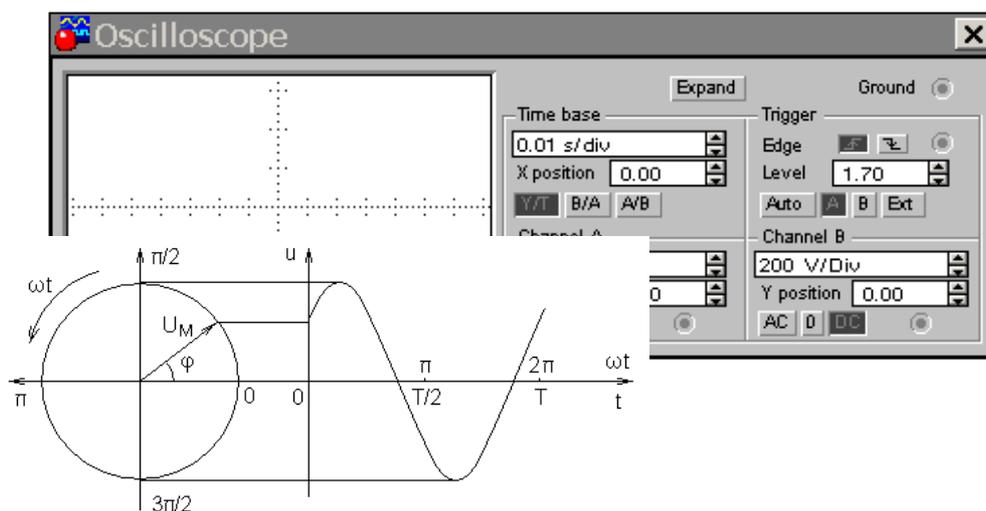


М. Н. Романовский

## ВВЕДЕНИЕ В ПРОФЕССИЮ

Руководство к практическим занятиям и  
самостоятельной работе



Рецензент: Еханин С.Г., заведующий кафедрой конструирования узлов и деталей радиоаппаратуры, доктор физико–математических наук

Романовский М.Н.

Введение в профессию: руководство к практическим занятиям и самостоятельной работе. – Томск: ТУСУР, 2014. – 103 с.

Для студентов направления подготовки бакалавра 211000.62 «Конструирование и технология электронных средств». Профиль 211000.04.62 «Конструирование и технология наноэлектронных средств».

## Содержание

Предисловие .....	5
<b>1 АНАЛИЗ СХЕМ В ELECTRONICS WORKBENCH .....</b>	<b>6</b>
1.1 Общие сведения.....	6
1.2 Полоса меню .....	6
1.3 Панель компонентов .....	10
1.4 Моделирование схем .....	19
1.5 Задание .....	20
1.6 Контрольные вопросы.....	21
<b>2 РЕЗИСТОРЫ .....</b>	<b>22</b>
2.1 Общие сведения.....	22
2.2 Задание .....	23
2.3 Контрольные вопросы.....	24
<b>3 КОНДЕНСАТОРЫ .....</b>	<b>25</b>
3.1 Общие сведения.....	25
3.2 Задание .....	27
3.3 Контрольные вопросы.....	28
<b>4 КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ .....</b>	<b>28</b>
4.1 Общие сведения.....	28
4.2 Переходной процесс в RL цепи .....	30
4.3 Контрольные вопросы.....	31
<b>5 ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ СИГНАЛЕ .....</b>	<b>31</b>
5.1 Общие сведения.....	31
5.2 Задание .....	35
5.3 Контрольные вопросы.....	37
<b>6 ЧАСТОТНЫЕ ФИЛЬТРЫ.....</b>	<b>37</b>
6.1 Общие сведения.....	37
6.2 Задание .....	39
6.3 Контрольные вопросы.....	41
<b>7 РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ .....</b>	<b>41</b>
7.1 Общие сведения.....	41
7.2 Последовательный колебательный контур.....	43

7.3 Задание .....	46
7.4 Контрольные вопросы.....	47
8 РЕЗОНАНС ТОКОВ.....	48
8.1 Общие сведения.....	48
8.2 Параллельный колебательный контур.....	49
8.3 Задание .....	50
8.4 Контрольные вопросы.....	51
9 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ .....	52
9.1 Собственные и примесные полупроводники .....	52
9.2 Электронно-дырочный переход .....	55
9.3 Выпрямительные диоды .....	57
9.4 Задание .....	60
9.5 Контрольные вопросы.....	61
10 ВЫПРЯМИТЕЛИ .....	62
10.1 Общие сведения .....	62
10.2 Задание .....	66
10.3 Контрольные вопросы .....	68
11 СТАБИЛИЗАТОРЫ И ОГРАНИЧИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ .....	69
11.1 Общие сведения .....	69
11.2 Задание .....	74
11.3 Контрольные вопросы .....	77
12 БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ .....	77
12.1 Устройство и схемы включения .....	77
12.2 Режимы работы и статические характеристики .....	79
12.3 Определение параметров из статических характеристик.....	84
12.4 Задание .....	86
12.5 Контрольные вопросы .....	90
13 КЛЮЧ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ .....	91
13.1 Назначение и принцип работы.....	91
13.2 Статический режим .....	91
13.3 Переходные процессы.....	93
13.4 Повышение быстродействия .....	94
13.5 Задание .....	95
13.6 Контрольные вопросы .....	97

Литература .....	98
Пример оформления отчета .....	99
Меню Analysis .....	102

## Предисловие

Основной целью дисциплины «Введение в профессию» является формирование у студентов адекватных представлений о выбранной специальности, создание своего рода фундамента для дальнейшей профессиональной подготовки.

На практических занятиях используется система схемотехнического моделирования Electronics Workbench (EWB). EWB обладает стандартным, интуитивно понятным интерфейсом и не требует много времени для освоения. Вместе с тем, интерфейс EWB подобен реальному рабочему месту разработчика схем, а виртуальные измерительные приборы максимально приближены к их реальным промышленным аналогам. Все это позволяет получить представление и о современных средствах разработки электронных устройств, и о работе с реальными измерительными приборами (мультиметром, осциллографом и др.).

Основные темы практических занятий: 1) анализ схем в EWB, 2) резисторы, 3) конденсаторы, 4) катушки индуктивности, 5) пассивные элементы при синусоидальном сигнале, 6) частотные фильтры, 7) резонанс напряжений, 8) резонанс токов, 9) полупроводниковые диоды, 10) выпрямители, 11) стабилизаторы и ограничители напряжения, 12) биполярные транзисторы, 13) электронный ключ на биполярном транзисторе. На изучение тем 1, 2, 3, 4, 6, 11 отводится по 2 часа аудиторных занятий, 5, 7, 8, 9, 12, 13 – по 4 часа. Отчет по теме должен содержать:

- 1) введение с указанием цели работы,
- 2) описание измерительных установок,
- 3) результаты расчетов и виртуальных экспериментов в виде таблиц, временных диаграмм, графиков и т. п.
- 4) выводы.

Пример оформления отчета приведен в приложении А.

Руководство к практическим занятиям не содержит сложных абстрактных доказательств и математических выкладок. Наличие специально организованных учебных текстов к каждому практическому занятию и компьютерной поддержки к ним создают условия для эффективной самостоятельной работы, развития творческого потенциала.

# 1 АНАЛИЗ СХЕМ В ELECTRONICS WORKBENCH

## 1.1 Общие сведения

Система схемотехнического моделирования Electronics Workbench (EWB) предназначена для моделирования и анализа электрических схем.

Интерфейс EWB (рис. 1.1) подобен реальному рабочему месту разработчика схем. Самая большая центральная область – рабочее пространство (Workspace) – место для сборки и тестирования схем. Над рабочим пространством находятся полоса меню и панель компонентов.

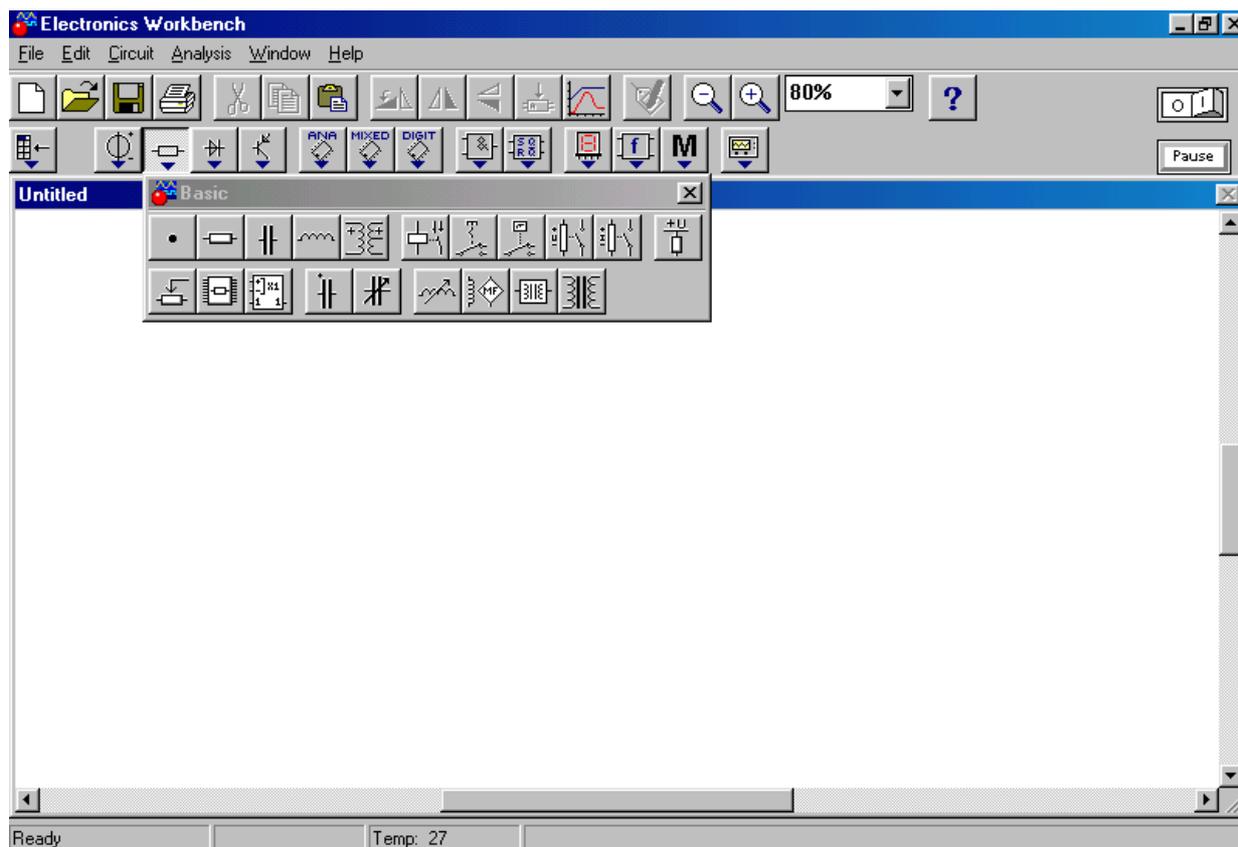


Рисунок 1.1 – Интерфейс пользователя EWB

## 1.2 Полоса меню

### 1.2.1 File

Меню **File** (**Файл**) служит для работы с файлами.

Операция **New** (**Новый**) – **Ctrl+N** создает окно Untitled.ewb для формирования схемы. При запуске EWB выполняется автоматически.

Операция **Open** (**Открыть**) – **Ctrl+O** отображает стандартное диалоговое окно открытия файла, в котором необходимо выбрать диск и каталог, содержащий файл схемы. Открывать можно файлы с расширениями .sa, .sa3, .cd3, .ca4 и .ewb.

Команда **Save** (**Сохранить**) – **Ctrl+S** отображает стандартное диалоговое окно, в котором необходимо выбрать диск и каталог, где нужно

сохранить схему, и название файла. Расширение .ewb добавляется к имени файла автоматически.

Команда **Save As (Сохранить Как)** аналогична предыдущей операции, но сохраняет текущую схему с новым именем файла, оставляя первоначальную схему неизменной.

Команда **Revert to Save (Заменить сохраненным)** используется для восстановления текущей схемы из файла, в котором она последний раз сохранялась.

Команда **Print (Печать)** – **Ctrl+P** предназначена для полной или частичной распечатки схемы.

Операция **Print Setup (Настройка печати)** предназначена для настройки принтера. EWB по умолчанию использует принтер, указанный в панели управления Windows (Windows Control Panel).

Операция **Exit (Выход)** – **Alt+F4** предназначена для завершения работы с пакетом EWB.

Операция **Install (Установка)** предназначена для установки добавочных компонентов EWB.

### 1.2.2 Edit

Меню **Edit (Правка)** позволяет осуществить операции редактирования.

Команда **Cut (Вырезать)** – **Ctrl+X** используется для удаления выбранных компонентов, схем или текста. При этом выбранный компонент помещается в буфер обмена, откуда его можно вставить в рабочую область.

Команда **Copy (Копировать)** – **Ctrl+C** предназначена для копирования выбранных компонентов, схемы или текста. Копия помещается в буфер обмена.

Команда **Paste (Вставить)** – **Ctrl+V** помещает содержание буфера обмена в активное окно (содержание остается в буфере). Для успешного выполнения операции буфер должен содержать компоненты EWB или текст.

Команда **Delete (Удалить)** – **Del** полностью удаляет выбранные компоненты или текст. Удаленная информация не может быть восстановлена.

Команда **Select All (Выбрать все)** выбирает все элементы в активном окне (окно схемы, окно подсхемы или окно описания). Если частью выбора является прибор, то команды **Copy** и **Paste** становятся недоступными.

Команда **Copy as Bitmap (Копировать как растровое изображение)** предназначена для копирования растрового отображения элементов в буфер обмена. Для копирования необходимо: 1) выбрать **Copy as Bitmap** (курсор изменится на перекрестие); 2) нажать и удерживать кнопку мыши, перемещая курсор, чтобы сформировать прямоугольник, включающий необходимые для копирования элементы; 3) отпустить кнопку мыши.

Команда **Show Clipboard (Показать буфер обмена)** отображает содержание буфера обмена. Если активное окно содержит необходимый тип информации или если буфер обмена пуст, команда **Paste** будет не доступна.

### 1.2.3 Circuit

Меню **Circuit (Цепь)** позволяет осуществить операции работы с цепями.

Команда **Rotate (Вращать)** – **Ctrl+R** позволяет вращать выбранные компоненты на 90° по часовой стрелке.

Команда **Flip Vertical (Отобразить зеркально по вертикали)** зеркально отражает выбранную схему по вертикали в окне схемы.

Команда **Flip Horizontal (Отобразить зеркально по горизонтали)** зеркально отражает выбранную схему по горизонтали в окне схемы.

Команда **Component Properties (Свойства компонентов)** выводит диалоговое окно для изменения свойств выбранного компонента. Окно выводится также при двойном нажатии левой кнопкой мыши на выбранном компоненте. При вызове окна нажатием правой кнопки мыши, назначаются заданные свойства для всех выбранных компонентов, впоследствии используемых в схеме. При этом не изменяются свойства уже размещенных компонентов. Диалоговое окно содержит набор закладок (зависящий от компонента).

Закладка **Label (Метка)** – **Ctrl+L** используется, чтобы установить или заменить метку компонента и идентификатор. Компоненты типа соединителей, заземлений, измерителей не имеют идентификаторов. Когда компонент вращается или зеркально отображается, метка может быть установлена повторно. Если в результате провод проходит через метку, можно сдвинуть метку направо, добавляя несколько пробелов перед меткой. Чтобы вставить общую информацию в схему, введите текст в окно описания, доступное из меню **Window**. Важно, что идентификаторы назначаются системой уникально, идентифицируя компонент. В случае необходимости их можно изменять, но они должны оставаться уникальными. Идентификаторы не могут быть удалены.

Закладка **Value (Значение)** – **Ctrl+U** служит для установки номинальных значений компонентов, предельных отклонений и т. п. Поля в этой закладке различаются в зависимости от компонента.

Закладка **Models (Модели)** – **Ctrl+M** применяется, чтобы выбрать модель, используемую для компонента, а также для редактирования, добавления или удаления моделей или библиотек.

Закладка **Schematic Options (Вариации схемы)** используется, чтобы установить цвет провода.

Закладка **Fault (Неисправность)** – **Ctrl+F** используется, чтобы назначить неисправность на терминал компонента. Leakage – помещает значение дополнительного сопротивления, определенное в смежных полях, параллельно с выбранными терминалами. Short – помещает низкое сопротивление между двумя терминалами. Open – помещает высокое сопротивление между двумя терминалами. None – не вносит никаких неисправностей.

Закладка **Node (Узел)** используется для изменения свойств узла. Node ID – назначенное системой имя узла. Set Node Color – определяет набор цветов

для отдельных проводов, связанных с выбранным узлом. Analysis – определяет, должен ли узел рассматриваться как тестовая точка.

Закладка **Display (Вывод на экран)** используется для отображения/скрытия тех или иных элементов EWB. Когда выбрано Use Schematic Options, используются настройки параметров дисплея из закладки Show/Hide диалогового окна Circuit/Schematic Options. Когда выбраны Show labels, Show models, Show reference ID и не выбрано Use Schematic Options, используются параметры дисплея, как они были определены.

Закладка **Setup (Настройка)** используется для настройки параметров элементов, таких как рабочая температура. Use global temperature – набор температур, установленный в Analysis/Analysis Options. Если не выбрано, используются те температуры, которые были определены. Set initial conditions – устанавливает начальные значения для компонента. Некоторые компоненты отображают дополнительные параметры на закладке Setup, для использования вместе с параметрами, описанными в техническом справочнике EWB.

Команда **Create Subcircuit (Создать подсхему)** – **Ctrl+B** объединяет выбранные элементы схемы в подсхему. Чтобы создать подсхему, необходимо: 1) выбрать элементы, которые нужно использовать для подсхемы; 2) выбрать **Circuit/Create Subcircuit** и завершить диалог, который появляется:

*Copy from Circuit* – помещает копию выбранных компонентов в подсхему. Первоначальные компоненты остаются в окне схемы;

*Move from Circuit* – удаляет выбранные компоненты из схемы, так что они появляются только в подсхеме;

*Replace in Circuit* – помещает выбранные компоненты в подсхему и заменяет выбранные компоненты в схеме прямоугольником, помеченным именем подсхемы. Выбранные компоненты появляются в новом окне, окне подсхемы. Имя новой подсхемы добавляется к списку доступных подсхем, который отображается, когда пиктограмма подсхемы перемещается из инструментальной панели Favorites. Подсхема доступна только для текущей схемы.

Команда **Zoom (Лупа)** – **Ctrl+** (Увеличение) и **Ctrl--** (Уменьшение) отображает подменю увеличения или уменьшения размера дисплея окна схемы.

Команда **Schematic Options** предназначена для управления всем дисплеем схемы. Изменения относятся только к текущей схеме.

Закладка **Grid (Сетка)** управляет дисплеем и использованием сетки, лежащей в основе окна схемы. Применение сетки упрощает выравнивание элементов в схеме. Можете использовать сетку без ее отображения. Отображение сетки осуществляется на заднем плане окна схемы. Сетку удобно использовать при расстановке объектов.

Закладка **Show/Hide** управляет дисплеем информации в окне схемы. Ее параметры полезно использовать, когда нужно скрыть объект.

Закладка *Display* управляет шрифтом, используемым для меток и ссылок на идентификаторы.

Закладка *Value* управляет шрифтом, используемым для задания значений компонентов.

### 1.2.4 Analysis

Меню **Analysis (Анализ)** позволяет выполнить различные виды анализа схем (см. приложение Б), но в настоящей работе не используется.

### 1.2.5 Window

Меню **Window** позволяет осуществлять работу с окнами.

Команда **Arrange (Порядок)** – **CTRL+W** аккуратно расставляет открытые окна.

Команда **Circuit** переносит окно схемы на передний план.

Команда **Description** – **CTRL+D** открывает окно описания. Если окно описания уже открыто, переносит его на передний план.

### 1.2.6 Help

Меню **Help** представляет собой стандартный вызов файла-справки. Вызов справки также можно осуществить нажатием клавиши F1.

## 1.3 Панель компонентов

Для операций с компонентами на общем поле EWB выделены две области: панель компонентов и поле компонентов. Панель компонентов состоит из пиктограмм полей компонентов, поле компонентов – из условных изображений самих компонентов.

В настоящем разделе представлены только те компоненты, которые понадобятся на практических занятиях.

### 1.3.1 Базовые компоненты

*Соединяющий узел* (рис. 1.2, а) применяется для соединения проводников и создания контрольных точек. К каждому узлу может подсоединяться не более четырех проводников.

*Заземление* (рис. 1.2, б). Любая схема, содержащая операционный усилитель, трансформатор, управляемый источник, осциллограф, должна быть обязательно заземлена, иначе приборы не будут производить измерения или их показания окажутся неправильными.

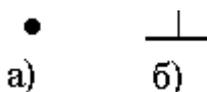


Рисунок 1.2 – Условные изображения соединяющего узла (а) и заземления (б)

### 1.3.2 Неуправляемые источники

*Источник постоянного напряжения* (рис. 1.3, а). ЭДС источника постоянного напряжения (батареи) измеряется в вольтах и задается

производными величинами (от мкВ до кВ). Батарея в Electronics Workbench имеет внутреннее сопротивление, равное нулю, поэтому, если необходимо использовать две параллельно подключенные батареи, следует включить последовательно между ними небольшое сопротивление (например, в 1 Ом).

**Источник переменного напряжения** (рис. 1.3, б). Действующее значение напряжения источника измеряется в вольтах и задается производными величинами (от мкВ до кВ). Имеется возможность установки частоты и начальной фазы.

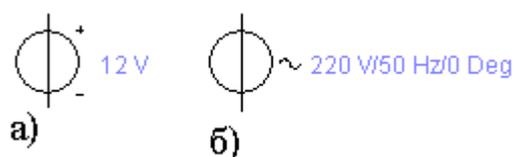


Рисунок 1.3 – Условные изображения неуправляемых источников постоянного (а) и переменного напряжения (б)

### 1.3.3 Управляемые источники

**Источник напряжения, управляемый напряжением** (рис. 1.4, а). Отношение выходного напряжения к входному определяется коэффициентом пропорциональности  $E$ , который задается в мВ/В, В/В и кВ/В.

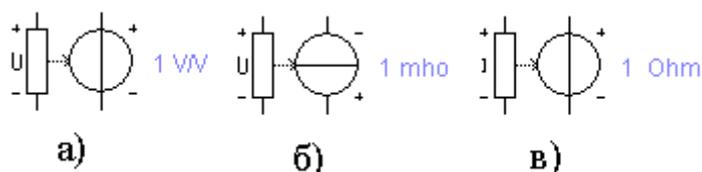


Рисунок 1.4 – Условные изображения источников: напряжения, управляемого напряжением (а), тока, управляемого напряжением (б), напряжения, управляемого током (в)

**Источник тока, управляемый напряжением** (рис. 1.4, б). Отношение выходного тока к управляющему напряжению – коэффициент  $G$ , измеряется в единицах проводимости (1 / Ом или Сименс).

**Источник напряжения, управляемый током** (рис. 1.4, в). Передаточное сопротивление имеет размерность сопротивления и задается в мОм, Ом и кОм.

### 1.3.4 Линейные элементы

**Резистор** (рис. 1.5, а). Сопротивление резистора измеряется в омах и задается производными величинами (от Ом до МОм).

**Переменный резистор** (рис. 1.5, б). В диалоговом окне можно установить сопротивление, начальное положение движка (в процентах) и шаг приращения (также в процентах). Имеется возможность изменять положение движка при помощи клавиш-ключей. Используемые клавиши-ключи: буквы от А до Z, цифры от 0 до 9, клавиша Enter на клавиатуре, клавиша «пробел».

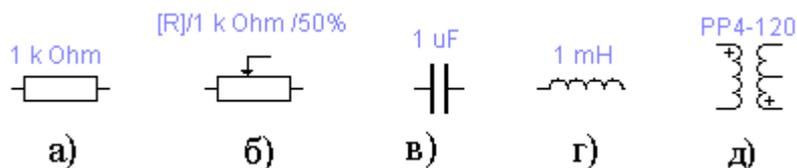


Рисунок 1.5 – Условные изображения резистора (а), переменного резистора (б), конденсатора (в), катушки индуктивности (г), трансформатора (д)

**Конденсатор** (рис. 1.5, в). Емкость конденсатора измеряется в фарадах и задается производными величинами (от пФ до Ф).

**Катушка индуктивности** (рис. 1.5, г). Индуктивность катушки измеряется в генри и задается производными величинами (от мкГн до Гн).

**Трансформатор** (рис. 1.5, д).

### 1.3.5 Ключи

**Ключ, управляемый клавишей** (рис. 1.6). Ключи могут быть замкнуты или разомкнуты при помощи управляющих клавиш на клавиатуре. Имя управляющей клавиши можно ввести с клавиатуры в диалоговом окне, появляющемся после двойного щелчка мышью на изображении ключа. Используемые клавиши-ключи: буквы от А до Z, цифры от 0 до 9, клавиша Enter на клавиатуре, клавиша «пробел».

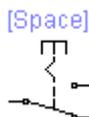


Рисунок 1.6 – Условные изображения ключа, управляемого клавишей

### 1.3.6 Нелинейные элементы

**Диод** (рис. 1.7, а). Подobie стрелки в условном обозначении показывает, в каком направлении диод пропускает электрический ток.

**Стабилитрон** (рис. 1.7, б) обычно используют для стабилизации напряжения.

**Биполярный транзистор** р-п-р и п-р-п (рис. 1.7, в) типа. Буквы означают тип проводимости полупроводникового материала, из которого изготовлены три области транзистора. Стрелкой отмечается эмиттер, направление стрелки указывает направление протекания тока.

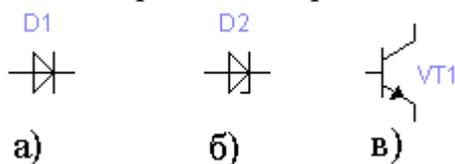


Рисунок 1.7 – Условные изображения диода (а), стабилитрона (б), биполярного п-р-п транзистора (в)

### 1.3.7 Приборы для проведения измерений

**Вольтметр** (рис. 1.8, а) используется для измерения напряжения. Выделенная толстой линией сторона прямоугольника соответствует отрицательной клемме. Двойным щелчком мыши на изображении открывается диалоговое окно для изменения вида измеряемого напряжения и величины внутреннего сопротивления вольтметра. Величина внутреннего сопротивления вводится с клавиатуры в строке *Resistance*, вид измеряемого напряжения (опция *Mode*) выбирается из списка. При измерении переменного синусоидального напряжения (*AC*) вольтметр показывает действующее значение напряжения. Внутреннее сопротивление вольтметра 1 МОм установлено по умолчанию. Это значение можно изменить, однако использование очень высокого внутреннего сопротивления вольтметра в схемах с низким выходным импедансом может привести к математической ошибке во время моделирования работы схемы.

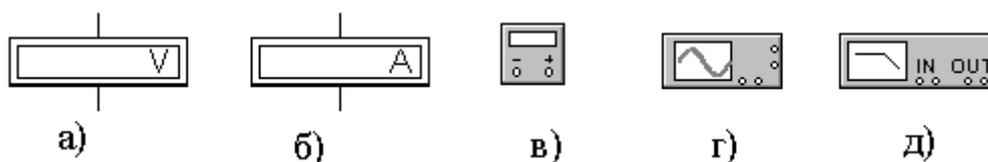


Рисунок 1.8 – Условные изображения вольтметра (а), амперметра (б), мультиметра (в), осциллографа (г), плоттера (д)

**Амперметр** (рис. 1.8, б) служит для измерения переменного и постоянного тока. Использование амперметра с очень маленьким внутренним сопротивлением в схемах с высоким выходным импедансом может привести к математической ошибке во время моделирования работы схемы.

**Мультиметр** используется для измерения: напряжения, тока, сопротивления, уровня сигнала в децибелах.

Двойным щелчком мыши на условном изображении (рис. 1.9, в) открывается увеличенное изображение мультиметра (рис. 1.9, а).

На увеличенном изображении нажатием левой кнопки мыши выбирается измеряемая величина – *A*, *V*,  $\Omega$  или *dB* (по единицам измерения).

При измерении переменного тока или напряжения нажимается кнопка «~», при измерении постоянного – кнопка «-».

В режиме омметра мультиметр подключают параллельно участку цепи, сопротивление которого нужно измерить. На увеличенном изображении нажимают кнопки  $\Omega$  и «-». Во избежание ошибок, схема должна быть заземлена, а источники питания должны быть исключены из схемы: идеальный источник тока заменяют разрывом цепи, а идеальный источник напряжения – короткозамкнутым участком.

Клавишу *SETTINGS* используют для настройки входного сопротивления вольтметра, последовательного сопротивления амперметра, измерительного тока омметра, опорного напряжения для отсчета в децибелах.

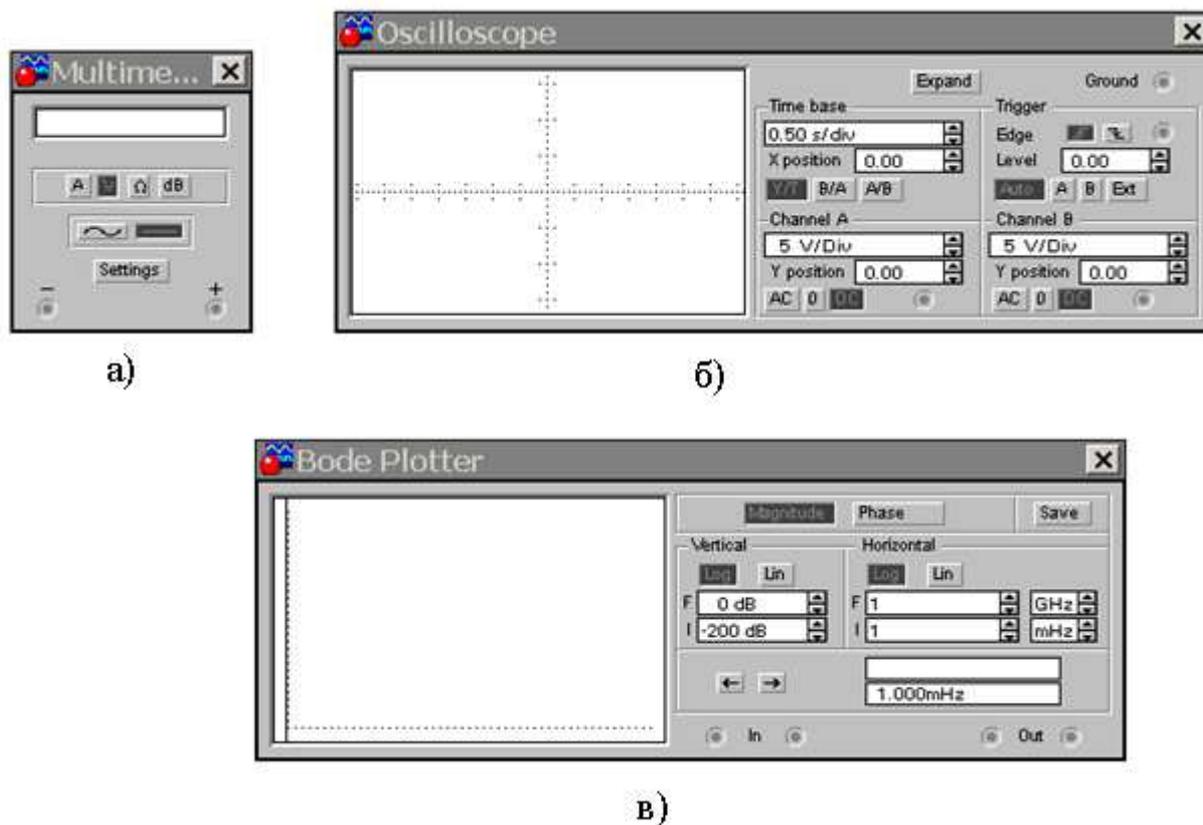


Рисунок 1.9 – Увеличенное изображение мультиметра (а), осциллографа (б), плоттера (в)

**Осциллограф** аналогичен вполне промышленному двулучевому запоминающему осциллографу и имеет две модификации: простую и расширенную. Изображение простой модели осциллографа (рис. 1.9, б) открывается двойным щелчком мыши по его условному изображению (рис. 1.8, г).

Для проведения измерений нужно задать: 1) расположение осей, по которым откладывается сигнал; 2) нужный масштаб развертки по осям; 3) смещение начала координат по осям; 4) режим работы по входу: закрытый или открытый; 5) режим синхронизации: внутренний или внешний.

Настройка осциллографа производится при помощи полей управления, расположенных на панели управления. Панель управления имеет общий для обеих модификаций осциллографа вид и разделена на четыре поля управления: 1) горизонтальной разверткой (*Time base*); 2) синхронизацией (*Trigger*); 3) каналом *A*; 4) каналом *B*.

Поле управления горизонтальной разверткой (масштабом времени) служит для задания масштаба горизонтальной оси осциллографа при наблюдении напряжения на входах каналов *A* и *B* в зависимости от времени. Временной масштаб задается в: с/дел, мс/дел, мкс/дел, нс/дел (s/div, ms/div,  $\mu$ s/div, ns/div соответственно). Величина одного деления может быть установлена от 0,1 нс до 1 с.

С помощью кнопок, расположенных в поле строки *X position*, можно дискретно сдвигать начало осциллограммы по горизонтальной оси.

В этом же поле расположены три кнопки: *Y/T*, *A/B*, *B/A*, позволяющие задавать вид зависимости отображаемых сигналов. При нажатии на кнопку *Y/T* по вертикальной оси откладывается напряжение, по горизонтальной оси – время, при нажатии на кнопки *A/B* по вертикальной оси откладывается амплитуда напряжения на входе канала *A*, по горизонтальной оси – канала *B* и при нажатии на кнопку *B/A* наоборот. При этом масштаб осей определяется установками соответствующих каналов. В режимах *A/B* и *B/A* можно наблюдать частотные и фазовые сдвиги (фигуры Лиссажу), петли гистерезиса, вольтамперные характеристики и т.д.

Две нижних части панели осциллографа являются полями управления отображением сигналов, поданных на входы каналов *A* и *B* соответственно. Верхнее окно в поле позволяет управлять масштабом напряжения, отображаемого по вертикальной или горизонтальной оси. Цена деления может дискретно устанавливаться от 10 мВ/дел до 5 кВ/дел. Масштаб для каждой оси устанавливается отдельно. Чтобы получить удобное для работы изображение на экране осциллографа перед началом эксперимента, следует установить масштаб, соответствующий ожидаемому напряжению. Ниже расположено поле, которое позволяет дискретно сдвигать ось *X* вверх или вниз. Для того, чтобы развести изображения от каналов *A* и *B*, следует воспользоваться сдвигом по оси *Y* (*Y position*) для одного или двух каналов.

Три нижние кнопки реализуют различные режимы работы осциллографа по входу. Режим работы осциллографа с закрытым входом устанавливается нажатием на кнопку *AC*. В этом режиме на вход не пропускается постоянная составляющая сигнала. При нажатии на кнопку *DC* осциллограф переходит в режим с открытым входом. В этом режиме на вход осциллографа пропускается как постоянная, так и переменная составляющая сигнала. При нажатии на кнопку *0* вход осциллографа соединяется с общим выводом осциллографа, что позволяет определить положение нулевой отметки по *Y*.

Верхнее правое поле управления *TRIGGER* определяет момент начала отображения осциллограммы на экране осциллографа. Кнопки в строке *EDGE* задают момент запуска осциллограммы по фронту или по срезу импульса на входе синхронизации. Поле *LEVEL* позволяет задавать уровень, при превышении которого происходит запуск осциллограммы. Значение уровня можно сдвинуть на три деления вниз или вверх.

Осциллограф имеет четыре режима синхронизации.

1. Автоматический режим (*AUTO*) – запуск осциллограммы производится автоматически при подключении осциллографа к схеме или при ее включении. Когда «луч» доходит до конца экрана, осциллограмма снова прописывается с начала экрана (новый экран).

2. Режимы запуска по входу *A* или *B*, в которых запускающим сигналом является сигнал, поступающий на соответствующий вход.

3. Режим «Внешний запуск» (*EXT – external*). В этом случае сигналом запуска является сигнал, подаваемый на вход синхронизации.

Нажатие клавиши *Expand* на панели простой модели открывает окно расширенной модели осциллографа (рис. 1.10). Из-за того, что расширенная модель занимает много места на рабочем поле, рекомендуется начинать исследование процессов с простой моделью, а в последующем использовать расширенную модель.

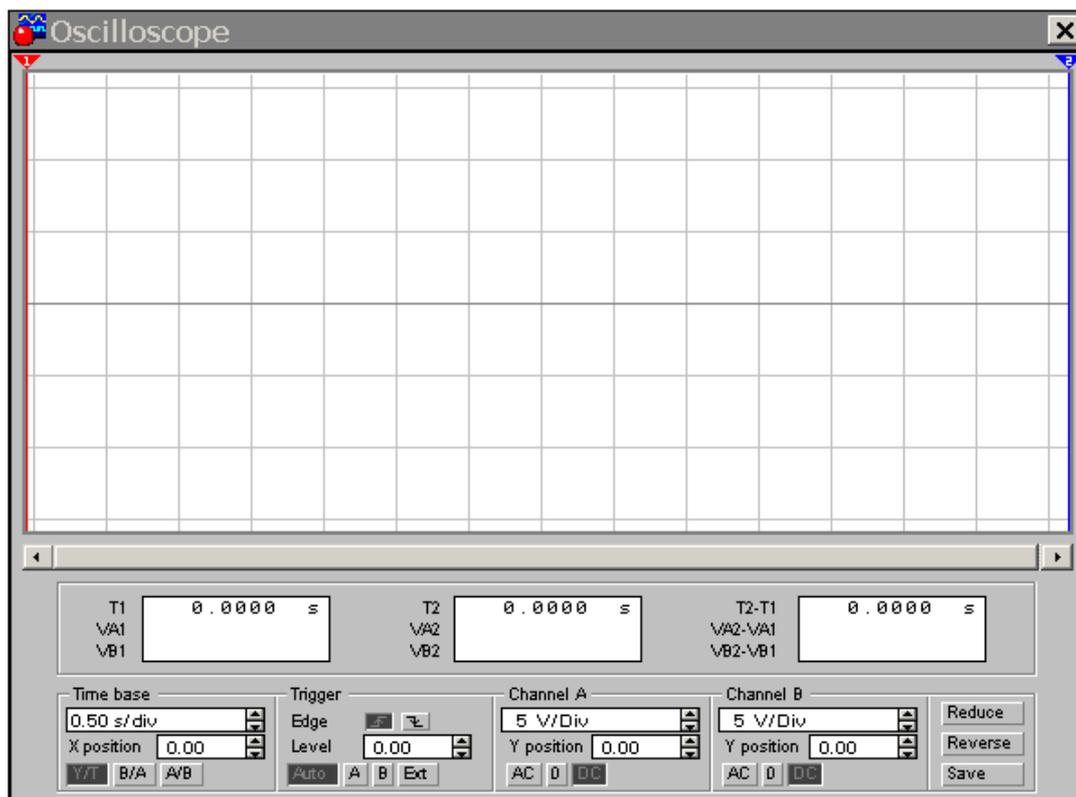


Рисунок 1.10 – Изображение расширенной модели осциллографа

Панель расширенной модели осциллографа расположена под экраном и дополнена тремя информационными табло, на которые выводятся результаты измерений. Кроме того, непосредственно под экраном находится линейка прокрутки, позволяющая наблюдать любой временной отрезок процесса от момента включения до момента выключения схемы. В сущности, расширенная модель осциллографа это совершенно другой прибор, позволяющий намного удобнее и более точно проводить анализ процессов.

На экране осциллографа расположены два курсора, обозначаемые 1 и 2, при помощи которых можно измерить мгновенные значения напряжений в любой точке осциллограммы. Для этого следует просто перетащить мышью курсоры за треугольники в их верхней части в требуемое положение. Координаты точек пересечения первого курсора с осциллограммами отображаются на левом табло, координаты второго курсора – на среднем табло. На правом табло отображаются значения разностей между соответствующими координатами первого и второго курсоров. Результаты измерений, полученные при помощи расширенной модели осциллографа,

можно записать в файл. Для этого следует нажать кнопку *Save* (Сохранить) и в диалоговом окне ввести имя файла.

Чтобы вернуться к прежнему изображению осциллографа, следует нажать клавишу *REDUCE*, расположенную в правом нижнем углу.

**Бодеплоттер** (рис. 1.8, г) используется для получения амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик схемы. Бодеплоттер измеряет отношение амплитуд сигналов в двух точках схемы и фазовый сдвиг между ними. Отношение амплитуд сигналов может измеряться в децибелах. Для измерения Бодеплоттер генерирует собственный спектр частот, диапазон которого может задаваться при настройке прибора. Частота любого переменного источника в исследуемой схеме игнорируется, однако схема должна включать какой-либо источник переменного тока.

Бодеплоттер имеет четыре зажима: два входных (*IN*) и два выходных (*OUT*). Для измерения отношения амплитуд или фазового сдвига нужно подключить положительные выводы входов *IN* и *OUT* (левые выводы соответствующих входов) к исследуемым точкам, а два других вывода заземлить.

Увеличенное изображение Бодеплоттера открывается при двойном щелчке мышью по его уменьшенному изображению (рис. 1.9, в). Верхняя панель плоттера задает вид получаемой характеристики: АЧХ или ФЧХ. Для получения АЧХ следует нажать кнопку *Magnitude*, для получения ФЧХ – кнопку *Phase*. Левая панель управления (*Vertical*) задает начальное (*I* – initial) и конечное (*F* – final) значения параметров, откладываемых по вертикальной оси, а также вид шкалы вертикальной оси – логарифмическая (*LOG*) или линейная (*LIN*). Правая панель управления (*HORIZONTAL*) настраивается аналогично.

При получении АЧХ по вертикальной оси откладывается отношение напряжений: в линейном масштабе от 0 до  $10E9$ ; в логарифмическом масштабе от  $-200$  dB до  $200$  dB. При получении ФЧХ по вертикальной оси откладываются градусы: от  $-720$  до  $+720$ . По горизонтальной оси всегда откладывается частота в герцах или в производных единицах.

В начале горизонтальной шкалы расположен курсор. Его можно перемещать нажатием на кнопки со стрелками, расположенными справа от экрана, либо «тащить» с помощью мыши. Координаты точки пересечения курсора с графиком характеристики выводятся на информационных полях внизу справа.

**Функциональный генератор** (рис. 1.11, а) является идеальным источником напряжения, вырабатывающим сигналы синусоидальной, прямоугольной или треугольной формы. Средний вывод генератора при подключении к схеме обеспечивает общую точку для отсчета амплитуды переменного напряжения. Для отсчета напряжения относительно нуля общий вывод заземляют. Крайние правый и левый выводы служат для подачи переменного напряжения на схему.

При двойном щелчке мышью по уменьшенному изображению функционального генератора открывается его увеличенное изображение (рис. 1.11, б).

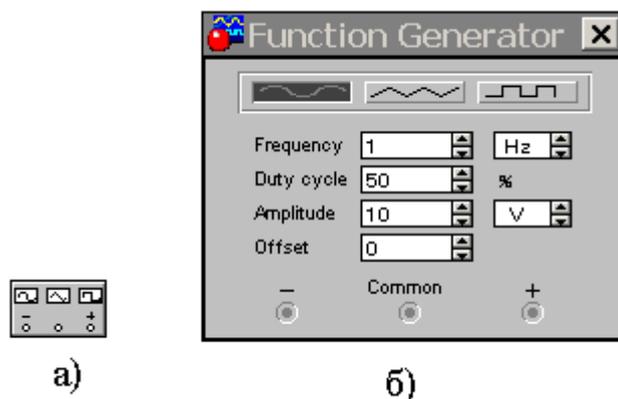


Рисунок 1.11 – Условное (а) и увеличенное (б) изображение функционального генератора

*Установка формы сигнала.* Выбрать требуемую форму выходного сигнала и нажать на кнопку с соответствующим изображением. Форму треугольного и прямоугольного сигналов можно изменить, уменьшая или увеличивая значение в поле *DUTY CYCLE* (скважность). Этот параметр определяется для сигналов треугольной и прямоугольной формы. Для треугольной формы напряжения он задает длительность (в процентах от периода сигнала) между интервалом нарастания напряжения и интервалом спада. Установив, например, значение 20, можно получить длительность интервала нарастания 20 % от периода, а длительность интервала спада – 80 %. Для напряжения прямоугольной формы этот параметр задает соотношение между длительностями положительной и отрицательной части периода.

*Установка частоты сигнала.* Частота генератора может регулироваться от 1 Hz до 999 MHz. Значение частоты устанавливается в строке *FREQUENCY* с помощью клавиатуры и кнопок со стрелками. В левом поле устанавливается численное значение, в правом – единица измерения (Hz, kHz, MHz – Гц, кГц, МГц соответственно).

*Установка амплитуды выходного напряжения.* Амплитуда выходного напряжения может регулироваться от 0 мВ до 999 кВ. Значение амплитуды устанавливается в строке *AMPLITUDE* с помощью клавиатуры и кнопок со стрелками. В левом поле устанавливается численное значение, в правом – единица измерения (mV, mV, V, kV – мкВ, мВ, В, кВ соответственно).

*Установка постоянной составляющей выходного напряжения.* Постоянная составляющая переменного сигнала устанавливается в строке *OFFSET* при помощи клавиатуры или кнопок со стрелками. Она может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Это позволяет получить, например, последовательность однополярных импульсов.

## 1.4 Моделирование схем

При построении и редактировании схем выполняются следующие операции: а) выбор компонента из библиотеки компонентов; б) выделение объекта; в) перемещение объекта; г) копирование объектов; д) удаление объектов; е) соединение компонентов схемы проводниками; ж) установка значений компонентов; з) подключение приборов.

Если схема не помещается на экране монитора, любой ее участок можно просмотреть при помощи линейек прокрутки, расположенных справа и под рабочим полем.

После построения схемы и подключения приборов анализ её работы начинается после нажатия выключателя в правом верхнем углу окна программы. Сделать паузу при работе схемы можно нажатием кнопки **Pause** под выключателем. Возобновить процесс можно повторным нажатием кнопки **Pause**. Повторное нажатие выключателя в правом верхнем углу прекращает работу схемы.

Выбор нужного компонента производится из поля компонентов, нужное поле компонентов выбирается нажатием левой кнопки мыши на одной из пиктограмм панели компонентов. При этом в поле компонентов появляются изображения соответствующих компонентов. После выбора поля компонентов нужный компонент при помощи мыши перемещается на рабочее поле. Выделение объекта осуществляется при помощи мыши (под объектом подразумевается как один компонент, так и группа компонентов). При выборе компонента нужно установить указатель мыши на нужный компонент (при этом изображение указателя изменится) и щёлкнуть левой кнопкой мыши. Для выбора группы компонентов нужно установить указатель мыши в один из углов прямоугольной области, содержащей группу, и, нажав левую кнопку мыши, растянуть рамку до необходимых размеров, после чего отпустить кнопку.

Выбранный объект изменяет свой цвет на красный. Снять выделение можно щелчком мыши в любой точке рабочего поля.

Объект можно поворачивать на угол, кратный  $90^\circ$ . Для этого объект нужно предварительно выделить, а затем выбрать команду **Rotate** из меню **Circuit**, нажать **Ctrl + R** или нажать соответствующую кнопку на рабочей панели. При этом объект повернётся на  $90^\circ$  по часовой стрелке. При повороте группы компонентов на  $90^\circ$  поворачивается каждый компонент, а не вся группа целиком.

Копирование объектов осуществляется при помощи команды **Copy** из меню **Edit**, нажатием **Ctrl + C** или нажатием соответствующей кнопки на рабочей панели. Перед копированием объект нужно выделить. После выполнения команды выделенный объект копируется в буфер. Для вставки содержимого буфера на рабочее поле нужно выбрать команду **Paste** из меню **Edit**, нажать **Ctrl + V** или нажать соответствующую кнопку на рабочей

панели. После выполнения команды содержимое буфера появится на рабочем поле и будет выделено цветом.

Удаление объекта осуществляется командами **Cut** (на рабочей панели есть соответствующая кнопка) и **Delete**. Отличие состоит в том, что при выполнении команды **Cut** объект удаляется в буфер и может быть затем вставлен обратно на рабочее поле, а при

выполнении команды **Delete** объект удаляется совсем. Перед удалением объект также должен быть выделен.

Для соединения компонентов проводниками нужно подвести указатель мыши к выводу компонента. При этом на выводе компонента появится большая чёрная точка (рис. 1.12). Нажав левую кнопку мыши, переместите её указатель к выводу компонента, с которым нужно соединиться, и отпустите кнопку мыши. Выводы компонентов соединятся проводником.

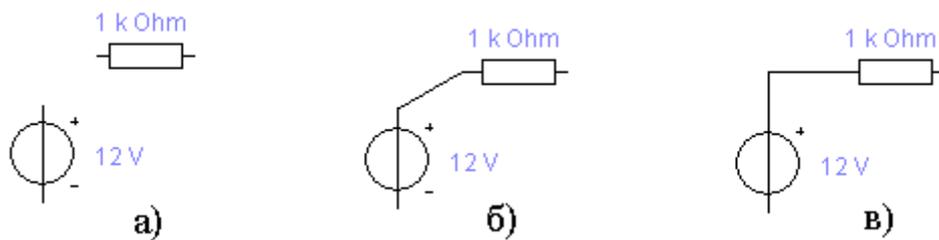


Рисунок 1.12 – Соединение компонентов проводниками

Если в схеме компоненты размещены неаккуратно, то может потребоваться спрямить проводники, соединяющие компоненты. Это можно сделать, переместив компоненты так, чтобы проводники отображались прямыми линиями.

## 1.5 Задание

1.5.1 Ознакомиться с подразделами 1.1 – 1.4 и ответить на контрольные вопросы.

1.5.2 В папке ВВП создать персональную папку с уникальным именем.

1.5.3 Собрать электрическую цепь, показанную на рис. 1.14. Сохранить файл схемы (команда Save) в персональной папке.

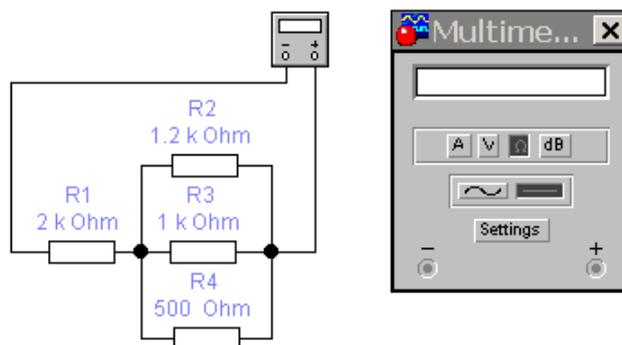


Рисунок 1.14 – Схема измерения сопротивления резисторов

1.5.4 Собрать схему, показанную на рис. 1.15. Сохранить файл схемы в персональной папке.

1.5.5 Оформить отчет.

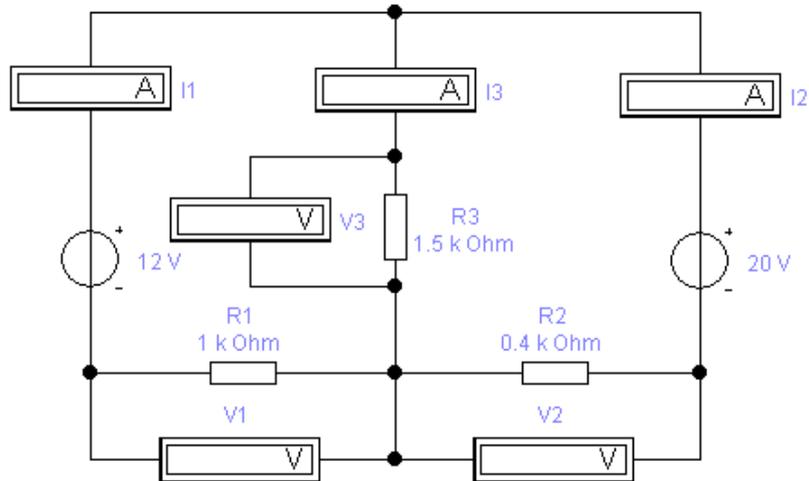


Рисунок 1.15 – Схема измерения токов и напряжений в электрической цепи

## 1.6 Контрольные вопросы

1.6.1 Какова цель работы?

1.6.2 Каково назначение системы схемотехнического моделирования Electronics Workbench?

1.6.3 Для выполнения каких операций (команд) предназначено меню работы с файлами (File)?

1.6.4 Для выполнения каких операций (команд) предназначено меню редактирования (Edit)?

1.6.5 Для выполнения каких операций (команд) предназначено меню работы с цепями (Circuit)?

1.6.6 Чем отличаются панель компонентов и поле компонентов?

1.6.7 Какие операции выполняются при построении и редактировании схем?

1.6.8 Какие приборы используются для проведения измерений?

1.6.9 Как с помощью вольтметра измерить напряжение на участке цепи?

1.6.10 Как с помощью амперметра измерить ток в цепи?

1.6.11 Как изменить внутреннее сопротивление амперметра или вольтметра?

1.6.12 Как с помощью мультиметра измерить напряжение или ток?

1.6.13 Как с помощью мультиметра измерить сопротивление участка цепи?

1.6.14 Почему при измерении сопротивления из схемы необходимо исключать источники напряжения и тока?

1.6.15 Почему источники напряжения замещаются разрывом цепи, а источники тока – коротким замыканием?

## 2 РЕЗИСТОРЫ

### 2.1 Общие сведения

На резисторах<sup>1</sup> электрическая энергия превращается в тепло, т. е. происходит рассеяние (диссипация) энергии. Основная характеристика резистора (рис. 1.1) – сопротивление электрическому току. В международной системе единиц (СИ) единица сопротивления – Ом ( $\Omega$ , Ohm).



Рисунок 2.1 – Чип-резистор на печатной плате

Резисторы позволяют контролировать и регулировать значения токов и напряжений в электрических цепях и применяются чаще, чем другие элементы электроники.

Падение напряжения  $V$  на резисторе и ток  $I$ , протекающий через него, связаны с номинальным сопротивлением  $R$  резистора законом Ома:

$$I = V / R.$$

При последовательном соединении резисторов (рис. 2.2, а) их сопротивления складываются:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2,$$

где  $R_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентное сопротивление последовательно включенных резисторов  $R_{1,2}$ .

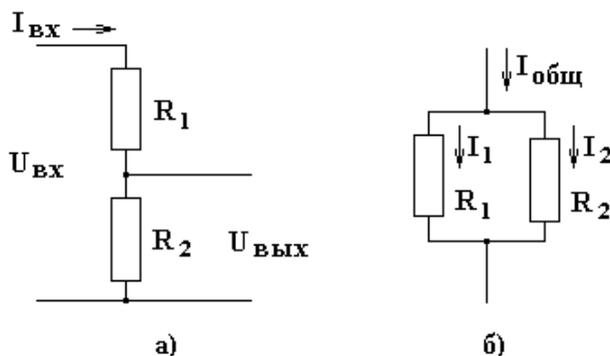


Рисунок 2.2 – Последовательное (а) и параллельное (б) соединение резисторов

<sup>1</sup> От латинского resisto – сопротивляюсь.

При параллельном соединении резисторов (рис. 1.2, б) суммируются их проводимости:

$$1 / R_{\text{ЭКВ}} = 1 / R_1 + 1 / R_2.$$

Наиболее часто применяемое соединение резисторов – делитель напряжения (рис. 2.2, а). В делителе напряжения, выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  зависит от значения входного (питающего) напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  и значений сопротивления резисторов  $R_{1,2}$ . Пренебрегая малым током нагрузки, делитель напряжения можно описать соотношением:

$$I_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / (R_1 + R_2) = U_{\text{ВЫХ}} / R_2.$$

Простейший делитель тока – два параллельно включённых резистора (рис. 2.2, б). Поскольку резисторы соединены параллельно, к ним приложено одинаковое напряжение. Расчёт делителя тока на резисторах основывается на законе Ома, первом законе Кирхгофа (правиле сложения токов) и формуле параллельного соединения резисторов:

$$I_{1,2} = I_{\text{ОБЩ}} R_{1,2} / (R_1 + R_2).$$

Согласно первому закону Кирхгофа, сумма токов, втекающих в узел электрической цепи и вытекающих из него, равна нулю. Например, для схемы рис. 2.2, б

$$I_{\text{ОБЩ}} + I_1 + I_2 = 0.$$

Ток, втекающий в узел, обычно берется со знаком плюс, а вытекающий – со знаком минус.

По второму закону Кирхгофа суммарное падение напряжения на элементах цепи, образующих замкнутый контур, также равно нулю. Например, для схемы рис. 1.2, б

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0.$$

## 2.2 Задание

2.2.1 Ознакомиться с подразделом 2.1 и ответить на контрольные вопросы.

2.2.2 Открыть файл со схемой, показанной на рис. 2.3.

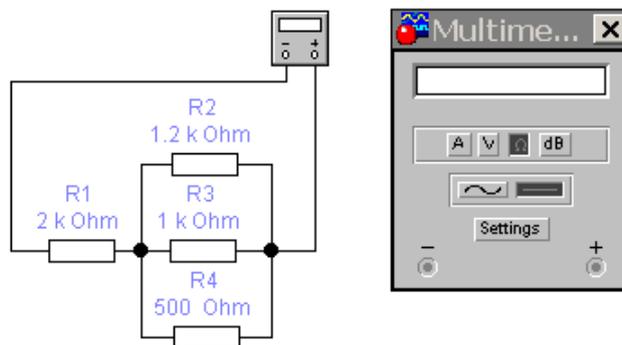


Рисунок 2.3 – Измерение эквивалентного сопротивления

2.2.3 Рассчитать эквивалентное сопротивление цепи. При помощи мультиметра измерить эквивалентное сопротивление. Результаты измерения и расчета внести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. Результаты измерения и расчета эквивалентного сопротивления цепи

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$	$R_{\text{ЭКВ}}, \text{ Ом}$	
				Расчет	Измерение

2.2.4 Повторить п. 2.2.3 для других (выбранных Вами) значений сопротивления резисторов. Результаты измерения и расчета также внести в таблицу 2.1. Сравнить результаты измерений с расчетными значениями.

2.2.5 Открыть файл со схемой, показанной на рис. 2.4.

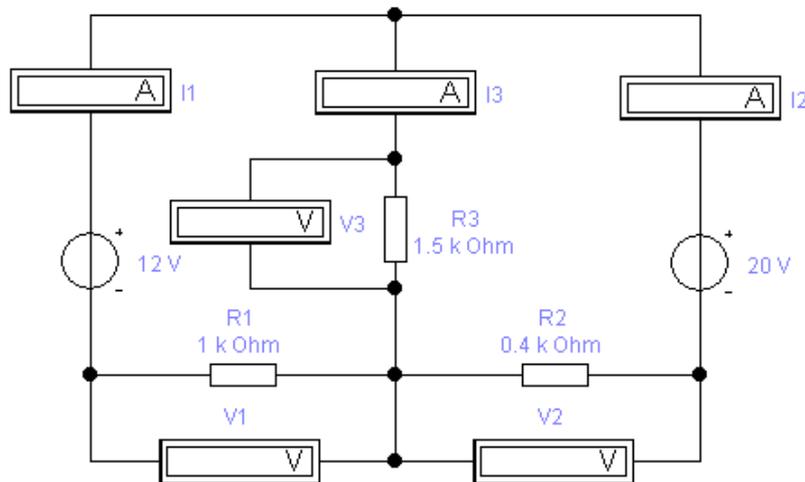


Рисунок 2.4 – К проверке законов Ома и Кирхгофа

2.2.6 Измерить токи в ветвях цепи и падения напряжений на резисторах. Результаты измерений внести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2. Результаты измерений для проверки законов Ома и Кирхгофа

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$I_1, \text{ А}$	$I_2, \text{ А}$	$I_3, \text{ А}$	$V_1, \text{ А}$	$V_2, \text{ А}$	$V_3, \text{ А}$

2.2.7 Повторить п. 2.2.6 для других (выбранных Вами) значений сопротивления резисторов. Результаты измерений также внести в таблицу 2.2.

2.2.6. Проверить законы Ома и Кирхгофа.

2.2.7 Оформить отчет.

## 2.3 Контрольные вопросы

2.3.1 Какова цель работы?

2.3.2 Каково назначение резисторов?

2.3.3 Сформулируйте законы Ома и Кирхгофа.

2.3.4 Как определить эквивалентное сопротивление последовательно включенных резисторов?

2.3.5 Как определяется эквивалентное сопротивление параллельно включенных резисторов?

2.3.6 Что называют резистивными делителями напряжения и тока?

## 3 КОНДЕНСАТОРЫ

### 3.1 Общие сведения

Конденсатор<sup>2</sup> (рис. 3.1) обычно состоит из электродов (обкладок) в форме пластин, разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок. Конденсатор способен накапливать энергию в собственном электрическом поле, создаваемом зарядами на обкладках. Напряжение на конденсаторе  $U_C$  и заряд на обкладках  $Q$  можно описать соотношением:

$$U_C = Q / C,$$

где  $C$  – электрическая емкость конденсатора. В системе СИ единицей емкости является фарад (Ф, F).



Рисунок 3.1 – Чип-конденсатор на печатной плате

На рис. 3.2 показаны процессы в конденсаторе при подключении его к идеальному источнику<sup>3</sup> прямоугольных импульсов напряжения  $E$ .

В момент подачи импульса  $E$  напряжение на выводах конденсатора  $U_C$  равно нулю. Со временем  $U_C$  экспоненциально увеличивается, – конденсатор заряжается через резистор  $R$  до напряжения питания  $E$ . Ток зарядки  $I_C$  максимален в первый момент времени, но по мере зарядки конденсатора экспоненциально уменьшается до нуля. По окончании импульса напряжения конденсатор разряжается,  $U_C$  уменьшается по экспоненте. При этом ток  $I_C$  изменяет направление и по мере разрядки конденсатора также уменьшается по экспоненциальному закону. Напряжение и ток на резисторе  $R$  ведут себя одинаково, их взаимосвязь описывается законом Ома.

<sup>2</sup> От латинского *condensare* – уплотнять, сгущать.

<sup>3</sup> Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю.

Скорость изменения напряжения  $U_C$  и тока  $I_C$  со временем  $t$  зависит от емкости конденсатора  $C$  и сопротивления  $R$ , через которое он заряжается или разряжается. Чем больше так называемая постоянная времени цепи  $\tau = C R$  (имеющая размерность времени) тем меньше скорость изменения  $U_C$  и  $I_C$  (экспонента более вытянута по времени).

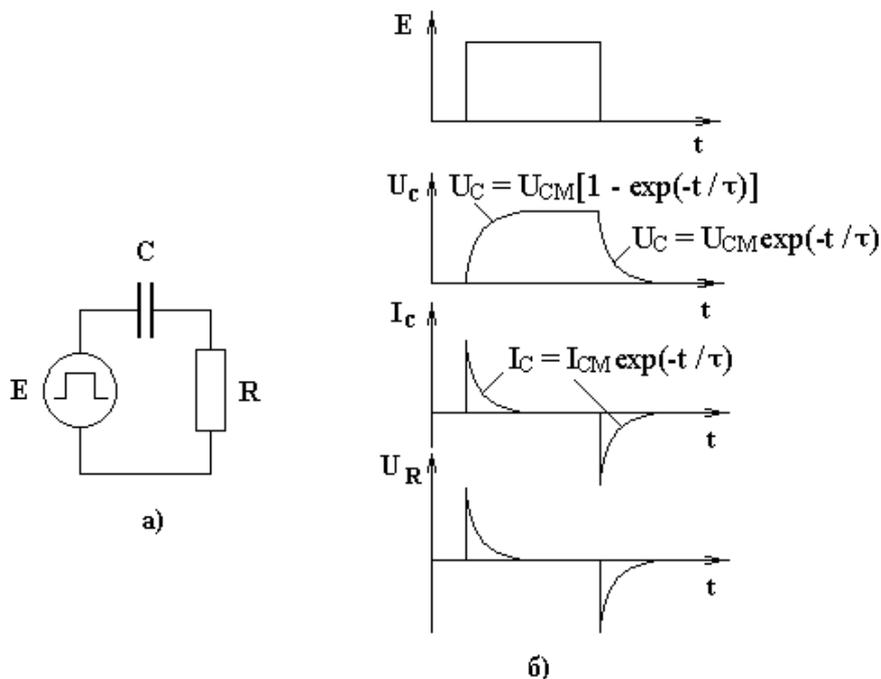


Рисунок 3.2 – Схема (а) и временные диаграммы (б) зарядки и разрядки конденсатора

Постоянную времени зарядки конденсатора можно определить экспериментально на том основании, что за время  $t = \tau$  ток  $I_C$  уменьшается до значения  $I_{CM} \exp(-1) = 0,368 I_{CM}$ , а напряжение увеличивается до  $U_C = (1 - 0,368) U_{CM} = 0,632 U_{CM}$ . Соответственно, при разрядке за время  $t = \tau$  напряжение  $U_C$  уменьшается до значения  $0,368 U_C$ , а ток  $I_C$  – до  $0,368 I_{CM}$ .

Таким образом, постоянная времени зарядки – это время, которое требуется конденсатору, чтобы зарядиться до 63,2 % приложенного напряжения. Постоянная времени разрядки – это время, которое требуется конденсатору, чтобы разрядиться до 36,8 % от начального напряжения. Время, которое требуется конденсатору, чтобы полностью зарядиться до приложенного напряжения или полностью разрядиться до нуля, приблизительно равно пятикратной постоянной времени, т. е.  $5 \tau$ .

Общая емкость конденсаторов при параллельном соединении равна сумме их емкостей. Величина, обратно пропорциональная общей емкости  $K$  конденсаторов при последовательном соединении равна сумме величин, обратно пропорциональных их емкостям:

$$1 / C_{\text{Общ}} = 1 / C_1 + 1 / C_2 + \dots + 1 / C_K.$$

Для двух последовательно соединенных конденсаторов ( $K = 2$ ) их общая емкость

$$C_{\text{Общ}} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2).$$

Состоящий из конденсатора и резистора четырёхполюсник, представленный на рис. 3.2, а, называют дифференцирующей цепочкой. Если в дифференцирующей цепочке поменять местами конденсатор и резистор, то получим интегрирующую цепочку. На выходе интегрирующей цепочки будут не остrokонечные дифференцированные импульсы, а импульсы напряжения, которое присутствует на выводах конденсатора.

### 3.2 Задание

3.2.1 Ознакомьтесь с подразделом 3.1 и ответить на контрольные вопросы.

3.2.2 Открыть файл rc.ewb со схемой, показанной на рис. 3.3 (File – Open – rc.ewb).

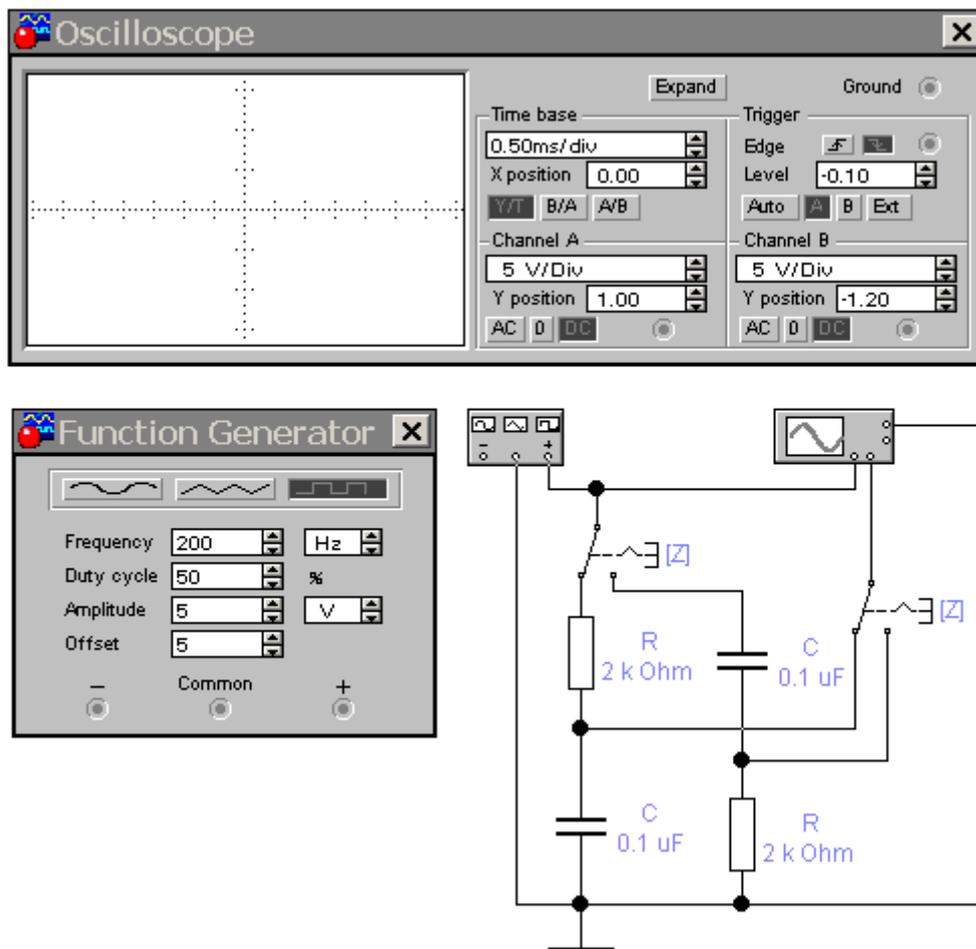


Рисунок 3.3 – Схема измерений переходного процесса в RC цепи

С выхода функционального генератора на RC цепь через ключ, управляемый клавишей Z, поступают прямоугольные импульсы напряжения. Внутренне сопротивление функционального генератора равно нулю. На канал А осциллографа подается напряжение с выхода функционального генератора. На канал В осциллографа при одном положении ключа подается напряжение  $U_C$  на конденсаторе С, а при другом положении – падение напряжения на резисторе R, пропорциональное току зарядки и разрядки конденсатора  $I_C$ .

3.2.3 Определить постоянные времени RC цепи: 1) как произведение номинальных значений емкости конденсатора и сопротивления резистора –  $\tau_{RC}$ ; 2) как время зарядки конденсатора до 63,2 % приложенного напряжения –  $\tau_{3U}$ ; 3) как время понижения тока зарядки конденсатора до 36,8 % начального значения –  $\tau_{3I}$ ; 4) как время разрядки конденсатора до 36,8 % приложенного напряжения –  $\tau_{pU}$ . Результаты внести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. Параметры RC цепи

R, Ом	C, Ф	$\tau_{RC}$ , с	$\tau_{3U}$ , с	$\tau_{3I}$ , с	$\tau_{pU}$ , с

3.2.4 Определить постоянные времени RC цепи для других (выбранных Вами) номинальных значений емкости конденсатора C и сопротивления резистора R. Результаты также внести в таблицу 2.1.

3.2.5 Оформить отчет.

### 3.3 Контрольные вопросы

3.3.1 Какова цель работы?

3.3.2 Каково назначение конденсаторов?

3.3.3 Как определить общую емкость последовательно включенных конденсаторов?

3.3.4 Как определить общую емкость параллельно включенных конденсаторов?

3.3.5 Что называют постоянной времени RC цепи?

3.3.6 Как рассчитать постоянную времени RC цепи?

3.3.7 Как из осциллограммы переходного процесса определить постоянную времени RC цепи?

3.3.8 В чем отличие интегрирующей и дифференцирующей RC цепочек?

## 4 КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

### 4.1 Общие сведения

Катушка индуктивности (рис. 4.1) может быть выполнена из одножильного или многожильного изолированного провода, намотанного на каркас из диэлектрика. Бывают и бескаркасные катушки индуктивности, в частности в виде плоской спирали, волны, полоски печатного или другого проводника.

Катушка индуктивности способна накапливать энергию в собственном магнитном поле. Основным параметром катушки индуктивности является ее индуктивность (или коэффициент самоиндукции)

$$L = \Phi / I,$$

где  $I$  – ток в катушке,  $\Phi$  – создаваемый этим током магнитный поток. В системе СИ индуктивность измеряется в генри (Гн).



Рисунок 4.1 – Цилиндрическая и тороидальная катушки индуктивности с сердечниками

Временные диаграммы процессов в катушке индуктивности при ее подключении к источнику прямоугольного однополярного сигнала, показаны на рис. 4.2.

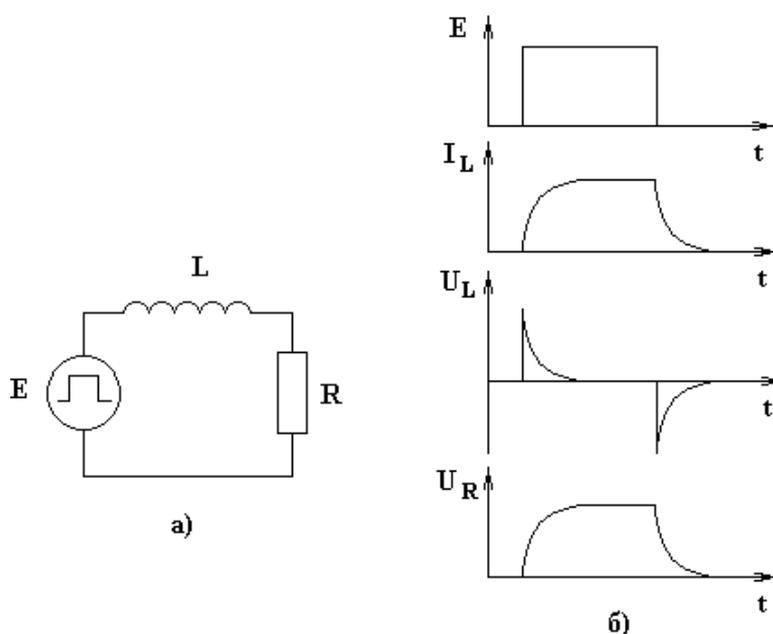


Рисунок 4.2 – Схема (а) и временные диаграммы (б) процессов в катушке индуктивности

В момент подачи прямоугольного импульса напряжения  $E$  ток индуктивности  $I_L$  равен нулю и со временем увеличивается по экспоненте, – катушка индуктивности накапливает энергию (в начальный момент времени ее внутреннее сопротивление максимально). Напряжение на выводах катушки  $U_L$  по мере накопления энергии уменьшается по экспоненте от максимального значения до нуля. По окончании входного импульса, т. к. индуктивность – элемент инерционный,  $U_L$  изменяет полярность, ток  $I_L$  при этом продолжает течь в прежнем направлении. Со временем  $I_L$  уменьшается по экспоненте, – запасённая в катушке индуктивности энергия иссякает. Напряжение  $U_L$ , изменившее полярность, так же по экспоненте стремится к нулю. Напряжение и ток на нагрузочном резисторе ведут себя одинаково.

Постоянная времени, характеризующая скорость экспоненциального изменения напряжения  $U_L$  и тока  $I_L$

$$\tau = L / R.$$

Чем больше индуктивность  $L$  и меньше сопротивление  $R$ , тем медленнее изменяются  $U_L$  и  $I_L$  (экспоненты более вытянуты по времени).

Состоящий из резистора и катушки индуктивности четырёхполюсник, представленный на рис. 4.2, а, называют интегрирующей цепочкой. Если в интегрирующей цепочке поменять местами резистор и катушку индуктивности, то получим дифференцирующую RL цепочку.

## 4.2 Переходной процесс в RL цепи

4.2.1 Ознакомиться с подразделом 4.1 и ответить на контрольные вопросы.

4.2.2 Открыть файл gl.ewb со схемой, показанной на рис. 4.3.

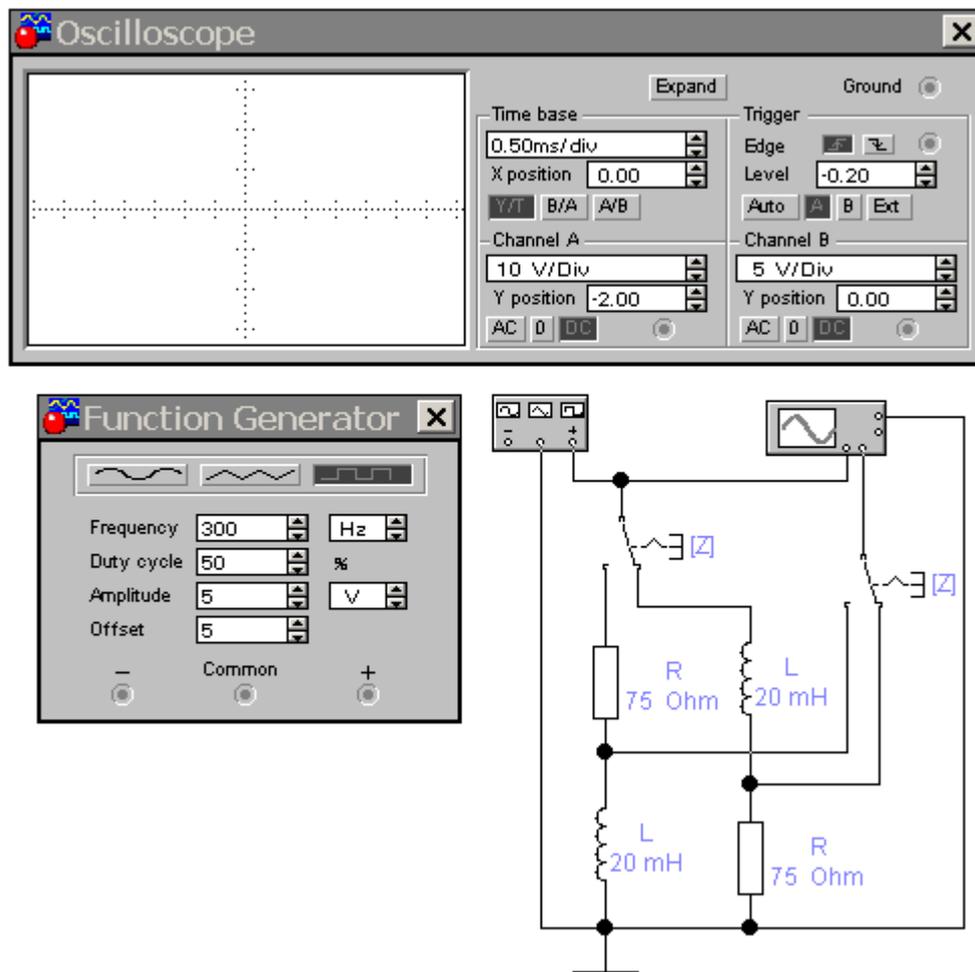


Рисунок 4.3 – Схема измерений переходного процесса в RL цепи

С выхода функционального генератора на исследуемую RL цепь через ключ поступают прямоугольные импульсы напряжения. На канал А осциллографа подается напряжение с выхода функционального генератора. На канал В осциллографа при одном положении ключа подается напряжение

$U_L$  на катушке индуктивности  $L$ , а при другом положении – падение напряжения на резисторе  $R$ , пропорциональное току  $I_L$ .

4.2.3 Определить постоянные времени  $RL$  цепи: 1) как отношение номинальных значений индуктивности катушки и сопротивления резистора –  $\tau_{RL}$ ; 2) как время нарастания тока  $I_L$  до 63,2 % максимального значения –  $\tau_{3I}$ ; 3) как время понижения тока  $I_L$  до 36,8 % начального значения –  $\tau_{PI}$ ; 4) как время понижения напряжения на катушке  $U_L$  до 36,8 % начального значения –  $\tau_U$ . Результаты внести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. Параметры  $RL$  цепи

R, Ом	L, Гн	$\tau_{RL}$ , с	$\tau_{3I}$ , с	$\tau_{PI}$ , с	$\tau_U$ , с

4.2.4 Определить постоянные времени  $RL$  цепи для других (выбранных Вами) номинальных значений индуктивности катушки  $L$  и сопротивления резистора  $R$ . Результаты также внести в таблицу 4.1.

4.2.5 Оформить отчет.

### 4.3 Контрольные вопросы

4.3.1 Какова цель работы?

4.3.2 Каково назначение катушек индуктивности?

4.3.3 Как определить общую индуктивность последовательно включенных катушек индуктивности?

4.3.4 Как определить общую индуктивность параллельно включенных катушек индуктивности?

4.3.5 Что называют постоянной времени  $RL$  цепи?

4.3.6 Как рассчитать постоянную времени  $RL$  цепи?

4.3.7 Как из осциллограммы переходного процесса определить постоянную времени  $RL$  цепи?

4.3.8 В чем отличие интегрирующих (дифференцирующих)  $RL$  и  $RC$  цепочек?

## 5 ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ СИГНАЛЕ

### 5.1 Общие сведения

Электромагнитные процессы в электрической цепи, при которых мгновенные значения напряжений –  $u$  и токов –  $i$  повторяются через определенный промежуток времени (период –  $T$ ), называют периодическими. Гармоническими колебаниями (сигналами) называются периодические процессы, описываемые простейшей синусоидальной функцией. Любые несинусоидальные периодические колебания можно представить суммой (бесконечным рядом) синусоидальных функций, имеющих (обычно) кратные частоты.

На рис. 5.1 показаны основные элементы тригонометрического описания гармонического сигнала

$$u = U_M \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $u$  – мгновенное значение электрического напряжения;  $U_M$  – максимальное значение напряжения (амплитуда);  $\omega = 2 \pi f$  – угловая частота (скорость изменения аргумента – угла, [рад / с]);  $f = 1 / T$  – частота синусоидального колебания, [Гц];  $\varphi$  – начальная фаза (определяется смещением гармонической функции относительно начала координат).

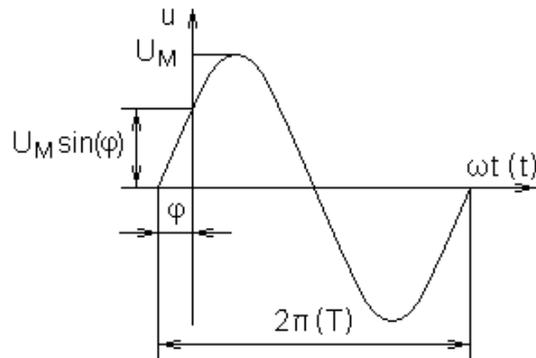


Рисунок 5.1 – Временная диаграмма гармонического сигнала

За аргумент может быть принято время –  $t$  или соответствующий ему угол –  $\omega t$ . Аргументу  $t$  соответствует период  $T$ , а аргументу  $\omega t$  – период  $2 \pi$ . Величина  $\omega t + \varphi$  называется фазовым углом или фазой.

Мгновенное значение функции  $u = U_M \sin(\omega t + \varphi)$  можно получить как проекцию на вертикальную ось отрезка (вектора) длиной  $U_M$ , вращающегося относительно начала прямоугольной системы координат в положительном направлении (против часовой стрелки) с угловой частотой  $\omega$  (рис. 5.2).

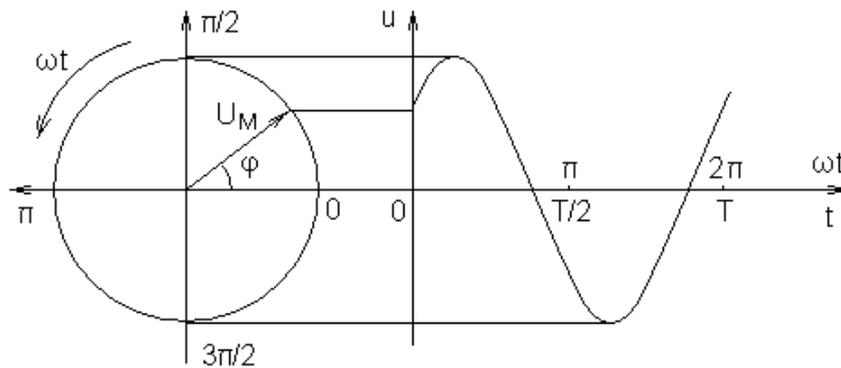


Рисунок 5.2 – Представление синусоиды вращающимся вектором

В момент  $t = 0$  вектор образует с горизонтальной осью угол  $\varphi$  и его проекция на вертикальную ось равна  $U_M \sin \varphi$ , т. е. мгновенному значению функции  $u = U_M \sin(\omega t + \varphi)$  при  $t = 0$ . За время  $t = t_1$  вектор повернется на угол  $\omega t_1$  и окажется повернутым относительно горизонтальной оси на угол  $\omega t_1 + \varphi$ , его проекция на ось будет равна  $U_M \sin(\omega t_1 + \varphi)$  и т. д.

Если гармонические колебания имеют одну и ту же частоту, то соответствующие этим колебаниям векторы вращаются с одинаковой угловой частотой, и поэтому углы между ними сохраняются неизменными. При равенстве начальных фаз, т. е. при  $\varphi = 0$ , векторы направлены в одну и ту же сторону, т. е. совпадают по фазе (синфазны). При фазовом сдвиге  $180^\circ$  векторы направлены в диаметрально противоположные стороны (находятся в противофазе).

Диаграмма, изображающая совокупность векторов, построенных с соблюдением их взаимной ориентации по фазе, называется векторной диаграммой.

Пусть возмущающим сигналом, приложенным к пассивному элементу, будет электрическое напряжение:

$$u(t) = U_M \sin(\omega t).$$

Мгновенный ток резистора изменяется синфазно с напряжением на его контактах (рис. 5.3, а):

$$i_R(t) = (U_M / R) \sin(\omega t) = I_{RM} \sin(\omega t),$$

где  $R$  – электрическое сопротивление резистора. На временной диаграмме (рис. 5.4, а) синусоиды тока и напряжения одновременно проходят нулевые и экстремальные точки.

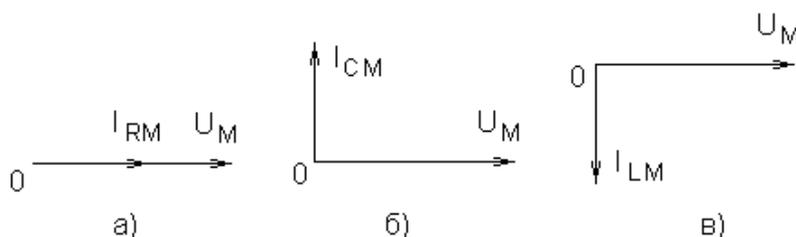


Рисунок 5.3 – Векторные диаграммы напряжения и тока для резистора (а), конденсатора (б) и катушки индуктивности (в)

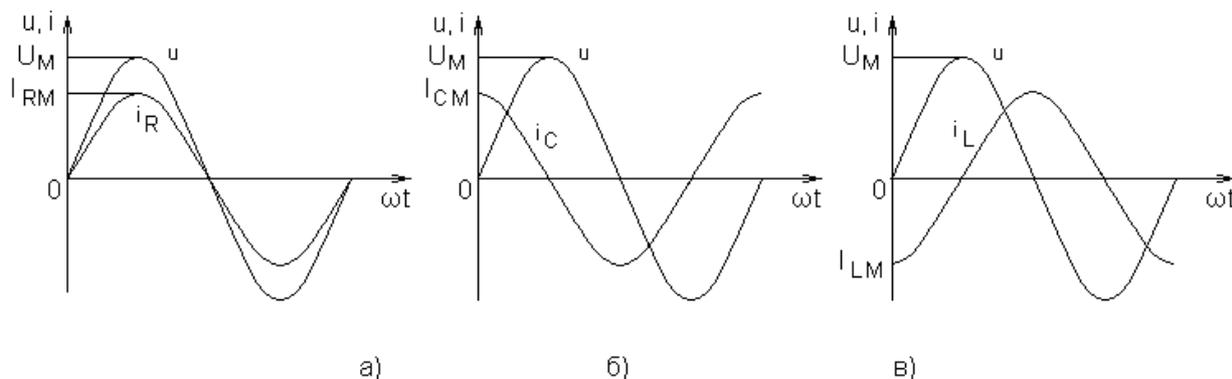


Рисунок 5.4 – Временные диаграммы напряжения и тока для резистора (а), конденсатора (б) и катушки индуктивности (в)

Свойство конденсатора сопротивляться переменному электрическому току называют реактивным сопротивлением конденсатора –  $X_C$ . Реактивное сопротивление  $X_C$  измеряется в Омах и обусловлено передачей энергии

переменным током электрическому полю и обратно. Чем выше частота  $\omega$ , тем меньше реактивное сопротивление конденсатора:

$$X_C = 1 / (\omega C),$$

где  $C$  – собственная емкость конденсатора.

Для конденсатора справедлива следующая зависимость тока от напряжения:

$$i_C(t) = (U_M / X_C) \cos(\omega t) = I_{CM} \cos(\omega t).$$

При  $t = 0$  ток  $i_C$  достигает максимального значения (рис. 5.4, б) и опережает напряжение на  $90^\circ$  (рис. 5.3, б). С ростом частоты гармонического сигнала  $\omega$  емкостное сопротивление уменьшается, что вызывает при той же амплитуде напряжения рост тока.

Катушка индуктивности в электрической цепи хорошо проводит постоянный ток и в то же время оказывает сопротивление переменному току, поскольку при изменении тока в катушке возникает электродвижущая сила (ЭДС) самоиндукции, препятствующая этому изменению. Свойство индуктивности сопротивляться переменному электрическому току называют реактивным сопротивлением индуктивности –  $X_L$ . Реактивное сопротивление  $X_L$  измеряется в Омах и обусловлено передачей энергии переменным током магнитному полю и обратно. Чем выше частота, тем больше реактивное сопротивление индуктивности:

$$X_L = \omega L,$$

где  $L$  – индуктивность катушки.

Для катушки индуктивности

$$i_L(t) = - (U_M / X_L) \cos(\omega t) = - I_{LM} \cos(\omega t).$$

При  $t = 0$  ток достигает максимально отрицательного значения (рис. 5.4, в) и отстаёт от напряжения на  $90^\circ$  (рис. 5.3, в). При росте частоты входного сигнала пропорционально растёт реактивное сопротивление катушки индуктивности, соответственно уменьшается ток в цепи.

Полное сопротивление (импеданс) RLC цепи

$$Z = (R^2 + X_{\text{СУМ}}^2)^{1/2},$$

где  $X_{\text{СУМ}} = X_L - X_C$  – суммарное реактивное сопротивление. Активное сопротивление  $R$  определяет необратимые процессы в цепи, в данном случае процессы превращения электроэнергии в тепло. Реактивное сопротивление  $X_{\text{СУМ}}$  определяет процессы временного перераспределения энергии между источником электроэнергии, конденсатором и катушкой индуктивности.

Определив амплитудное значение тока

$$I_M = U_M / Z,$$

легко рассчитать амплитуды падений напряжения на каждом компоненте электрической цепи, используя закон Ома:

$$U_{RM} = R I_M, \quad U_{CM} = X_C I_M, \quad U_{LM} = X_L I_M.$$

Фазовая задержка напряжения относительно тока в последовательной цепи

$$\varphi = \text{arctg}(X_{\text{СУМ}} / R).$$

## 5.2 Задание

5.2.1 Ознакомиться с подразделом 5.1 и ответить на контрольные вопросы.

5.2.2 Открыть файл rgs.ewb со схемой, показанной на рис. 5.5.

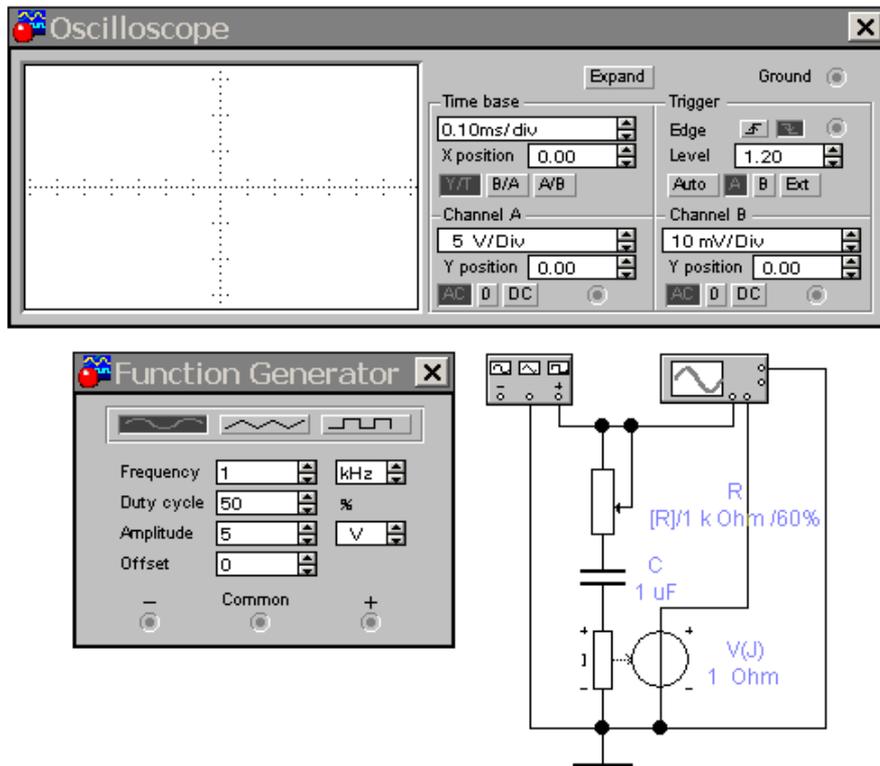


Рисунок 5.5 – Схема анализа RC цепи на переменном сигнале

С выхода функционального генератора на RC цепь подается синусоидальное напряжение. Внутренне сопротивление функционального генератора равно нулю. На канал А осциллографа подается напряжение с выхода генератора, а на канал В (посредством управляемого током источника напряжения V) – напряжение, пропорциональное току RC цепи.

Таблица 5.1. Зависимость полного сопротивления RC цепи, амплитуды и фазовой задержки тока от сопротивления резистора R

R, Ом	Расчет			Эксперимент	
	Z, Ом	I <sub>СМ</sub> , А	φ, °	I <sub>СМ</sub> , А	φ, °
0					
200					
...					
1000					

5.2.3 С помощью осциллографа измерить зависимость амплитуды и фазовой задержки тока от сопротивления резистора  $R$ . Результаты внести в таблицу 5.1

5.2.4 Рассчитать полное сопротивление исследуемой  $RC$  цепи –  $Z$ , амплитуду тока –  $I_{CM}$ , фазовую задержку тока –  $\varphi$  в зависимости от сопротивления  $R$ . Результаты внести в таблицу 5.1.

5.2.5 Открыть файл `pr1.ewb` со схемой, показанной на рис. 5.6.

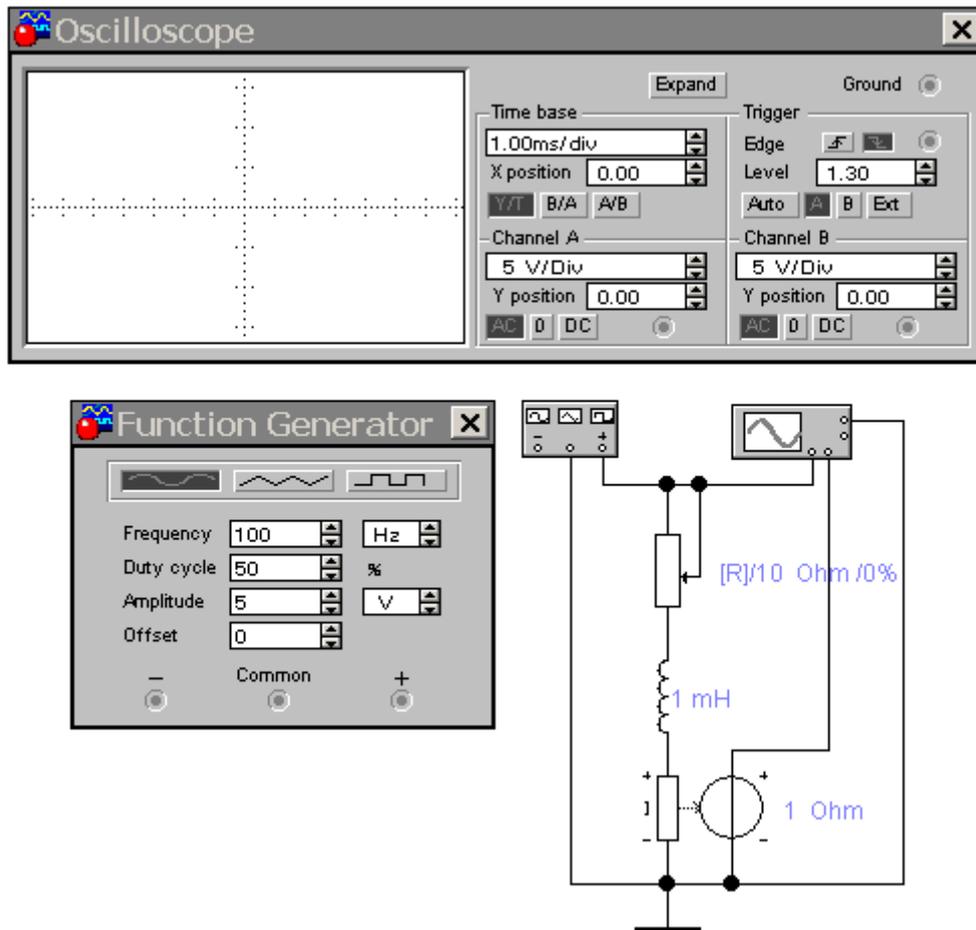


Рисунок 5.6 – Схема анализа  $RL$  цепи на переменном сигнале

С выхода функционального генератора на  $RL$  цепь подается синусоидальное напряжение. Внутренне сопротивление функционального генератора равно нулю. На канал А осциллографа подается напряжение с выхода генератора, а на канал В (посредством управляемого током источника напряжения  $V$ ) – напряжение, пропорциональное току  $RL$  цепи.

5.2.6 С помощью осциллографа измерить зависимость амплитуды и фазовой задержки тока от сопротивления резистора  $R$ . Результаты внести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2. Зависимость амплитуды и фазовой задержки тока  $RL$  цепи от сопротивления резистора  $R$

R, Ом	Расчет			Эксперимент	
	Z, Ом	$I_{LM}$ , А	$\varphi$ , °	$I_{LM}$ , А	$\varphi$ , °

0					
2					
...					
10					

5.2.7 Рассчитать полное сопротивление RL цепи –  $Z$ , амплитуду тока –  $I_{LM}$ , фазовую задержку тока –  $\varphi$  в зависимости от сопротивления  $R$ . Результаты внести в таблицу 5.2.

5.2.8 Оформить отчет.

### 5.3 Контрольные вопросы

5.3.1 Какова цель работы?

5.3.2 Что называют гармоническим сигналом?

5.3.3 Какими параметрами характеризуется гармонический сигнал?

5.3.4 В чем отличие активного и реактивного сопротивлений цепи?

5.3.5 От чего зависят реактивные сопротивления конденсатора и катушки индуктивности?

5.3.6 Как определить полное сопротивление последовательной RLC цепи?

5.3.7 Как определить фазовый сдвиг между током и напряжением для последовательной RLC цепи?

5.3.8 Какова природа реактивного сопротивления конденсатора и катушки индуктивности?

## 6 ЧАСТОТНЫЕ ФИЛЬТРЫ

### 6.1 Общие сведения

Частотные свойства различных цепей в технике принято оценивать с помощью амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), при этом сами цепи рассматривают как четырёхполюсники.

Состоящий из конденсатора и резистора четырёхполюсник, представленный на рис. 3.2, а, называют дифференцирующей цепочкой. Дифференцирующая цепочка применяется для преобразования прямоугольных импульсов большой длительности в прямоугольные импульсы малой длительности, а также в качестве фильтра верхних частот (ФВЧ).

На переменном напряжении дифференцирующую цепочку можно рассматривать как резистивный делитель напряжения (рис. 2.2, а), в котором вместо резистора  $R_1$  выступает реактивное сопротивление  $X_C$ . АЧХ такого делителя показана на рис. 6.1, а. Значение частоты сигнала, на котором амплитуда выходного напряжения уменьшается (затухает) до значения 0,7 от максимального называется частотой среза фильтра. Частота среза  $f_{CP}$  связана с постоянной времени цепи  $\tau$  соотношением

$$f_{CP} = 1 / (2 \pi \tau) .$$

Зная, как рассчитывается делитель напряжения и реактивное сопротивление конденсатора на определённой частоте, можно легко рассчитать простейший Г-образный ФВЧ на конденсаторе и резисторе.

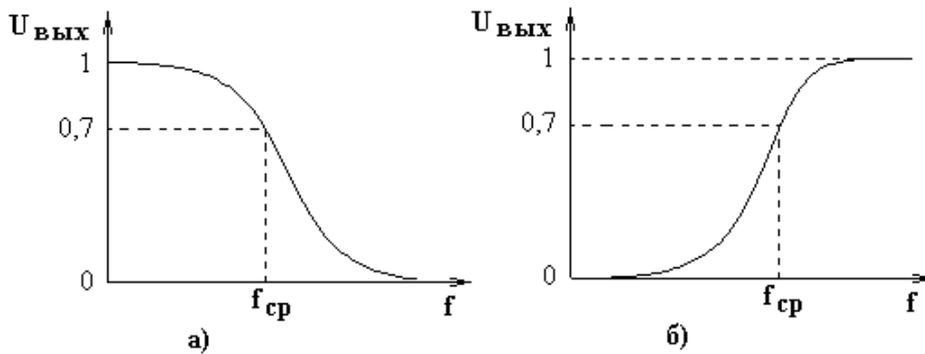


Рисунок 6.1 – Амплитудно-частотные характеристики ФВЧ (а) и ФНЧ (б)

На рис. 6.2, а приведена фазово-частотная характеристика ФВЧ.

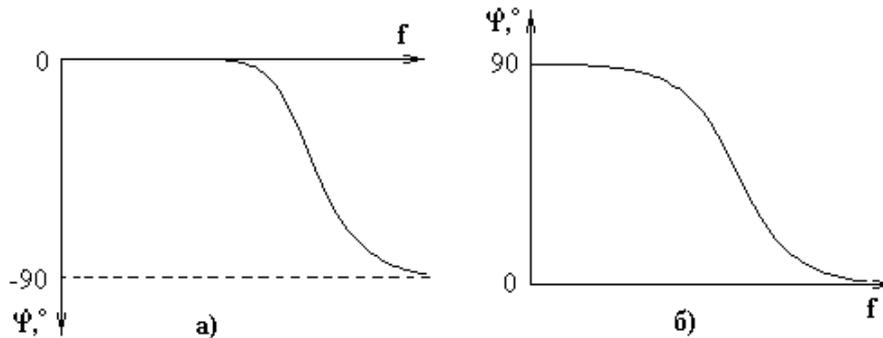


Рисунок 6.2 – Фазово-частотные характеристики ФВЧ (а) и ФНЧ (б)

Если в дифференцирующей цепочке поменять местами конденсатор и резистор, то получим интегрирующую цепочку с АЧХ, показанной на рис. 6.1, б. Все процессы в интегрирующей цепочке происходят точно так же, как и в дифференцирующей. Отличие заключается в том, что выходным элементом является не резистор, а конденсатор. (а) и ФНЧ (б)

Таким образом, если дифференцирующая цепочка – ФВЧ, то интегрирующая – фильтр нижних частот (ФНЧ). Рассчитывается ФНЧ так же, как и ФВЧ, т. е. через делитель напряжения. Фазово-частотная характеристика ФВЧ приведена на рис. 6.2, б.

Интегрирующая цепочка чаще всего применяется для формирования пилообразных импульсов и задержки прямоугольных импульсов во времени. Для получения пилообразных импульсов используется наиболее прямолинейный участок интегрированного импульса – его начало. Для задержки импульсов используют пороговое устройство: по достижении амплитуды сигнала, прошедшего через интегрирующую цепочку, определённого значения (порога), пороговое устройство пропускает входной сигнал на выход.

Зная, как рассчитывается делитель напряжения и реактивное сопротивление катушки индуктивности на определённой частоте, можно рассчитать простейший Г-образный ФНЧ на катушке и резисторе.

Частотные фильтры, выполненные на катушках индуктивности и резисторах (так же, как и на конденсаторах и резисторах), имеют пологую АЧХ. Более качественный срез имеют частотные фильтры состоящие из конденсаторов и катушек индуктивности.

## 6.2 Задание

6.2.1 Ознакомиться с подразделом 6.1 и ответить на контрольные вопросы.

6.2.2 Открыть файл frc.ewb со схемой, показанной на рис. 6.2.

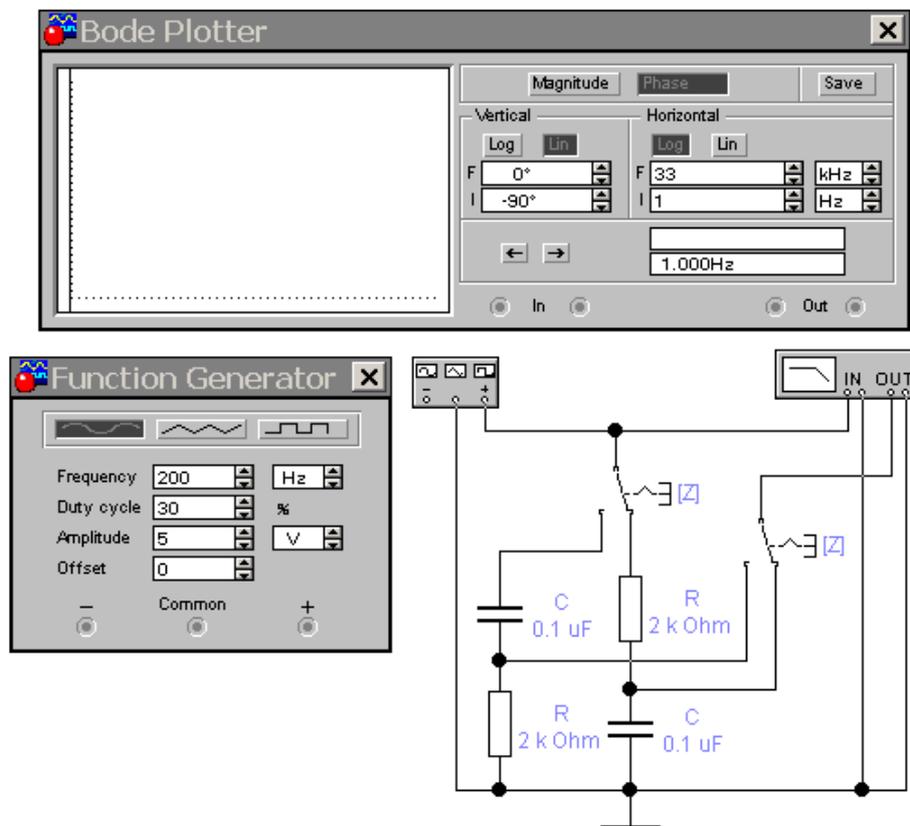


Рисунок 6.2 – Схема измерений АЧХ RC фильтров

На RC цепь через ключ, управляемый клавишей Z, поступает гармонический сигнал. Вход IN Боде-плоттера подключен ко входу четырехполюсника, а вход OUT при одном положении ключа подключен к конденсатору C (интегрирующая цепочка), при другом положении – к резистору R (дифференцирующая цепочка).

6.2.3 Последовательно вывести на экран Боде-плоттера АЧХ и ФЧХ представленных четырехполюсников и определить частоты среза фильтра нижних  $f_{\text{ФНЧ}}$  и верхних  $f_{\text{ФВЧ}}$  частот. Рассчитать постоянные времени RC цепи: 1) из номиналов резистора и конденсатора –  $\tau_{RC}$ ; 2) из частот среза фильтров –  $\tau_{\text{ФНЧ}}$ ,  $\tau_{\text{ФВЧ}}$ . Результаты внести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1. Параметры RC фильтров

R, Ом	C, Ф	$\tau_{RC}$ , с	$f_{ФНЧ}$ , Гц	$f_{ФВЧ}$ , Гц	$\tau_{ФНЧ}$ , с	$\tau_{ФВЧ}$ , с

6.2.4 Повторить п. 6.2.3 для других (выбранных Вами) номинальных значений емкости конденсатора C и сопротивления резистора R. Результаты также внести в таблицу 6.1.

6.2.5 Открыть файл frl.ewb со схемой, показанной на рис. 6.3.

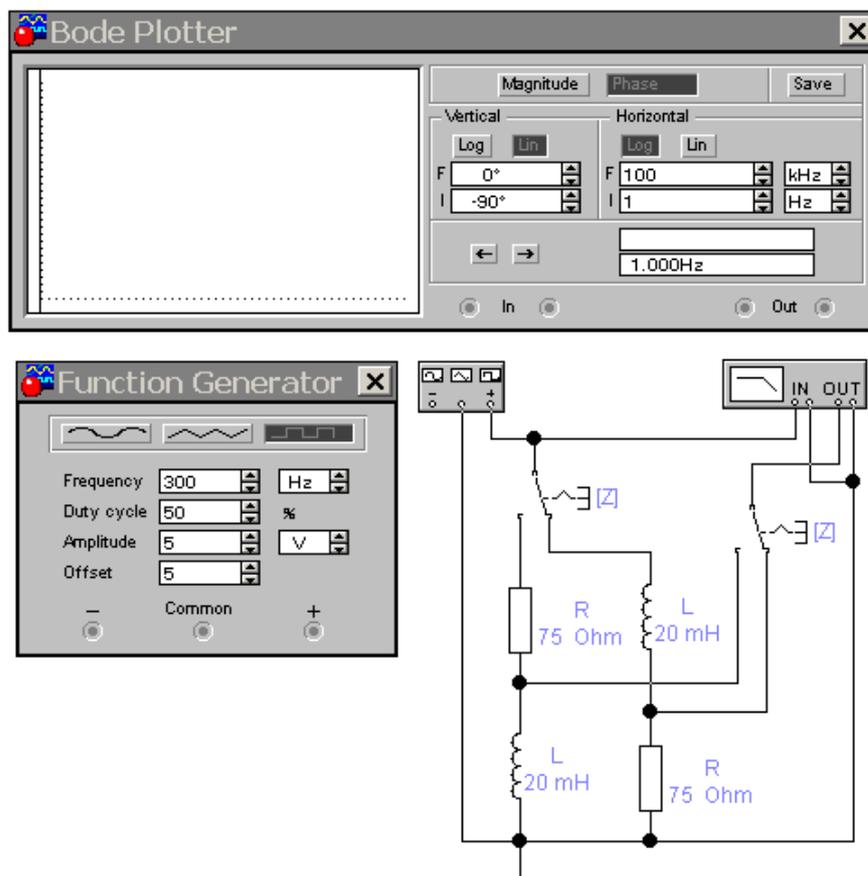


Рисунок 6.3 – Схема измерений АЧХ RL цепи

На RL цепь через ключ, управляемый клавишей Z, поступает гармонический сигнал. Вход IN Бode-плоттера подключен ко входу четырехполюсника, а вход OUT при одном положении ключа подключен к резистору R (интегрирующая цепочка), при другом положении – к катушке индуктивности L (дифференцирующая цепочка).

6.2.6 Последовательно вывести на экран Бode-плоттера АЧХ и ФЧХ представленных четырехполюсников и определить частоты среза фильтра нижних  $f_{ФНЧ}$  и верхних  $f_{ФВЧ}$  частот. Рассчитать постоянные времени цепи: 1) из номиналов резистора и катушки индуктивности –  $\tau_{RL}$ ; 2) из частот среза фильтров –  $\tau_{ФНЧ}$ ,  $\tau_{ФВЧ}$ . Результаты внести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2. Параметры RL фильтров

R, Ом	C, Ф	$\tau_{RL}$ , с	$f_{ФНЧ}$ , Гц	$f_{ФВЧ}$ , Гц	$\tau_{ФНЧ}$ , с	$\tau_{ФВЧ}$ , с

6.2.7 Повторить п. 6.2.6 для других (выбранных Вами) номинальных значений индуктивности катушки L и сопротивления резистора R. Результаты также внести в таблицу 6.2.

6.2.8 Оформить отчет.

### 6.3 Контрольные вопросы

6.3.1 Какова цель работы?

6.3.2 Что называют амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристиками четырехполюсников?

6.3.3 Каковы схемы фильтров верхних и нижних частот?

6.3.4 Что называют частотой среза фильтра?

6.3.5 Какова роль функционального генератора в виртуальных измерениях АЧХ RL и RC цепей?

6.3.6 Как связаны частота среза фильтра и постоянная времени цепи?

## 7 РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

### 7.1 Общие сведения

Предположим, что на последовательную RCL цепь (рис. 7.1) действует синусоидальное напряжение в установившемся режиме, – переходные процессы, которые могут возникнуть в момент подачи питания, завершены.

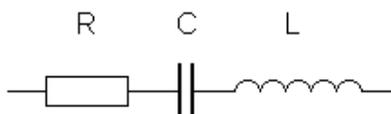


Рисунок 7.1 – Последовательное соединение резистора, конденсатора и катушки индуктивности

В последовательной цепи ток одинаков (является общим) для всех компонентов. Поэтому удобно принять, что начальная фаза тока равна нулю, т. е.  $i = I_M \sin(\omega t)$ . Тогда входное напряжение можно представить в виде:  $u = U_M \sin(\omega t + \varphi)$ . Полное сопротивление (импеданс) цепи

$$Z = (R^2 + X_{\text{СУМ}}^2)^{1/2},$$

где  $X_{\text{СУМ}} = X_L - X_C$  – суммарное реактивное сопротивление. Активное сопротивление R определяет необратимые процессы в цепи, в данном случае процессы превращения электроэнергии в тепло. Реактивное сопротивление  $X_{\text{СУМ}}$  определяет процессы временного перераспределения энергии между источником электроэнергии, конденсатором и катушкой индуктивности.

Определив амплитудное значение тока

$$I_M = U_M / Z,$$

легко рассчитать амплитуды падений напряжения на каждом компоненте электрической цепи, используя закон Ома:

$$U_{RM} = R I_M, \quad U_{CM} = X_C I_M, \quad U_{LM} = X_L I_M.$$

Поведение индуктивности с частотой противоположно поведению емкости (рис. 7.2). Следовательно, на некоторой частоте окажется справедливым равенство:

$$X_C = X_L$$

или

$$1 / (\omega C) = \omega L.$$

Это равенство позволяет определить частоту так называемого электромагнитного резонанса, проявляющегося в схемах с последовательным (или параллельным) соединением конденсаторов и катушек индуктивности:

$$\omega_0 = 1 / (L C)^{1/2}.$$

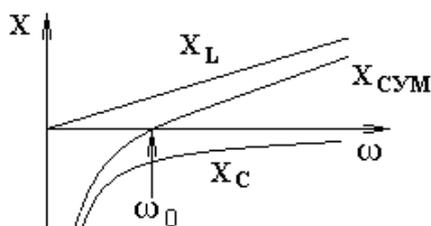


Рисунок 7.2 – Зависимости реактивных сопротивлений от частоты

На резонансной частоте  $\omega_0$  напряжения  $U_L$  и  $U_C$  имеют одинаковые значения и компенсируют друг друга (рис. 7.3, а), полное сопротивление  $Z$  оказывается равным небольшому активному сопротивлению катушки  $R$ . При этом ток в цепи  $I$  совпадает по фазе с напряжением  $U$  и может оказаться довольно большим даже при малых  $U$ . Такое явление называют резонансом напряжений.

При резонансе напряжений на катушке и на конденсаторе падает одинаковое напряжение  $U_L = U_C = I X_L = I X_C$ , которое может значительно (в десятки раз) превышать приложенное напряжение  $U$ . На частотах, отличных от резонансной, напряжения на катушке и конденсаторе неодинаковы – они определяются амплитудой тока в цепи и величинами реактивных сопротивлений  $X_L$  и  $X_C$ .

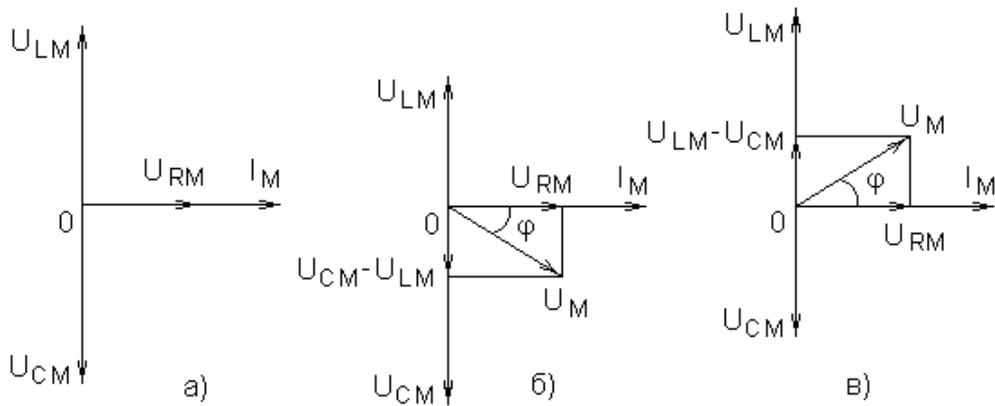


Рисунок 7.3 – Векторные диаграммы напряжения и тока RCL цепи для частот  $\omega = \omega_0$  (а),  $\omega < \omega_0$  (б) и  $\omega > \omega_0$  (в)

Фазовая задержка напряжения относительно тока в последовательной цепи

$$\varphi = \arctg(X_{\text{сум}} / R).$$

На частотах сигнала ниже резонансной частоты  $\text{tg}(\varphi)$  оказывается отрицательным (поскольку  $X_{\text{сум}} < 0$ ) и, соответственно, фазовая задержка напряжения  $\varphi < 0$  (рис. 7.3, б), т. е. ток опережает напряжение. При частотах выше резонансной  $X_L > X_C$ , угол  $\varphi > 0$  (рис. 7.3, в), т. е. напряжение опережает ток.

## 7.2 Последовательный колебательный контур

Последовательным колебательным контуром называется электрическая цепь, состоящая из конденсатора С, катушки индуктивности L, и активного сопротивления R, характеризующего потери энергии в реактивных элементах контура.

Для компенсации потерь последовательно с элементами контура можно включить источник переменной электродвижущей силы (ЭДС). В этом случае колебания в контуре будут вынужденными, поскольку осуществляются за счет внешней периодической ЭДС (рис. 7.4).

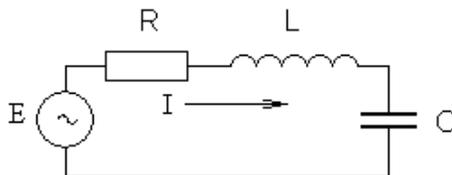


Рисунок 7.4 – Последовательный колебательный контур

Основными параметрами колебательного контура являются собственная резонансная частота  $\omega_0$ , характеристическое (волновое) сопротивление  $\rho$  и добротность Q. Волновое сопротивление  $\rho$  служит количественной мерой оценки энергии, запасаемой реактивными элементами контура:  $\rho = X_L = X_C$  при  $\omega = \omega_0$ . Добротностью Q называют отношение энергии, запасаемой реактивными элементами, к энергии потерь за период колебаний. Добротность определяет амплитуду и ширину амплитудно-частотной

характеристики (АЧХ) резонанса. Для последовательного колебательного контура, в котором все три элемента –  $R$ ,  $L$  и  $C$  – включены последовательно, добротность

$$Q = (L / C)^{1/2} / R = \rho / R.$$

При неизменных  $E$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $R$  зависимость тока  $I$  от частоты

$$I = E / Z = E / \{R^2 + [\omega L - 1 / (\omega C)]^2\}^{1/2} = I_0 / [1 + (X_{\text{СУМ}} / R)^2]^{1/2},$$

где  $I_0 = E / R$  – ток при  $\omega = \omega_0$ . Безразмерное отношение

$$I / I_0 = 1 / [1 + (X_{\text{СУМ}} / R)^2]^{1/2}$$

выражает закон изменения амплитуды тока в контуре при изменении частоты (АЧХ) для всех возможных соотношений между  $X$  и  $R$  и называется предельной нормированной частотной характеристикой контура (рис. 6.5, а).

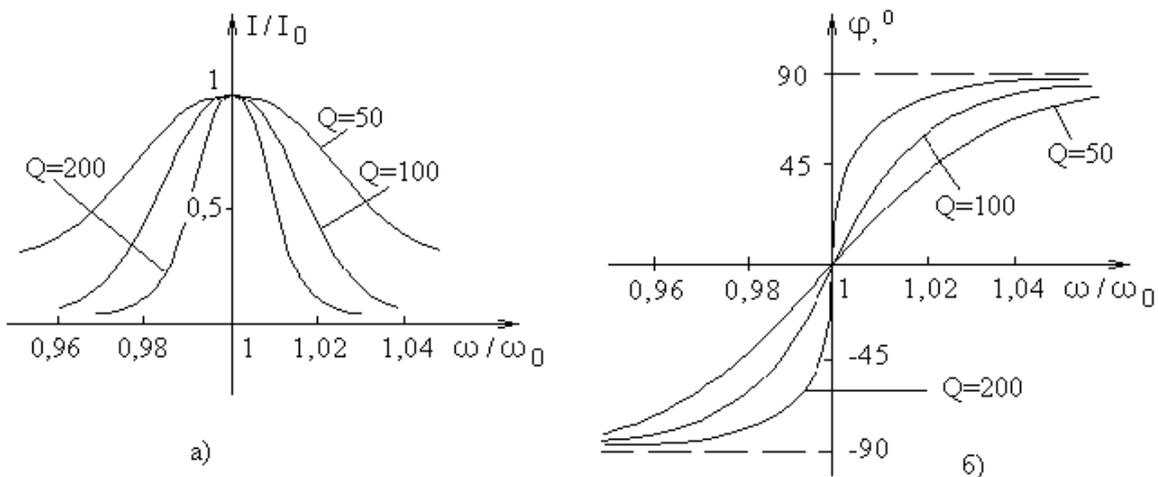


Рисунок 7.5 – АЧХ (а) и ФЧХ (б) последовательного колебательного контура

Интервал частот, на границах которого амплитуда тока снижается до уровня 0,707 от резонансного значения, называют полосой пропускания контура (рис. 7.6).

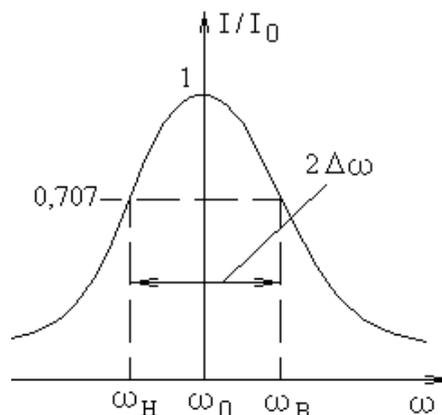


Рисунок 7.6 – Полоса пропускания последовательного колебательного контура

Резонансный максимум АЧХ контура получается тем выше и острее, чем выше добротность, т. е. чем меньше активное сопротивление  $R$  и больше

индуктивность  $L$ . С увеличением активного сопротивления  $R$  максимальное значение тока уменьшается, и говорить о резонансе при больших значениях  $R$  не имеет смысла. ФЧХ (рис. 7.7, б) в пределах полосы пропускания изменяется от  $-45^\circ$  при  $\omega = \omega_H$  до  $+45^\circ$  при  $\omega = \omega_B$ .

Сопротивление нагрузки  $R_H$ , включенное параллельно конденсатору или катушке индуктивности последовательного колебательного контура, вызывает дополнительные потери, уменьшает добротность и увеличивает полосу пропускания контура. Аналогичное влияние оказывает на избирательность контура внутреннее сопротивление источника сигнала.

Передаточные АЧХ и ФЧХ последовательного колебательного контура при подключении нагрузки параллельно конденсатору приведены на рис. 7.7. Максимум коэффициента передачи  $K_C$  не совпадают с резонансной частотой  $\omega_0$ , а сдвинут по оси  $\omega$  в область низких частот. Максимальное значение  $K_C$  получается на частоте

$$\omega_C \approx \omega_0 [1 - 1 / (2 Q^2)]^{1/2}.$$

При  $\omega = \omega_0$   $K_C = Q$ , а  $\varphi = -90^\circ$ .

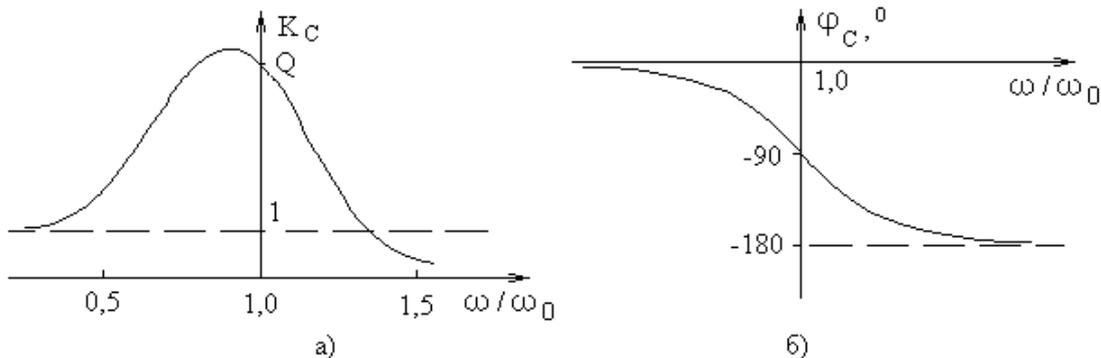


Рисунок 7.7 – Передаточные АЧХ (а) и ФЧХ (б) последовательного колебательного контура при подключении нагрузки параллельно конденсатору

Передаточные АЧХ (а) и ФЧХ (б) контура при подключении нагрузки параллельно катушке индуктивности приведены на рис. 7.8.

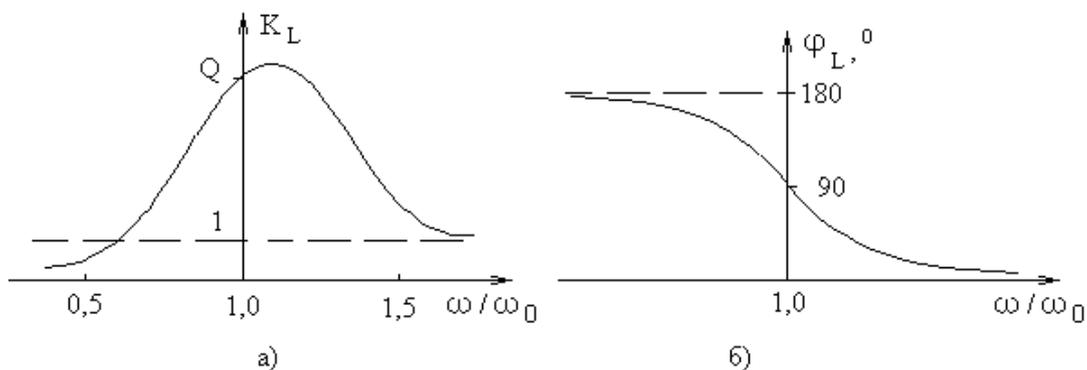


Рисунок 7.8 – Передаточные АЧХ (а) и ФЧХ (б) последовательного колебательного контура при подключении нагрузки параллельно катушке индуктивности

Максимум коэффициента передачи  $K_L$  достигается на частоте

$$\omega_L \approx \omega_0 / [1 - 1 / (2 Q^2)]^{1/2}.$$

При  $\omega = \omega_0$   $K_L = Q$ ,  $\varphi = 90^\circ$ .

Отметим, что при  $Q \gg 1$  значение  $1 / (2 Q^2)$  весьма мало и  $\omega_C \approx \omega_L \approx \omega_0$ .

Из рис. 7.7, 7.8 видно, что колебательный контур можно использовать как частотно-избирательную или фазо-сдвигающую цепь. Частотно-избирательные свойства контура нашли широкое применение в радиосвязи. Радиоволны от различных передающих станций возбуждают в антенне радиоприемника переменные токи различных частот, т. к. каждая передающая радиостанция работает на своей частоте. С антенной индуктивно связан колебательный контур. Вследствие электромагнитной индукции в контурной катушке возникают переменные ЭДС соответствующих частот и вынужденные колебания силы тока этих же частот. Но только при резонансе колебание силы тока в контуре и напряжения на контуре будут значительными. Поэтому из всех частот, возбужденных в антенне, контур выделяет колебания, частота которых равна собственной частоте контура. Настройка контура на нужную частоту  $\omega_0$  обычно осуществляется путем изменения емкости конденсатора.

Помимо этого электромагнитный резонанс широко используется в современных источниках питания. Так называемые безтрансформаторные источники питания содержат колебательный контур, настраивая который, можно добиваться существенного увеличения подаваемого напряжения.

В некоторых случаях резонанс в электрической цепи может принести вред. Так, если цепь не рассчитана на работу в условиях резонанса, то возникновение резонанса приведет к аварии, – большие напряжения приведут к пробое изоляции.

### 7.3 Задание

7.2.1 Ознакомиться с подразделами 7.1, 7.2 и ответить на контрольные вопросы.

7.3.2 Открыть файл u.ewb со схемой, показанной на рис. 7.9.

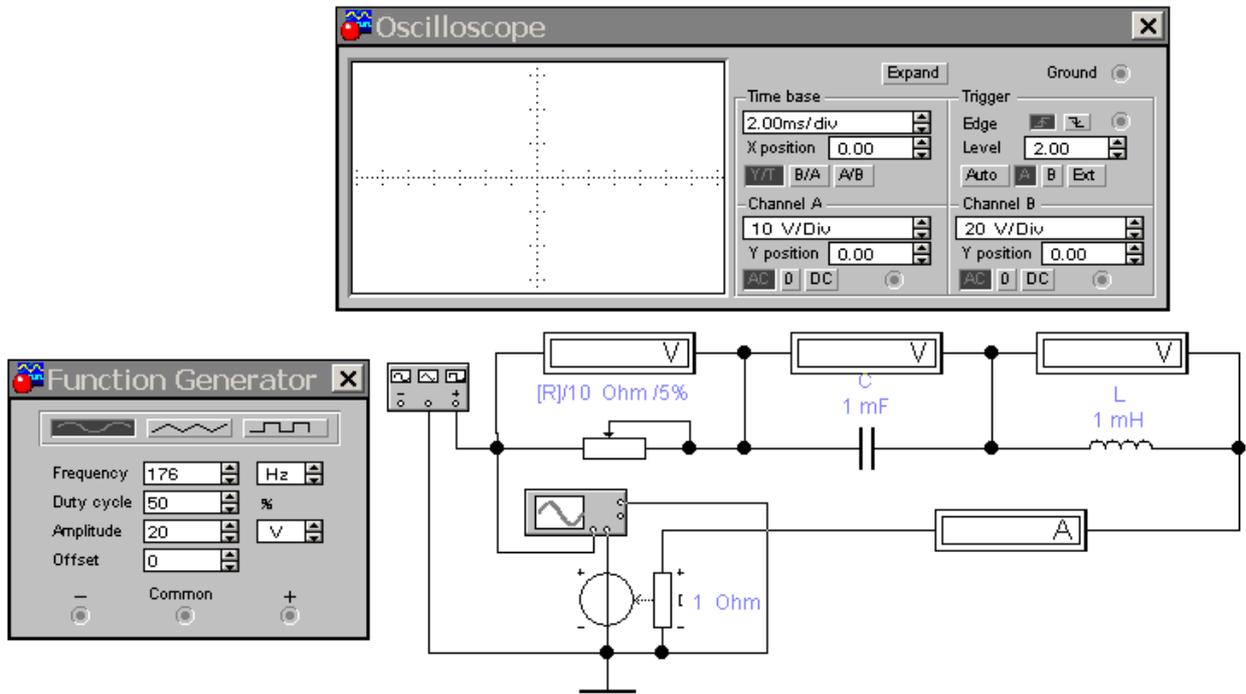


Рисунок 7.9 – Схема неразветвленной RCL цепи

7.3.3 Рассчитать резонансную частоту цепи  $f_0 = \omega_0 / (2 \pi)$ . Изменяя частоту генератора от 80 до 140 % резонансной частоты  $f_0$  измерить действующие значения напряжения  $U$  на каждом элементе, действующий ток  $I$  в цепи и угол  $\varphi$  (с использованием осциллографа). Результаты внести в таблицу 7.1. Сопротивление  $R$  задается преподавателем.

Таблица 7.1. Зависимость падения напряжений на элементах, тока в RCL цепи и фазовой задержки от частоты генератора ( $f_0 = \dots$  Гц)

$f / f_0, \%$	$f, \text{Гц}$	$U_R, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_L, \text{В}$	$I, \text{А}$	$\varphi, ^\circ$
80						
85						
90						
...						
140						

7.3.4 Оценить добротность  $Q$  на основании номинальных значений параметров элементов контура, а также по результатам виртуального эксперимента.

7.3.5 Оформить отчет.

## 7.4 Контрольные вопросы

7.4.1 Какова цель работы?

7.4.2 Как определить полное сопротивление последовательной RLC цепи?

7.4.3 Что называют резонансом напряжений?

7.4.4 Что называют добротностью колебательного контура?

7.4.5 Что называют предельной нормированной частотной характеристикой контура?

7.4.6 Что называют полосой пропускания контура?

## 8 РЕЗОНАНС ТОКОВ

### 8.1 Общие сведения

При параллельном соединении конденсатора и катушки индуктивности (рис. 8.1, а), как и в случае последовательной LC цепи, имеется некоторая частота  $\omega_0$ , на которой реактивные сопротивления, а значит и проводимости катушки  $B_L = 1 / (\omega L)$  и конденсатора  $B_C = -\omega C$  одинаковы по величине, но имеют разные знаки. На этой частоте суммарная реактивная проводимость LC цепи  $B_{\text{СУМ}}$  обращается в нуль (рис. 8.1, б), а зависимость  $X_{\text{СУМ}} = 1 / B_{\text{СУМ}}$  от частоты (рис. 8.1, в) обнаруживает разрыв второго рода. Сопротивление реальной LC цепи (т. е. с потерями), разумеется, не равно бесконечности – оно тем меньше, чем больше омическое сопротивление потерь.

На частоте резонанса  $\omega_0$  токи в ветвях L и C будут одинаковыми, т. е. имеет место резонанс токов. Как и в случае последовательной цепи, реактивные проводимости катушки и конденсатора компенсируют друг друга, сопротивление параллельной LC цепи становится чисто активным (резистивным). На частотах, отличных от  $\omega_0$ , сопротивление цепи уменьшается и приобретает индуктивный характер на низких частотах и емкостный на высоких частотах.

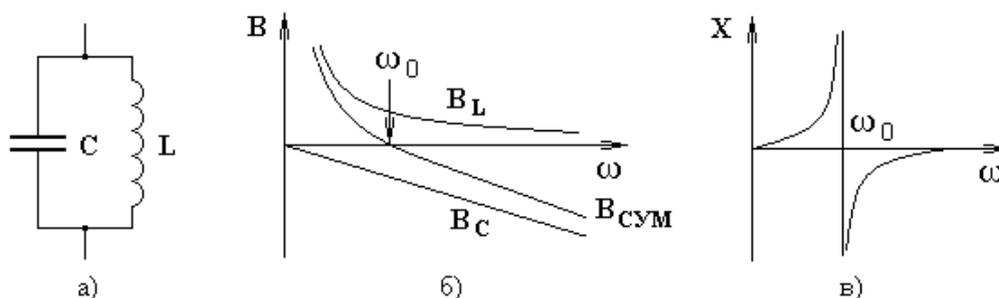


Рисунок 8.1 – Схема (а) и зависимости реактивных проводимостей (б) и сопротивления (в) параллельной LC цепи от частоты

За период колебаний дважды происходит обмен энергией между катушкой и конденсатором. Энергия накапливается на конденсаторе в виде энергии электрического поля, на катушке индуктивности – в виде энергии магнитного поля. При этом в LC цепи протекает собственный контурный ток  $I_K$ , превосходящий по величине ток во внешней цепи  $I$ . В отсутствие потерь величина  $I_K$  будет бесконечно большой. Но на практике паразитные параметры элементов цепи ограничивают контурный ток.

## 8.2 Параллельный колебательный контур

В различных радиотехнических устройствах даже чаще, чем последовательные применяют параллельные колебательные контуры (рис. 8.2).

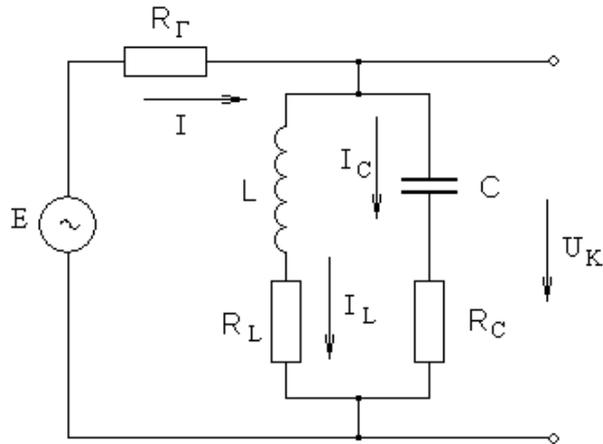


Рисунок 8.2 – Параллельный колебательный контур

Добротность колебательного контура, в котором индуктивность  $L$ , емкость  $C$  и сопротивление  $R$  соединены параллельно,

$$Q = R (C / L)^{1/2}.$$

На резонансной частоте  $\omega_0$  сопротивление контура протекающему через него току становится чисто активным. Величина этого сопротивления, часто называемого эквивалентным, определяется произведением добротности контура на его характеристическое сопротивление:

$$R_{\text{ЭКВ}} = Q \rho.$$

На частотах, отличных от  $\omega_0$ , сопротивление контура уменьшается и приобретает индуктивный характер на низких частотах и емкостный на высоких частотах.

При равенстве активных сопротивлений ветвей  $R_L = R_C$  или при  $R_L \ll \rho$ ,  $R_C \ll \rho$ , что выполняется практически во всем интересующем нас диапазоне частот, частота резонанса

$$\omega_0 = 1 / (L C)^{1/2},$$

т. е. условия резонанса токов совпадают с условиями резонанса напряжений в последовательном контуре, составленном из тех же элементов  $L$  и  $C$ .

При резонансе, за период колебаний в контуре дважды происходит обмен энергией между катушкой и конденсатором. При этом в контуре протекает собственный контурный ток  $I_K$ , превосходящий по величине ток во внешней цепи  $I$  в  $Q$  раз. В случае идеального контура (без потерь), добротность которого теоретически бесконечна, величина контурного тока также будет бесконечно большой. Но на практике паразитные параметры элементов контура, электрические цепи, служащие для подвода энергии и отбора энергии из контура, ограничивают контурный ток.

АЧХ параллельного колебательного контура имеет такой же вид, как и резонансная кривая последовательного контура; ФЧХ представляет собой зеркальное отображение ФЧХ последовательного контура.

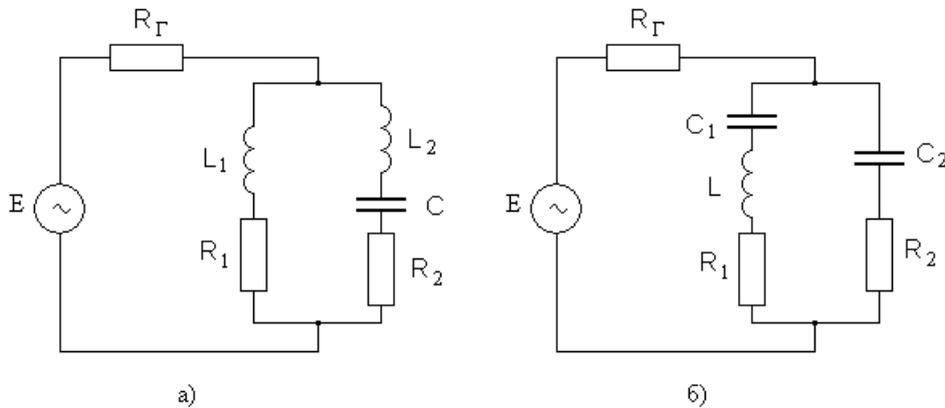


Рисунок 8.3 – Сложные колебательные контуры II (а) и III (б) вида

С уменьшением внутреннего сопротивления генератора  $R_{\Gamma}$  эквивалентная добротность уменьшается, а полоса пропускания увеличивается. Аналогичное влияние оказывает на избирательность контура сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$ , включенное параллельно контуру. Максимальная мощность передается от генератора к нагрузке при  $R_{\Gamma} = R_{\text{ЭКВ}}$ . Внутреннее сопротивление  $R_{\Gamma}$  генератора не регулируется в широких пределах. Для согласования параллельного колебательного контура с генератором необходимо изменять входное сопротивление  $R_{\text{ЭКВ}}$  контура при неизменной резонансной частоте и полосе пропускания. Условия для этого выполняются в сложных контурах II и III вида с неполным включением индуктивности (рис. 8.3, а) или емкости (рис. 8.3, б).

### 8.3 Задание

8.3.1 Ознакомиться с подразделами 8.1, 8.2 и ответить на контрольные вопросы.

8.3.2 Открыть файл i.ewb со схемой разветвленной RCL цепи, показанной на рис. 8.4.

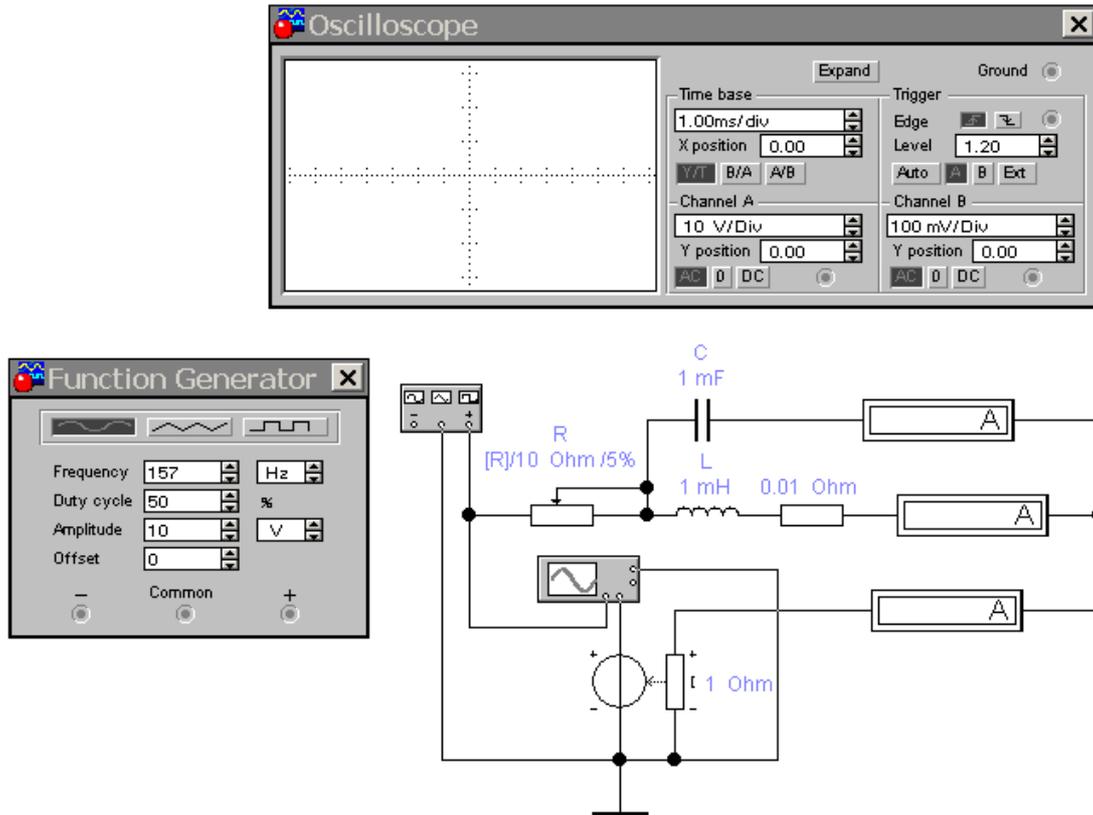


Рисунок 8.4 – Схема измерительной установки для анализа RCL цепи на переменном сигнале

8.3.3 Рассчитать резонансную частоту цепи  $f_0 = \omega_0 / (2 \pi)$ . Изменяя частоту генератора от 80 до 120 % резонансной частоты  $f_0$  измерить действующие значения токов в цепи и (с использованием осциллографа) угол  $\varphi$ . Результаты внести в таблицу 8.1. Номинал R задается преподавателем.

Таблица 8.1. Зависимость токов в разветвленной RCL цепи и фазовой задержки от частоты генератора ( $f_0 = \dots$  Гц)

$f / f_0, \%$	$f, \text{Гц}$	$I_C, \text{В}$	$I_L, \text{В}$	$I, \text{А}$	$\varphi, ^\circ$
80					
85					
...					
120					

8.3.4 Оценить добротность  $Q$  на основании номинальных значений параметров элементов контура, а также по результатам виртуального эксперимента.

8.3.5 Оформить отчет.

## 8.4 Контрольные вопросы

8.4.1 Какова цель работы?

8.4.2 Что называют резонансом токов?

8.4.3 Как определить добротность параллельного колебательного контура?

8.4.4 Как выглядит АЧХ параллельного колебательного контура?

8.4.5 Как влияет внутреннее сопротивление генератора на эквивалентную добротность и полосу пропускания колебательного контура?

8.4.6 Какое применение находят сложные колебательные контуры с неполным включением индуктивности и емкости?

## 9 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

### 9.1 Собственные и примесные полупроводники

По способности проводить электрический ток (проводимости) полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Характерная особенность полупроводников – сильная зависимость их проводимости от внешних факторов, таких как температура, свет, электрическое поле и др.

В электронике наиболее широко используются полупроводники германий и кремний. Они относятся к IV группе периодической системы Менделеева. На внешней оболочке атома кремния (или германия) находятся 4 валентных электрона (в переводе на русский "валента" – сила, способность). В кристаллической решетке полупроводника (рис. 9.1) каждый из атомов образует с четырьмя соседними атомами ковалентные связи (в слове "ковалентная" приставка "ко-" означает "совместное участие").

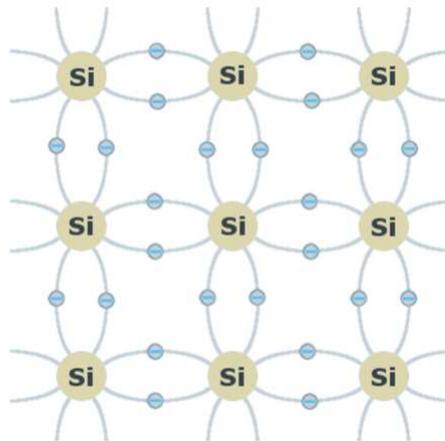


Рисунок 9.1 – Кристаллическая решетка кремния

При образовании ковалентной связи атомы объединяют свои электроны в молекулярную орбиталь, которая формируется из атомных оболочек отдельных атомов. Эта новая оболочка содержит завершённое число электронов и заменяет атомам их собственные незавершённые атомные оболочки.

Ковалентные связи очень устойчивы, поэтому каждая электронная пара прочно связана со своей атомной парой и не может свободно перемещаться в объёме полупроводника. Это справедливо для химически чистого

полупроводника, находящегося при температуре близкой к 0 К (абсолютный нуль). При повышении температуры атомы полупроводника начинают совершать тепловое колебательное движение. Энергия этого движения передается электронам, и для некоторых из них она оказывается достаточной, чтобы оторваться от своих атомов<sup>4</sup>. При этом ковалентная связь становится дефектной, в ней образуется свободное (вакантное) место, которое может занять один из валентных электронов соседней связи, в результате чего вакантное место переместится к другой паре атомов. Перемещение вакантного места внутри кристаллической решетки можно рассматривать как перемещение некоторого фиктивного (виртуального) положительного заряда, величина которого равна заряду электрона. Такой положительный заряд принято называть дыркой.

Проводимость, которая возникает в объеме полупроводника за счет нарушения связей, называется собственной проводимостью. При этом число электронов в полупроводнике равно числу дырок.

Когда электрон оказывается в зоне действия электрического поля какой-либо дырки, она захватывает его, и отрицательный заряд электрона нейтрализуется положительным зарядом дырки. Такая рекомбинация дырок и электронов происходит очень часто, но не менее часто образуются новые электроны и дырки, так что в среднем их количество для определенного полупроводника в конкретных условиях является постоянной величиной. С ростом температуры концентрации электронов и дырок увеличиваются по экспоненциальному закону.

Рассмотренные чистые полупроводники называются собственными полупроводниками или полупроводниками типа *i* (от английского *intrinsic* – собственный).

Если в структуру чистого полупроводника (кремния) ввести атом вещества, относящегося к V группе периодической системы элементов (например, атом мышьяка), то этот атом также будет образовывать связи с соседними атомами кремния. Но атомы V группы имеют на внешней оболочке 5 валентных электронов. Четыре из них образуют устойчивые ковалентные связи, а пятый окажется лишним (рис. 9.2). Этот избыточный электрон связан со своим атомом намного слабее и, чтобы оторвать его от атома, требуется меньше энергии, чем для освобождения электрона из ковалентной связи. Кроме того, превращение такого электрона в свободный носитель заряда не связано с одновременным образованием дырки. Уход электрона с внешней оболочки атома мышьяка превращает его в положительный ион.

---

<sup>4</sup> Нарушение валентных связей может происходить не только за счёт тепловой энергии, но и за счёт энергии света или энергии электрического поля.

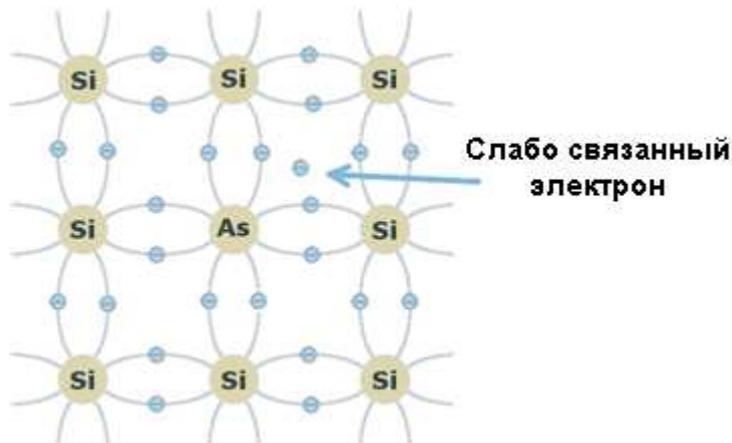


Рисунок 9.2 – Атом мышьяка в кристаллической решетке кремния

При увеличении содержания мышьяка в кристалле кремния увеличивается количество свободных электронов без увеличения количества дырок. Такую примесь называют донорной (от латинского слова – донор, что значит – отдающий, в данном случае – электроны). Полупроводник с донорной примесью принято называть полупроводником типа *n* (от слова *negative* – отрицательный).

Теперь введем в кристалл кремния атом III группы, например, атом индия. У него три валентных электрона (рис. 9.3). Соответственно, он образует устойчивые связи с тремя атомами кремния. Четвертая связь остается незаполненной, но не несет в себе заряда, поэтому атом индия остается электрически нейтральным.

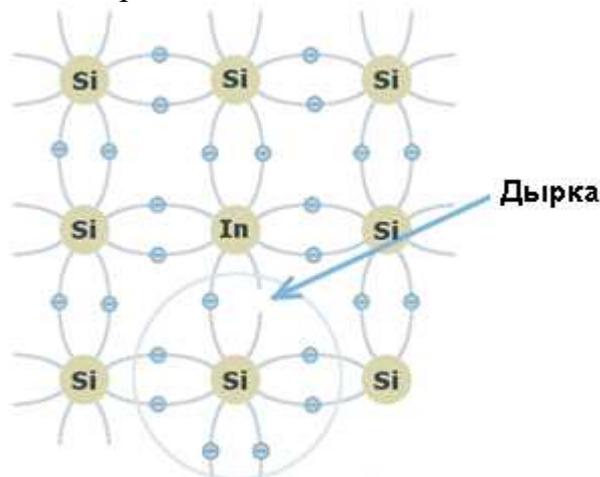


Рисунок 9.3 – Атом индия в кристаллической решетке кремния

Уже при небольшом тепловом возбуждении электрон одной из соседних ковалентных связей может перейти в эту четвертую связь. В результате такого перехода во внешней оболочке индия появится лишний электрон, т. е. атом превратится в отрицательный ион. Нарушится электрическая нейтральность и в той ковалентной связи, откуда пришёл электрон, появится положительный заряд – дырка в этой нарушенной связи.

При увеличении содержания индия будет увеличиваться количество дырок, они станут основными носителями заряда. Такую примесь называют

акцепторной (акцептор в переводе с латинского – поглотитель). Полупроводник с акцепторной примесью называется полупроводником типа р (от слова positive – положительный).

При комнатной температуре практически все примесные атомы оказываются ионизированными. Наряду с ионизацией примесей происходит и тепловая генерация электронов и дырок, однако их концентрация значительно меньше концентрации свободных носителей тока, образующихся при ионизации примесных атомов. Причина этого в том, что энергия, необходимая для разрыва ковалентных связей, существенно больше энергии, затрачиваемой на ионизацию примесей.

## 9.2 Электронно-дырочный переход

Рассмотрим полупроводник, в котором имеются две области: электронная (n – типа) и дырочная (p – типа). Электроны стремятся перейти из n – области, где их концентрация выше, в p – область, а дырки – наоборот. Такое перемещение зарядов называется диффузией. Ток, который при этом возникает, называется диффузионным. Выравнивание концентраций за счет диффузии происходило бы до тех пор, пока дырки и электроны не распределились равномерно, но этому мешают силы возникающего внутреннего электрического поля. Дырки, уходящие из p – области оставляют в ней отрицательно ионизированные атомы, а электроны, уходящие из n – области – положительно ионизированные атомы. В результате дырочная область становится заряженной отрицательно, а электронная – положительно. Между областями возникает электрическое поле, созданное двумя слоями зарядов. Если направление электронов, попавших в электрическое поле, совпадает с ним, то электроны тормозятся. Для дырок – наоборот. Таким образом, благодаря возникшему электрическому полю, процесс диффузии прекращается.

На рис. 9.4 видно, что и в электронной, и в дырочной области имеются как электроны, так и дырки. При этом электроны – основные носители электрического тока в n – области и неосновные – в p – области, а дырки – основные носители электрического тока в p – области и неосновные – в n – области. Неосновные носители образуются за счёт собственной проводимости. Электроны p – области, совершая тепловое хаотическое движение, попадают в электрическое поле p – n перехода и переносятся в n – область. То же происходит с дырками n – области. Ток, образованный основными носителями, называют диффузионным током, а неосновными – током проводимости. Эти токи направлены навстречу друг другу, и так как в изолированном проводнике общий ток равен нулю, то они равны.

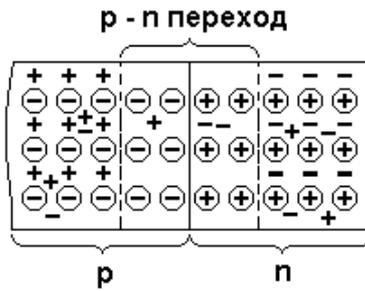
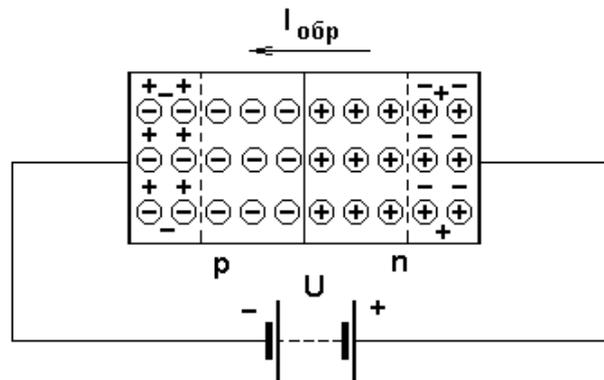
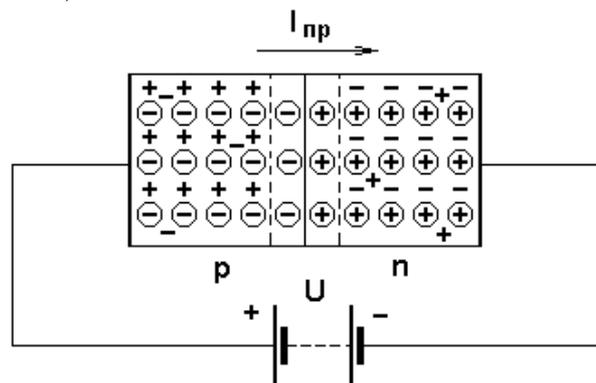


Рисунок 9.4 – Электронно-дырочный переход

Приложим теперь к переходу внешнее напряжение плюсом к  $n$  – области, а минусом к  $p$  – области (рис. 9.5). Поле, создаваемое внешним источником, усилит действие внутреннего поля  $p$  –  $n$  перехода. Диффузионный ток уменьшится до нуля, так как электроны из  $n$  – области и дырки из  $p$  – области увлекаются от  $p$  –  $n$  перехода к внешним контактам, в результате чего  $p$  –  $n$  переход расширяется. Через переход проходит только ток проводимости, который называют обратным. Он состоит из электронного и дырочного токов проводимости. Напряжение, приложенное таким образом, называют обратным напряжением.

Рисунок 9.5 – Обратное включение  $p$  –  $n$  перехода

Если внешнее напряжение приложено плюсом к  $p$  – области, а минусом к  $n$  – области, то электрическое поле источника будет направлено навстречу полю  $p$  –  $n$  перехода и ослабит его действие (рис. 9.6). При этом увеличится диффузионный (прямой) ток.

Рисунок 9.6 – Прямое включение  $p$  –  $n$  перехода

Вольтамперная характеристика (ВАХ) р – n перехода (рис. 9.7) – зависимость тока  $I$ , протекающего через переход, от приложенного к нему напряжения  $U$  – показывает, что уже при сравнительно небольших прямых напряжениях сопротивление перехода падает, а прямой ток резко увеличивается. Обратные напряжения значительно больше прямых, а обратные токи намного слабее прямых токов. При некотором возросшем значении обратного напряжения наступает явление так называемого пробоя р – n перехода и обратный ток резко возрастает.

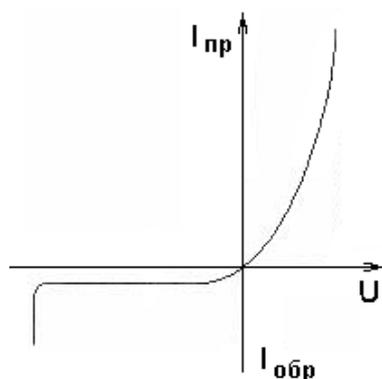


Рисунок 9.7 – Вольтамперная характеристика р – n перехода

В диапазоне обратных напряжений, не превышающих напряжения пробоя, переход проявляет емкостные свойства, то есть ведет себя как конденсатор, причем емкость перехода уменьшается с увеличением приложенного напряжения. Это свойство широко используется там, где возникает необходимость применения конденсаторов переменной емкости, перестраиваемых не вручную, а автоматически – в зависимости от обратного напряжения, приложенного к р – n переходу.

### 9.3 Выпрямительные диоды

Основой полупроводникового диода является р – n переход, определяющий его свойства, характеристики, параметры. Условное обозначение выпрямительного диода приведено на рис. 9.8, где А – анод и К – катод – металлические выводы, посредством которых диод может быть подсоединен к внешней электрической цепи. Подобие стрелки в условном обозначении показывает, в каком направлении диод пропускает электрический ток (в противоположном направлении – не пропускает).



Рисунок 9.8 – Условное обозначение выпрямительного диода

Для изготовления выпрямительных диодов чаще всего применяют кремний n – типа. Его выращивают в специальных печах и получают в виде слитков цилиндрической формы. Слитки разрезают на пластины, которые и являются основой (базой) полупроводникового диода. Пластины шлифуют и

полируют для того, чтобы ликвидировать образовавшиеся в них после разрезания слитка механически и физически нарушенные слои. Далее в пластину  $n$  – типа в специальных печах вводят атомы примеси – акцепторы (бор, алюминий), что приводит к созданию  $p^+$  –  $n$  перехода. При изготовлении  $n^+$  –  $p$  перехода исходным материалом является кремний  $p$  – типа, а атомами примеси (донорами) – фосфор. Схематические изображения двух возможных вариантов полупроводниковых диодов ( $p$  –  $n$  переходов) показаны на рис. 9.9, где Э – эмиттер, Б – база диода.

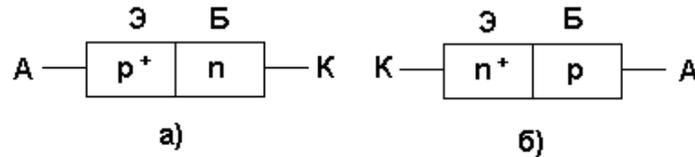


Рисунок 9.9 – Схематические изображения переходов  $p^+$  –  $n$  (а) и  $n^+$  –  $p$  (б)

Диоды относят к классу биполярных полупроводниковых приборов, так как ток, протекающий через диод, обусловлен носителями обоих знаков – электронами и дырками. Знак « $+$ » в схематических изображениях переходов указывает на то, что концентрации атомов примеси в эмиттерных областях существенно выше, нежели в базах приборов. Следовательно, основных носителей электрического тока в эмиттерах намного больше, чем в базах (на 2 – 3 порядка). При создании определенных условий эти носители можно перевести (инжектировать) из эмиттера в базу, что приведет к резкому уменьшению сопротивления базы и к протеканию тока через диод. Эффект инжекции лежит в основе работы любого биполярного полупроводникового прибора, в том числе, и выпрямительного диода.

В условиях теплового равновесия и при  $U = 0$ , в приконтактной области  $p^+$  –  $n$  перехода образуется область, обедненная основными носителями электрического тока шириной  $W_0$  – область пространственного заряда (ОПЗ). Это приводит, в свою очередь, к образованию внутри  $p^+$  –  $n$  перехода потенциального барьера с напряжением  $U_0$  («встроенный потенциал»), препятствующего протеканию электрического тока от анода к катоду диода по цепи  $(+)U$  – диод –  $(-)U$  (рис. 9.10).

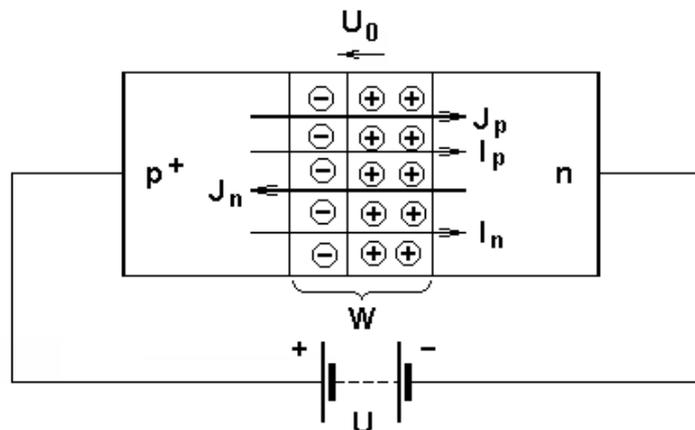


Рисунок 9.10 – Схема, поясняющая принцип работы выпрямительного диода

При смещении  $p^+ - n$  перехода в прямом направлении за счет подачи на диод напряжения  $U$ , превышающего значение  $U_0$ , из эмиттера в базу поступает поток дырок  $J_p$ . Поток дырок образует протекающий в том же направлении ток дырок  $I_p$ . Навстречу потоку дырок из базы в эмиттер поступает поток электронов  $J_n$ , образуя ток электронов  $I_n$ , протекающий в том же направлении, что и ток дырок. При этом  $I_n \ll I_p$  (для  $p^+ - n$  перехода – наоборот). Поток и ток электронов направлены встречно вследствие отрицательного заряда электрона. Поэтому результирующий ток  $I$  в диоде равен сумме электронного и дырочного токов:  $I = I_p + I_n$ .

Процесс поступления неосновных носителей электрического тока из эмиттера в базу называют инжекцией, а эффективность этого процесса характеризуют коэффициентом инжекции  $p^+ - n$  перехода  $\gamma = I_p / I$  (в случае  $p^+ - n$  перехода,  $\gamma = I_n / I$ ).

Если полярность источника  $E$  изменить на противоположную, то с ростом  $U$  ширина ОПЗ  $W$  будет возрастать, распространяясь, главным образом, в сторону высокоомной базы и создавая еще большее препятствие протеканию электрического тока от катода к аноду диода. При этом током диода будет ток обратного смещенного  $p^+ - n$  перехода, который с ростом  $U$  будет слабо возрастать (обратная ветвь ВАХ диода). При увеличении  $U$  до значения  $U_{\text{проб}}$  диод выйдет из строя из-за электрического пробоя  $p^+ - n$  перехода.

Таким образом, ВАХ диода будет иметь вид, показанный на рис. 9.11.

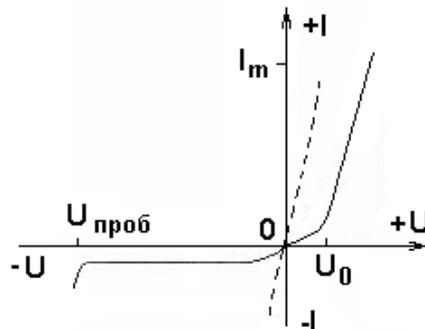


Рисунок 9.11 – Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

В правом верхнем квадранте – прямая ветвь ВАХ, а кривая в левом нижнем квадранте – обратная ветвь ВАХ,  $U_0$  и  $U_{\text{проб}}$  – «встроенный потенциал» и напряжение пробоя  $p^+ - n$  перехода (диода) соответственно. Пунктиром на рис. 9.11 показана ВАХ диода после его выхода из строя, при котором диод пробивается по фаске полупроводниковой пластины и становится «перемычкой». На практике, для избежания пробоя  $p^+ - n$  перехода, диоды применяют при напряжениях, не превышающих значения  $U = U_m = 0.7U_{\text{проб}}$ . Для предотвращения выхода диода из строя из-за тепловых потерь, прямой ток ограничивают на уровне, не превышающем значения  $I = I_m$ . Параметры диода  $U_m$  и  $I_m$  приводятся в справочных данных как максимально допустимые.

## 9.4 Задание

9.4.1 Ознакомиться с подразделами 9.1 – 9.3 и ответить на контрольные вопросы.

9.4.2 Открыть файл ПД1.ewb со схемой, показанной на рис. 9.12. Объектами исследования являются два выпрямительных диода –  $D_1$  и  $D_2$ .

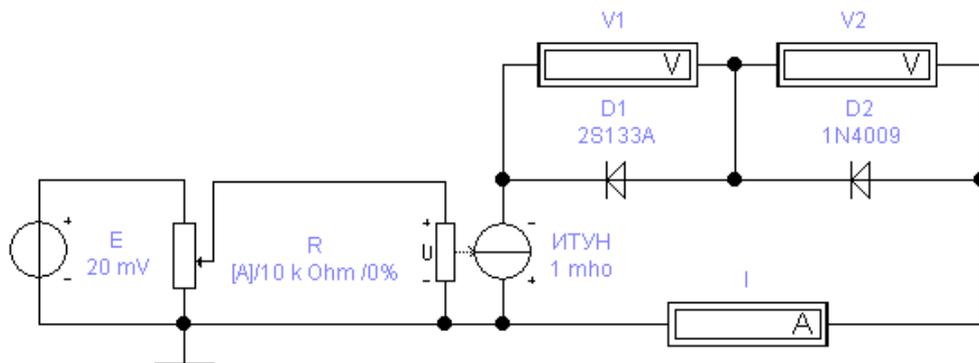


Рисунок 9.12 – Схема измерения прямых ветвей ВАХ полупроводниковых диодов

9.4.3 Изменяя ток через диоды с шагом 5 % от максимального тока (задает источник тока управляемый напряжением), измерить падения напряжения на диодах. Результаты внести в таблицу 9.1. Каждое новое значение тока получают, нажимая на А клавиатуры при нажатом Shift (A+Shift).

Таблица 9.1. Результаты измерения прямых ветвей ВАХ полупроводниковых диодов

I, mA	U, В	
	D1	D2

9.4.4 Открыть файл ПД2.ewb со схемой, показанной на рис. 9.13.

9.4.5 Изменяя напряжение на диодах с шагом 8 % от максимального (задает источник напряжения управляемый напряжением), измерить токи через диоды. Результаты внести в таблицу 9.2.

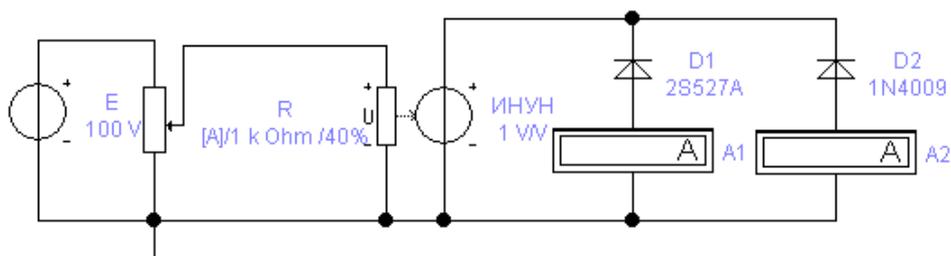


Рисунок 9.13 – Схема измерения обратных ветвей ВАХ полупроводниковых диодов

Таблица 9.2. Результаты измерения обратных ветвей ВАХ полупроводниковых диодов

U, В	I, mA	
	D1	D2

9.4.6 Открыть файл ПДЗ.ewb со схемой, показанной на рис. 9.14.

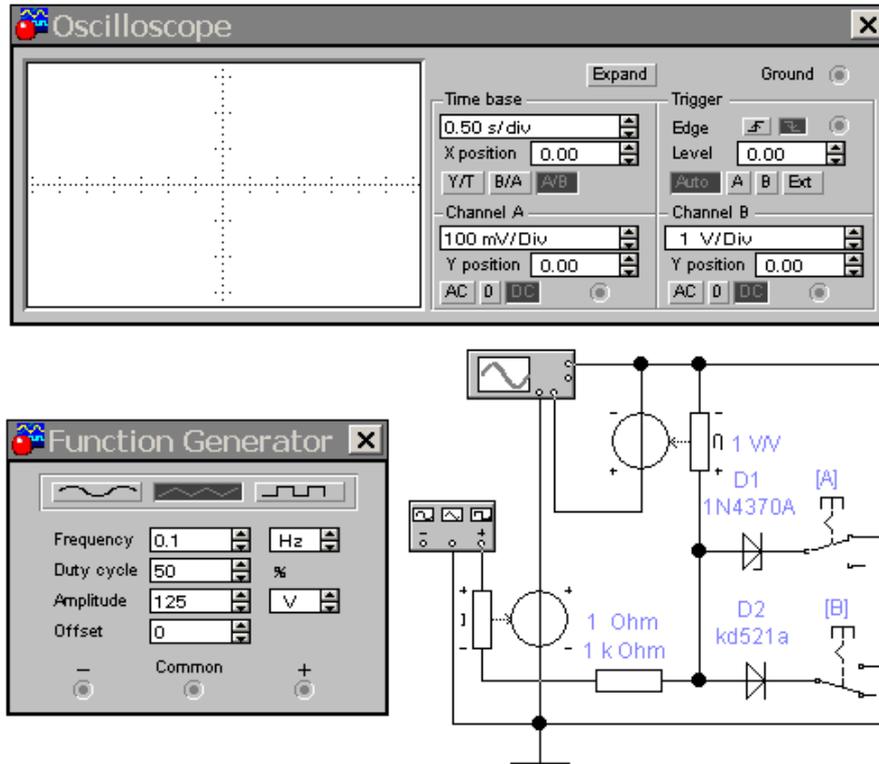


Рисунок 9.14 – Схема измерения ВАХ диодов с помощью осциллографа

На канал А осциллографа через источник напряжения управляемый ток подается напряжение, пропорциональное току через диод, а на канал В через источник напряжения управляемый напряжением подается падение напряжения на диоде. В результате, на экране осциллографа отображается ВАХ диода.

9.4.7 С использованием команды Copy as Bitmap скопировать осциллограмму ВАХ диода в отчет.

9.4.8 Оформить отчет.

## 9.5 Контрольные вопросы

9.5.1 Какова цель работы?

9.5.2 Чем полупроводники отличаются от проводников и диэлектриков?

9.5.3 Какие полупроводниковые материалы используются в электронике?

9.5.4 Чем собственные полупроводники отличаются от примесных?

9.5.5 Что называют донорами и акцепторами?

9.5.6 Чем отличаются полупроводники n и p типа проводимости?

9.5.7 Чем отличаются основные и неосновные носители тока в полупроводниках?

9.5.8 Что характерно для ковалентной связи?

9.5.9 Как соотносятся энергия, необходимая для разрыва ковалентных связей, и энергия, затрачиваемая на ионизацию примесей?

9.5.10 Что называют p – n переходом?

9.5.11 Что движет носителями тока при диффузии?

9.5.12 Какая полярность напряжения отвечает прямому включению p – n перехода?

9.5.13 Что называют областью пространственного заряда?

9.5.14 Что называют коэффициентом инжекции?

9.5.15 Как определить напряжение пробоя p – n перехода?

## 10 ВЫПРЯМИТЕЛИ

### 10.1 Общие сведения

Выпрямители предназначены для преобразования синусоидального входного напряжения  $U_{ВХ}$  в практически постоянное (неизменное во времени) выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$ . Широкое распространение получили: однополупериодный выпрямитель, двухполупериодный выпрямитель на основе диодного моста, двухполупериодный выпрямитель на основе трансформатора со средней точкой. Последние два сложнее по построению, но, в отличие от однополупериодного выпрямителя, формируют выходное напряжение более близкое к постоянному (с меньшими пульсациями).

Схема и временные диаграммы работы однополупериодного выпрямителя приведены на рис. 10.1, где Тр – трансформатор, D – полупроводниковый диод, С – фильтрующий конденсатор,  $R_H$  – сопротивление нагрузки (потребитель электрической энергии),  $U(t)$  – синусоидальное напряжение на первичной обмотке трансформатора (напряжение питающей сети),  $U_{ВХ}$  – синусоидальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора (входное напряжение выпрямителя),  $U_{ВЫХ}$  – близкое к постоянному выходное напряжение,  $I_0$  – ток заряда конденсатора.

При подаче напряжения  $U_{ВХ}$  на вход выпрямителя, за несколько периодов этого напряжения конденсатор заряжается до значения, близкого к максимальному значению  $U_M$  входного напряжения  $U_{ВХ}$ . При этом ток  $I_0$ , заряжающий конденсатор, замыкается по контуру 1 – D – С – 2. Ток  $I_0$  протекает только при положительных полуволнах входного напряжения и только в те короткие промежутки времени, когда  $U_{ВХ} > U_{ВЫХ}$ , т. е. когда диод открыт. На всех остальных промежутках времени, в том числе, и при отрицательных полуволнах входного напряжения диод закрыт и конденсатор разряжается по контуру (+)С –  $R_H$  – (-)С. Таким образом, выходное

напряжение выпрямителя получается пульсирующим, т. е. изменяющимся от минимального значения  $U_{\text{MIN}}$  до максимального  $U_{\text{MAX}}$ , и наоборот. Размах пульсации выходного напряжения

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}. \quad (10.2)$$

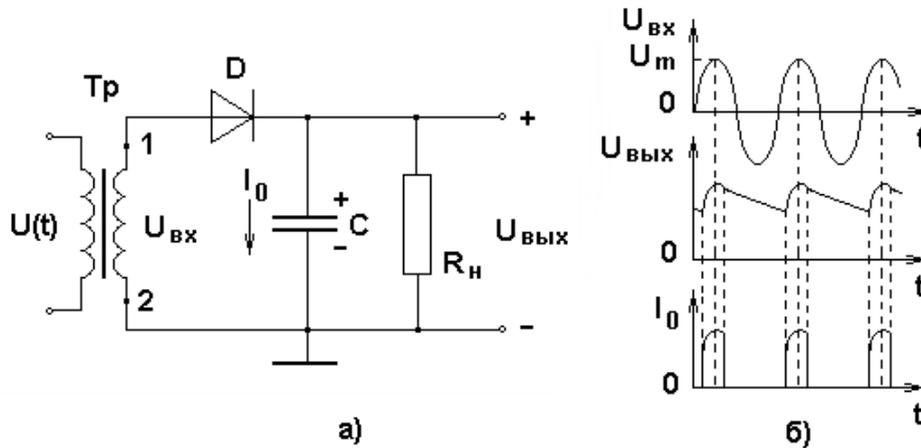


Рисунок 10.1 – Схема (а) и временные диаграммы работы (б) однофазного однополупериодного выпрямителя напряжения

Для небольших пульсаций, среднее значение выходного напряжения можно определить в виде

$$U_{\text{СР}} = (U_{\text{MAX}} + U_{\text{MIN}}) / 2. \quad (10.2)$$

Приращение по модулю среднего значения выходного напряжения

$$\Delta U_{\text{СР}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / 2. \quad (10.3)$$

Используя приведенные соотношения, определим коэффициент пульсации выходного напряжения в виде

$$K_{\text{П}} = (\Delta U_{\text{СР}} / U_{\text{СР}}) \times 100 (\%) \quad (10.4)$$

или, с учетом (10.1) – (10.3),

$$K_{\text{П}} = [(1-K) / (1+K)] \times 100 (\%) \quad (10.5)$$

где  $K = U_{\text{MIN}} / U_{\text{MAX}}$ .

Коэффициент пульсации – один из основных параметров выпрямителя. Он отражает качество выпрямления входного синусоидального напряжения, т. е. близость выходного напряжения к постоянному (неизменному во времени). При идеальном выпрямлении пульсации нет:  $U_{\text{MIN}} = U_{\text{MAX}}$ ,  $K_{\text{П}} = 0$ . При  $U_{\text{MIN}} = 0$  (наихудший вариант выпрямления)  $K_{\text{П}} = 100\%$ .

Пульсации тем меньше, чем больше емкость конденсатора и сопротивление нагрузки выпрямителя. Так, если в схеме на рис. 10.1, а сопротивление нагрузки или емкость конденсатора бесконечно велики, то выходное напряжение неизменно во времени ( $K_{\text{П}} = 0$ ) и равно амплитудному значению входного напряжения ( $U_{\text{ВХ}} = U_m$ ). Если в схеме на рис. 10.1, а

конденсатор отсутствует, то  $U_{\text{ВЫХ}}$  имеет вид положительных полуволн входного напряжения и  $K_{\text{П}} = 100\%$ .

Другим важным параметром выпрямителя является нагрузочная характеристика – зависимость среднего значения выходного напряжения  $U_{\text{СР}}$  от сопротивления нагрузки:

$$U_{\text{СР}} = f(R_{\text{Н}}). \quad (10.6)$$

Нагрузочная характеристика показывает, какой ток можно отбирать от выпрямителя во внешнюю электрическую цепь. Вид нагрузочной характеристики приведен на рис. 9.2, из которого следует, что при уменьшении сопротивления нагрузки выходное напряжение может измениться до недопустимо малых значений. Это связано с тем, что при уменьшении  $R_{\text{Н}}$  возрастает ток, отбираемый от выпрямителя во внешнюю электрическую цепь (в цепь сопротивления нагрузки  $R_{\text{Н}}$ ).

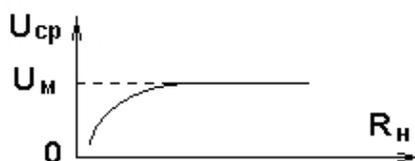


Рисунок 10.2 - Нагрузочная характеристика выпрямителя

Схема двухполупериодного выпрямителя на основе диодного моста приведена на рис. 10.3, а. Временные диаграммы, поясняющие работу этого выпрямителя, показаны на рис. 10.3, б. Здесь диоды  $D_1 - D_4$  соединены по так называемой мостовой схеме.

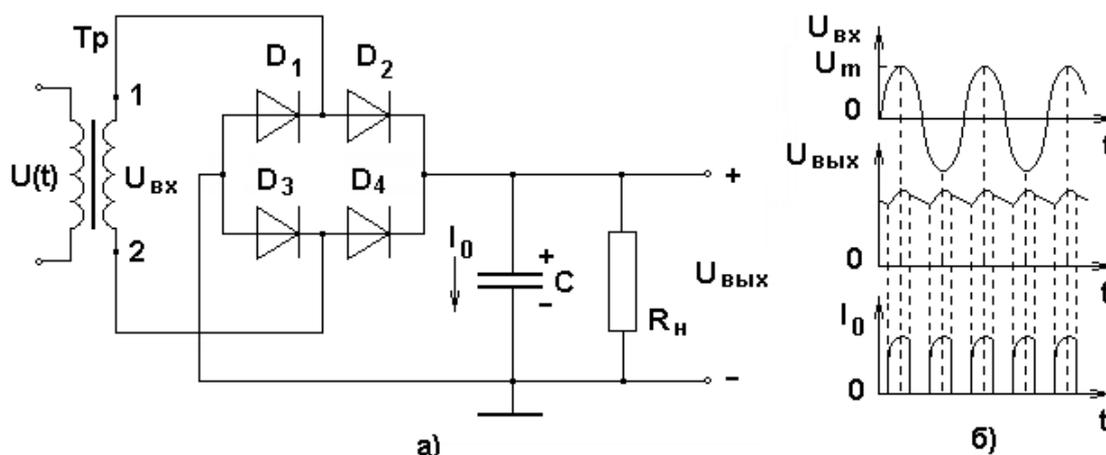


Рисунок 10.3 – Схема (а) и временные диаграммы работы (б) однофазного двухполупериодного выпрямителя напряжения на основе диодного моста

При подаче напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  на вход выпрямителя, за несколько периодов этого напряжения конденсатор заряжается до значения, близкого к максимальному значению  $U_{\text{М}}$  входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$ . При этом при положительных полуволнах входного напряжения, ток  $I_0$ , заряжающий конденсатор, замыкается по контуру  $1 - D_2 - C - D_3 - 2$ , а при отрицательных

полуволнах – по контуру 2 – D4 – С – D1 – 1. Видно, что как при положительной, так и при отрицательной полуволнах входного напряжения, ток  $I_0$  протекает через конденсатор в одном и том же направлении и только в те короткие промежутки времени, когда  $U_{вх} > U_{вых}$ .

Таким образом, в двухполупериодном выпрямителе частота подзаряда конденсатора вдвое выше, нежели в однополупериодном. Следствием этого является лучшее качество выпрямления входного синусоидального напряжения. В промежутках времени, когда диоды моста закрыты, конденсатор разряжается по контуру (+) – С – Rн – (-) С.

На рис. 10.4 приведена схема однофазного двухполупериодного выпрямителя на основе трансформатора со средней точкой. Временные диаграммы, поясняющие работу этого выпрямителя, те же, что и на рис. 10.3, б. При положительной полуволне входного напряжения, ток  $I_0$ , заряжающий конденсатор, замыкается по контуру 1 – D1 – С – 0, а при отрицательной – по контуру 2 – D2 – С – 0. Качество выпрямления входного синусоидального напряжения этим выпрямителем такое же, как и у выпрямителя на основе диодного моста.

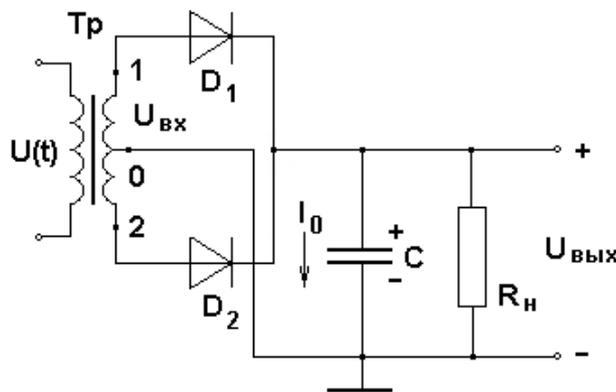


Рисунок 10.4 – Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя напряжения на основе трансформатора со средней точкой

Отметим, что при прочих равных условиях, выпрямители, собранные по схемам на рис. 10.1, а и 10.4, обладают меньшими достижимыми значениями выходного напряжения, нежели выпрямители с мостовой схемой соединения диодов. Действительно, в схеме на рис. 10.3, а в промежутках времени, когда диоды закрыты, выходное напряжение прикладывается в обратном направлении к парам диодов, а не к одному, как в однополупериодном выпрямителе и в выпрямителе на основе трансформатора со средней точкой. Поэтому, с практической точки зрения, выпрямитель на основе диодного моста является предпочтительным, по сравнению с другими рассмотренными выпрямителями.

Реальные схемы выпрямителей, конечно же, не содержат осциллографа и измерительного резистора, но могут содержать высокоомный резистор, включенный параллельно конденсатору С. Через этот резистор конденсатор разряжается (до нуля) в отсутствие входного синусоидального напряжения

$U_{ВХ}$ . Наличие такого высокоомного резистора продиктовано соображениями безопасности.

## 10.2 Задание

10.2.1 Ознакомиться с подразделом 10.1 и ответить на контрольные вопросы.

10.2.2 Открыть файл V1.ewb со схемой, показанной на рис. 10.5. На канал А осциллографа подается напряжение на измерительном резисторе  $R_2$ , пропорциональное току  $I_0$ , заряжающему конденсатор  $C$ , а на канал В – выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  выпрямителя.

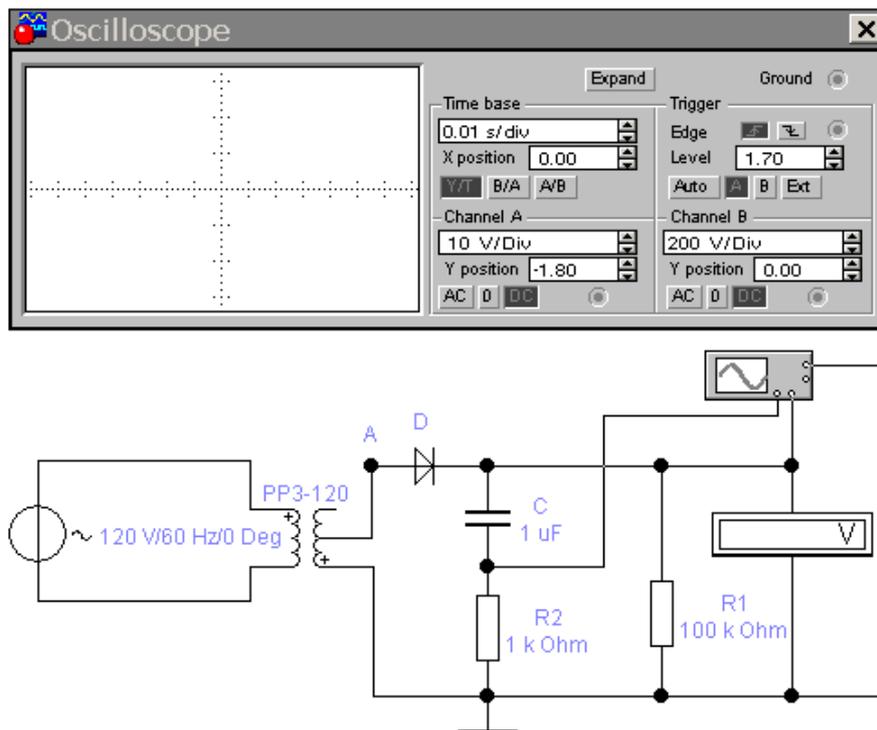


Рисунок 10.5 – Схема однополупериодного выпрямителя

10.2.3 Посредством осциллографа измерить максимальные и минимальные значения напряжения  $U_{ВЫХ}$ , а также максимальное значение тока  $I_0$  (определяется по падению напряжения на измерительном резисторе). С использованием команды `Copy as Bitmap` скопировать временные диаграммы выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  и напряжения на измерительном резисторе в отчет<sup>5</sup>.

10.2.4 Подключив один из каналов осциллографа к вторичной обмотке трансформатора (точка А). Посредством осциллографа измерить максимальное значение напряжения  $U_{ВХ}$ . С использованием команды `Copy as Bitmap` скопировать временную диаграмму входного напряжения  $U_{ВХ}$  в отчет.

Временные диаграммы  $U_{ВХ}$ ,  $U_{ВЫХ}$ ,  $I_0$  расположить одну под другой, как показано на рис. 10.1, б.

<sup>5</sup> Для смещения диаграмм на экране в вертикальном направлении, использовать Y position осциллографа.

На основе соотношений (10.2) и (10.5) рассчитать среднее значение и коэффициент пульсации выходного напряжения выпрямителя.

10.2.5 Измерить нагрузочную характеристику однополупериодного выпрямителя –  $U_{CP} = f(R_H)$ . Для этого замкнуть резистор 1 кОм накоротко, подключить к выходу выпрямителя (параллельно конденсатору C) вольтметр и, изменяя<sup>6</sup> сопротивление нагрузки  $R_H$  в диапазоне 100 Ом – 1МОм, заполнить таблицу 10.1.

Таблица 10.1. Нагрузочная характеристики однополупериодного выпрямителя

$R_H$ , кОм	$U_{CP}$ , В

10.2.6 Открыть файл B2.ewb со схемой двухполупериодного выпрямителя напряжения на основе диодного моста (рис. 10.6).

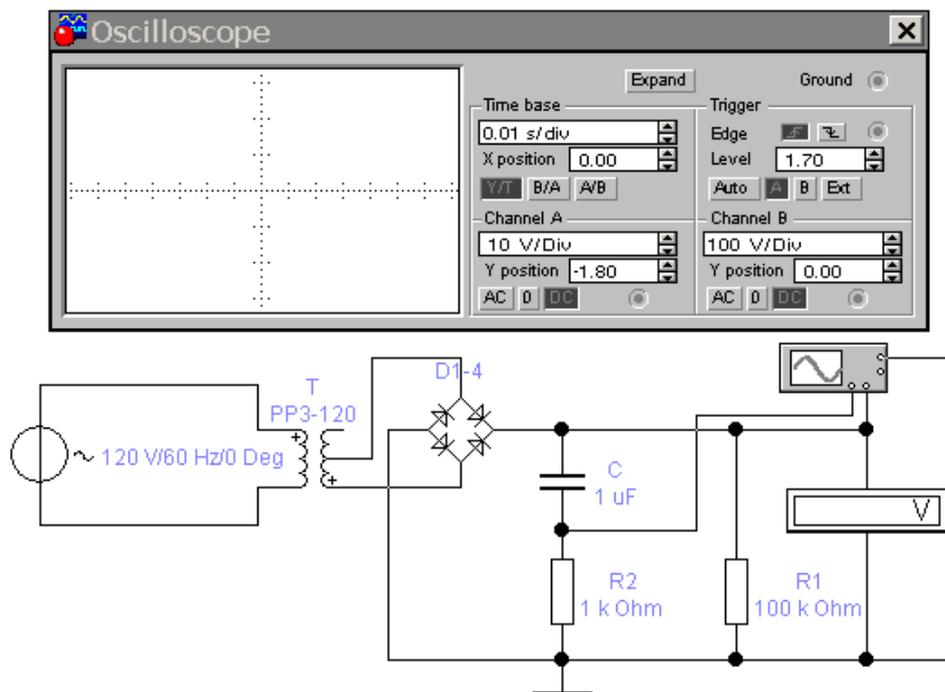


Рисунок 10.6 – Схема двухполупериодного выпрямителя напряжения на основе диодного моста

10.2.7 С использованием команды Copy as Bitmap скопировать временные диаграммы выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  и напряжения на измерительном резисторе в отчет в виде, показанном на рис. 10.3, б. Диаграмму входного напряжения  $U_{ВХ}$  взять из п. 10.2.2 для однополупериодного выпрямителя.

10.2.8 Определить основные параметры двухполупериодного выпрямителя напряжения на основе диодного моста (аналогично однополупериодному).

<sup>6</sup> Для замены номинала  $R_H$  щелкнуть мышкой по  $R_H$  дважды, установить новое значение  $R_H$  и нажать ОК.

10.2.9 Измерить нагрузочную характеристику этого выпрямителя (так же, как и в п. 10.2.3 для однополупериодного).

10.2.10 Открыть файл В3.ewb со схемой, показанной на рис. 10.7.

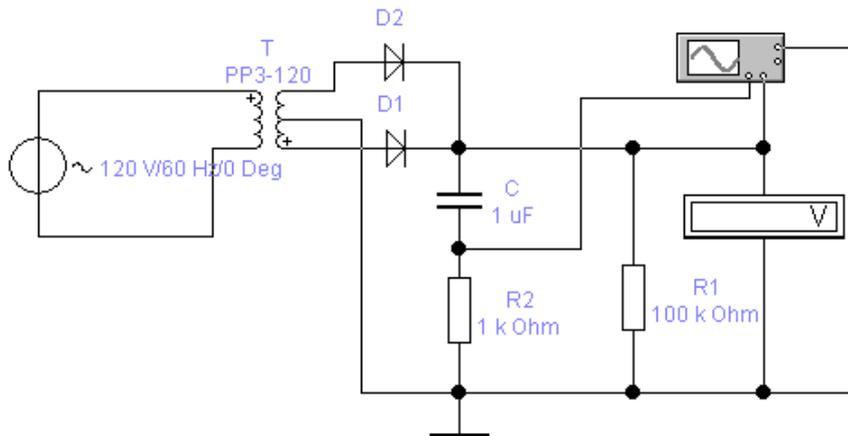
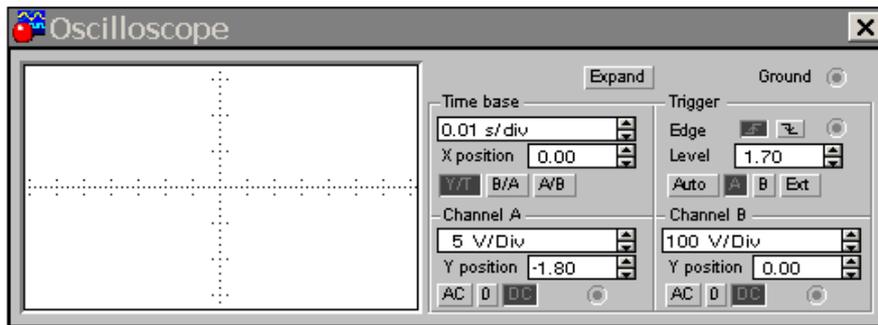


Рисунок 10.7 – Схема двухполупериодного выпрямителя на трансформаторе со средней точкой

10.2.11 С использованием команды `Copy as Bitmap` скопировать временные диаграммы выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  и напряжения на измерительном резисторе в отчет в виде, показанном на рис. 10.3, б.

10.2.12 Определить основные параметры выпрямителя.

10.2.13 Измерить нагрузочную характеристику этого выпрямителя.

10.2.14 Оформить отчет.

### 10.3 Контрольные вопросы

10.3.1 Какова цель работы?

10.3.2 Каково назначение выпрямителей?

10.3.3 Каково назначение конденсатора С в схемах выпрямителей?

10.3.4 С какой целью параллельно конденсатору С включается резистор  $R_1$ ?

10.3.5 Что называют коэффициентом пульсации?

10.3.6 Каково значение коэффициента пульсации при идеальном выпрямлении?

10.3.7 Каково значение коэффициента пульсации при  $U_{\text{MIN}} = 0$ ?

10.3.8 Что называют нагрузочной характеристикой выпрямителя?

10.3.9 Почему при измерении нагрузочной характеристики из схемы выпрямителя нужно убрать резистор  $R_1$ ?

10.3.10 Какой выпрямитель Вы бы выбрали?

## 11 СТАБИЛИЗАТОРЫ И ОГРАНИЧИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

### 11.1 Общие сведения

Для стабилизации напряжения широко используются стабилитроны (диоды Зенера). Основой стабилитрона (рис. 11.1, а) является  $p^+ - n$  переход, и его ВАХ (рис 11.1,б) вполне аналогична ВАХ выпрямительного диода.

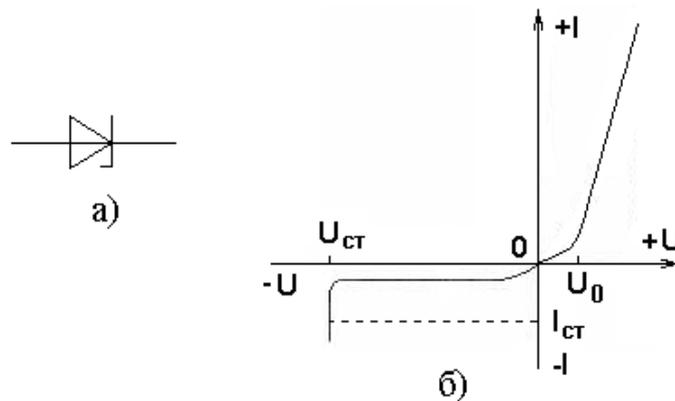


Рисунок 11.1 – Условное обозначение (а) и вольтамперная характеристика (б) стабилитрона

Отличие от диода состоит в том, что стабилитрон способен работать без выхода из строя в области обратных напряжений, превышающих напряжение пробоя  $U_{\text{проб}}$ , которое в случае стабилитронов называют напряжением стабилизации  $U_{\text{ст}}$ . При этом необходимо лишь ограничивать мощность, рассеиваемую стабилитроном, на уровне, не превышающем максимально допустимого значения

$$P_{\text{ст}} = I_{\text{ст}} U_{\text{ст}},$$

где  $I_{\text{ст}}$  – максимально допустимый ток стабилизации стабилитрона. Значения  $U_{\text{ст}}$  и  $I_{\text{ст}}$  приведены в справочных данных. При  $P > P_{\text{ст}}$  стабилитрон может выйти из строя из-за тепловых потерь.

Возможность работы стабилитрона без выхода его из строя при  $P \leq P_{\text{ст}}$  обусловлена тем, что он, в отличие от диода, имеет сильнолегированную (низкоомную) базу. Благодаря этому, при  $U > U_{\text{проб}} = U_{\text{ст}}$  в стабилитроне реализуется не электрический пробой, как в диоде, а лавинный (лавинное умножение носителей электрического тока в объеме полупроводниковой структуры прибора).

Из рис. 11.1, б видно, что в широкой области обратных токов напряжение на стабилитроне сохраняется практически неизменным и равным  $U_{\text{ст}}$ . Эта особенность и предопределила основное назначение стабилитрона –

ограничение (стабилизация) напряжения внешней электрической цепи на уровне  $U_{ст}$ . При напряжениях  $U < U_{ст}$  стабилитрон можно применять в качестве диода.

Напряжения стабилизации разных типов стабилитронов находятся в пределах  $U_{ст} = (3.3 \div 180)$  В. Для получения выходных стабилизированных напряжений больших 180 В, стабилитроны соединяют последовательно, как это показано на рис. 11.2. При этом выходное стабилизированное напряжение

$$U_{вых} = U_{ст1} + U_{ст2} + \dots + U_{стк},$$

где  $U_{ст1}, U_{ст2}, \dots, U_{стк}$  – напряжения стабилизации стабилитронов D1, D2, ..., Dk. Ограничительный резистор  $R_{огр}$  в схеме на рис. 11.2 задает обратный ток через стабилитроны на уровне, не превышающем предельно допустимого значения.

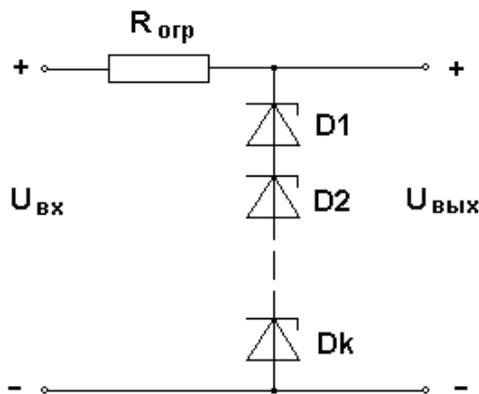


Рисунок 11.2 – Схема получения больших значений стабилизированных напряжений

Для получения малых значений стабилизированных напряжений, меньших 3.3 В, применяют стабисторы (рис. 11.3). Стабистор (ранее нормистор) – полупроводниковый диод, в котором для стабилизации напряжения используется прямая ветвь ВАХ. Стабисторы обычно изготавливаются из кремния и имеют напряжение стабилизации  $U_D \approx 0.7$  В. Следовательно, для получения, например,  $U_{вых} = 2.1$  В, схема на рис. 11.3 должна содержать три стабистора.

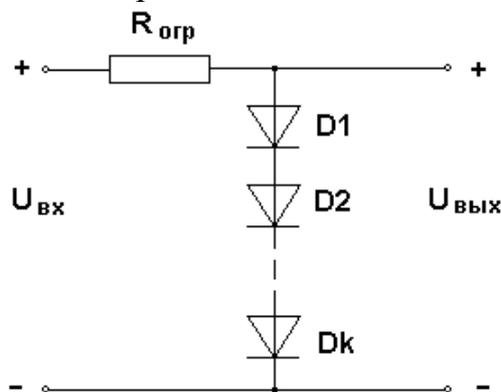


Рисунок 11.3 – Схема получения малых значений стабилизированных напряжений

Ограничители напряжения предназначены для установки постоянного или переменного входного напряжения на заданном уровне при возможных колебаниях входного напряжения в известных пределах. Широкое распространение получили диодные ограничители напряжения и ограничители напряжения на стабилитронах.

По функциональному назначению указанные ограничители делят на односторонние и двухсторонние. Применительно к постоянным входным напряжениям используют, естественно, только односторонние ограничители напряжения, а применительно к переменным напряжениям – оба вида ограничителей.

Схема одностороннего диодного ограничителя напряжения приведена на рис. 11.4, а. Временные диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 11.4, б. Здесь  $U_{ВХ}$  – входное напряжение,  $U_{ВЫХ}$  – ограниченное на заданном уровне (уровне  $U_{ОП}$ ) выходное напряжение,  $R_{ОГР}$  – резистор, ограничивающий ток в цепи  $D_{ОП} - U_{ОП}$ ;  $U_{ОП}$  – опорный источник постоянного напряжения,  $D_{ОП}$  – диод в цепи этого источника,  $D$  – диод, компенсирующий в составе выходного напряжения падение напряжения на диоде  $D_{ОП}$ ;  $R_{Н}$  – сопротивление нагрузки (потребитель электрической энергии);  $I_{Н}$  – ток нагрузки, т. е. ток, отбираемый от ограничителя во внешнюю электрическую цепь.

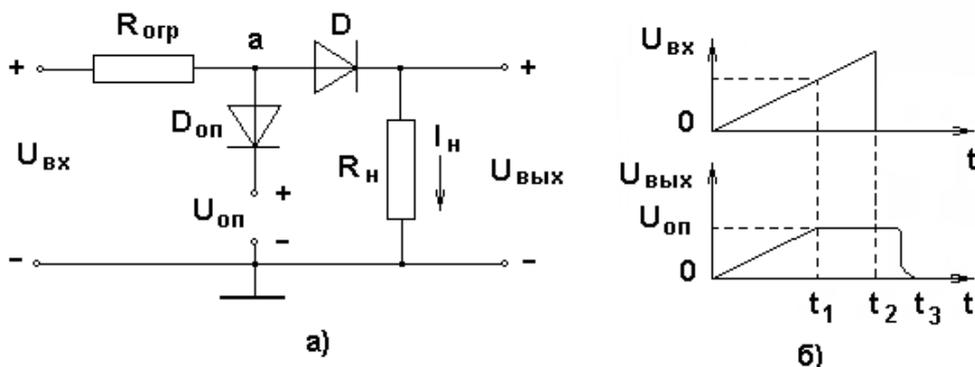


Рисунок 11.4 – Схема (а) и временные диаграммы работы (б) одностороннего диодного ограничителя напряжения

Параметры входного линейно нарастающего напряжения следующие:

$$U_{ВХ} = A t \text{ при } 0 \leq t \leq t_2, \quad U_{ВХ} = 0 \text{ при } t > t_2,$$

где  $A$  – скорость нарастания входного напряжения.

В интервале времени  $0 \leq t \leq t_1$   $U_{ВХ} < (U_{ОП} + U_{D_{ОП}})$ , диод  $D_{ОП}$  закрыт, ток нагрузки

$$I_{Н} = U_{ВХ} / (R_{ОГР} + R_{Н})$$

и выходное напряжение

$$U_{ВЫХ} = I_{Н} \times R_{Н} = U_{ВХ} \times R_{Н} / (R_{ОГР} + R_{Н})$$

повторяет форму входного напряжения, т.е. нарастает по линейному закону. В интервале времени  $t_1 \leq t \leq t_2$   $U_{ВХ} \gg (U_{ОП} + U_{ДОП})$ , диод  $D_{ОП}$  открыт и потенциал точки а

$$U_a = U_{ОП} + U_{ДОП},$$

где  $U_{ДОП}$  - падение напряжения на открытом диоде  $D_{ОП}$ . При этом ток нагрузки

$$I_H = U_{ОП} / R_H$$

и

$$U_{ВЫХ} = U_{ОП},$$

т. е. ограничено на уровне напряжения опорного источника. В момент времени  $t_2$   $U_{ВХ}$  скачком уменьшается до нуля, а  $U_{ВЫХ}$  еще некоторое время сохраняется неизменным, после чего так же уменьшается до нуля. Это обусловлено инерционными свойствами диода  $D_{ОП}$ , который из открытого состояния в запертое мгновенно перейти не может. Если на вход рассмотренного ограничителя подать постоянное напряжение  $U_{ВХ} > U_{ОП} + U_{ДОП}$ , то выходное напряжение  $U_{ВЫХ} = U_{ОП}$ , будет так же неизменным во времени.

В подавляющем большинстве случаев  $U_{ОП} \gg U_{ДОП}$ . Поэтому в приведенных выше соотношениях напряжением  $U_{ДОП}$  можно пренебречь, а диод  $D$  в схему на рис. 11.4, а не включать.

Схема двухстороннего диодного ограничителя напряжения приведена на рис. 11.5, а. Временные диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 11.5, б. Здесь цепь  $D_{ОП1} - U_{ОП1}$  ограничивает положительную полуволну синусоидального входного напряжения на уровне  $U_{ОП1}$ , а цепь  $D_{ОП2} - U_{ОП2}$  - отрицательную полуволну на уровне  $U_{ОП2}$ .

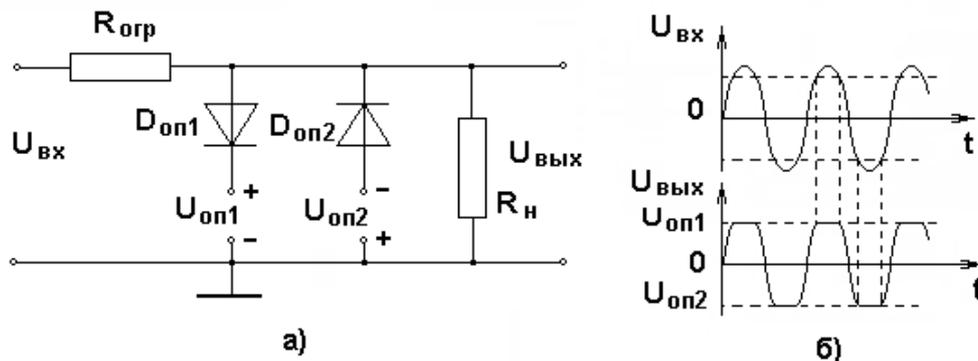


Рисунок 11.5 – Схема (а) и временные диаграммы работы (б) двухстороннего диодного ограничителя напряжения

Схема одностороннего ограничителя напряжения на основе стабилитрона приведена на рис. 11.6, а. Временные диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 11.6, б. В этой схеме входное напряжение прямоугольной формы  $U_{ВХ}$  ограничивается стабилитроном  $D$  на уровне

$$U_{ВЫХ} = U_{СТ},$$

где  $U_{CT}$  – напряжение стабилизации стабилитрона. Если на вход этого ограничителя подать постоянное напряжение  $U_{ВХ} > U_{CT}$ , то  $U_{ВЫХ} = U_{CT}$  будет так же неизменным во времени.

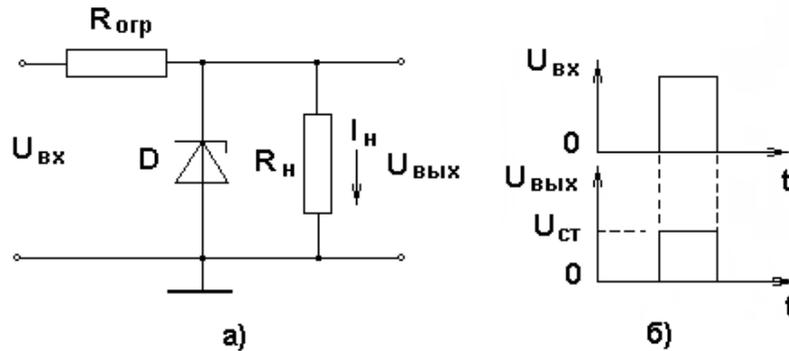


Рисунок 11.6 – Схема (а) и временные диаграммы работы (б) одностороннего ограничителя напряжения на основе стабилитрона

Схема двустороннего ограничителя напряжения на основе стабилитронов приведена на рис. 11.6, а. Временные диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 11.6, б.

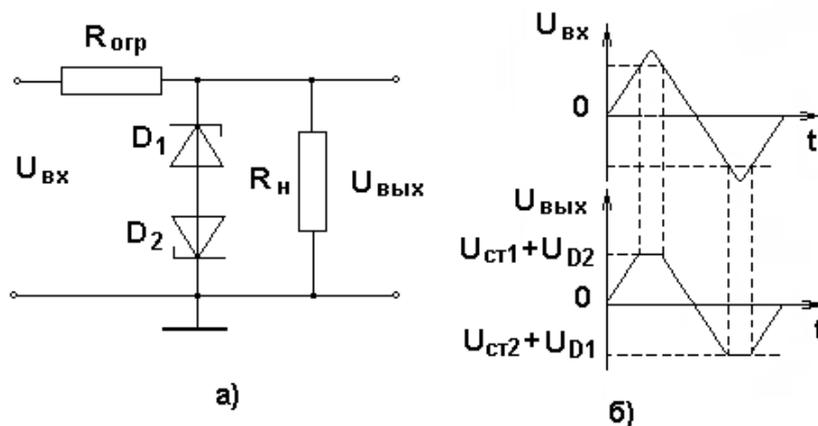


Рисунок 11.6 – Схема (а) и временные диаграммы работы (б) двустороннего ограничителя напряжения на основе стабилитронов

На временных диаграммах  $U_{CT1}$  и  $U_{CT2}$  – напряжения стабилизации стабилитронов  $D_1$  и  $D_2$ ,  $U_{D1}$  и  $U_{D2}$  – падения напряжения на этих стабилитронах при их включении в прямом направлении. Положительную полуволну входного пилообразного напряжения ограничивает стабилитрон  $D_1$  на уровне

$$U_{ВЫХ} = U_{CT1} + U_{D2},$$

а отрицательную – стабилитрон  $D_2$  на уровне

$$U_{ВЫХ} = U_{CT2} + U_{D1}.$$

В заключение отметим, что диодные ограничители напряжения целесообразно применять в тех случаях, когда в нагрузку от ограничителя отбираются относительно большие токи, а ограничители напряжения на основе стабилитронов – в электронных устройствах, где требуется высокое качество выходного напряжения.

На рис. 11.7 приведена схема однополупериодного выпрямителя с ограничителем напряжения на основе стабилитрона. Выходное напряжение для этой схемы в точности равно напряжению стабилизации стабилитрона  $D_1$  и не зависит от пульсации напряжения на выходе выпрямителя. Протекающий через ограничительный резистор ток

$$I = (U_C - U_{СТ}) / R_{огр},$$

а ток нагрузки

$$I_H = I - I_{D1},$$

где  $U_C$  – напряжение на выходе выпрямителя (на конденсаторе  $C$ ),  $I_{D1}$  – ток, протекающий в цепи стабилитрона  $D_1$ .

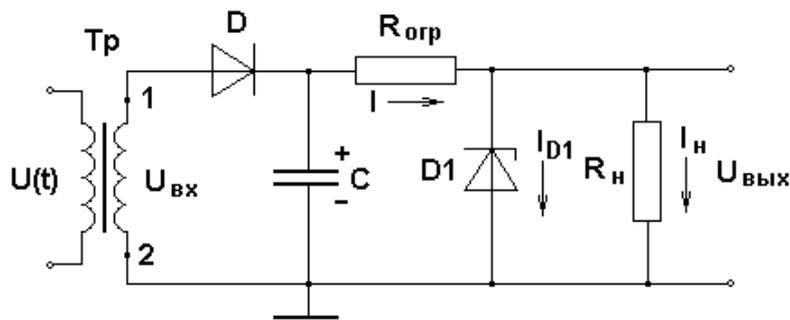


Рисунок 11.7 – Схема выпрямителя со стабилизатором напряжения

Если в схеме на рис. 11.7 вместо стабилитрона включить последовательную цепочку нескольких стабилитронов, то можно получить несколько значений выходных напряжений, не зависящих от пульсации напряжения на выходе выпрямителя.

## 11.2 Задание

11.2.1 Ознакомиться с подразделом 11.1 и ответить на контрольные вопросы.

11.2.2 Открыть файл 01.ewb со схемой, приведенной на рис. 11.8.

На канал А осциллографа подается входное напряжение  $U_{ВХ}$ , а на канал В – выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$ . Резистор 1 кОм ограничивает на допустимом уровне ток через диод ограничителя напряжения.

11.2.3 Посредством осциллографа измерить максимальные значения входного и выходного напряжений. С использованием команды `Copy as Bitmap` скопировать временные диаграммы входного и выходного напряжения в отчет.

11.2.4 Повторить п. 11.2.2 при других формах входного напряжения.

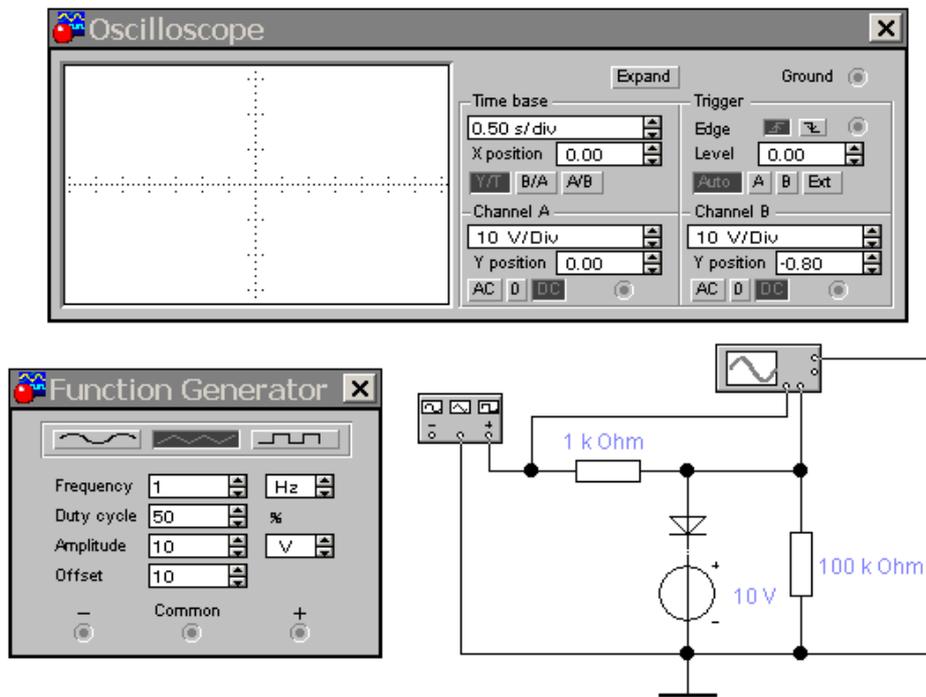


Рисунок 11.8 – Схема одностороннего диодного ограничителя напряжения

11.2.5 Открыть файл O2.ewb со схемой, приведенной на рис. 11.9.

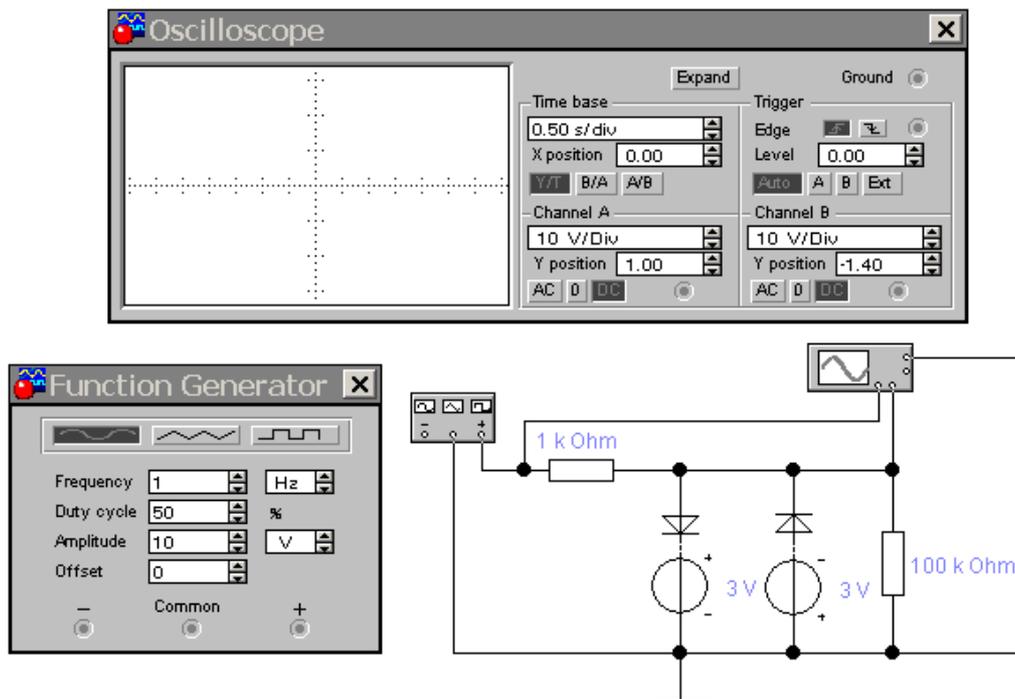


Рисунок 11.9 – Схема двухстороннего диодного ограничителя напряжения

11.2.6 Повторить п. 11.2.2 применительно к этому ограничителю.

11.2.7 Открыть файл O3.ewb со схемой, приведенной на рис. 11.10.

11.2.8 Повторить п. 11.2.2 применительно к этому ограничителю.

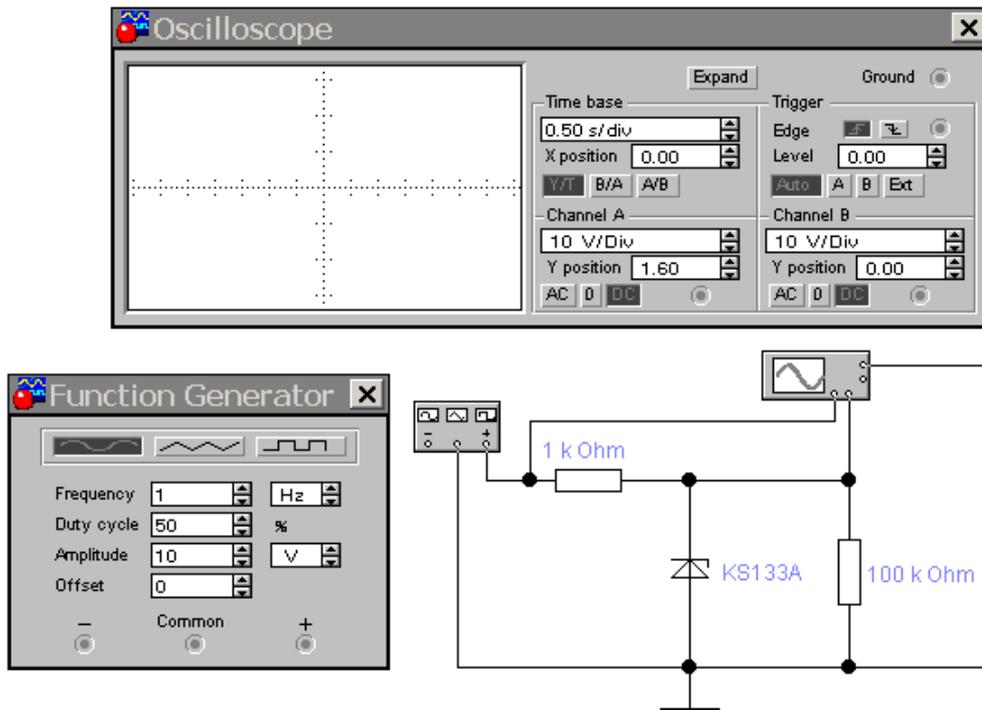


Рисунок 11.10 – Схема одностороннего ограничителя напряжения на основе стабилитрона

11.2.8 Открыть файл O4.ewb со схемой, приведенной на рис. 11.11.

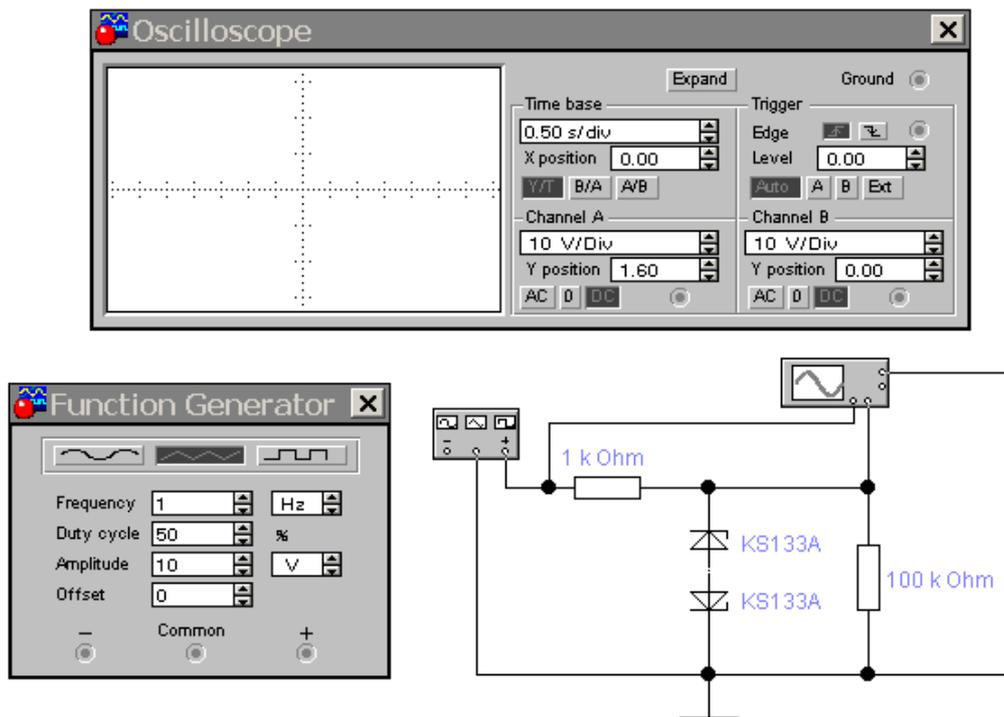


Рисунок 11.11 – Схема двухстороннего ограничителя напряжения на основе стабилитронов

11.2.9 Повторить п. 11.2.2 применительно к этому ограничителю.

11.2.10 Оформить отчет.

## 11.3 Контрольные вопросы

- 11.3.1 Какова цель работы?  
 11.3.2 Чем стабилитроны отличаются от обычных выпрямительных диодов?  
 11.3.3 Чем отличаются стабилитроны от стабисторов?  
 11.3.4 Можно ли в ограничителях напряжения вместо стабисторов использовать выпрямительные диоды или стабилитроны?  
 11.3.5 Чем двухсторонние ограничители отличаются от односторонних?  
 11.3.6 Почему схема выпрямителя со стабилизатором напряжения (рис. 11.7) характеризуется очень низким коэффициентом пульсаций?

## 12 БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

### 12.1 Устройство и схемы включения

Биполярный транзистор<sup>7</sup> (БТ) – полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, генерации и преобразования электрических сигналов. Основным элементом БТ является монокристалл полупроводника, в котором созданы три области с чередующимся типом примесной проводимости – эмиттер (Э), база (Б), коллектор (К). Эти области имеют внешние выводы, с помощью которых БТ включается в электрическую схему. В зависимости от чередования типа проводимости областей различают р-п-р (рис. 12.1, а) и п-р-п (рис. 12.1, б) транзисторы. Переход между эмиттером и базой называется эмиттерным, а между базой и коллектором – коллекторным.

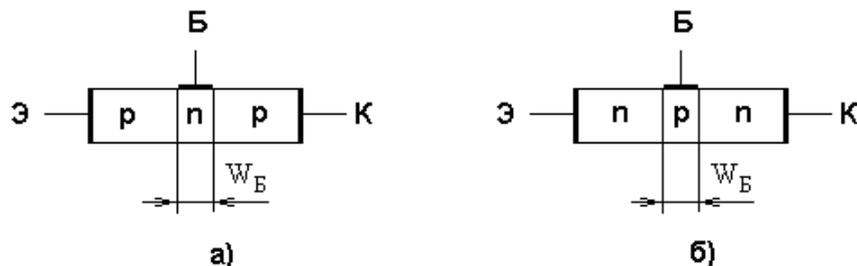


Рисунок 12.1 – К структуре р-п-р (а) и п-р-п (б) транзисторов

Первые БТ были изготовлены на основе германия<sup>8</sup>. В настоящее время их изготавливают в основном на кремнии и арсениде галлия.

На рис. 12.2 представлен п-р-п транзистор в составе интегральной схемы с небольшим числом элементов (увеличение по вертикали много больше, чем в горизонтальном направлении). Эмиттер имеет наименьшие размеры и предназначен для создания потока электронов, пронизывающего всю структуру прибора. Область эмиттера характеризуется очень высокой

<sup>7</sup> Название транзистор происходит от «transfer resistor» – регулируемое сопротивление. Термин «биполярный» подчеркивает тот факт, что функционирование би-полярного транзистора обеспечивается носителями зарядов двух типов – электронами и дырками.

<sup>8</sup> В 1956 г. за изобретение транзистора (1947 г.) Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн получили Нобелевскую премию по физике.

степенью легирования (концентрация доноров составляет  $10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ). Средняя область транзистора – база – предназначена для управления потоком электронов, движущихся из эмиттера в коллектор. Для уменьшения потерь носителей заряда на рекомбинацию в базе ее ширина  $W_B$  делается очень маленькой, а степень легирования – очень низкой (на 3 ÷ 4 порядка ниже, чем у эмиттера). Из-за различий в уровне легирования областей базы и эмиттера поток электронов, инжектируемых из эмиттера в базу, значительно превосходит встречный поток дырок, инжектируемых из базы в эмиттер. Коллектор предназначен для собирания потока электронов, инжектируемых эмиттером. Область коллектора имеет наибольшие размеры и легируется значительно слабее эмиттера

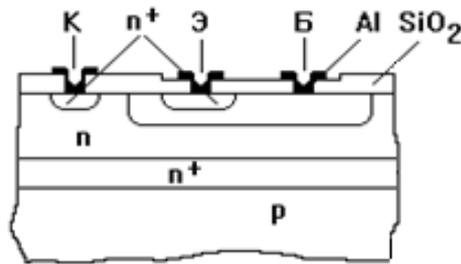


Рисунок 12.2 – Интегральный n-p-n БТ в разрезе

На рис. 12.3 приведены условные обозначения p-n-p и n-p-n транзисторов. Стрелка на выводе эмиттера показывает направление эмиттерного тока в нормальном активном режиме работы транзистора. Кружок обозначает корпус дискретного прибора, и в обозначении БТ без корпуса – отсутствует.

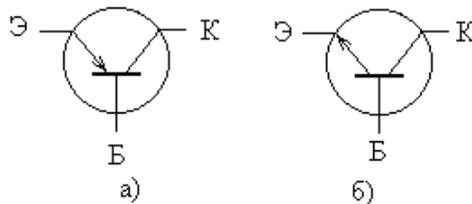


Рисунок 12.3 – Условные обозначения p-n-p (а) и n-p-n (б) транзисторов

Принцип работы p-n-p и n-p-n транзисторов одинаков, а полярности напряжений между их электродами и направления токов в цепях электродов противоположны. Транзисторы n-p-n обладают большим усилением и меньшей инерционностью. Значительное отличие характеристик n-p-n и p-n-p транзисторов является недостатком биполярных схем.

В большинстве электрических схем БТ используются как четырехполюсники. При этом один из трех выводов транзистора является общим для входной и выходной цепи. Соответственно различают три схемы включения транзисторов: схема включения с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК).

В схеме с ОБ (рис. 12.4, а) входной цепью является цепь эмиттера, а выходной – цепь коллектора. Напряжение  $U_{ЭБ}$  прикладывается к эмиттерному переходу, а напряжение  $U_{КБ}$  – к коллекторному.

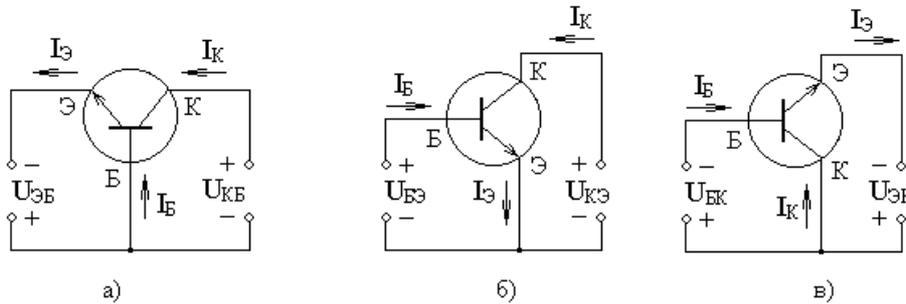


Рисунок 12.4 – Схемы включения n-p-n транзистора с ОБ (а), ОЭ (б) и ОК (в)

В схеме с ОЭ (рис. 12.4, б) входной цепью является цепь базы, а выходной – цепь коллектора. Напряжение  $U_{БЭ}$  прикладывается непосредственно к эмиттерному переходу. Напряжение  $U_{КЭ}$  распределяется между обоими переходами:

$$U_{КЭ} = U_{КБ} + U_{БЭ}.$$

Для того, чтобы коллекторный переход был закрыт, необходимо  $U_{КБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ} > 0$ , что обеспечивается при  $U_{КЭ} > U_{БЭ} > 0$ .

В схеме с общим коллектором (рис. 12.4, в) входной цепью является цепь базы, а выходной – цепь эмиттера. Схему с таким включением часто называют эмиттерным повторителем.

## 12.2 Режимы работы и статические характеристики

Любой из p-n переходов БТ может быть смещен как в прямом, так и в обратном направлениях. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора: нормальный активный (усиления), отсечки, насыщения и инверсный активный. Рассмотрим каждый из этих режимов на примере n-p-n БТ. Для p-n-p транзистора все рассуждения аналогичны, с заменой слова «электроны» на «дырки», и наоборот, а также с заменой всех напряжений противоположными по знаку.

Приведенные на рис. 12.4 полярности напряжений ( $U_{ЭБ} < 0$ ,  $U_{КБ} > 0$ ) обеспечивают открытое состояние эмиттерного перехода и закрытое состояние коллекторного перехода n-p-n транзистора, что соответствует нормальному активному режиму его работы. Активный режим является основным при использовании БТ для усиления сигналов. В этом режиме инжектированные из эмиттера в базу электроны диффундируют к коллектору. Поле коллекторного перехода втягивает электроны в область коллектора, т. е. происходит экстракция электронов в коллектор. Часть инжектированных из эмиттера электронов рекомбинирует с основными носителями заряда в базе – дырками. Однако, из-за того что базу делают очень тонкой и сравнительно слабо легированной, большая часть электронов доходит до коллектора. Потери носителей заряда на рекомбинацию в базе образуют ток базы

$$I_B = I_C - I_K.$$

Инверсный режим работы транзистора аналогичен активному режиму с той разницей, что в открытом состоянии находится коллекторный переход, а в закрытом – эмиттерный. Поскольку усилительные свойства транзистора в инверсном режиме много хуже, чем в активном режиме, инверсный режим практически не используется.

Режимы отсечки и насыщения являются основными, когда БТ работает в ключевых и логических схемах. В режиме отсечки оба перехода транзистора находятся в закрытом состоянии, сквозные потоки электронов отсутствуют. Через переходы транзистора протекают потоки неосновных носителей заряда, создающие малые и неуправляемые тепловые токи. База и переходы транзистора в режиме отсечки обеднены подвижными носителями заряда, их сопротивление оказывается очень высоким. Поэтому часто считают, что транзистор в режиме отсечки представляет собой разрыв цепи.

В режиме насыщения оба перехода транзистора находятся в открытом состоянии. И эмиттер, и коллектор инжектируют электроны в базу, в результате чего в структуре протекают два встречных сквозных потока электронов (нормальный и инверсный). От соотношения этих потоков зависит направление токов, протекающих в цепях эмиттера и коллектора. Область базы перенасыщена избыточными электронами, и рекомбинационный ток базы – значительно выше, чем в активном или инверсном режиме. Сопротивление базы и переходов транзистора – очень малы. Поэтому транзистор в режиме насыщения можно считать короткозамкнутыми.

Как четырехполюсник БТ характеризуется входным  $U_{ВХ}$  и выходным  $U_{ВЫХ}$  напряжениями и входным  $I_{ВХ}$  и выходным  $I_{ВЫХ}$  токами. Функциональные зависимости между этими величинами называются статическими характеристиками. Чтобы установить такие функциональные зависимости, необходимо две из указанных величин взять в качестве независимых переменных, а две оставшиеся выразить в виде функций этих независимых переменных. Как правило, применительно к БТ в качестве независимых переменных выбирают входной ток  $I_{ВХ}$  и выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$ . В этом случае входное напряжение и выходной ток выражаются следующим образом:

$$U_{ВХ} = F_1(I_{ВХ}, U_{ВЫХ}),$$

$$I_{ВЫХ} = F_2(I_{ВХ}, U_{ВЫХ}).$$

На практике удобнее использовать функции одной переменной. Для перехода к таким функциям необходимо вторую переменную, называемую в этом случае параметром характеристики, поддерживать постоянной. В результате получают четыре типа характеристик транзистора: 1) входная характеристика:  $U_{ВХ} = f_1(I_{ВХ})$  при  $U_{ВЫХ} = \text{const}$ ; 2) характеристика обратной передачи (связи) по напряжению:  $U_{ВХ} = f_2(U_{ВЫХ})$  при  $I_{ВХ} = \text{const}$ ; 3)

характеристика (прямой) передачи тока, называемая также управляющей или передаточной характеристикой:  $I_{ВЫХ} = f_3(I_{ВХ})$  при  $U_{ВЫХ} = \text{const}$ ; 4) выходная характеристика:  $I_{ВЫХ} = f_4(U_{ВЫХ})$  при  $I_{ВХ} = \text{const}$ .

Статические характеристики БТ могут задаваться аналитическими выражениями или графически. Несколько характеристик одного типа, полученные при различных значениях параметра, образуют семейство характеристик. Семейства входных и выходных характеристик транзистора считаются основными и приводятся в справочниках, с их помощью легко могут быть получены два других семейства характеристик.

Входные характеристики БТ относятся к эмиттерному переходу. В активном режиме на эмиттерный переход подается прямое напряжение. Поэтому входные характеристики БТ аналогичны характеристике прямого тока диода. Выходные характеристики подобны характеристике обратного тока диода, т. к. они отражают свойства коллекторного перехода, работающего при обратном напряжении. Конкретный вид статических характеристик зависит от схемы включения транзистора. На практике наиболее часто используются схемы включения с ОБ и ОЭ.

В схеме с ОБ (рис. 12.5, а) входным током является ток эмиттера  $I_Э$ , а выходным – ток коллектора  $I_К$ , входным напряжением является напряжение  $U_{ЭБ}$ , а выходным – напряжение  $U_{КБ}$ . Входная характеристика в схеме с ОБ обычно представляется в виде  $I_Э = f(U_{ЭБ})$  при  $U_{КБ} = \text{const}$ . При  $U_{КБ} = 0$  она аналогична ВАХ полупроводникового диода в прямом направлении (рис. 12.5, а – кривая  $U_{КБ} = 0$ ).

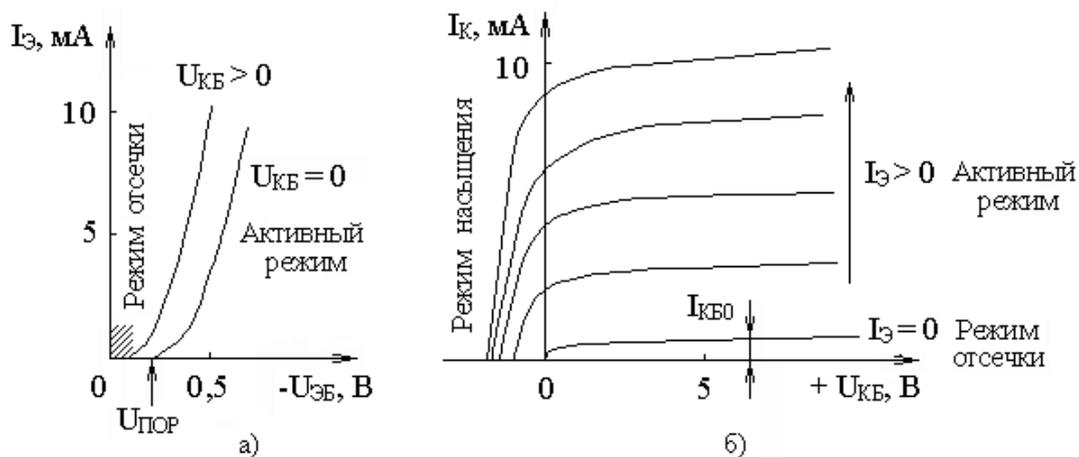


Рисунок 12.5 – Семейство входных (а) и выходных (б) характеристик n-p-n БТ в схеме с ОБ

Поскольку коллекторный переход включен в обратном направлении, при увеличении напряжения на коллекторе ширина запирающего слоя коллекторного перехода будет расти, а эффективная ширина базы  $W_{ЭФФ}$  соответственно – уменьшаться (эффект Эрли). Это приводит к некоторому увеличению тока эмиттера  $I_Э$ . Увеличение тока  $I_Э$  с ростом  $U_{КБ}$  отражается небольшим смещением входной характеристики в сторону меньших напряжений  $|U_{ЭБ}|$  (рис. 12.5, а – кривая  $U_{КБ} > 0$ ). Режиму отсечки формально

соответствует обратное напряжение  $U_{ЭБ} > 0$ , хотя реально эмиттерный переход остается закрытым ( $I_{Э} \rightarrow 0$ ) и при прямых напряжениях  $|U_{ЭБ}|$  меньших порогового напряжения  $U_{ПОР}$ .

Выходная характеристика транзистора в схеме ОБ – зависимость  $I_{К} = f(U_{КБ})$  при  $I_{Э} = \text{const}$ . Выражение для идеализированной выходной характеристики в активном режиме имеет вид:

$$I_{К} = \alpha_{С} I_{Э} + I_{КБ0},$$

где  $\alpha_{С}$  – статический коэффициент передачи тока эмиттера,  $I_{КБ0}$  – обратный ток коллекторного перехода при  $I_{Э} = 0$ . Для современных БТ  $\alpha_{С} = 0.950 \div 0.995$ . Чем больше коэффициент  $\alpha_{С}$ , тем эффективней транзистор передает ток.

В соответствие с последним выражением ток коллектора определяется только током эмиттера и не зависит от напряжения  $U_{КБ}$ . Реально (рис. 12.5, б) имеет место очень небольшой рост  $I_{К}$  при увеличении обратного напряжения  $U_{КБ}$ , связанный с эффектом Эрли (уменьшением эффективной ширины базы  $W_{ЭФФ}$ ). При  $I_{Э} = 0$  в цепи коллектора протекает тепловой ток ( $I_{К} = I_{КБ0}$ ). В режиме насыщения на коллекторный переход подается прямое напряжение  $U_{КБ}$ , большее порогового значения, открывающее коллекторный переход. В структуре транзистора появляется инверсный сквозной поток электронов, движущийся из коллектора в эмиттер навстречу нормальному сквозному потоку, движущемуся из эмиттера в коллектор. Инверсный поток очень резко увеличивается с ростом  $U_{КБ}$ , в результате чего коллекторный ток уменьшается и очень быстро спадает до нуля (рис. 12.5, б). Зависимость между токами  $I_{К}$  и  $I_{Э}$  почти линейна. Поэтому при одинаковом приращении тока  $I_{Э}$  выходные характеристики располагаются почти на одинаковом расстоянии друг от друга (эквидистантны).

В схеме с ОЭ (рис. 12.6, б) входным током является ток базы  $I_{Б}$ , а выходным – ток коллектора  $I_{К}$ , входным напряжением является напряжение  $U_{БЭ}$ , а выходным – напряжение  $U_{КЭ}$ . Входная характеристика транзистора, включенного по схеме с ОЭ, обычно представляется в виде  $I_{Б} = f(U_{БЭ})$ . При  $U_{КЭ} = 0$  она подобна вольтамперной характеристике полупроводникового диода в прямом направлении (рис. 12.6, а – кривая  $U_{КЭ} = 0$ ). Экспоненциальный рост тока базы  $I_{Б}$  при увеличении  $U_{БЭ}$  связан с увеличением инжекции электронов в базу и соответствующим усилением их рекомбинации с дырками. При увеличении напряжения на коллекторе  $U_{КЭ}$  за счет эффекта Эрли (т. е. уменьшения  $W_{ЭФФ}$ ) уменьшается рекомбинация носителей в базе и ток базы. Следовательно, характеристика смещается вниз (рис. 12.6, а – кривая  $U_{КЭ} > 0$ ).

Физические процессы в транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, аналогичны описанным выше. Разность между эмиттерным и коллекторным токами в соответствии с первым законом Кирхгофа представляет собой ток

базы:  $I_B = I_E - I_C$ . Во многих случаях  $I_E \gg I_{КБ0}$  и можно считать, что  $I_E = I_C / \alpha_C$ . Отсюда  $I_B = I_C / \alpha_C - I_C = [(1 - \alpha_C) / \alpha_C] I_C$  или

$$\beta_C = I_C / I_B = \alpha_C / (1 - \alpha_C).$$

Статический коэффициент передачи тока базы  $\beta_C$  значительно больше, чем коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha$ . Для современных маломощных БТ  $\beta_C = 20 \div 350$ .

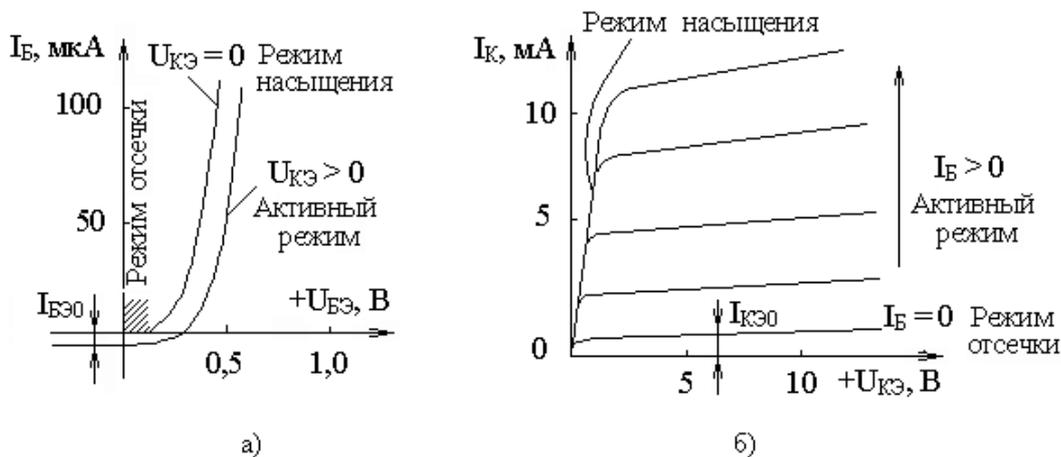


Рисунок 12.6 – Семейство входных характеристик БТ в схеме с ОЭ

В схеме с ОЭ выходная характеристика БТ – зависимость  $I_C = f(U_{CE})$  при  $I_B = \text{const}$ . Напряжение  $U_{CE}$  распределяется между обоими переходами, и при  $U_{CE} < U_{BE}$  напряжение на коллекторном переходе меняет знак и становится прямым, в результате транзистор переходит в режим насыщения при  $U_{CE} > 0$  (рис. 12.6, б). В режиме насыщения характеристики сливаются в одну линию, то есть ток коллектора не зависит от тока базы. Так же, как и в схеме ОБ, идеализированная характеристика в активном режиме не зависит от напряжения  $U_{CE}$ . Реально имеет место заметный рост тока  $I_C$  с ростом  $U_{CE}$  (рис. 12.6, б), связанный с эффектом Эрли. Этот рост выражен значительно сильнее, чем в схеме ОБ из-за более резкой зависимости от напряжения на коллекторном переходе коэффициента передачи тока базы  $\beta_C$  по сравнению с коэффициентом передачи тока эмиттера  $\alpha_C$ . Также более резкой зависимостью  $\beta_C$  от тока эмиттера и, соответственно, от тока базы объясняется практическое отсутствие эквидистантности характеристик.

При  $I_B = 0$  в цепи коллектора протекает ток  $I_{КЭ0} = \beta_C I_{БЭ0}$ . Увеличение тока в  $\beta_C$  раз по сравнению со схемой ОБ объясняется тем, что в схеме ОЭ при  $I_B = 0$  и  $U_{CE} > 0$  эмиттерный переход оказывается несколько приоткрыт напряжением  $U_{CE}$ , и инжектируемые в базу электроны существенно увеличивают ток коллектора.

Статические характеристики БТ, включенного по схеме ОК (рис. 12.4, в), практически не отличаются от характеристик транзистора в схеме с ОЭ и в справочниках не приводятся.

### 12.3 Определение параметров из статических характеристик

Параметры – количественное выражение свойств. Основными параметрами, характеризующими БТ как активный нелинейный четырехполусник, являются коэффициенты усиления по току  $K_I$ , напряжению  $K_U$  и мощности  $K_P$ , а также входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления. Различают статические и динамические параметры. Статические параметры определяются как отношения соответствующих переменных, динамические – через малые приращения тех же переменных. И статические, и динамические параметры зависят от режима работы по постоянному току – рабочей точки БТ.

В схеме с ОБ рабочую точку определяют значения  $U_{КБ}$  и  $I_Э$ . Схема с ОБ характеризуется низким входным сопротивлением, отсутствием усиления по току, большим усилением по напряжению и мощности. Динамический коэффициент усиления по току (рис. 12.7, а)

$$K_{I\_ОБ} = \Delta I_K / \Delta I_Э = \alpha_d,$$

где  $\Delta I_Э$  и  $\Delta I_K$  – малое приращение тока эмиттера  $I_Э$  и отвечающее ему приращение тока коллектора  $I_K$  в рабочей точке,  $\alpha_d$  – динамический коэффициент передачи тока эмиттера.

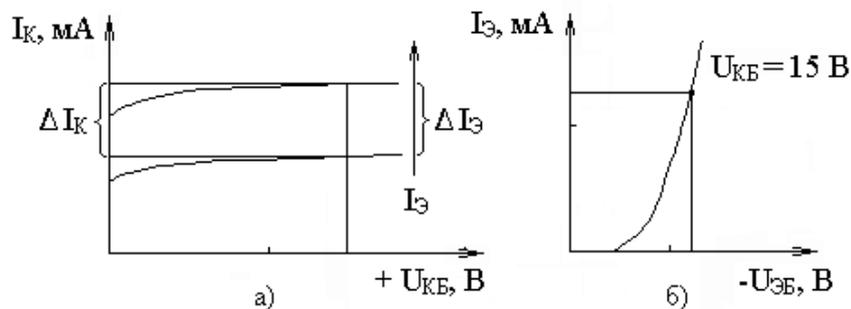


Рисунок 12.7 – К определению параметров БТ в схеме с ОБ

Входное статическое сопротивление – сопротивление открытого эмиттерного перехода (рис. 12.8, б):

$$R_{ВХ\_ОБ} = U_{ЭБ} / I_Э.$$

Динамический коэффициент усиления по напряжению

$$K_{U\_ОБ} = \Delta U_{КБ} / \Delta U_{ЭБ} = \Delta I_K R_H / (\Delta I_Э R_{ВХ\_ОБ}) = \alpha_d R_H / R_{ВХ\_ОБ},$$

где  $\Delta U_{ЭБ}$  и  $\Delta U_{КБ}$  – малое приращение напряжения эмиттера  $\Delta U_{ЭБ}$  и отвечающее ему приращение напряжения коллектора  $U_{КБ}$ ,  $R_H$  – сопротивление нагрузки, включенное в коллекторную цепь.

Для любой схемы включения БТ коэффициент усиления по мощности

$$K_P = K_I K_U.$$

Схема с ОЭ имеет большее, чем схема с ОБ, входное сопротивление и усиливает сигнал по току, по напряжению и по мощности. Достоинство схемы с ОЭ – удобство питания от одного источника, т. к. на коллектор и базу подаются питающие напряжения одного знака. В схеме с ОЭ динамический коэффициент усиления по току (рис. 12.8, а)

$$K_{I_{OЭ}} = \Delta I_K / \Delta I_B = \beta_D.$$

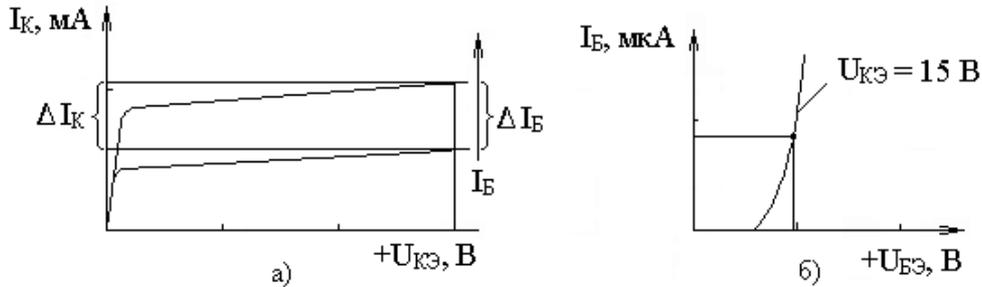


Рисунок 12.8 – К определению параметров БТ в схеме с ОЭ

Входное статическое сопротивление (рис. 1.8, б)

$$\begin{aligned} R_{ВХ_{OЭ}} &= U_{БЭ} / I_B = U_{БЭ} I_{Э} / (I_B I_{Э}) = U_{БЭ} I_{Э} / (I_B I_{Э}) = R_{ВХ_{OБ}} (I_K + I_B) / I_B = \\ &= R_{ВХ_{OБ}} (\beta_C + 1). \end{aligned}$$

Динамический коэффициент усиления по напряжению

$$\begin{aligned} K_{U_{OЭ}} &= \Delta U_{КЭ} / \Delta U_{БЭ} = \Delta I_K R_H / (\Delta I_B R_{ВХ_{OЭ}}) = \beta_D R_H / [(\beta_D + 1) R_{ВХ_{OБ}}] \approx \\ &\approx R_H / R_{ВХ_{OБ}}. \end{aligned}$$

В схеме с ОК динамический коэффициент усиления по току

$$K_{I_{OK}} = \Delta I_{Э} / \Delta I_B = (\Delta I_K + \Delta I_B) / \Delta I_B = \beta_D + 1.$$

Входное статическое сопротивление

$$\begin{aligned} R_{ВХ_{OK}} &= U_{БК} / I_B = (U_{БЭ} + U_{ЭК}) / I_B = U_{БЭ} I_{Э} / (I_B I_{Э}) + U_{ЭК} / I_B = \\ &= R_{ВХ_{OБ}} (\beta_C + 1) + R_H I_K / I_B = (R_{ВХ_{OБ}} + R_H) (\beta_C + 1). \end{aligned}$$

Динамический коэффициент усиления по напряжению

$$\begin{aligned} K_{U_{OK}} &= \Delta U_{ЭК} / \Delta U_{БК} = \Delta U_{ЭК} / (\Delta U_{БЭ} + \Delta U_{ЭК}) = \Delta I_{Э} R_H / (\Delta I_{Э} R_{ВХ_{OБ}} + \Delta I_{Э} R_H) = \\ &= R_H / (R_{ВХ_{OБ}} + R_H). \end{aligned}$$

Схема с ОК имеет значительно большее значение входного сопротивления, чем любая другая схема включения БТ, и усиливает сигнал по току и мощности. Большое значение входного сопротивления  $R_{ВХ_{OK}}$  предопределяет ее применение в качестве согласующего устройства. Коэффициент усиления по напряжению  $K_{U_{OK}}$  близок к единице, но всегда меньше ее, т. е. схема с ОК практически не изменяет значения напряжения входного сигнала. Поскольку выходное напряжение повторяет входное и

снимается с  $R_H$  в цепи эмиттера, схему с ОК и называют эмиттерным повторителем.

### 12.4 Задание

12.4.1 Ознакомьтесь с подразделами 12.1 – 12.3 и ответить на контрольные вопросы.

12.4.2 Открыть файл ОБ.ewb со схемой, показанной на рис. 12.9.

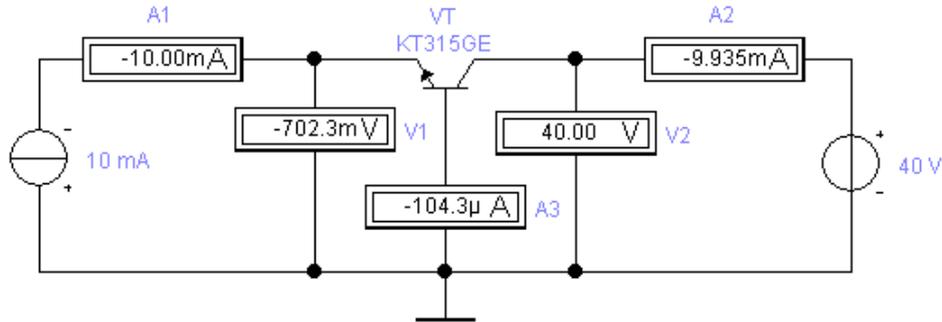


Рисунок 12.9 – Схема измерений статических ВАХ БТ в схеме с ОБ

12.4.3 Измерить входные статические ВАХ БТ в схеме с ОБ. Результаты внести в таблицу 12.1. По результатам измерений построить графики  $I_{Э}(U_{ЭБ})$  при  $U_{КБ} = \text{const}$ .

12.4.4 Измерить выходные статические ВАХ БТ в схеме с ОБ. Результаты внести в таблицу 12.2. По результатам измерений построить графики  $I_{К}(U_{КБ})$ .

Таблица 12.1. Входные статические ВАХ БТ в схеме с ОБ

$I_{Э}$ , мА		0	2	4	6	8	10	20
$U_{КБ} = 0$ В	$U_{ЭБ}$ , В							
$U_{КБ} = 15$ В	$U_{ЭБ}$ , В							

Таблица 12.2. Выходные статические ВАХ БТ в схеме с ОБ

$U_{КБ}$ , В		-0,5	0	2	4	6	8	10	20
$I_{Э} = 0$ мА	$I_{К}$ , мА								
$I_{Э} = 2$ мА	$I_{К}$ , мА								
$I_{Э} = 4$ мА	$I_{К}$ , мА								
$I_{Э} = 6$ мА	$I_{К}$ , мА								
$I_{Э} = 8$ мА	$I_{К}$ , мА								

12.4.5 Открыть файл ООБ1.ewb со схемой, показанной на рис. 12.10. С помощью осциллографа измерить входные статические ВАХ БТ в схеме с ОБ. Результаты внести в таблицу аналогичную таблице 12.1 (или просто убедиться в их соответствии).

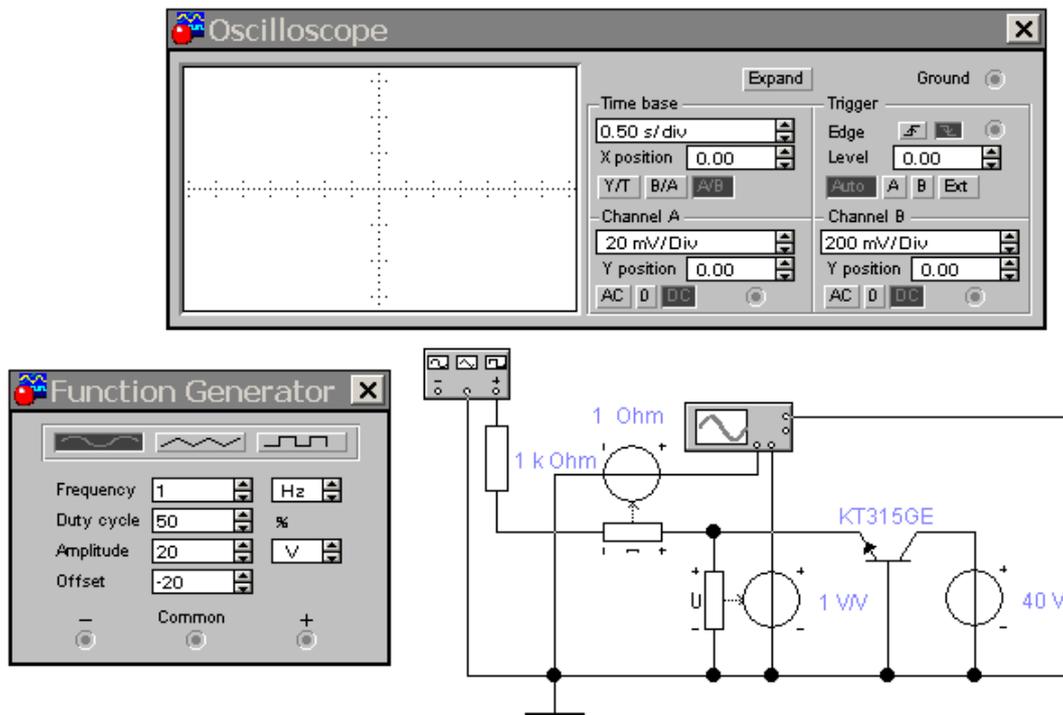


Рисунок 12.10 – Схема измерений входных статических ВАХ БТ в схеме с ОБ с помощью осциллографа

12.4.6 Открыть файл ООБ2.ewb со схемой, показанной на рис. 12.11. С помощью осциллографа измерить выходные статические ВАХ БТ в схеме с ОБ. Результаты внести в таблицу аналогичную таблице 12.2 (или просто убедиться в их соответствии п. 12.4.3).

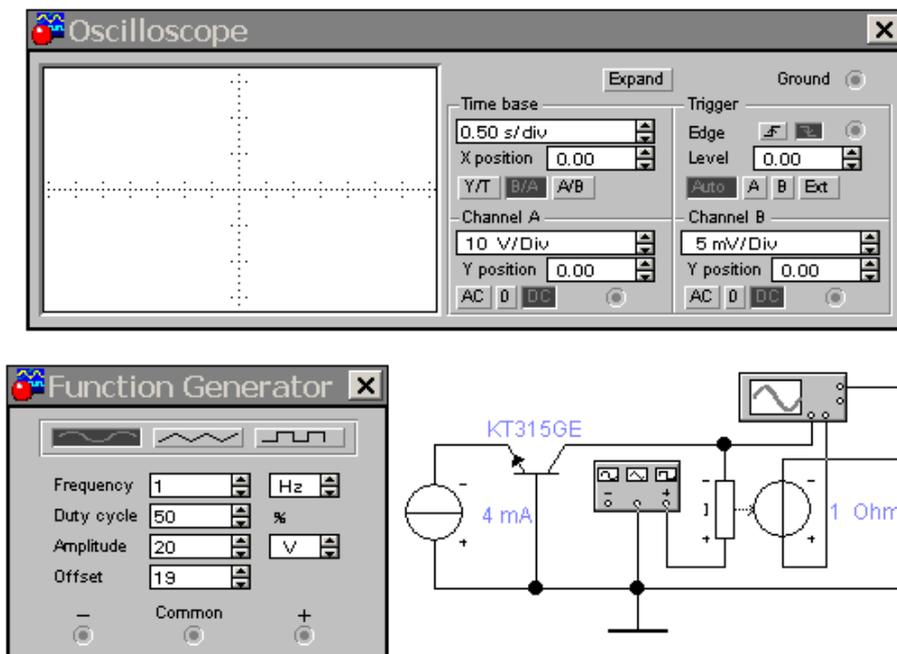


Рисунок 12.11 – Схема измерений выходных статических ВАХ БТ в схеме с ОБ с помощью осциллографа

12.4.7 Для определенных значений  $U_{КБ}$ ,  $I_{Э}$  и  $R_H$  вычислить динамический коэффициент усиления по току

$$K_{I\_ОБ} = \Delta I_K / \Delta I_{Э} = \alpha_D,$$

входное статическое сопротивление

$$R_{ВХ\_ОБ} = U_{ЭБ} / I_{Э},$$

динамический коэффициент усиления по напряжению

$$K_{U\_ОБ} = \alpha_D R_H / R_{ВХ\_ОБ},$$

коэффициент усиления по мощности

$$K_{P\_ОБ} = K_{I\_ОБ} K_{U\_ОБ}.$$

Результаты внести в таблицу 12.3.

Таблица 12.3. Параметры БТ как четырехполюсника в схеме с ОБ при  $U_{КБ} = \dots$  В,  $I_{Э} = \dots$  А,  $R_H = \dots$  Ом

$R_{ВХ}$ , Ом	$K_{I\_ОБ}$	$K_{U\_ОБ}$	$K_{P\_ОБ}$

12.4.8 Открыть файл ОЭ.ewb со схемой, показанной на рис. 12.12.

12.4.9 Измерить входные статические ВАХ БТ в схеме с ОЭ. Результаты внести в таблицу аналогичную таблице 12.1. Измерения проводить при  $I_B = 0$ ; 0.01; 0.05; 0.1 мА, при  $U_{КЭ} = 0$  и +15 В. По результатам измерений построить графики  $I_B(U_{БЭ})$  при  $U_{КЭ} = \text{const}$ .

12.4.10 Измерить выходные статические ВАХ БТ в схеме с ОЭ. Результаты внести в таблицу аналогичную таблице 12.2. По результатам измерений построить графики  $I_K(U_{КБ})$  при  $I_B = \text{const}$ .

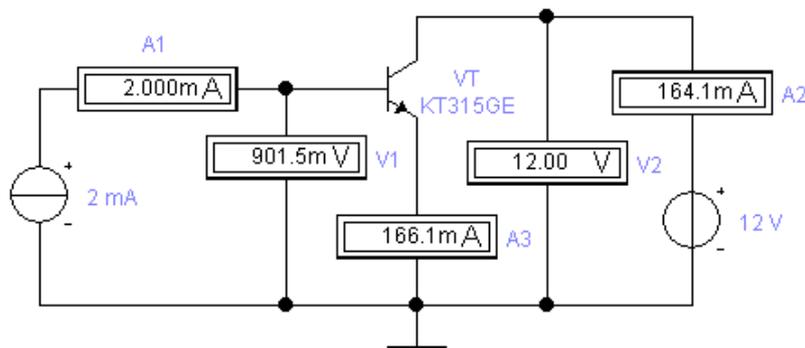


Рисунок 12.12 – Схема измерений статических ВАХ БТ в схеме с ОЭ

12.4.11 Открыть файл ООЭ1.ewb со схемой, показанной на рис. 12.13. С помощью осциллографа измерить входные статические ВАХ БТ в схеме с ОЭ. Результаты внести в таблицу аналогичную таблице 12.1 (или просто убедиться в их соответствии п. 12.4.9).

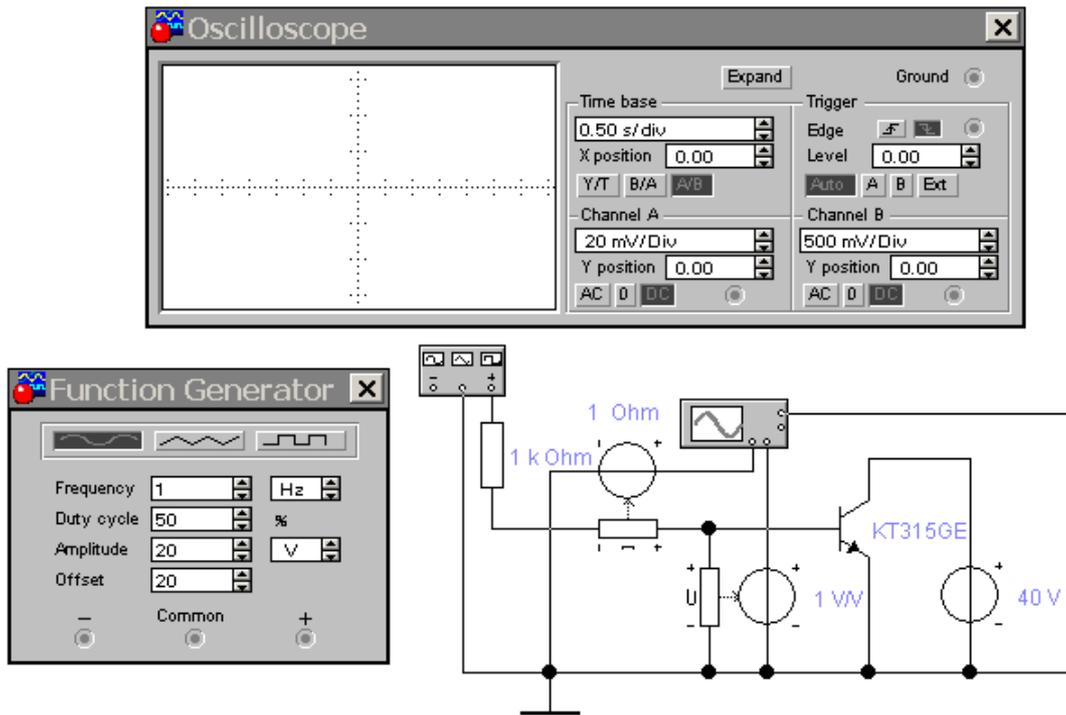


Рисунок 12.14 – Схема измерений входных статических ВАХ БТ в схеме с ОЭ с помощью осциллографа

12.4.12 Открыть файл ООЭ2.ewb со схемой, показанной на рис. 2.6. С помощью осциллографа измерить выходные статические ВАХ БТ в схеме с ОЭ. Результаты внести в таблицу аналогичную таблице 2.2 (или просто убедиться в их соответствии п. 12.4.10).

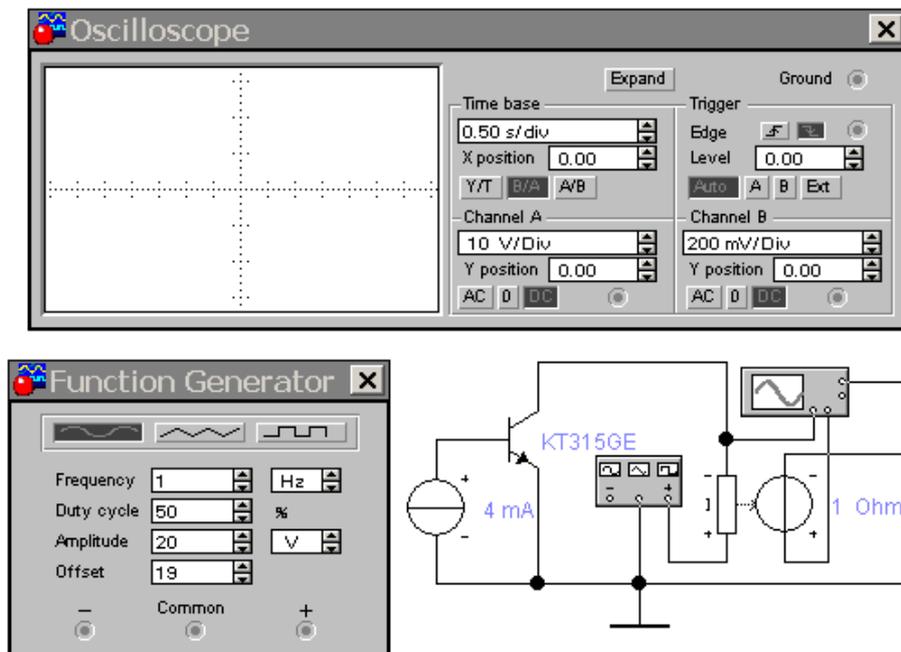


Рисунок 12.15 – Схема измерений выходных статических ВАХ БТ в схеме с ОЭ с помощью осциллографа

12.4.13 Для определенных значений  $U_{кэ}$ ,  $I_B$  и  $R_H$  вычислить динамический коэффициент усиления по току

$$K_{I_{OЭ}} = \Delta I_K / \Delta I_B = \beta_D.$$

входное статическое сопротивление

$$R_{ВХ_{OЭ}} = U_{БЭ} / I_B,$$

динамический коэффициент усиления по напряжению

$$K_{U_{OЭ}} \approx R_H / R_{ВХ_{OЭ}},$$

коэффициент усиления по мощности

$$K_{P_{OЭ}} = K_{I_{OЭ}} K_{U_{OЭ}}.$$

Результаты внести в таблицу 12.4.

Таблица 12.4. Параметры БТ как четырехполюсника в схеме с ОЭ при  $U_{кэ} = \dots В$ ,  $I_B = \dots А$ ,  $R_H = \dots Ом$

$R_{ВХ}, Ом$	$K_{I_{OЭ}}$	$K_{U_{OЭ}}$	$K_{P_{OЭ}}$

12.4.14 Оформить отчет.

## 12.5 Контрольные вопросы

12.5.1 Какова цель работы?

12.5.2 Каковы структура и назначение БТ?

12.5.3 Какие полупроводниковые материалы используются для изготовления БТ?

12.5.4 Какие функции выполняют области эмиттера, базы и коллектора?

12.5.5 Что показывает стрелка на выводе эмиттера в условном обозначении БТ?

12.5.6 Какие существуют схемы включения БТ?

12.5.7 Какие режимы работы БТ Вы знаете?

12.5.8 Какие режимы работы являются основными при использовании БТ для усиления сигналов?

12.5.9 Что называют статическими коэффициентами передачи тока эмиттера и тока базы?

12.5.10 Что называют входными и выходными характеристиками БТ?

12.5.11 В чем суть эффекта Эрли?

12.5.12 Чем отличаются статические и динамические параметры?

12.5.13 Что называют рабочей точкой?

12.5.14 Как определить входное статическое сопротивление БТ?

## 13 КЛЮЧ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

### 13.1 Назначение и принцип работы

Электронные ключи служат для коммутации (переключения) цепей нагрузки под действием управляющих сигналов. Ключи устанавливают последовательно с коммутируемыми участками цепей (нагрузками) или параллельно им. В совокупности с другими элементами ключи входят в состав многих импульсных и цифровых устройств: триггеров, мультивибраторов и др.

На рис. 13.1, а приведена схема простейшего ключа на биполярном транзисторе (БТ);  $E_K$  – напряжение источника питания, резисторы  $R_B$  и  $R_K$  ограничивают токи базы и коллектора БТ. Ключом управляют, подавая на вход напряжение  $U_{ВХ}$ .

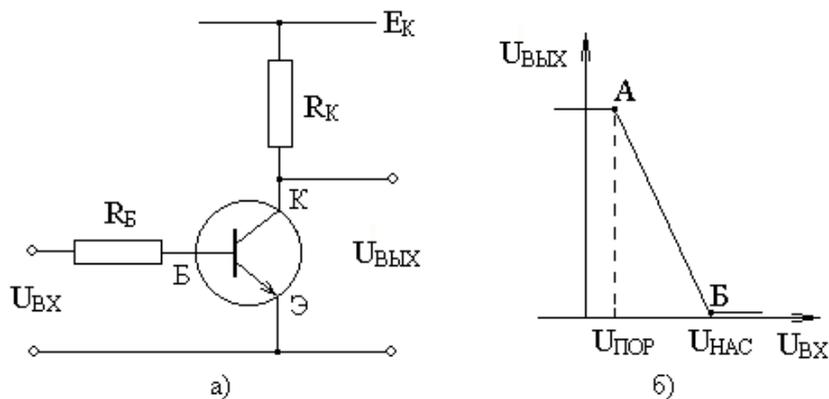


Рисунок 13.1 – Схема (а) и передаточная характеристика (б) транзисторного ключа

На рис. 1.1, б показана передаточная характеристика ключа  $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ . Входное напряжение  $U_{ПОР}$  (точка А) отвечает переходу БТ из режима отсечки в активный режим,  $U_{НАС}$  (точка Б) – переходу из активного режима в режим насыщения. В активном режиме (наклонный участок передаточной характеристики) БТ находится только во время переключения из одного статического состояния в другое. В точках А и Б коллекторный ток еще связан линейной зависимостью с током базы. Выключенному состоянию (ключ разомкнут) соответствует низкий уровень входного напряжения ( $U_{ВХ} < U_{ПОР}$ ,  $U_{ВЫХ} \approx E_K$ ), включенному (ключ замкнут) – высокий ( $U_{ВХ} > U_{НАС}$ ,  $U_{ВЫХ} \approx 0$ ). Во включенном или выключенном состоянии ключ удерживается до тех пор, пока на входе сохраняется соответствующее напряжение.

### 13.2 Статический режим

Для анализа работы ключа в статическом режиме на семейство выходных характеристик БТ наносят так называемую нагрузочную прямую (рис. 13.2):

$$U_{КЭ} = E_K - I_K R_K.$$

Нагрузочная прямая пересекает координатные оси в точках  $E_K$  (при  $I_K = 0$ ) и  $E_K / R_K$  (при  $U_{KЭ} = 0$ ). С изменением базового тока  $I_B$  рабочая точка перемещается по этой прямой, определяя режим работы и, соответственно, выходное сопротивление БТ.

В соответствии с функциями ключа БТ может находиться либо в режиме отсечки, либо в режиме насыщения. Для обеспечения режима отсечки необходимо выполнить условие  $U_{ВХ} < U_{ПОР}$ . При этом ток базы  $I_B \rightarrow 0$ , ток коллектора  $I_K$  равен обратному току коллекторного перехода  $I_{KЭ0}$ . Для маломощных кремниевых БТ  $I_{KЭ0}$  очень мал. Падение напряжения на резисторе  $R_K$  при  $I_K = I_{KЭ0}$  весьма незначительно и напряжение на выходе ключа  $U_{ВЫХ}$  практически равно напряжению источника питания  $E_K$ . Точнее выходное напряжение можно определить как сумму напряжений на элементах внешней цепи от коллектора к эмиттеру. Точка А на нагрузочной прямой (рис. 13.2) соответствует границе между режимом отсечки и активным режимом.

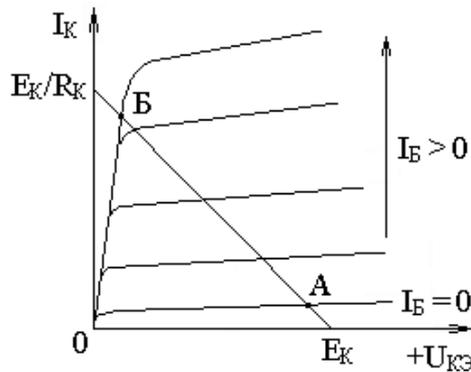


Рисунок 13.2 – Семейство выходных характеристик n-p-n БТ в схеме с ОЭ

В режиме насыщения на входе действует напряжение  $U_{ВХ} > U_{НАС}$ , которое вызывает появление тока базы  $I_B > I_{Б_НАС}$ . Ток базы  $I_{Б_НАС}$  соответствует границе между активным режимом и режимом насыщения (точка Б, рис. 13.2). В режиме насыщения оба перехода БТ смещены в прямом направлении. Остаточное напряжение  $U_{KЭ_НАС}$  на коллекторе открытого БТ – весьма мало. Ток коллектора  $I_K = I_{K_НАС} = (E_K - U_{KЭ_НАС}) / R_K \approx E_K / R_K$ .

Чтобы БТ не выходил из режима насыщения при изменении его параметров, неравенство  $I_B > I_{Б_НАС}$  должно быть достаточно сильным. Для количественной оценки неравенства вводят параметр  $S$  – степень насыщения:

$$S = I_B / I_{Б_НАС}.$$

Обычно  $S$  выбирают в диапазоне  $1,5 \div 3$ . С увеличением степени насыщения повышается нагрузочная способность ключа, снижается влияние дестабилизирующих факторов (например, температуры), но ухудшается быстродействие.

### 13.3 Переходные процессы

Процесс установления равновесного состояния объекта после возмущающего воздействия называют переходным. В электронном ключе переходные процессы обусловлены инерционными свойствами и самого БТ, и подключенных к нему внешних цепей.

На рис. 13.3 приведены временные диаграммы переходных процессов в ключе на БТ. Цикл переключения принято делить на этапы: 1) задержка включения; 2) включение; 3) задержка выключения; 4) выключение.

В исходном состоянии БТ находится в режиме отсечки, т. е. входное напряжение  $E_2$  меньше порога отпирания  $U_{\text{ПОР}}$ . Задержкой включения называют интервал времени от момента переключения входного напряжения с  $E_2$  на  $E_1$  до начала нарастания коллекторного тока  $I_K$ . Обусловлена задержка зарядкой входной емкости  $C_{\text{ВХ}}$  запертого БТ до напряжения отпирания  $U_{\text{ПОР}}$ . Завершению этапа задержки включения соответствует точка А на нагрузочной прямой (рис. 13.2).

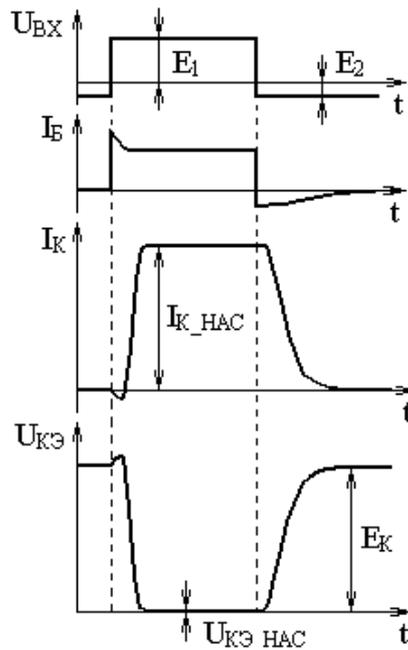


Рисунок 13.3 – Переходные процессы в ключе на биполярном транзисторе

На этапе включения БТ находится в активном режиме. При этом ток базы можно считать практически неизменным (вплоть до переключения входного напряжения с  $E_1$  на  $E_2$ ), т. к. обычно входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  транзистора много меньше сопротивления  $R_{\text{Б}}$ :

$$I_{\text{Б}} = E_1 / (R_{\text{Б}} + R_{\text{ВХ}}) \approx E_1 / R_{\text{Б}}.$$

Ток коллектора  $I_K$  экспоненциально увеличивается со временем. Увеличение  $I_K$  обусловлено увеличением прямого напряжения на эмиттерном переходе (зарядается входная емкость БТ) и увеличением количества электронов, переходящих из эмиттера в базу и далее в коллектор. Заряд электронов в базе

$Q_B$  возрастает. Этап включения заканчивается, когда ток коллектора  $I_K$  достигает значения  $I_{K\_НАС} \approx E_K / R_K$ .

В конце этапа включения БТ оказывается на границе режима насыщения (точка Б, рис. 13.2). Входное напряжение  $E_1$  выбирают так, чтобы обеспечить заданную степень насыщения  $S$ . Если  $S > 1$ , то после этапа включения начинается накопление избыточного заряда в базовом и коллекторном слоях БТ за счет инжекции электронов через открытые эмиттерный и коллекторный переходы. Внешние токи при этом существенно не изменяются, т. к. определяются внешними по отношению к БТ элементами схемы.

Этап задержки выключения обусловлен рассасыванием избыточного заряда электронов в базовой области. В момент переключения входного сигнала с  $E_1$  на  $E_2$  на обоих переходах сохраняются прямые смещения, близкие к напряжению отпираания. Ток базы изменяет направление на обратное и принимает значение  $I_B = E_2 / R_B$ . Ток коллектора  $I_K$  и напряжение на коллекторе  $U_{KЭ}$  не изменяются. Заряд в базовой области  $Q_B$  уменьшается вследствие рекомбинации и ухода электронов во внешнюю цепь. Окончание этапа задержки выключения характеризуется тем, что концентрация избыточных носителей на границе базы с коллектором падает до нуля и на коллекторном переходе восстанавливается обратное напряжение  $U_{KB} < 0$ . БТ переходит в активный режим работы.

На этапе выключения происходит дальнейшее рассасывание заряда электронов в базовой области. Уменьшаются ток  $I_K$  и увеличивается напряжение  $U_{KЭ}$ , рабочая точка БТ (рис. 13.2) перемещается из положения Б в положение А. Транзистор из активного режима переходит в режим отсечки (оба перехода заперты), токи базы  $I_B$  и коллектора  $I_K$  уменьшаются до нуля, а напряжение  $U_{KЭ}$  возрастает до величины  $E_K$ .

Для современных быстродействующих маломощных импульсных транзисторов длительности этапов переключения составляют единицы и десятые доли наносекунд, для мощных БТ – существенно больше.

### 13.4 Повышение быстродействия

Для повышения быстродействия ключей на БТ используют более сложные схемы: с ускоряющим конденсатором, нелинейной обратной связью и др.

Ускоряющий конденсатор  $C$  включают параллельно резистору  $R_B$  (рис. 13.4, а). При переключении входного сигнала с  $E_2$  на  $E_1$  базовый ток БТ – ток зарядки конденсатора  $C$  (не ограничен  $R_B$ ):

$$I_{B1} = (U_{ВХ} - U_{БЭ}) / R_{И},$$

где  $U_{БЭ}$  – напряжение на эмиттерном переходе БТ,  $R_{И}$  – внутреннее сопротивление источника входного напряжения (обычно  $R_{И} \ll R_B$ ). Ток  $I_{B1}$  быстро заряжает входную емкость  $C_{ВХ}$  и накапливает заряд в базе транзистора  $Q_B$ . Благодаря повышенному значению этого тока уменьшаются длительности задержки и включения БТ.

По мере зарядки конденсатора  $C$  ток базы уменьшается до значения  $I_{Б2} = U_{ВХ} / R_{Б}$ , определяемого сопротивлением  $R_{Б}$ . Поскольку  $R_{Б}$  выбирается из условия насыщения, по окончании входного импульса  $E_1$  в базе накапливается сравнительно небольшой избыточный заряд.

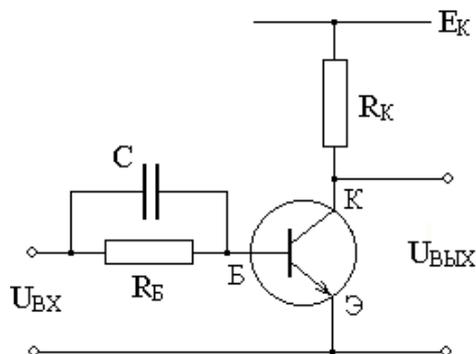


Рисунок 13.4 – Схема ключа с ускоряющим конденсатором

После переключения входного сигнала с  $E_1$  на  $E_2$  конденсатор  $C$  разряжается через эмиттерный переход БТ, создавая большой запирающий ток базы

$$I_{Б} = U_{C} / R_{И},$$

где  $U_{C}$  – напряжение на конденсаторе. Этот ток ускоряет процессы рассасывания заряда и выключения БТ.

Емкость  $C$  не должна быть слишком малой, иначе длительность всплесков тока будет меньше, чем длительность процессов переключения, которую они уменьшают. При этом процесс переключения будет протекать в основном при сравнительно малых токах базы, т. е. не будет ускоряться.

Нельзя выбирать ускоряющий конденсатор и слишком большой емкости. В этом случае: 1) ток базы не уменьшится до уровня  $I_{Б2}$  к концу входного импульса  $E_1$  и в базе накопится большой избыточный заряд; 2) конденсатор не зарядится до уровня входного импульса  $E_1$  к моменту его окончания, процессы рассасывания и включения будут протекать медленнее.

### 13.5 Задание

13.5.1 Ознакомьтесь с подразделами 13.1 – 13.4 и ответить на контрольные вопросы.

13.5.2 Открыть файл Кл1.ewb со схемой, показанной на рис. 13.5.

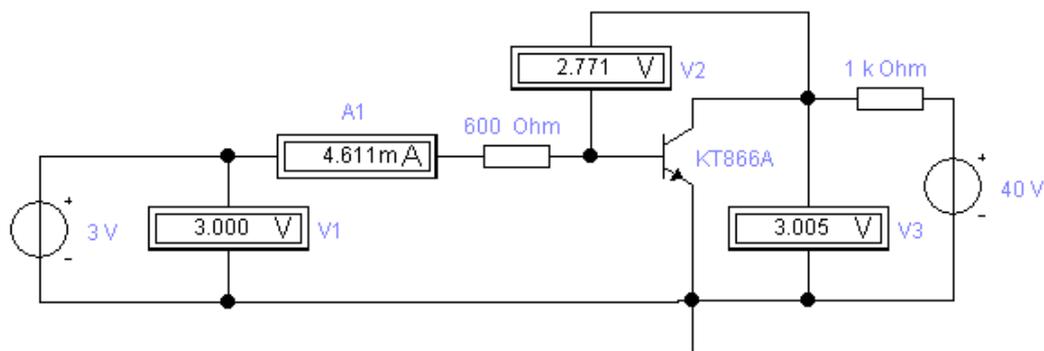


Рисунок 13.5 – Схема измерений передаточной характеристики ключа

13.5.3 Измерить статическую передаточную характеристику ключа  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ . Результаты внести в таблицу 13.1. По результатам измерений построить график  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ .

13.5.4 Определить входное напряжение насыщения  $U_{\text{ВХ\_НАС}}$  и ток базы насыщения  $I_{\text{Б\_НАС}}$ .

Таблица 13.1. Статическая передаточная характеристика ключа

$U_{\text{ВХ}}, \text{В (V1)}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В (V3)}$											
$I_{\text{Б}}, \text{мА (A1)}$											
$U_{\text{КБ}}, \text{В (V2)}$											

13.5.5 Открыть файл Кл2.ewb со схемой, показанной на рис. 13.6. На канал А осциллографа подается входное напряжение, а на канал В – выходное напряжение ключа.

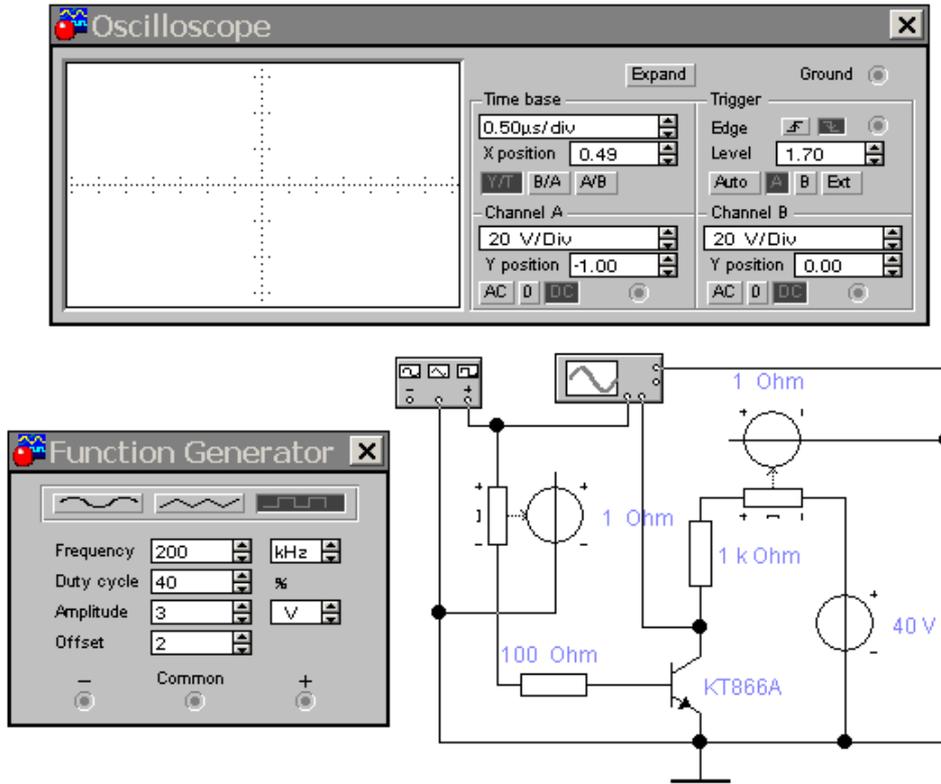


Рисунок 13.6 – Схема исследования переходных процессов

13.5.6 С помощью осциллографа определить длительность процессов задержки включения –  $t_1$ , включения –  $t_2$ , задержки выключения –  $t_3$  и выключения –  $t_4$ . Результаты внести в таблицу 13.2.

13.5.7 Копировать в отчет (с использованием команды Copy as bitmap) осциллограммы  $U_{ВХ}(t)$ ,  $U_{КЭ}(t)$ ,  $I_B(t)$ ,  $I_K(t)$ . Для регистрации  $I_B(t)$  и  $I_K(t)$  канал В осциллографа подключать к источникам напряжения, управляемым током базы  $I_B$  и током коллектора  $I_K$ , соответственно. Осциллограммы оформить аналогично рис. 13.3.

13.5.8 Параллельно базовому сопротивлению подключить ускоряющий конденсатор и повторить измерения пункта 13.5.5. Результаты внести в таблицу 13.2.

Таблица 13.2. Длительность процессов задержки включения –  $t_1$ , включения –  $t_2$ , задержки выключения –  $t_3$  и выключения –  $t_4$

С, пФ	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с
0				
100				

13.5.9 Оформить отчет.

## 13.6 Контрольные вопросы

13.6.1 Какова цель работы?

13.6.2 Какие режимы работы БТ являются основными при использовании его в ключевых и логических схемах?

13.6.3 Что называют нагрузочной прямой?

13.6.4 Что называют степенью насыщения?

13.6.5 Чем обусловлены переходные процессы в электронном ключе?

13.6.6 Какие этапы можно выделить в цикле переключения БТ?

13.6.7 Как можно повысить быстродействия ключа на БТ?

### **Литература**

1. Карлацук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. – М.: Солон-Р, 2001. – 726 с. (2 экз.)
2. Чернышова Т.И. Моделирование электронных схем: учебное пособие / Т.И. Чернышова, Н.Г. Чернышов. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 80 с.
3. Григорьев Б.И. Элементная база и устройства аналоговой электроники: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 94с.

**Пример оформления отчета**

*Приложение А*

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоаппаратуры

## ВВЕДЕНИЕ В ПРОФЕССИЮ

Отчет по теме ...

Выполнил студент гр. ...

... \_\_\_\_\_

... 2013

Принял ...

... \_\_\_\_\_

2013

**Введение**

...

Цель работы ...

**1 Методика эксперимента**

...

**2 Результаты и обсуждение**

...

**Выводы**

...

## Меню Analysis

Меню **Analysis (Анализ)** позволяет выполнить различные виды анализа схем. Перед выполнением любого анализа пользователю будет предложено заполнить параметры проведения. Анализ будет выполнен только в том случае, когда это возможно для данной схемы.

Команда **Activate (Активировать)** – **CTRL+G** активизирует схему (включает переключатель питания). Активизация схемы начинается последовательность математических операций, чтобы вычислить значения для тестовых точек в схеме. Переключатель питания остается включенным, пока пользователь не остановит или не приостановит моделирование.

Команда **Pause (Пауза)** – **F9** временно прерывает или продолжает моделирование. Приостановка полезна, если необходимо рассмотреть форму сигнала или сделать изменения в инструментальных настройках.

Команда **Stop (Стоп)** – **CTRL+T** вручную останавливает моделирование и аналогична переключателю питания. Важно обратить внимание, что выключение питания стирает данные и инструментальные следы, а также сбрасывает все значения к начальным.

Команда **Analysis Options (Параметры анализа)** – **CTRL+Y** позволяет рассмотреть или изменить любые из параметров компонентов.

Команда **DC Operating Point (Анализ по постоянному току)** выполняет анализ DC Operating Point. При этом считается, что на выходах источников переменного тока, присутствующих в схеме, напряжение равно нулю, и предполагается устойчивое состояние схемы, т. е. конденсаторы имеют бесконечное сопротивление, индуктивности – нулевое. Результаты такого анализа обычно являются промежуточными для дальнейшего анализа схемы.

Команда **AC Frequency (Частотный анализ схемы по переменному току)** выполняет анализ AC Frequency. При этом сначала производится анализ схемы по постоянному току (как в DC Operating Point) для получения линейных малосигнальных моделей всех нелинейных компонентов схемы. Затем создается комплексная матрица (содержащая и реальные, и мнимые значения параметров компонентов схемы). При построении матрицы источникам постоянного тока придаются нулевые значения. Источники переменного тока, конденсаторы и катушки индуктивности представлены их моделями переменного тока. Нелинейные компоненты представлены линейными моделями малого сигнала переменного тока, полученными по результатам анализа схемы по постоянному току. Все входные источники рассматриваются как синусоидальные. Частота источников игнорируется. Затем производится расчет ответа схемы по переменному току как функции частоты.

Команда **Transient (Анализ переходного процесса)** выполняет анализ Transient. Программа вычисляет ответ схемы как функцию времени. Каждый

входной цикл разделен на интервалы, и анализ схемы по постоянному току выполняется для каждой временной точки цикла. Решение о форме волны напряжения в узле определено значением этого напряжения в каждой временной точке одного полного цикла. В анализе переходного процесса источники постоянного тока имеют постоянные значения; источники переменного тока имеют значения, меняющиеся со временем. Конденсаторы и катушки индуктивности представлены переходными моделями.

Команда **Fourier (Анализ Фурье)** выполняет анализ Фурье. Оценивает постоянную составляющую, основную и гармонические компоненты периодического сигнала. Анализ выполняет дискретное преобразование Фурье этого сигнала. Производится преобразование формы волны периодического напряжения в ее частотные компоненты. EWB автоматически выполняет анализ периодического сигнала, чтобы произвести анализ Фурье.

Команда **Monte Carlo (Анализ Монте-Карло)** выполняет статистический анализ, который позволяет исследовать, как изменение параметров компонентов схемы воздействует на ее эксплуатационные показатели. Выполняются многократные моделирования, и для каждого моделирования параметры компонента случайным образом изменяются согласно типу распределения и допустимым отклонениям параметра, которые устанавливаются в окне диалога. Первое моделирование всегда выполняется с номинальными величинами.

Команда **Display Graph (Графический дисплей)** выводит графические результаты анализа.