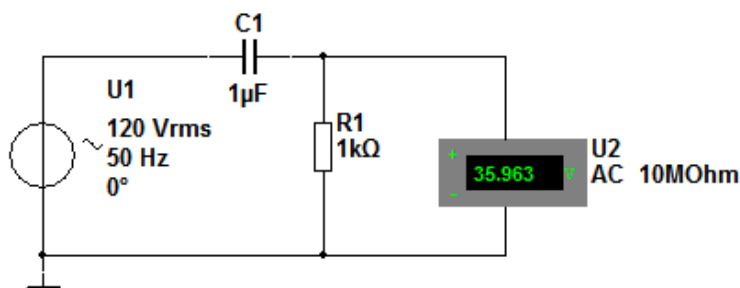


Рисунок 8.1 – Дифференцирующая RC-цепь

Напряжение на резисторе R (рис.8.1)

$$UR = U^2 = IR,$$

где $I = C \frac{dU_C}{dt}$,

тогда $U_2 = CR \frac{dU_C}{dt}$.

Зная, что $U_C = U_1 - U_2$, получим для $U_2 = CR \frac{dU_1}{dt} - CR \frac{dU_2}{dt}$.

При малых частотах и постоянных токах UR – величина малая, тогда

$$U_2 = CR \frac{dU_1}{dt},$$

т.е. напряжение на выходе цепи пропорционально дифференциалу U_1 , поэтому ее называют дифференцирующей (рис.8.1).

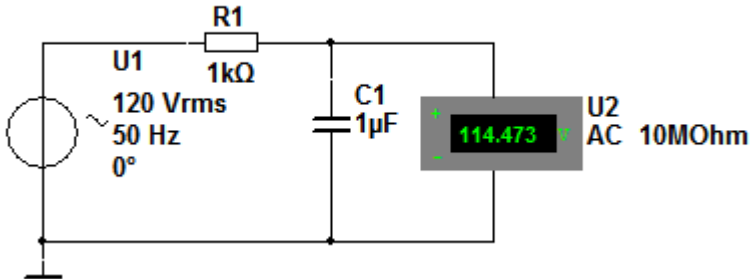


Рисунок 8.2 – Интегрирующая RC-цепь

Ток в цепи конденсатора (рис.8.2)

$$I = C \frac{dU_C}{dt},$$

а напряжение $U_C = \frac{1}{C} \int Idt$,

где $I = \frac{U_1}{R}$,

$$\text{тогда } U_C = \frac{1}{RC} \int U_R dt = \frac{1}{RC} \int U_1 dt - \frac{1}{RC} \int U_C dt .$$

$$\text{При } R \gg \frac{1}{\omega C}, U_2 = \frac{1}{RC} \int U_1 dt ,$$

т.е. напряжение на выходе RC – цепи пропорционально интегралу от входного напряжения. Такая RC – цепь именуется интегрирующей.

Постоянная времени.

Произведение $\tau = RC$ называют постоянной времени цепи.

Если R измерять в Омах, а C – в Фарадах, то произведение RC будет измеряться в секундах. Для конденсатора емкостью 1 мкФ, подключенного к резистору сопротивлением 1 кОм, постоянная времени составляет 1 мс, если конденсатор был предварительно заряжен и напряжение на нём составляет 1 В, то при подключении резистора в цепи появится ток, равный 1 мА.

При условии $t \gg RC$, напряжение на выходе интегрирующей цепочки практически равно выходному напряжению. Следует запомнить правило пяти RC (или пяти τ): за время равное пяти постоянным времени, конденсатор заряжается или разряжается на 99%.

Интегрирующая (иногда её называют сглаживающая) цепочка при определенных условиях может выполнять функцию интегрирующего звена.

Дифференцирующая цепочка в зависимости от своих параметров может выполнять функции разделительного звена, укорачивающей или дифференцирующей цепочки.

Эффективность рассматриваемых цепочек зависит от соотношения между постоянной времени $\tau = RC$ и периодом входного сигнала T , поступающего на цепочку.

Например, функция интегрирования выполняется тем лучше, чем сильнее выражено неравенство $\tau > T$. При этом автоматически выполняется неравенство $U_2 < U_1$.

Функция дифференцирования цепочкой, выполняется тем лучше, чем сильнее выражено неравенство $\tau < T$. При этом, опять-таки, $U_2 < U_1$. В этом заключается существенный недостаток рассматриваемых цепочек.

чек, они делят (уменьшают) амплитуду выходного сигнала по сравнению с входным

Эксперимент 1. Исследование дифференцирующей цепи

Соберите схему дифференциальной цепочки и подключите к её входу генератор прямоугольных импульсов как показано на рис. 8.3.

Амплитуда прямоугольных импульсов 5 В, скважность 2.

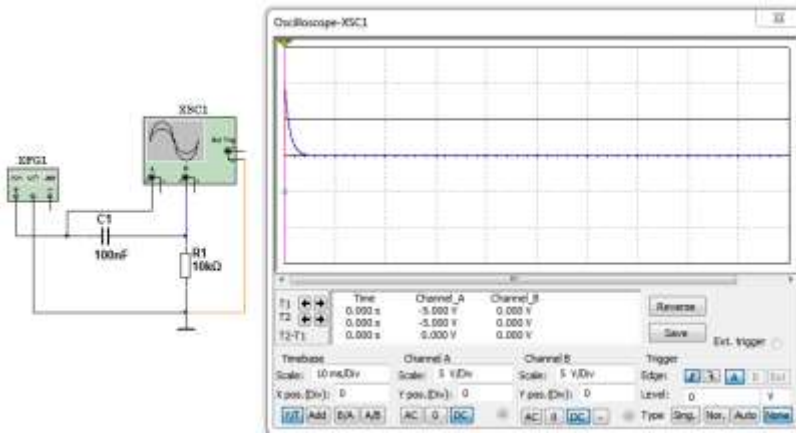


Рисунок 8.3 – Схема к эксперименту 1

В соответствии с номером варианта по табл.8.1 определите период следования импульсов, и для заданного значения емкости выберите три различных значения сопротивлений для того чтобы выполнялись условия $T = RC$; $T = 0,1 RC$; $T = 10 RC$.

Таблица 8.1 – Характеристика входного сигнала и емкость конденсатора

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , Гц	100	200	300	400	500	600	700	850	900	950
C , нФ	100	50	10	20	100	50	10	20	100	50

Получите и сохраните осциллограммы входного и выходных сигналов для различных значений выбранных сопротивлений, по осциллограмме определите период входного сигнала, длительность входного положительного импульса и длительность выходного положительного импульса, амплитуду входного и выходного положительных импульсов. Получите АЧХ дифференциальной цепочки.

Расчеты представьте в табл. 8.2.

Таблица 8.2 – Результаты эксперимента 1

R , Ом	f , Гц	C , нФ	$T_{вх}$, с	$t_{вх}$, с	$t_{вых}$, с	$U_{вх}$	$U_{вых}$

Эксперимент 2. Исследование интегрирующей цепи

Соберите схему интегрирующей цепочки и подключите к её входу генератор прямоугольных импульсов как показано на рис.8.4.

Для определенного ранее варианта и выбранных значений сопротивлений получите и сохраните осциллограммы входных и выходных сигналов, АЧХ интегрирующей цепочки

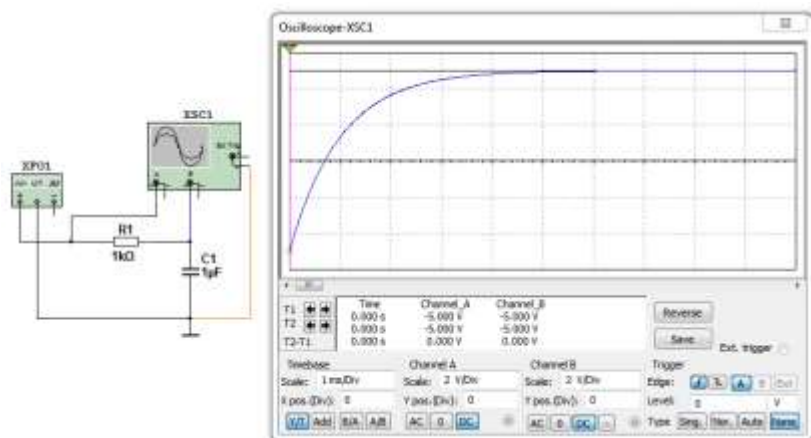


Рисунок 8.4 – Схема к эксперименту 2

Содержание отчета

- цель работы;
- схемы интегрирующей и дифференцирующей цепочек;
- осциллограммы напряжения на входе и выходе интегрирующей и дифференцирующей цепочек для различных значений сопротивлений;
- АЧХ интегрирующей и дифференцирующей цепочек;
- результаты расчетов, табл. 8.2.

Контрольные вопросы

1. Для чего используются формирователи импульсов? Приведите примеры их практического использования.
2. Что такое постоянная времени дифференцирующей или интегрирующей цепи и что она определяет?
3. Поясните принцип построения дифференцирующей или интегрирующей цепи. Запишите формулы выполняемых операций.

ТРЕБОВАНИЯ К ЗНАНИЯМ И УМЕНИЯМ СТУДЕНТОВ

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны:

- знать физические основы работы, характеристики, параметры и эквивалентные схемы электронных приборов, их назначение, классификацию, маркировку, основные конструкторско-технологические и эксплуатационные параметры, типу схемотехнические решения электронных устройств;
- уметь использовать электронные приборы для построения электронных устройств, выполнять их проектную компоновку;
- быть ознакомленным с новейшими достижениями в отрасли производства и использования микроэлектронных элементов;
- освоить программу Multisim и ее использование для создания и анализа принципиальных электрических схем различных устройств.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Давиденко О. П. Електроніка у вимірювальній техніці / О. П. Давиденко, І. В. Григоренко, Р. П. Мигущенко. – Харків : Підручник НТУ «ХПІ», – 2015. – 428 с.
2. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. / И. П. Степаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 488 с.
3. Щука А. А. Электроника: учеб. пособ. / под ред. проф. А. С. Сигова. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 800 с.
4. Хоровиц П. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т.3. Пер. с англ. – 4-е изд. перераб и доп. / Хоровиц П., Хилл У. – М: Мир, 1993. – 367 с.
5. Москатов Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.
6. Попов Э.Г. Основы аналоговой техники. Учеб. пособие для студ. радиотехнических спец. – Мн.: БГУИР, 2006 – 276 с.
7. Гусев В. Г. Электроника и микропроцессорная техника : учеб. пособ. для вузов / В. Г. Гусев. – 3-е изд., переработано и доп. – М. : Высш. шк., 2005.
8. Лачин В. И. Электроника : учеб. пособ. 4-е изд. / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов н/Д: Феникс, 2004.
9. Кардашев Г. А. Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование аналоговых устройств / Г. А. Кардашев. - М. : Горячая линия - Телеком, 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа №1. «Организация работы с системой Multisim, создание схем в Multisim».....	5
Лабораторная работа №2. «Исследование делителей напряжения».....	13
Лабораторная работа №3. «Исследование амплитудно-фазовых соотношений в простых цепях».....	20
Лабораторная работа №4. «Исследование полупроводникового диода».....	30
Лабораторная работа №5. «Исследование стабилитрона».....	43
Лабораторная работа №6. «Исследование полупроводниковых выпрямителей».....	51
Лабораторная работа №7. «Исследование биполярных и полевых транзисторов».....	66
Лабораторная работа №8. «Исследование интегрирующих и дифференцирующих цепей».....	75
Требования к знаниям и умениям студентов.....	84
Список литературы.....	85
Содержание.....	86

Навчальне видання

**Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу
«Основи електроніки» для студентів спеціальності 152 «Метрологія
та інформаційно-вимірювальна техніка», у тому числі іноземних
студентів**

Укладачі: ГРИГОРЕНКО Ігор Володимирович
ТРОХІН Михайло Вікторович
БОРИСЕНКО Євген Анатолійович

Відповідальний за випуск С.І. Кондрашов

В авторській редакції

План 2018 р., поз. 137

Підп. до друку 25.06.2018 р. Формат 60×84 ¹/₁₆. Папір офісний.
Riso-друк. Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 5,0. Наклад 50 прим.
Зам. № ____ . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП»
Свідоцтво про державну реєстрацію Д № 5478 від 21.08.2017 р.
м. Харків, вул. Кирпичова, 2.