

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

А.Ф. Супрун

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА.

Техническая защита информации.

Лабораторный практикум

Допущено Северо-Западным региональным отделением ФУМО по
информационной безопасности в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обу-
чающихся по направлению 10.00.00 «Информационная безопасность»,
по программам подготовки бакалавров, магистров, специалистов.

ПОЛИТЕХ-ПРЕС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2021

УДК 621.382

ББК 32.85

Рецензенты:

Генеральный директор ООО «Росречинфоком», доктор технических наук, профессор,

И.А. Сикарев;

доктор технических наук, доцент, директор института информационных систем и геотехнологий, заведующая кафедрой Информационных технологий и систем безопасности ФГБОУ ВО «Российский

государственный гидрометеорологический университет». Т.М. Татарникова.

Супрун А.Ф. Электроника и схемотехника. Техническая защита информации. Лабораторный практикум: учебное пособие / А.Ф. Супрун. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕС, 2021. – 109 с.

Лабораторный практикум по дисциплине "Электроника и схемотехника" курса «Техническая защита информации» соответствует государственному образовательному стандарту учебных дисциплин по направлению 10.00.00 «Информационная безопасность».

В пособии содержатся теоретические сведения по работе в среде Multisim. Приведены описания и методика проведения исследований в соответствии с курсом Электроники и схемотехники. Основное внимание в пособии уделено физическим основам образования побочных электромагнитных излучений, образующихся в процессе обработки информации.

Пособие предназначено для подготовки специалистов, бакалавров и магистров по направлению 10.00.00 «Информационная безопасность», а также студентам, обучающимся по другим техническим специальностям о области электроники.

Табл. 5. Ил. 109. Библиогр.: 9 назв.

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

© Супрун А.Ф., 2021

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

ISBN

Содержание

	Введение	4
1.	Общие сведения о программе моделирования Multisim	5
2	Создание схемы. Общие сведения и рекомендации	23
3	Сдвиг, поворот, выбор и соединение компонентов	26
4	Виртуальные приборы	30
5	Лабораторная работа № 1. Основы работы в среде Multisim	38
6	Лабораторная работа № 2. RL-и RC- цепи	41
7	Лабораторная работа № 3. Электрические фильтры	45
8	Лабораторная работа № 4. Спектры сигналов	48
9	Лабораторная работа № 5. Полупроводниковые диоды	50
10	Лабораторная работа № 6. Биполярные транзисторы	57
10	Лабораторная работа № 7. Резистивный усилитель на транзисторе	65
11	Лабораторная работа № 8. RC-автогенератор	70
12	Лабораторная работа № 9. Логические элементы	76
13	Лабораторная работа № 10. Триггеры, счетчики и регистры	88
14	Лабораторная работа № 11. Цифровая обработка сигнала	100
15	Список литературы	108

Введение

В практикум включены задания по трем разделам курса: "Основы теории электрических цепей и сигналов", "Полупроводниковые приборы, усилители и аналоговые преобразователи" и "Импульсные и цифровые устройства".

Все задания в практикуме являются многовариантными, что позволяет каждому студенту самостоятельно выполнять индивидуальное задание, проводить исследования. В процессе выполнения работ, студенты закрепляют теоретические знания, исследуют электрические цепи, прохождение сигналов, изучают работу аналоговых и цифровых устройств. Лабораторные работы выполняются индивидуально каждым студентом. Защита работ происходит в результате личной беседы студента и преподавателя по теме лабораторной работы.

В практикуме приведено достаточное количество работ для усвоения программы по дисциплине Электроника и схемотехника. Количество учебного времени на каждую лабораторную работу может быть скорректировано преподавателем в зависимости от графика учебного процесса, степени подготовленности студентов.

В каждой лабораторной работе предусмотрено решение небольшой расчетной и исследовательской задач, результаты решения которых моделируются в среде Multisim. В заданиях имеются вопросы для проведения самоконтроля обучающихся.

Нумерация схем, формул, рисунков, таблиц для каждого задания индивидуальна.

Задания, содержащиеся в практикуме, выполняются с использованием программы моделирования Multisim 11.0. Допускается работы в более высоких версиях программы.

1. Общие сведения о программе моделирования Multisim.

Multisim - это эмулятор схем, который позволяет создавать и исследовать электронные схемы средней сложности за короткое время. Он включает в себя версию Multicap, что делает его универсальным средством для программного описания и немедленного последующего тестирования схем.

Multisim позволяет объединить процессы разработки электронных устройств и тестирования на основе технологии виртуальных приборов для учебных и производственных целей. Эта платформа связывает процессы тестирования и проектирования, предоставляя разработчику электронного оборудования гибкие возможности технологии виртуальных приборов. Совместное использование программного обеспечения для моделирования электрических цепей Multisim со средой разработки измерительных систем LabVIEW, позволяет сравнивать теоретические данные с реальными непосредственно в процессе создания схем, разработки обычных печатных плат, что снижает количество проектных итераций, число ошибок в прототипах и ускоряет выход продукции на рынок.

Структурная схема программы машинного моделирования представлена на рис. 1. Кратко опишем основные части программы.



Рис.1

База данных элементов цепи в современной программе моделирования содержит сведения о большом числе радиоэлементов и микросхем. Каждый элемент в базе данных представляется эквивалентной схемой и описанием параметров элемента. Чем сложнее элемент, тем больше в эквивалентной схеме идеальных резисторов, конденсаторов, катушек, источников напряжения и тока.

Ввод схемы устройства осуществляется с использованием базы данных, — из нее вызываются нужные элементы. При этом на экране дисплея рисуется условное обозначение элемента, даются название (тип) и основные параметры. Элементы соединяются проводами. В программе моделирования создается внутреннее описание схемы, состоящее из перечня используемых элементов, указания номеров узлов, к которым подключен элемент, и записей дополнительной информации о типе элемента, его параметрах и т. п. Нумерация узлов схемы производится автоматически по мере добавления новых элементов. Корпусу схемы, как правило, присваивается номер 0.

Составление уравнений цепи базируется на использовании уравнений элементов (включая законы Ома) и уравнений соединений (законов Кирхгофа). При этом используются внутреннее описание схемы и эквивалентные схемы элементов. Для уменьшения числа уравнений в программах машинного моделирования используются методы узловых напряжений и контурных токов. (Последний метод используется реже и, в основном, для анализа подсхем со связанными катушками индуктивности.) Алгоритмы составления уравнений цепи относительно просты. Например, процесс составления узловых уравнений цепи состоит из последовательного перебора всех узлов схемы (исключая узел, соединенный с корпусом) и учета проводимостей всех элементов, подключенных к этим узлам. Последовательный перебор контуров схемы позволяет получить контурные уравнения. Параметры элементов, необходимые для записи уравнений, запрашиваются из базы данных.

Решение уравнений цепи проводится с использованием хорошо отработанных численных методов. Для уменьшения вычислительных затрат уравнения решаются отдельно для разных видов сигналов. Наиболее часто используются расчет цепей на постоянном токе (режим DC),

при малых гармонических воздействиях (режим AC), а также в переходном режиме (режим Transient). В последнем случае токи и напряжения могут изменяться сложным образом. Их амплитуды могут достигать больших величин, при которых возникает нелинейный режим работы устройства. При решении нелинейных уравнений из базы данных дополнительно запрашиваются нелинейные характеристики элементов.

Вывод результатов в современных программах машинного моделирования осуществляется в графическом (графики, диаграммы, рисунки и т. п.) и текстовом виде. Полученные данные можно вывести на экран монитора, на принтер или записать в файл.

Таблица 1.

Возможные обозначения приставок и множителей

Приставка	Обозначение, русское	Обозначение Multisim	Множитель
Тера	Т	T	10^{12}
Гига	Г	G	10^9
Мега	М	M	10^6
Кило	к	k	10^3
Милли	м	m	10^3
Микро	мк	u	10^{-6}
Нано	н	n	10^{-9}
Пико	п	p	10^{-12}
Фемто	ф	f	10^{-15}
<i>Другие обозначения</i>			
Вольт	В	V	напряжение
Ампер	А	A	ток
Ватт	Вт	W	мощность
Герц	Гц	Hz	частота
Секунда	с	S	время

База данных компонентов включает более 2000 SPICE-моделей элементов от ведущих производителей, таких как Analog Devices, Linear Technology и Texas Instruments, а также более 100 новых моделей импульсных источников питания. Помимо этого, в версии Multisim (11.0 и

последующих версиях) появился помощник Convergence Assistant, который автоматически корректирует параметры SPICE, исправляя ошибки моделирования. Добавлена поддержка моделей МОП-транзисторов стандарта BSIM4, а также расширены возможности отображения и анализа данных, включая новый пробник для значений тока и обновленные статические пробники для дифференциальных измерений.

Таблица 2.

Горячие клавиши

Ctrl+N	Создать новый файл
Ctrl+O	Открыть файл
Ctrl+S	Сохранить текущий файл
Ctrl+P	Печать графиков / текущий файл
Ctrl+Z	Отмена действия
Ctrl+X	Вырезать
Ctrl+C	Копировать
Ctrl+V	Вставить
Ctrl+D	Открывает Circuit Description Box
Ctrl+F	Поиск
Delete	Удалить выделенную группу
Ctrl+W	Выбор устройств
Ctrl+J	Вставка узла
Ctrl+Q	Добавление провода
Ctrl+I	Вставка коннектора
Ctrl+B	Вставка подсхемы
Ctrl+T	Вставка текста
F5	Запуск схемы
F6	Пауза
Alt+Y	Зеркальное отображение по вертикали
Alt+X	Зеркальное отображение по горизонтали
Ctrl+R	Поворот на 90 вправо
Ctrl+Shift+R	Поворот на 90 влево
Клавиши курсора	Перемещает выделенное устройство влево, вправо, вверх, вниз

Среда Multisim.

Интерфейс пользователя программы Multisim состоит из нескольких основных элементов, которые представлены на рисунке 2(а, б).

Программа Multisim имитирует реальное рабочее место исследователя — радиоэлектронную лабораторию, оборудованную измерительными приборами, работающими в реальном масштабе времени. С помощью программы можно создавать, моделировать и исследовать как простые, так и сложные аналоговые и цифровые радиоэлектронные устройства.

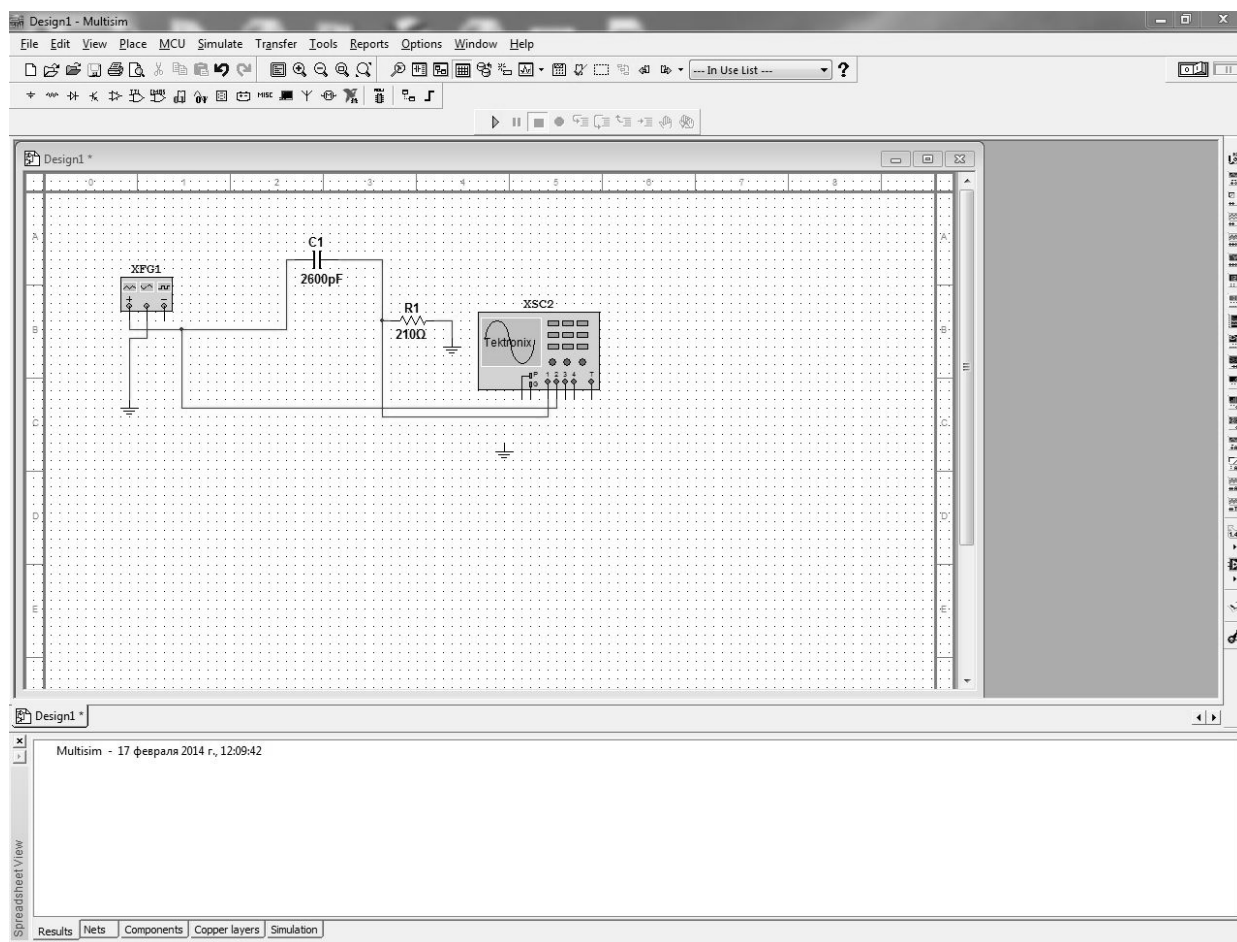


Рис. 2а. Окно программы

Главное окно программы показано на рис. 2а,б. Как видим, программа имеет стандартный оконный интерфейс пользователя.

Окно меню команд находится в верхней части главного окна программы. Работа с программой, как правило, начинается с выбора пункта меню File и с загрузки из папки примеров (Samples) одного из файлов, с описанием схемы типового радиоэлектронного устройства. Например, на рис. 2а показана, схема RC цепочки.

Окно схемы занимает центральную основную область окна программы. В этом окне, используя радиоэлементы и соединительные провода, создают и редактируют электрические цепи. В этом окне на рис. 2б изображена схема сложного радиоэлектронного устройства с приборами индикации.

Окно значков (иконки) располагается выше окна схемы. Оно включает две линейки. Верхняя линейка значков дублирует команды меню. Вторая линейка иконок, располагающаяся непосредственно над окном схемы, используется для выбора радиоэлементов и измерительных приборов, подключаемых к цепи. На рис. 2а показано *окно выбора элементов* — диодов (Diodes) и *окно выбора измерительных приборов* (Instruments).

Значок активизации и остановки расчета схемы (Activate/Stop), а также *значок паузы* (Resume) располагаются в правом верхнем углу окна программы. Иконка Activate/Stop изображена в виде выключателя с цифрами 0 и 1. На рис. 2а в окне используемого измерительного прибора — осциллографа (Oscilloscope) представлен выходной сигнал автогенератора, полученный после активации схемы и перехода затем в режим паузы (нажат значок Resume). Отметим, что не рекомендуется длительное время держать схему в активированном состоянии. При этом в процессе интенсивной обработки данных и решения уравнений может накопиться большая ошибка в вычислениях, что в свою очередь может вызвать аварийное завершение работы программы моделирования.

Особенность программы Multisim — для построения и исследования цепи интенсивно используется мышь компьютера. Клавиатура используется для набора текста, ввода чисел и для быстрого вызова команд. Программа является сложным продуктом, с большим числом устанавливаемых параметров и режимов работы. После обычной инсталляции большинство параметров и опций программы установлены по умолчанию так, что обеспечивается возможность исследования большинства типовых электронных устройств. В дальнейшем при анализе учебных схем будут описываться только основные шаги, изменяющие состояние программы. Не упомянутые параметры используются по умолчанию.

Работа с программой Multisim включает три основных этапа: создание схемы, выбор и подключение измерительных приборов и, наконец, активация схемы — расчет процессов, протекающих в исследуемом устройстве.

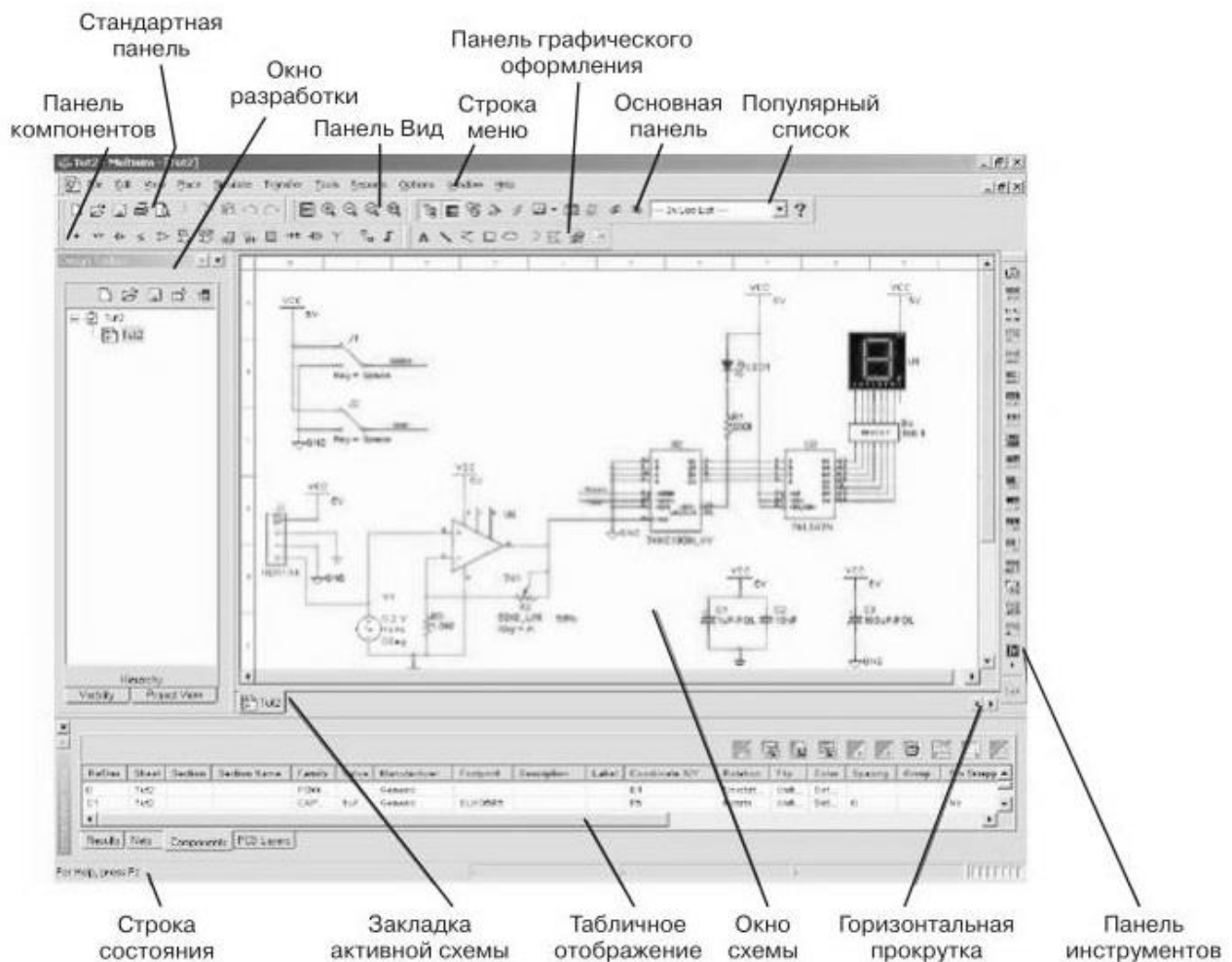


Рис. 2б. Среда Multisim.

Окно разработки (Design Toolbox).

В окне разработки находятся средства управления различными элементами схемы. Закладка Доступность (Visibility) позволяет скрыть или отобразить слои схемы рабочей области. Закладка Иерархия (Hierarchy) отображает взаимосвязь между файлами открытого проекта в виде древовидной структуры. Закладка Проект (Project) содержит информацию об открытом проекте. Пользователь может добавить файлы в папки открытого проекта, изменить доступ к файлам и создать архив проекта.

Глобальные настройки.

Глобальные настройки управляют свойствами среды Multisim. До-

ступ к ним открывается из диалогового окна "Свойства" (Preferences) (рис.3). Выберите пункт Опции/глобальные настройки (Options/Global Preferences), откроется окно "Свойства" со следующими вкладками:

- Paths (Путь) – здесь вы можете указать путь к файлам баз данных и другие настройки.
- Save (Сохранить) – здесь вы можете настроить период автоматического сохранения и нужно ли записывать данные эмуляции вместе с прибором.
- Parts (Компоненты) – здесь вы можете выбрать режим размещения компонентов и стандарт символов (ANSI или DIN). Также здесь находятся настройки эмуляции по умолчанию.
- General (Общие) – Здесь вы можете изменить поведение прямоугольника выбора, колеса мыши и инструментов соединения и автоматического соединения.

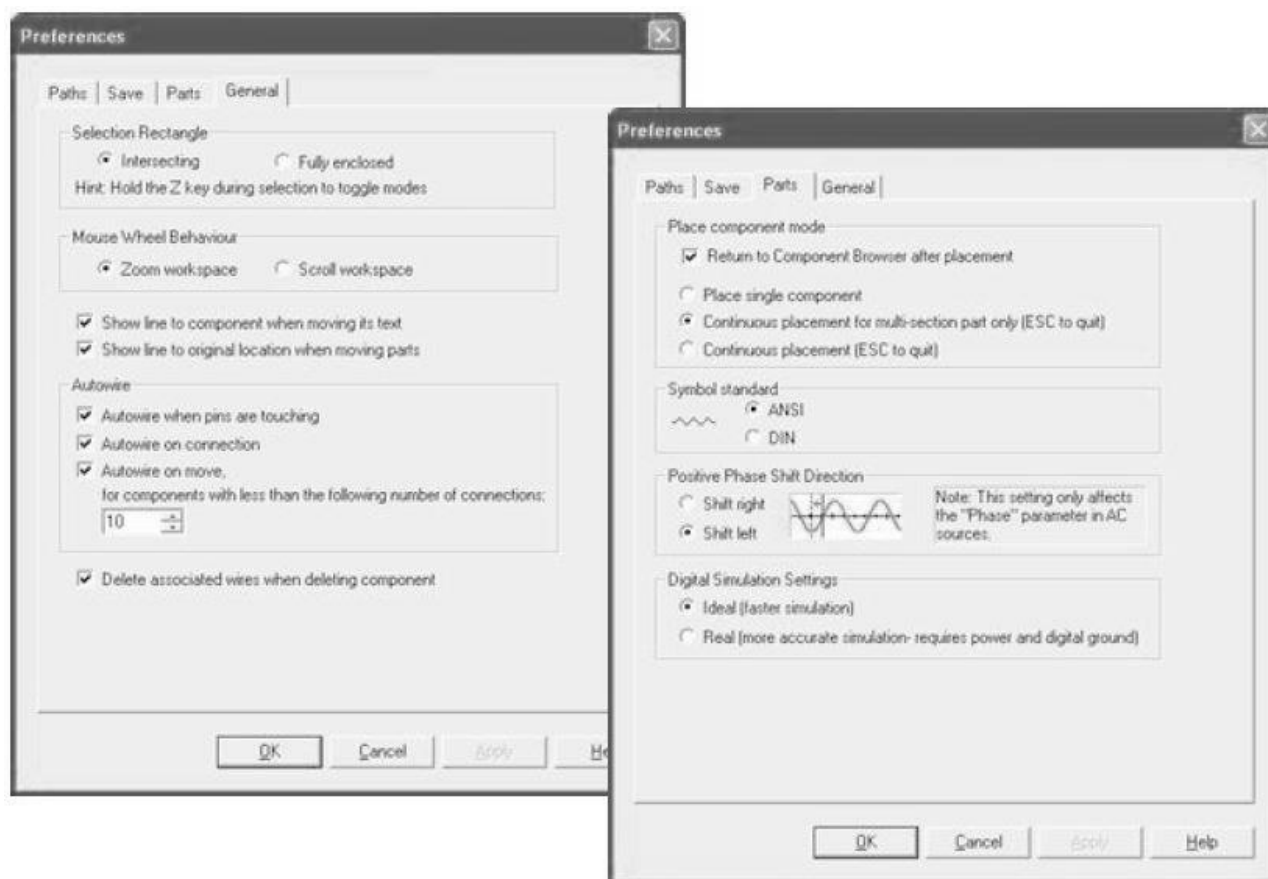


Рис. 3. Различные глобальные настройки.

Настройка листа.

Диалоговое окно настройки свойств листа (Sheet Properties) (рис. 4) используется для изменения свойств каждого листа. Эти свойства со-

хранятся с файлом схемы, поэтому если проект открывается на другом компьютере, настройки не изменяются.

Настройки листа сгруппированы в следующие закладки:

- Circuit (Схема) – здесь вы можете выбрать цветовую схему и внешний вид текста рабочей области.
- Workspace (Рабочая область) – здесь вы можете настроить размер листа и его свойства.
- Wiring (соединение) – здесь находятся настройки соединений и шины.
- Font (Шрифт) – здесь вы можете выбрать шрифт, его размер и начертание для текстовых элементов схемы.
- PCB (Печатная плата) – здесь находятся настройки печатной платы.
- Visibility (Доступность) – здесь вы можете скрыть или отобразить дополнительные слои комментариев.

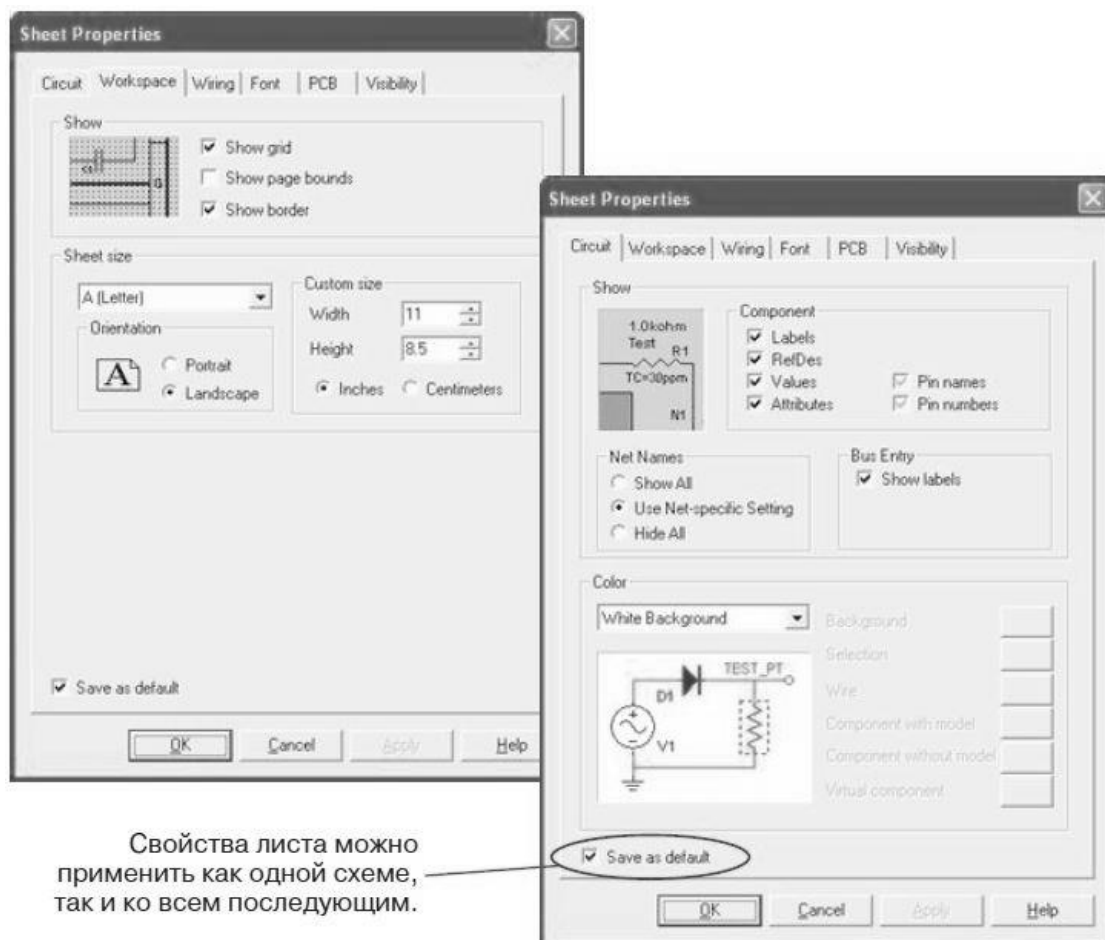


Рис. 4. Свойства листа.

Подробное описание каждого свойства листа можно посмотреть в

руководстве пользователя Multisim.

Настройка пользовательского интерфейса.

Пользовательский интерфейс Multisim можно настроить на свой вкус, изменения зависят друг от друга. Панели инструментов можно закрепить в любом месте и изменить их форму. Инструменты всех панелей также можно изменять и создавать новые панели. Система меню также полностью настраивается, вплоть до контекстных меню разных объектов.

Горячие клавиши клавиатуры (табл. 2) тоже можно настроить. Любой команде меню или панели инструментов можно назначить свою клавишу.

Чтобы назначенные клавиши не пересекались с командами интерактивных элементов, предлагается назначать комбинации клавиш, например Ctrl-E.

Таким образом, для листа схемы и описания можно назначить свою комбинацию горячих клавиш и дополнительных окон.

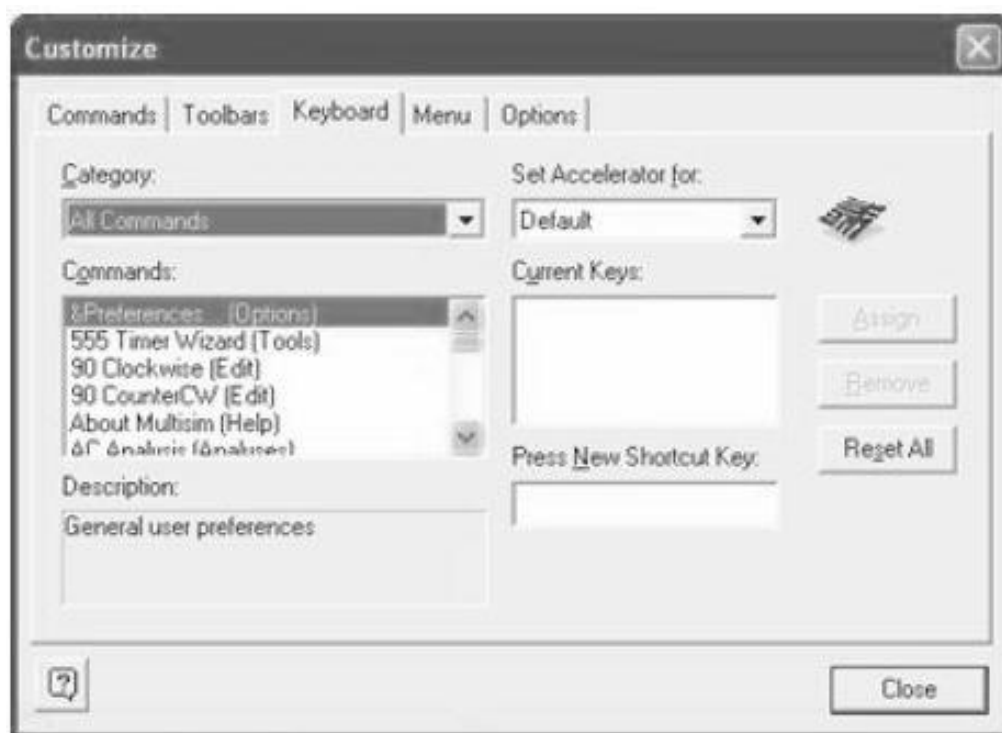


Рис. 5. Диалоговое окно.

Для настройки пользовательского интерфейса выбираем пункт Опции/Настроить пользовательский интерфейс (Options/Customize User Interface). С помощью диалогового окна "Настройка" (Customize) можно

создавать и изменять панели инструментов, назначать горячие клавиши, настраивать и создавать новые меню, а также изменять стиль пользовательского интерфейса.

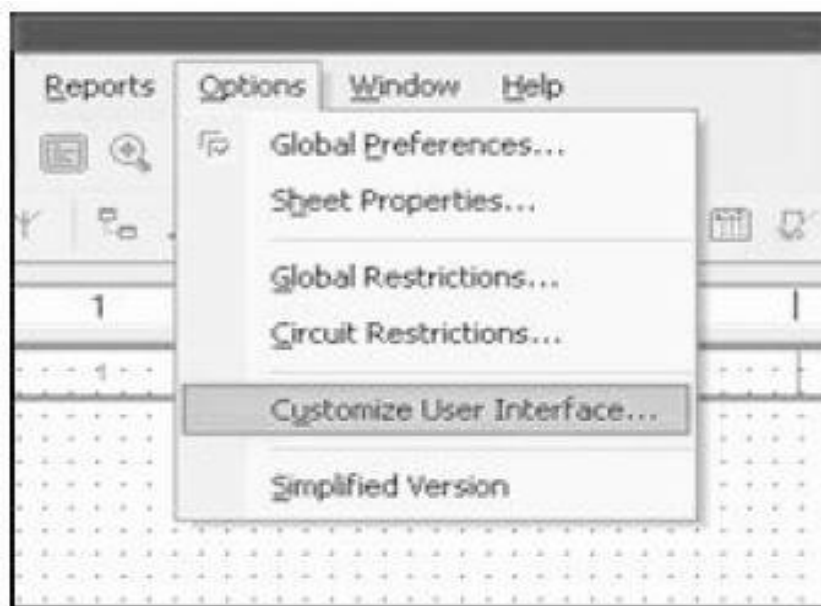


Рис. 6. Настройка меню.

Для закрепления теоретического материала, следует выполнить упражнение 1.

Упражнение 1. *Интерфейс Multisim.*

Цель этого упражнения – познакомиться с интерфейсом Multisim. В результате выполнения упражнения каждый студент должен знать внешний вид среды Multisim, глобальные настройки, а также различные панели инструментов и пункты меню. Каждый студент должен приобрести навыки и умения в настройке параметров среды Multisim.

Ход выполнения упражнения:

1) Запустите Multisim.

а) Выберите пункт меню Файл/Открыть пример (Select File/Open Samples) и откройте AMPMOD.ms9.

б) Поэкспериментируйте с различными внешними видами среды Multisim.

i) Выберите Вид/Таблица (View/Spreadsheet), чтобы включить представление таблицы.

ii) Изучите закладки Browse Сети, Компоненты и Слои печатной платы (Nets, Components и PCB Layers).

iii) Укажите количество сетей с уникальным номером.

с) Выберите пункт Вид/Описание схемы (View/Circuit Description Box). Здесь пользователь может узнать подробные сведения о разрабатываемой схеме. Для редактирования содержимого выбираем пункт Инструменты/Редактор описания (Tools/Description Box Editor).

д) Выберите Вид/Панель разработчика (View/Design Toolbox). Здесь приведен список файлов, вспомогательных схем и других элементов схемы.

2) Изучите пункты Глобальные настройки и Свойства листа (Global Preferences и Sheet Properties).

а) Выберите пункт Опции/Свойства листа (Options/Sheet Properties).

i) Попробуйте отобразить и скрыть сетку на закладке Рабочая область (Workspace), чтобы увидеть изменения, нажмите ОК или Применить (Apply).

ii) Попробуйте изменить цвета с помощью закладки Схема (Circuit) чтобы увидеть изменения, нажмите ОК или Применить (Apply).

б) Выберите Опции/Глобальные настройки (Options/Global Preferences).

i) Отметьте Автоматическое создание резервной копии (Auto-backup) на закладке Сохранение (Save).

ii) Включите или отключите Возврат к проводнику компонентов (Return to Component Browser) на закладке Компоненты (Parts).

3) Изучите настройки на вкладке Общие (General). Какой режим для прямоугольника выбора (Selection Rectangle)?

4) Если есть время, потренируйтесь в среде Multisim. Попробуйте разместить произвольный элемент на схему.

5) Закройте схему с помощью пункта Файл/Заккрыть (File/Close).

Конец упражнения. Подготовьте краткий отчет о проделанной работе.

Компоненты.

Обзор компонентов

Компоненты – это основа любой схемы, это все элементы, из которых она состоит. Multisim оперирует с двумя категориями компонентов: реальными (real) и виртуальными (virtual). Необходимо ясно понимать

различия между ними, чтобы в полной мере воспользоваться их преимуществами.

У реальных компонентов, в отличие от виртуальных есть определенное, неизменяемое значение и свое соответствие на печатной плате.

Виртуальные компоненты нужны только для эмуляции, пользователь может назначить им произвольные параметры. Например, сопротивление виртуального резистора может быть произвольным, даже 3,86654 Ома. Виртуальные компоненты помогают разработчикам при проверке с помощью схем с известными значениями компонентов. Виртуальные компоненты также могут не соответствовать реальным, например, как 4-х контактный элемент отображения 16-тиричных цифр, показанный на рисунке 7.

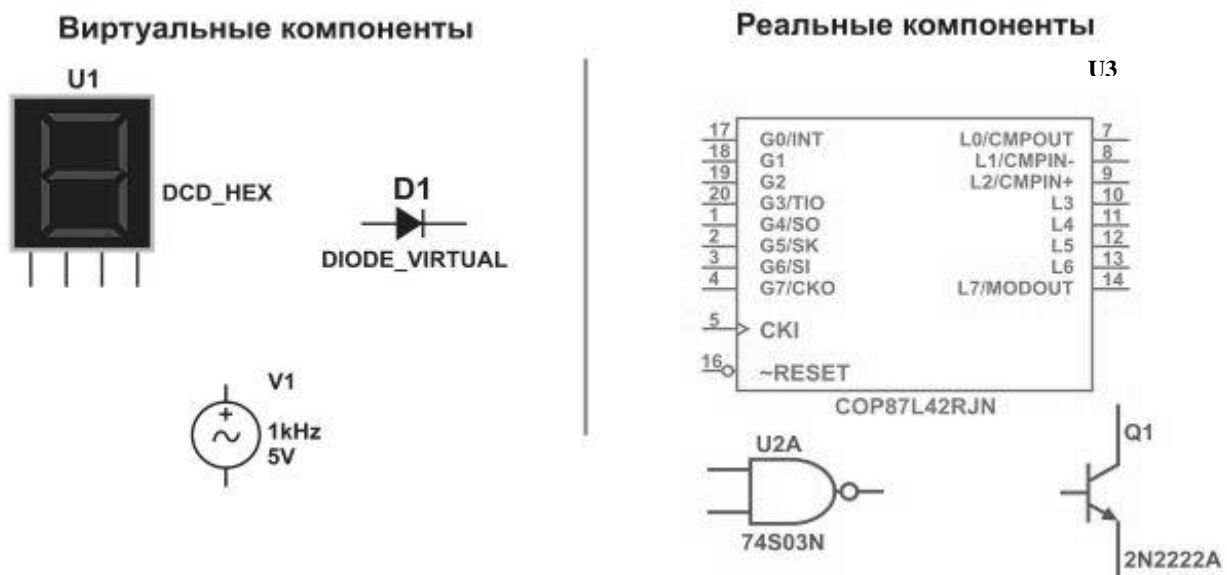


Рис. 7. Символы различных компонентов: 7-сегментный дисплей, диод D1, источник напряжения V1, логический элемент И-НЕ U2A, микроконтроллер и транзистор Q1.

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

Интерактивные компоненты.

Некоторые элементы схемы Multisim могут реагировать на действия пользователя. Изменение этих элементов сразу отражается на результатах эмуляции. Компоненты управляются с помощью клавиш,

указанных под каждым элементом.

Например, на рисунке 8 приведено несколько компонентов: клавиша A увеличит сопротивление потенциометра до 100% от указанной величины (1кОм). Чтобы уменьшить сопротивление, прижмите Shift и нажмете A. Пробел открывает или закрывает выключатель на правом рисунке.

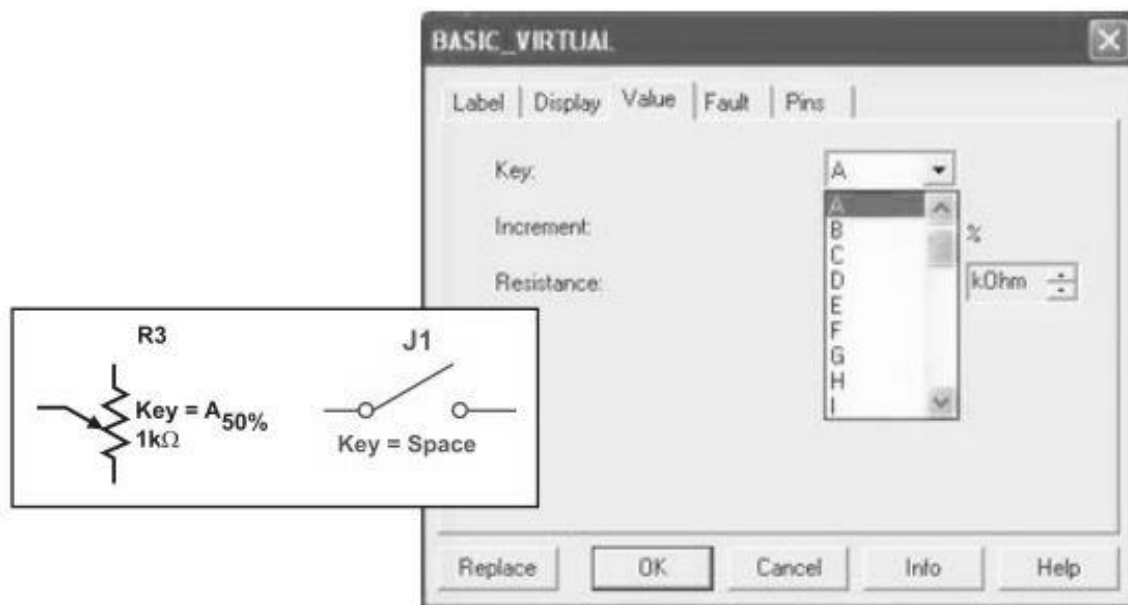


Рис. 8. Примеры интерактивных компонентов.

Горячую клавишу можно выбрать следующим образом: при двойном щелчке мыши откроется окно, в выпадающем меню которого можно выбрать нужную клавишу.


Поле	Описание	Пример
База данных	Название базы данных Multisim, в которой хранится данный компонент	Пользовательская (User)
Группа (Group)	Название группы, к которой принадлежит данный элемент	TTL
Семейство (Family)	Название семейства, к которому принадлежит данный элемент	74S
Компонент (Component)	Название данного компонента	74S00D
Символ (Symbol)	Символ (ANSI или DIN), который отображает компонент на схеме	
Назначение (Function)	Описание компонента	4-ной двухконтактный элемент И-НЕ (QUAD 2-INPUT NAND
Model Manuf./ID		Texas Instruments\74S00
(Footprint Manuf./Type)		DO14

Рис. 9. Информация о компонентах.

Характеристики компонентов.

В проводнике компонентов отображаются следующие поля:



Рис. 10. Вкладка Элементы (Parts) или панель инструментов "Компоненты" (Component).

Проводник компонентов.

Проводник компонентов (Component Browser) – это место, где выбираются компоненты, чтобы разместить их на схеме. Горячая клавиша по умолчанию для размещения компонента – Ctrl-W или двойной щелчок мышью. Курсор мыши примет форму компонента, пока вы не выберете место на схеме для компонента.

Для поиска просто начинаем набирать название компонента и проводник автоматически подберет подходящие элементы. Кнопка Поиск (Search) открывает расширенный поиск.

В Проводнике компонентов отображается текущая база данных, в которой хранятся отображаемые элементы. В Multisim они организованы в группы (groups) и семейства (families). Также в проводнике отображается описание компонента (поле Назначение Function), модель и печатная плата или производитель.

Символ звездочки ("*") заменяет любой набор символов. Например, среди результатов запроса "LM*AD" будут "LM101AD" и "LM108AD".

Следует заметить, что любому компоненту соответствует множество моделей. Каждая модель может ссылаться на различные физические характеристики компонента. Например, у операционного усилителя LM358M снаружи 5 контактов, но в этой модели из них используется только 3, контакты питания не задействованы. Более подробную информацию о моделях можно найти, выбрав модель в поле производитель/идентификатор (Model Manuf.\ID) и кликнув по кнопке Модель (Model).

Базы данных

В Multisim есть базы данных трех уровней:

- Главная база. Из главной базы данных (Master Database) можно только считывать информацию, в ней находятся компоненты Electronics

Workbench.

- Пользовательская база данных (User Database) соответствует текущему пользователю компьютера. Она предназначена для хранения компонентов, которые нежелательно предоставлять в общий доступ.

- Корпоративная база данных (Corporate Database) предназначена для тех, компонентов, которые должны быть доступны другим пользователям по сети.

Средства управления базами данных позволяют перемещать компоненты, объединять две базы в одну и редактировать их. Все базы данных разделяются на группы, а они, в свою очередь, на семейства. Когда пользователь выбирает компонент и помещает его в схему, создается новая копия. Все изменения с ней никак не затрагивают информацию, хранящуюся в базе данных.

База данных Master Database разделена на группы:

- 1) Sources. Содержит все источники напряжения и тока, заземления. Например, power sources (источники постоянного, переменного напряжения, заземление, беспроводные соединения - VCC, VDD, VSS, VEE), signal voltage sources (источники прямоугольных импульсов, источник сигнала через определенные промежутки времени), signal current sources (постоянные, переменные источники тока, источники прямоугольных импульсов)

- 2) Basic. Содержит основные элементы схемотехники: резисторы, индуктивные элементы, емкостные элементы, ключи, трансформаторы, реле, коннекторы и т.д.

- 3) Diodes. Содержит различные виды диодов: фотодиоды, диоды Шоттки, светодиоды и т.д.

- 4) Transistors. Содержит различные виды транзисторов: pnp-,npn-транзисторы, биполярные транзисторы, МОП-транзисторы, КМОП-транзисторы и т.д.

- 5) Analog. Содержит все виды усилителей: операционные, дифференциальные, инвертирующие и т.д.

- 6) TTL. Содержит элементы транзисторно-транзисторной логики

- 7) CMOS. Содержит элементы КМОП-логики.

- 8) MCU Module – управляющий модуль многопунктовой связи (от

англ. multipoint control unit)

9) Advanced_Peripherals. Содержит подключаемые внешние устройства (дисплеи, терминалы, клавишные поля).

10) Misc Digital. Содержит различные цифровые устройства.

11) Mixed. Содержит комбинированные компоненты

12) Indicators. Содержит измерительные приборы(вольтметры, амперметры), лампы и т.д.

Если изменить компонент в базе данных, то уже существующие копии компонентов останутся такими же, как и были. Изменения затронут новые компоненты этого типа. При сохранении схемы вся информация о компонентах хранится в файле Multisim. При загрузке пользователь может оставить загруженные элементы в том виде, как они есть или обновить компоненты данными из базы с аналогичными именами. На заметку: чтобы открыть проводник баз данных, выберите Инструменты/Базы данных/Проводник баз данных (Tools/Database/Database Manager), чтобы редактировать элементы проводника, скопируйте их в пользовательскую или корпоративную базу данных.

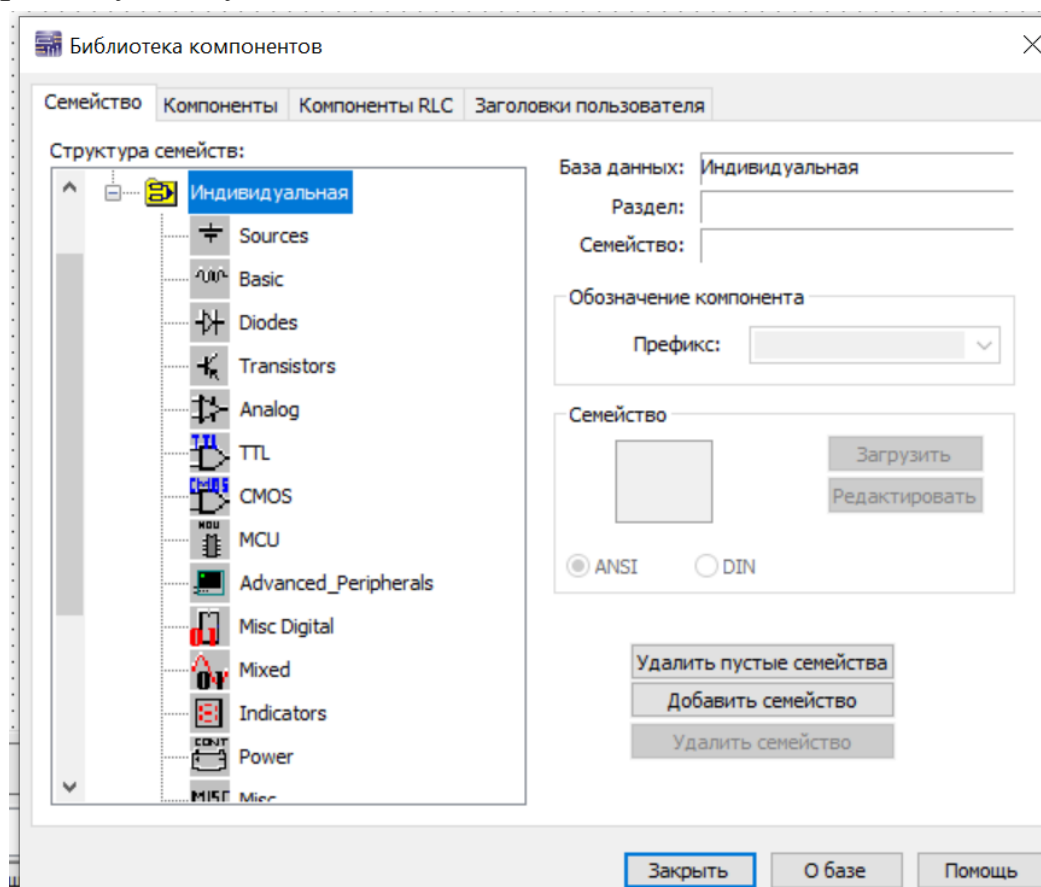


Рис. 11. Проводник базы данных

Упражнение 2 - Поиск и размещение компонентов.

Цель упражнения: познакомиться с проводником компонентов. Выполнив это упражнение, студенты должны уметь открывать проводник, искать и находить нужные компоненты, а также получать дополнительную информацию с помощью различных полей проводника.

Ход выполнения упражнения.

1) Откройте окно новой схемы: Файл/Новый/Ввод схемы (File/New/Schematic Capture).

2) Вызовите проводник компонентов с помощью кнопки Источники (Sources) панели элементов (Parts Bin) или панели компонентов (Components Toolbar).



3) Найдите и поместите на схему элемент заземление (Ground), он находится в семействе источников питания POWER_SOURCES.

4) С помощью инструмента поиск (Search) найдите микросхему Analog Devices OP297AZ.

a) В проводнике компонентов нажмите кнопку Поиск (Search).

b) Наберите "OP297AZ" в поле Компонент (Component), когда вы найдете компонент, нажмите ОК. **Пока не помещайте его на блок-диаграмму.**

c) Сколько различных операционных усилителей в вашей базе данных? (Воспользуйтесь символом '*' в поисковом запросе: "OP297*")

d) Сколько секций у микросхемы? (Секции обозначаются буквами A-Z)

e) При размещении операционного усилителя на блок-диаграмме нужно выбрать секцию A или B. Пока не помещайте ОУ на схему.

f) С помощью функции поиска найдите 16-тиричный инвертор 74S04D.



5) Перед тем, как поместить элемент на схему, программа предложит на выбор один из 6 инверторов. Выберите вариант A. После этого

вы можете добавлять либо такие же логические элементы (U1), либо другие микросхемы.

6) Добавьте еще один элемент вида A. Какая метка (reference designator) для него назначается по умолчанию?

Конец упражнения. Подготовьте краткий отчет о проделанной работе.

2. Создание схемы. Общие сведения и рекомендации.

Общие правила моделирования схем.

При моделировании схем необходимо соблюдать следующие общие правила:

1) *Любая схема должна обязательно содержать хотя бы один символ заземления.*

2) *Любые два конца проводника либо контакта устройства, встречающихся в точке, всегда считаются соединенными. При соединении трех концов (Т-соединение) необходимо использовать символ соединения (узел). Те же правила применяются при соединении четырех и более контактов.*

3) *В схемах должны присутствовать источники сигнала (тока или напряжения), обеспечивающие входной сигнал, и не менее одной контрольной точки (за исключением анализа схем постоянного тока).*

Проектирование схемы.

При проектировании схемы большинство действий выполняется с использованием левой кнопки мыши. Правая кнопка используется для «вызова контекстного меню свойств элементов или измерительных приборов.

Для создания цепи необходимо произвести следующие действия:

- найти и выбрать необходимые радиоэлементы;
- разместить элементы на рабочем пространстве окна схемы;
- соединить элементы проводами;
- установить значение параметров элементов.

Поиск и выбор радиоэлементов производится с помощью мыши и второй линейки значков. Для уменьшения ошибок при выборе радио-

элементов рекомендуется пользоваться контекстной помощью и кратким описанием элемента. Наиболее часто встречаются ошибки при выборе источников (источник тока используют вместо источника напряжения и наоборот), при выборе линии передачи с потерями и без потерь (у линии с потерями на значке имеется обозначение резистора), при выборе типа транзисторов и т. п. В состав схемы обязательно включается корпус (*заземление*). Без этого элемента правильный расчет схемы и ее работа не гарантируется.

Программа Multisim содержит большую элементную базу данных. В ней содержатся наиболее часто используемые радиоэлементы: резисторы, конденсаторы, катушки, источники тока и напряжения и т. д. Пассивные элементы используются без учета паразитных параметров. Только для резисторов вводится температурная зависимость. Другими словами, пассивные элементы в программе являются идеальными элементами. Интересной особенностью программы является возможность использования переменных резисторов, конденсаторов и катушек. Параметры этих элементов можно изменять, нажимая клавишу, соответствующую метке элемента. Изменение параметров допускается во время работы схемы. Правда, при этом точность вычислений не гарантируется и результаты нужно перепроверять, повторяя анализ цепи с фиксированным значением параметра элемента.

Размещение элементов в окне схемы осуществляется мышью. Выбранный элемент "захватывается" и "устанавливается" в нужное место окна схем при нажатой левой клавише мыши. Для вращения элемента используются иконки на первой линейке значков или соответствующие пункты контекстного меню или меню Circuit. Все элементы в окне схем должны быть размещены без пересечений и наложений. Перемещение элемента на новое место производится новым "захватыванием" и передвижением при нажатии левой клавиши мыши.

Соединение выводов всех элементов друг с другом осуществляется только проводами. Не допускается наложение выводов элементов друг на друга — при этом соединение не устанавливается. Для создания проводника выделяют узел первого элемента, начинают движение мышкой в выбранном направлении и появившийся провод при нажатой левой

клавише мышки помещают на узел второго элемента. Только после этого спокойно без рывков отпускают левую клавишу мышки. Отметим, что подключить проводник можно только с четырех сторон узла: сверху, снизу, справа и слева. Соединительные проводники можно, захватывая мышкой, переместить на новое место. Выделяя провод и нажимая правую кнопку мышки можно установить новый цвет соединительного проводника. Таким же цветом будет нарисована кривая на экране измерительного прибора, при подключении прибора к схеме "окрашенным" проводом. Нельзя оставлять в окне схемы элементы, не подключенные к другим элементам, — неиспользуемые элементы должны быть удалены.

Установка параметров элемента осуществляется наведением курсора, на элемент, нажатием правой кнопки мышки и выбором соответствующего пункта контекстного меню. Для изменения параметров можно также два раза нажать левую кнопку мышки или использовать подменю Component Properties, меню Circuit. В появившейся диалоговой панели устанавливаются параметры элемента. Для резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности используется закладка Value. Установка параметров сложных и активных элементов — диодов, транзисторов, длинных линий и т. д., производится выбором закладки Models и выбором пунктов меню Default и Ideal или выбором типа элемента из имеющейся библиотеки. Иногда возникает необходимость изменения библиотечных параметров элемента. Для этого используется кнопка Edit. Так, например, редактируются и устанавливаются новые погонные параметры длинной линии. Наиболее часто при установке параметров элементов встречается ошибка в размерности параметра: кило вместо мега, пико вместо нано и т. д.

Уничтожение элементов и проводов производится после наведения на них курсора, нажатия правой кнопки мышки и выбора пункта меню Delete. Выделить группу элементов можно, используя мышь и операцию "вытягивания прямоугольника". Эта операция производится с нажатой левой клавишей мышки. После выделения группу элементов можно уничтожить, переместить на новое место или скопировать в буфер.

Увеличение или уменьшение изображения схемы осуществляется после выбора Zoom In или Zoom Out из меню Circuit или после использования соответствующих значков на первой линейке иконок «Программы».

Для установки дополнительных параметров отображения схемы используется меню Circuit, пункт Schematic Option (рис. 1). Наиболее часто используется этот пункт меню для отображения номеров узлов схемы: выбирается закладка Show/Hide и отмечается пункт меню Show nodes (рис. 2а). С помощью этой диалоговой панели можно установить точечную сетку на изображении схемы, изменить шрифты, используемые в программе, показать на схеме метки радиоэлементов и т.д.

В программе Multisim участки большой схемы можно преобразовать в подсхему. Подсхема обозначается как небольшой прямоугольник с выводами. Для создания подсхемы необходимо выделить участок схемы, причем линии выделения должны пересекать те проводники, которые в дальнейшем станут выводами подсхемы. Затем нужно выбрать пункт Create Subcircuit меню Circuit и следовать появляющимся указаниям. В окне элементов Favorites появляется изображение созданной подсхемы. Использование подсхем позволяет получить компактную схему сложного устройства.

3. Сдвиг, поворот, выбор и соединение компонентов

Сдвиг, поворот и выделение.

После выбора компонентов из базы данных они размещаются на схеме и соединяются между собой. Двойной щелчок по компоненту в проводнике прикрепит его к курсору. После этого можно поместить элемент на схему, просто кликнув в желаемом месте.

В это время и после установки компоненты можно повернуть. Чтобы это сделать в первом случае, нажмите Ctrl-R. Чтобы повернуть установленный компонент, выделите его и тоже нажмите Ctrl-R или выберите в контекстном пункте пункт повернуть на 90° по или против часовой стрелки.

Чтобы выбрать компонент, просто щелкните по нему мышью. Для выбора нескольких компонентов прижмите кнопку мыши и перемещайте ее, рисуя прямоугольник выбора вокруг нужных компонентов. Вы-

бренные компоненты обозначаются пунктирной линией. Можно выбрать отдельные элементы, например значение или метку компонента. Выбор осуществляется одинарным щелчком мыши по нужному элементу.

Клавиша Shift позволяет добавлять или снимать выделение с нескольких компонентов.

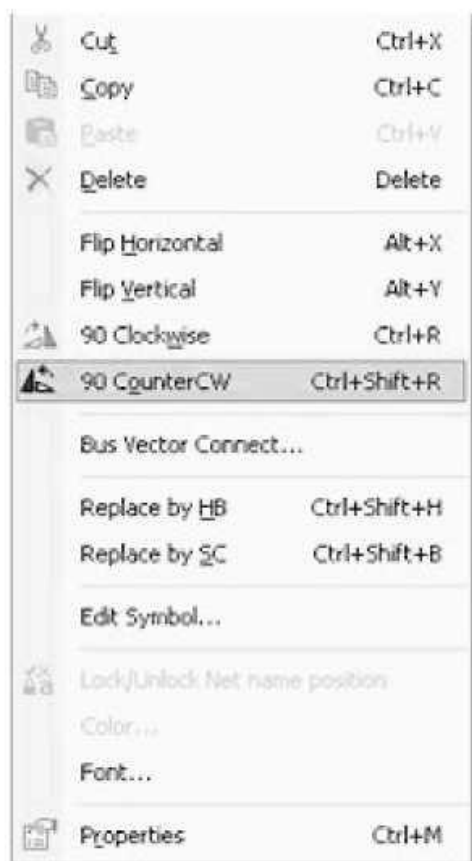


Рис. 12. Поворот компонента.



Рис. 13. Замена компонента.

Компоненты можно заменять на другие с помощью их контекстного меню, пункта Заменить компонент(ы) (Replace Component(s)). Новые компоненты выбираются в открывшемся дополнительном окне проводника компонентов. Соединения компонентов после замены Multisim восстановит.

Соединение.

В Multisim используется безрежимный принцип работы: действие мышью зависит от положения курсора, нет необходимости выбирать инструмент или режим при работе в Multisim. Курсор изменяет свой вид в зависимости от того, на какой объект он наведен. Различные виды курсора приведены на рис. 14.

Когда курсор расположен над разъемом (pin) или терминалом (terminal) компонента, левым щелчком мыши можно его соединить. Когда курсор расположен над существующим проводом и рядом с разъемом или терминалом, соединение можно легко изменить.

Чтобы начать вести соединяющий провод, кликните по разъему, чтобы завершить соединение, кликните по конечному терминалу.

После появления проводника Multisim автоматически присвоит ему номер в сети. Номера увеличиваются последовательно, начиная с 1. Заземляющие провода всегда имеют номер 0 — это требование связано с работой скрытого эмулятора SPICE. Чтобы изменить номер соединения или присвоить ему логическое имя, просто дважды кликните по проводнику (рис. 15).



Рис. 14. Свойства соединения.

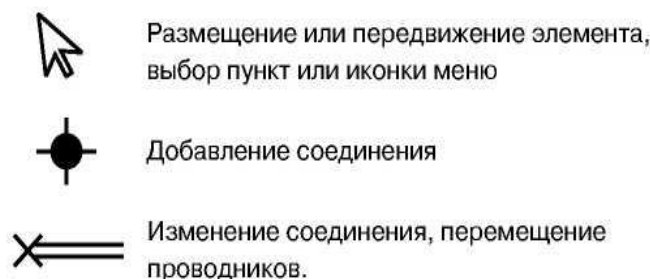


Рис. 15. Безрежимный курсор мыши.

Автосоединение разъемов касанием.

В Multisim есть функция автоматического соединения разъемов между собой и с проводниками. Чтобы добавить компонент в существующую сеть соединений, просто его разъемы касались существующей сети (рис. 16).

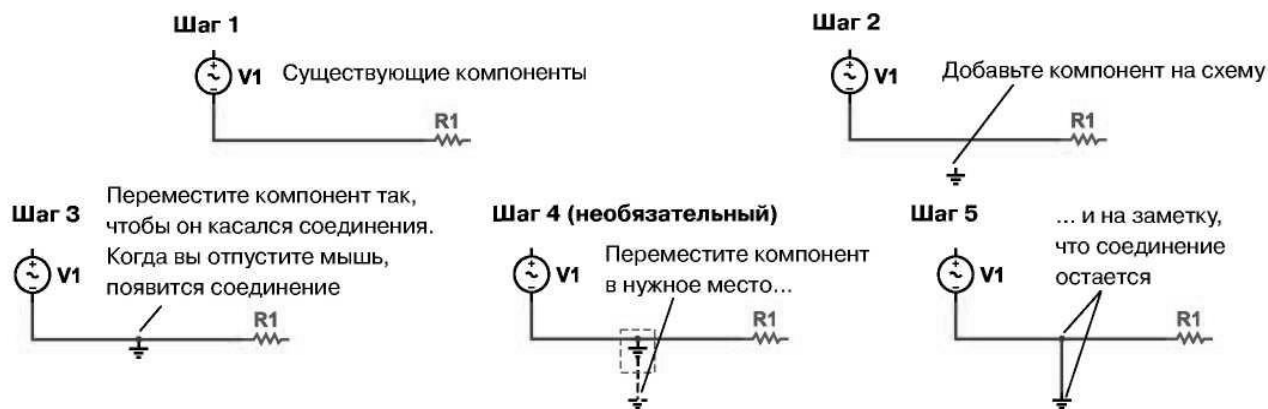


Рис. 16. Автоматическое соединение касанием.

Добавление в авторазрыв

В Multisim есть возможность вставить компонент внутрь существующей сети соединений. Для этого просто разместите элемент параллельно проводнику (рис.17).

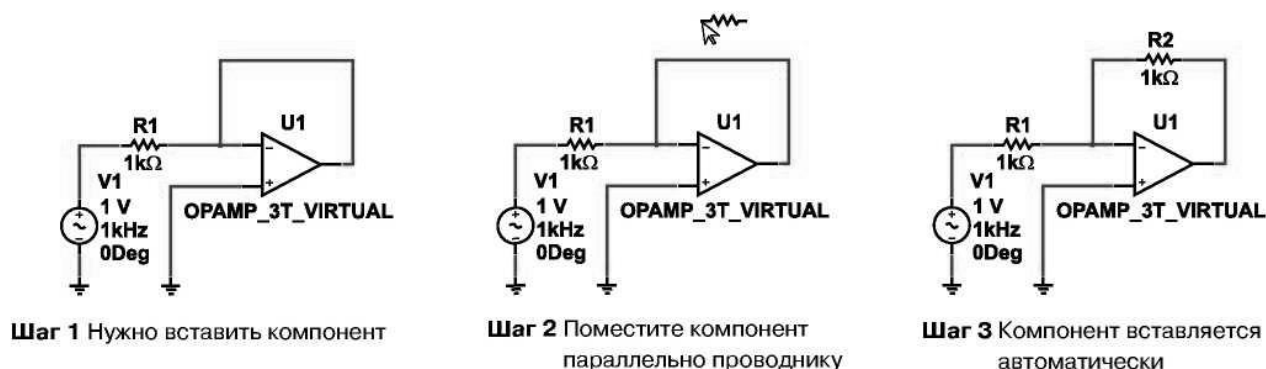


Рис. 17. Автоматическое соединение касанием.

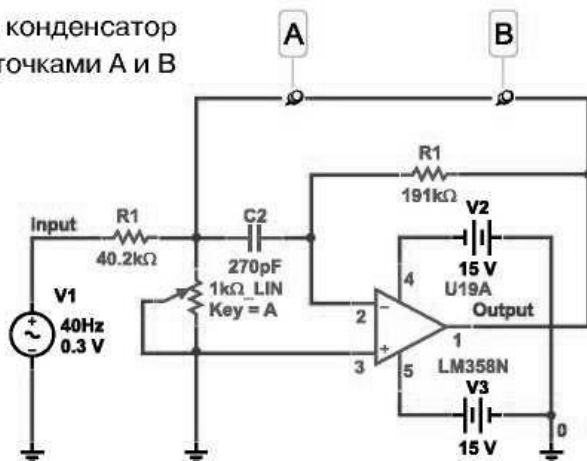
Упражнение 3. Нарисовать схему.

Цель упражнения: приобрести базовые навыки по вводу простой схемы в Multisim с использованием различных методов поиска компонентов, их соединения и запуска простейшей эмуляции.

Ход выполнения упражнения.

1) Создайте свою копию схемы 40kFILTER1_Complete.ms9, как показано на рисунке 18. Выберите необходимые компоненты из Основной базы данных (Master Database) (Разместить/Компонент Place/Component) и Популярного списка (In-Use List). Установите значения компонентов, как показано на рисунке 18.

Поместите конденсатор
между точками A и B



Внимание!

Все компоненты кроме ОУ – виртуальные (Virtual Components). ОУ был отражен сверху вниз.

Рис. 18. Полосовой фильтр.

2) Чтобы соединить компоненты, наведите курсор на терминал так, чтобы он изменил свой вид и кликните мышью. Переместите курсор (таща за собой провод) до второго терминала и кликните, чтобы завершить соединение.

3) Замените резистор R2 средствами Multisim: выберите в контекстном меню пункт заменить компоненты и замените виртуальные резистор реальным (раздел Basic/Resistor) на ваш выбор.

4) Дважды кликните на виртуальные компоненты и посмотрите, как задаются их параметры.

5) Поверните и переместите какой-либо компонент, чтобы посмотреть как ваши действия влияют на соединяющие проводники. Также компоненты можно поворачивать, когда вы размещаете их из базы данных.

6) Выберите виртуальный конденсатор из Популярного списка и разместите его между точками A и B схемы. На заметку: он автоматически соединяется и его емкость становится 270 пкФ.

Конец упражнения. Подготовьте краткий отчет о проделанной работе.

4. Виртуальные приборы.

Виртуальные приборы — это модельные компоненты Multisim, которые соответствуют реальным приборам. Например, среди виртуальных приборов в Multisim есть осциллографы, генераторы сигналов, сетевые анализаторы и плоттеры бode.

Виртуальные приборы — это простой и понятный метод взаимодействия со схемой, почти не отличающийся от традиционного при тестировании или создании прототипа.

Разработчики, знакомые с National Instruments Lab VIEW могут создавать свои собственные приборы буквально из ничего. Например, для моделирования электромагнитных помех можно сделать собственный генератор шума.

Виртуальные приборы Lab VIEW могут регистрировать реальные данные, пользоваться ими во время эмуляции, отправлять данные на вывод аналоговых приборов. Таким образом, эмулированные данные могут управлять реальными приборами. Для создания виртуальных приборов среда разработки Lab VIEW необходима, а для использования уже созданных — нет.

Чтобы добавить виртуальный прибор, выберите его с панели Приборов (Instruments), рис. 19. Чтобы посмотреть лицевую панель прибора, дважды кликните на иконку прибора. Терминалы прибора соединяются с элементами схемы так же, как и для других компонентов.

В Multisim также есть эмулированные реально-существующие приборы. К таким приборам относится Tektronix TDS 2024 Oscilloscope. Они выглядят и действуют точно в соответствии с техническим описанием производителя.



Рис. 19. Панель приборов.

В каждой схеме может быть много приборов, включая и копии одного прибора. Кроме того, у каждого окна схемы может быть свой набор приборов. Каждая копия прибора настраивается и соединяется отдельно.

В этом разделе рассмотрены наиболее популярные приборы. Более подробная информация о каждом приборе есть в руководстве пользователя Multisim (User Guide) и в файле справки (helpfile).

Упражнение 4. *Работа с приборами.*

Цель упражнения: приобрести навыки в размещении приборов, их соединении, настройке параметров приборов.

Ход выполнения упражнения.

1) Загрузите схему 40kFilter2.ms9. Во время выполнения шагов 2-4 обратитесь к рис. 18.

2) Замените Тактовый генератор (Clock Source) Генератором сигналов (Function Generator). После размещения дважды кликните его иконку, чтобы открыть переднюю панель и введите следующие параметры:

- Волновой фронт (Waveform) = синусоидальный (sinewave).
- Амплитуда (Amplitude) = 1 В.
- Частота (Frequency) = 40 кГц.

3) Закройте панель приборов.

4) Поместите Плоттер Боде (Bode plotter) между входным и выходным узлами. Двойным щелчком откройте прибор и введите настройки, указанные ниже. После этого запустите эмуляцию и исследуйте результаты.

- Установите величину (Magnitude).
- Горизонтальную I (Initial — начальная) = 1 кГц, F (Final — конечная) = 1 МГц.
- Вертикальную I (Initial — начальная) = -50 дБ, F (Final — конечная) = 10 дБ.

5) Поместите осциллограф чтобы измерить входное и выходное напряжения. Дважды кликните иконку осциллографа и введите следующие параметры:

- Цена деления по времени (Timebase) = 20 мкс/дел.
- Канал А = 1 В/дел.
- Канал В = 1 В/дел.

6) Цвет проводника, подключенного к прибору определяет цвет на экране прибора. Убедитесь, что проводники от выходного разъема до операционного усилителя голубые. В противном случае, в контекстном меню участка проводника выберите команду "Цвет проводника" (Wire Color) и измените цвет.

7) Измените значение потенциометра (R3), нажав "А", чтобы увеличить сопротивление и "Shift-А", чтобы его уменьшить. Изучите изме-

нение данных на экране осциллографа. (Данные Графика Боде изменятся только после перезапуска эмуляции).

8) Во время работы эмуляции воспользуйтесь прибором "Пробник" (Measurement Probe) чтобы проверить уровни напряжения в схеме. Он находится в конце панели приборов.

Конец упражнения. Подготовьте краткий отчет о проделанной работе.

Мультиметр

Мультиметр предназначен для измерения переменного или постоянного тока или напряжения, сопротивления или затухания между двумя узлами схемы. Диапазон измерений мультиметра подбирается автоматически. Его внутреннее сопротивление и ток близки к идеальным значениям, но их можно изменить (рис.20, 21).

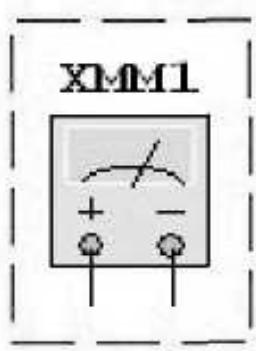


Рис. 20. Обозначение мультиметра. Рис. 21. Лицевая панель мультиметра.

Генератор сигналов.

Генератор сигналов (function generator) — это источник напряжения, который может генерировать синусоидальные, пилообразные и прямоугольные импульсы. Можно изменить форму сигнала, его частоту, амплитуду, коэффициент заполнения и постоянный сдвиг. Диапазон генератора достаточен, чтобы воспроизвести сигналы с частотами от несколько герц до аудио и радиочастотных (рис.22, 23).

У генератора сигналов есть три терминала-источника импульсов. Общий центральный терминал определяет положение нуля.

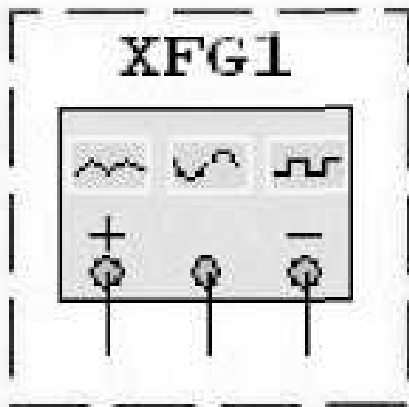


Рис. 22. Обозначение генератора сигналов

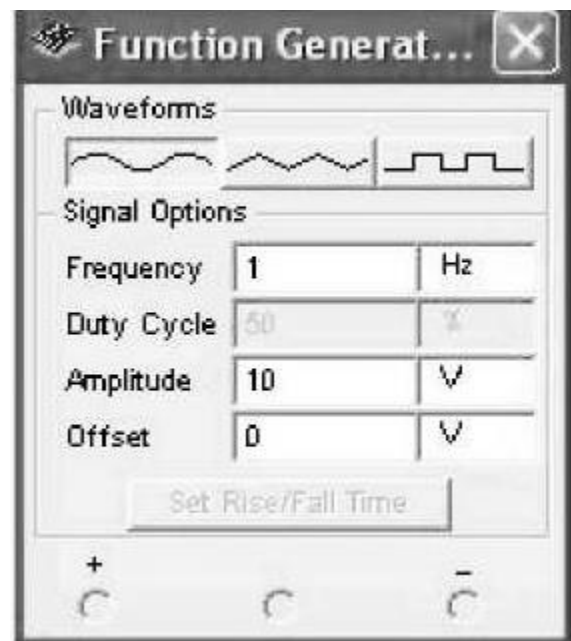


Рис.23. Лицевая панель генератора сигналов.

Осциллографы.

В Multisim есть несколько модификаций осциллографов, которыми можно управлять как настоящими. Они позволяют устанавливать параметры временно развертки и напряжения, выбирать тип и уровень запуска измерений. Данные специальных осциллографов Multisim можно посмотреть после эмуляции с помощью самописца (Grapher) из меню Вид/Плоттер (View/Grapher).

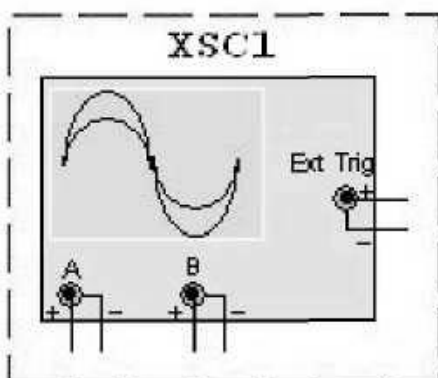


Рис. 24. Обозначение осциллографа.

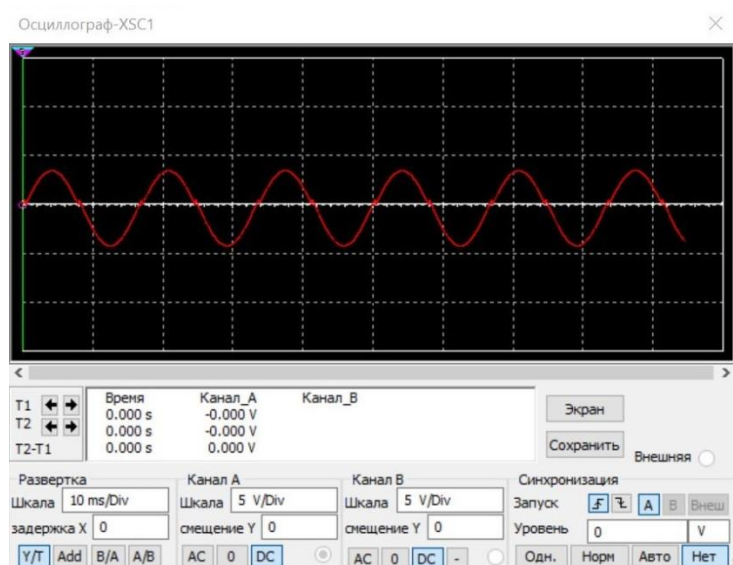


Рис. 25. Лицевая панель осциллографа.

В Multisim есть следующие осциллографы:

- 2-х канальный,
- 4-х канальный,
- осциллограф смешанных сигналов Agilent 54622D,
- 4-х канальный цифровой осциллограф с записью Tektronix TDS 2024 (рис. 26, 27).

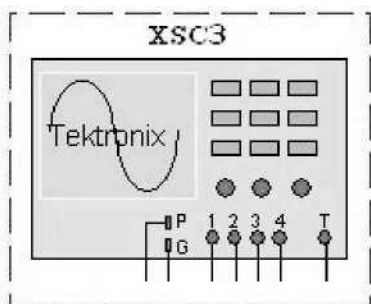


Рис. 26. Обозначение осциллографа Tektronix.

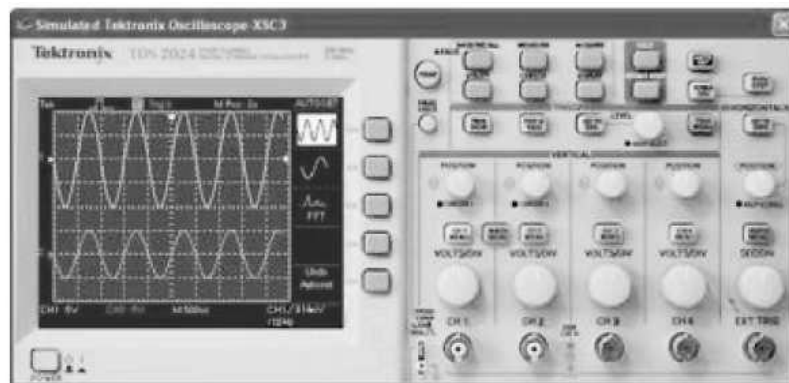


Рис. 27. Лицевая панель осциллографа Tektronix

Двух канальный осциллограф (*Oscilloscope*) позволяет наблюдать форму двух сигналов (рис. 27), поступающих на два входа осциллографа: каналы А и В. Обычно канал А подключается к входу исследуемого устройства, а канал В — к выходу. Выбор AC в окне осциллографа позволяет наблюдать только переменные сигналы (режим закрытого входа). По умолчанию используется режим DC (открытый вход). В этом случае на экране осциллографа дополнительно отображается постоянная составляющая сигнала. В режиме 0 (рис. 27) входной зажим закорачивается на корпус и на экране осциллографа отображается нулевое напряжение. Установка в окне Y position ненулевого напряжения (рис. 27) позволяет на соответствующую величину смещать вверх или вниз изображение кривой на экране осциллографа (после измерений смещение рекомендуется сделать равным нулю).

Первый из двух основных показателей осциллографа — *цена деления по вертикали* — устанавливается в главных окошках каналов А и В в диапазоне от 10 мкВ/дел до 5 кВ/дел.

Второй основной параметр осциллографа - *цена деления по горизонтали* (время развертки) устанавливается в окне Time Base. Этот па-

параметр первоначально устанавливается примерно равным периоду исследуемого процесса. Остальные параметры осциллографа рекомендуется использовать по умолчанию.

Нажимая кнопку Expand, получим увеличенный размер окна осциллографа. В увеличенном окне можно использовать полосу горизонтального прокручивания для наблюдения начала исследуемого процесса, а также устанавливать две визирные линии, перемещаемые с помощью курсора, для измерения напряжения в двух точках оси времени.

Соединение осциллографа с корпусом осуществляется с помощью клеммы Ground. Однако для большинства измерений такое соединение устанавливать не обязательно.

Плоттер Бode.

Плоттер Бode (рис. 28) отображает относительный фазовый или амплитудный отклик входного и выходного сигнала. Это особенно удобно при анализе свойств полосовых фильтров.



Рис. 28. Обозначение и лицевая панель плоттера Бode.

Спектральный анализатор.

Спектральный анализатор (spectrum analyzer) служит для измерения амплитуды гармоник с заданной частотой. Также он может измерить мощность сигнала и частотных компонент, определить наличие гармоник в сигнале.

Результаты работы спектрального анализатора отображаются в спектральной области, а не временной. Обычно сигнал — это функция времени, для ее измерения используется осциллограф. Иногда ожидает-

ся синусоидальный сигнал, но он может содержать дополнительные гармоники. В результате, невозможно измерить уровень сигнала. Если же сигнал измеряется спектральным анализатором, получается частотный состав сигнала, т.е. амплитуда основной и дополнительных гармоник.

Более подробно с принципом работы спектрального анализатора мы познакомимся при изучении негармонических напряжений.

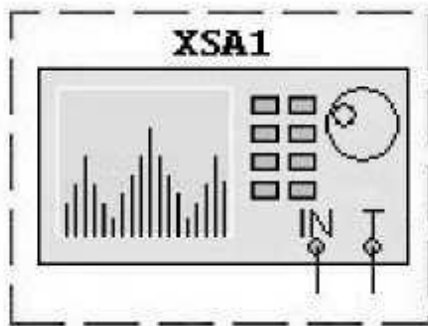


Рис. 29. Обозначение спектрального анализатора

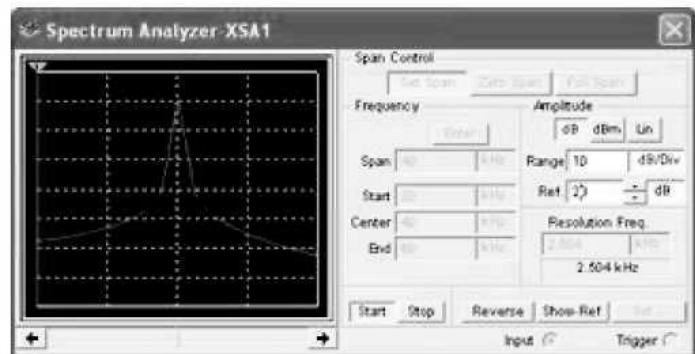


Рис. 30. Лицевая панель спектрального анализатора.

Вопросы для повторения.

1. Общие правила моделирования электрических схем.
2. Принципы моделирования электрических цепей, заложенные в программе Multisim.
3. Математические методы моделирования, применяемые в Multisim.
4. Виртуальные приборы для измерения параметров цепей в программе Multisim.
5. Назначение спектрального анализатора. Отображение результатов измерения спектральным анализатором.
6. Многоканальный осциллограф. Порядок настройки и измерения параметров сигналов с помощью осциллографа.
7. Причины погрешностей при моделировании электрических и электронных цепей в Multisim.
8. Порядок выбора параметров элементов схем.

ОСНОВЫ РАБОТЫ В СРЕДЕ MULTISIM

Цель работы – изучение основ работы в среде Multisim: интерфейс проводника программы, принципы построения схем, работа с виртуальными приборами, построение схем, составление уравнений цепи, решение уравнений цепи и вывод результатов.

Порядок выполнения работы.

Часть 1.

Запустите Multisim

Выберите пункт меню Файл/Открыть пример (Select File/Open Samples) и откройте пример «Amplitude Modulator» из папки с установленных программ.

Поэкспериментируйте с различными внешними видами среды Multisim. С помощью осциллографа изучите принцип амплитудной модуляции. Подключайте осциллограф ко входам и выходам операционных усилителей и перемножителей.

Этапы работы представить в отчете. Опишите принцип работы амплитудного модулятора.

Попробуйте изменить цвета с помощью закладки Схема (Circuit) чтобы увидеть изменения, нажмите ОК или Применить (Apply).

Отметьте Автоматическое создание резервной копии (Auto-backup) на закладке Сохранение (Save).

Включите или отключите Возврат к проводнику компонентов (Return to Component Browser) на закладке Компоненты (Parts).

Потренируйтесь в среде Multisim. Попробуйте поместить произвольный элемент, изменить параметр элемента схемы.

Закройте схему с помощью пункта Файл/Заккрыть (File/Close).

Часть 2.

1. Запустите Multisim.

2. Откройте окно новой схемы: Файл/Новый/Ввод схемы (File/New/Schematic Capture).

3. Вызовите проводник компонентов с помощью кнопки Источники (Sources) панели элементов (Parts Bin) или панели компонентов (Components Toolbar).

4. Найдите и поместите на схему элемент заземление (Ground) и генератор гармонических колебаний (AC Voltage), они находятся в семействе источников питания POWER_SOURCES.

5. С помощью инструмента поиск (Search) найдите микросхему Analog Devices OP297AZ. Перед тем, как поместить элемент на схему, вам предложат на выбор один из 6 инверторов. Выберите вариант А. После этого вы можете добавлять либо такие же логические элементы (U1), либо другие микросхемы.

6. Поместите на схему 2-х каналный осциллограф (oscilloscope на панели инструментов).

7. Соедините добавленные компоненты согласно рис 1.

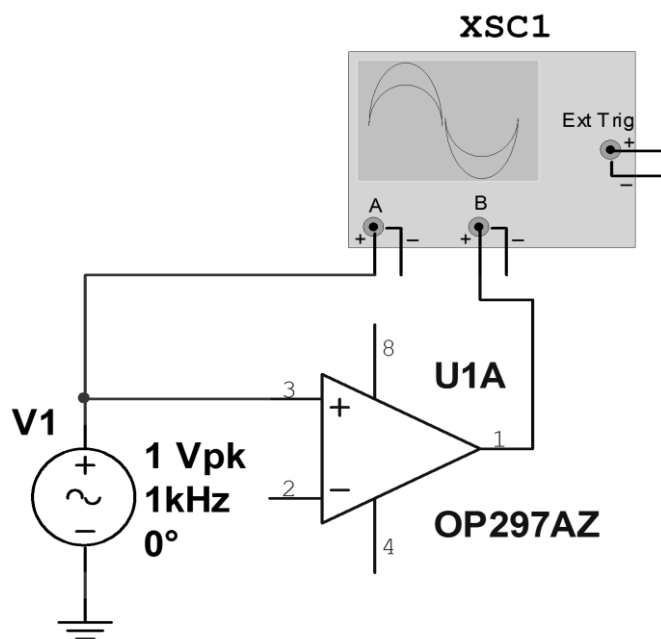


Рис. 1

8. Измените цвет соединительного провода между операционным усилителем и осциллографом на синий (контекстное меню/Color segment).

9. Запустите эмуляцию схемы (команда Simulate/Run).

10. Откройте свойства осциллографа и настройте параметры частоты развёртки (Timebase/Scale) и масштабирования сигнала каналов A и B (Channel A/Scale) для приемлемого для анализа изображения.

11. Остановите симуляцию.
12. Откройте свойства генератора и установите частоту (Frequency) 2 кГц и амплитуду (Voltage (Pk)) 100 В. Повторите действия 9-11.

Подготовить и сдать отчет преподавателю. Быть готовым ответить на вопросы.

Лабораторная работа 2.

RL- и RC-ЦЕПИ

Цель работы – изучить процессы, протекающие в электрических цепях, содержащих реактивные элементы, и приобрести навыки использования генератора гармонических сигналов и вольтметра.

Теоретические сведения

Рабочее место для выполнения лабораторной работы включает генератор гармонических сигналов, вольтметр и лабораторный стенд.

Генератор гармонических сигналов предназначен для получения синусоидальных по форме сигналов. Начальная фаза сигнала генератора при измерениях принимается равной нулю. Поэтому генератор имеет только две группы элементов управления, предназначенных для установки частоты и уровня выходного напряжения. Для индикации частоты у генератора существует шкала, или цифровое табло. У некоторых генераторов для установки уровня выходного сигнала имеется встроенный вольтметр. Однако более точно выходное напряжение генератора устанавливается с помощью внешнего вольтметра.

Вольтметр (или *милливольтметр*) предназначен для измерения среднеквадратичного (действующего, эффективного) напряжения. Обратите внимание на то, что действующее напряжение меньше амплитуды гармонического напряжения на величину $\sqrt{2}$. Ток, потребляемый вольтметром при измерениях, пренебрежимо мал. Поэтому сам прибор практически не оказывает влияния на работу схемы. У цифрового милливольтметра индикация измеренного напряжения осуществляется на цифровом табло. Чаще используются аналоговые милливольтметры, у которых имеется стрелочный индикатор напряжения. В этом случае показания милливольтметра зависят от выбранного с помощью переключателя максимального значения напряжения (диапазона) прибора. Обратите внимание на то, что в зависимости от выбранного диапазона измерений нужно использовать соответствующую шкалу стрелочного индикатора с тем, чтобы непосредственно отсчитать измеренное напряжение.

Порядок выполнения работы.

1. Электрическая схема лабораторного стенда приведена на рис. 1. Для исследования выбираются резисторы R_1 , R_2 , R_3 , конденсаторы

C_1, C_2, C_3 .

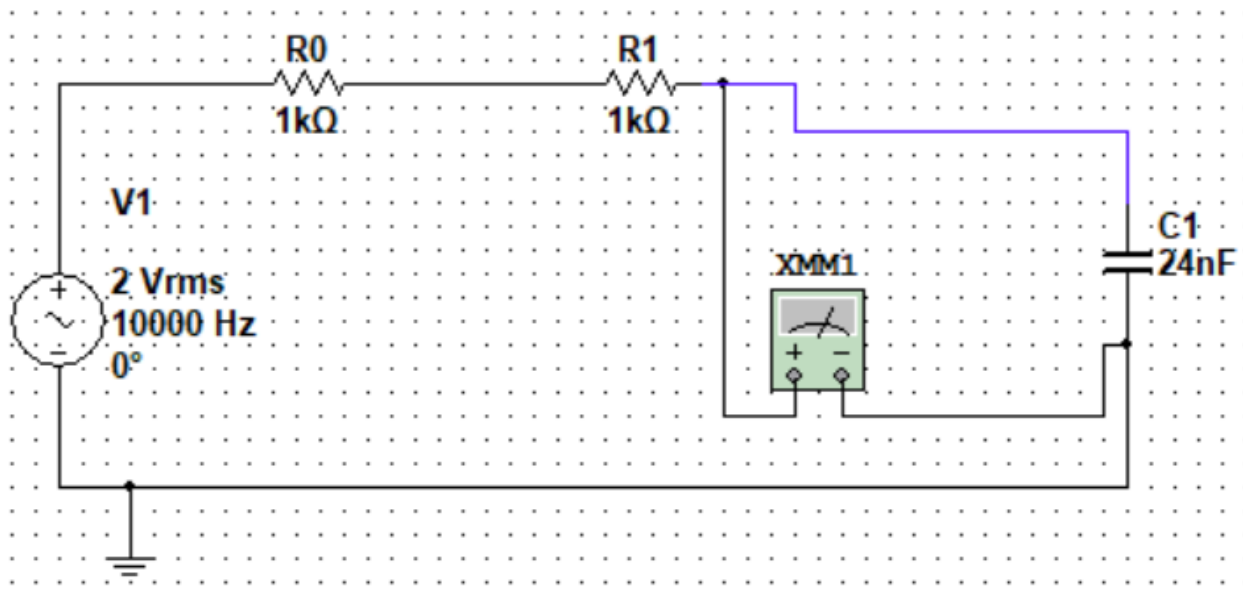


Рис 1

Исследование свойств последовательных соединений резистора и конденсатора, проводится путем изменения частоты входного сигнала для пар значений R и C согласно таблицы. Величина резисторов R выбираются произвольно в пределах от 1 кОм до 1,8 кОм. Величину емкости C выбирать произвольно в пределах от 20 пФ до 1 мкФ. Результаты исследования занести в таблицу 1.

Таблица 1

Частота напряжения	0,5кГц	1кГц	1,5кГц	2кГц	2,5кГц	3кГц	3,5кГц	5кГц
$U_C/R1, C1$								
$U_C/R1, C2$								
$U_C/R1, C3$								
$U_C/R2, C1$								
$U_C/R2, C2$								
$U_C/R2, C3$								
$U_C/R3, C1$								
$U_C/R3, C2$								
$U_C/R3, C3$								

По результатам исследования сделать выводы как меняется выходное напряжение в зависимости от частоты сигнала, почему так происхо-

дит. Построить графики результатов эксперимента.

Представить *векторную диаграмму* напряжения и токов цепи для выбранных значений параметров резистора и конденсатора. Обратить внимание на фазу напряжения и сделать выводы.

2. При исследовании последовательного соединения резистора и катушки индуктивности собрать схему по аналогии с предыдущим пунктом, заменив конденсатор на индуктивность. Величину индуктивности выбирать самостоятельно в пределах от 3 мГн до 8 мГн.

Результаты измерений представить в таблице 2

Таблица 2

Частота напряжения	0,5кГц	1кГц	1,5кГц	2кГц	2,5кГц	3кГц	3,5кГц	5кГц
$U_L/R1,L1$								
$U_L/R1,L2$								
$U_L/R1,L3$								
$U_L/R2,L1$								
$U_L/R2,L2$								
$U_L/R2,L3$								
$U_L/R3,L1$								
$U_L/R3,L2$								
$U_L/R3,L3$								

По результатам исследования сделать выводы как меняется выходное напряжение в зависимости от частоты сигнала, почему так происходит. Построить графики результатов эксперимента.

Представить *векторную диаграмму* напряжения и токов цепи для выбранных значений параметров резистора и индуктивности. Обратить внимание на фазу напряжения и сделать выводы.

3. Собрать схему для исследования физики процесса заряда-разряда конденсатора, рис.2.

Провести исследование для разных частот и разной скважности прямоугольных меандр генератора.

Результаты эксперимента представить в отчете и сделать выводы по работе.

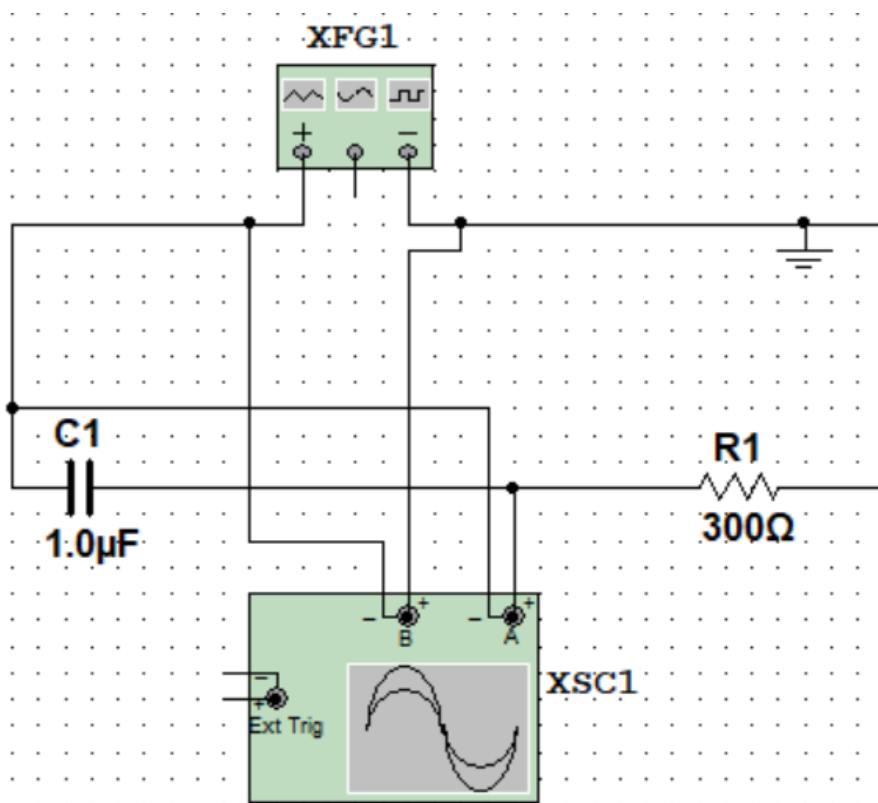


Рис.2

Содержание отчёта

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать результаты экспериментов в виде схем, таблиц, графиков, расчетов и выводов о влиянии частоты, емкости конденсаторов, величины индуктивности, сопротивлений резисторов на величину напряжений в цепи.

Лабораторная работа 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Цель работы – изучить схемотехнику электрических фильтров, приобрести навыки снятия и исследования амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров высоких частот, низких частот и полосовых (ФВЧ, ФНЧ и ПФ).

Теоретические сведения

Рабочее место для выполнения лабораторной работы включает генератор гармонических сигналов, вольтметр, осциллограф и элементы фильтров.

Генератор гармонических сигналов необходим для подачи гармонического сигнала на вход фильтра и изменения частоты этого сигнала.

Вольтметр необходим для замера напряжений на входе и выходе фильтра. Следует обращать внимание на правильную настройку вольтметра в соответствии с видом измеряемого напряжения.

Осциллограф двухканальный предназначен для наблюдения формы напряжения и его характеристик на входе фильтра и выходе. Для получения устойчивого изображения следует пользоваться регулировками осциллографа по каждому каналу отдельно

Электрическая схема лабораторного стенда для изучения ВЧ фильтра на элементах RC приведена на рис. 1. По аналогии собираются схемы других фильтров предназначенных для исследования.

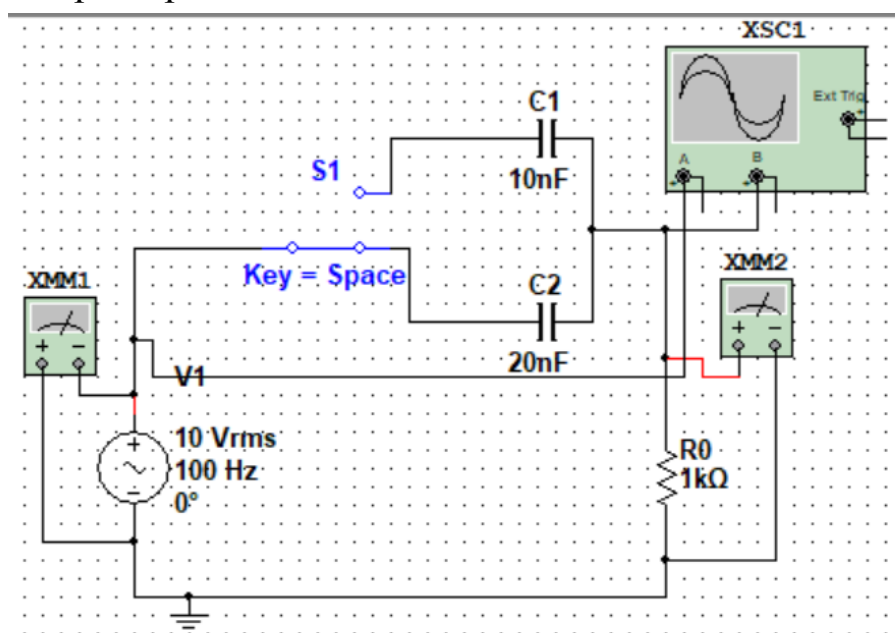


Рис. 1

Порядок выполнения работы

Порядок выполнения работы заключается в последовательном исследовании всех типов фильтров. В результате исследования представляется график АЧХ фильтра, построенного по результатам замеров. Количество измерений на должно превышать 10. Значения частот напряжения выбираются в диапазоне, позволяющим построить АЧХ, отображающую свойства фильтра. Снятие характеристик всех фильтров проводить для двух значений реактивных элементов (пары элементов), входящих в фильтр.

Следует обратить внимание на правильность построения характеристик фильтров. Все характеристики должны быть приведены к максимальному значению АЧХ. Такое приведение позволит сравнивать характеристики фильтров и выбирать требуемый фильтр.

В заключении работы сделать выводы по каждому типу фильтра.

План работы:

1. Исследование простейших RC- и RL-фильтров высоких частот.
2. Исследование простейших RC- и RL-фильтров низких частот.
3. Исследование сложных T- и П-образных ФВЧ и ФНЧ. Рис.2.

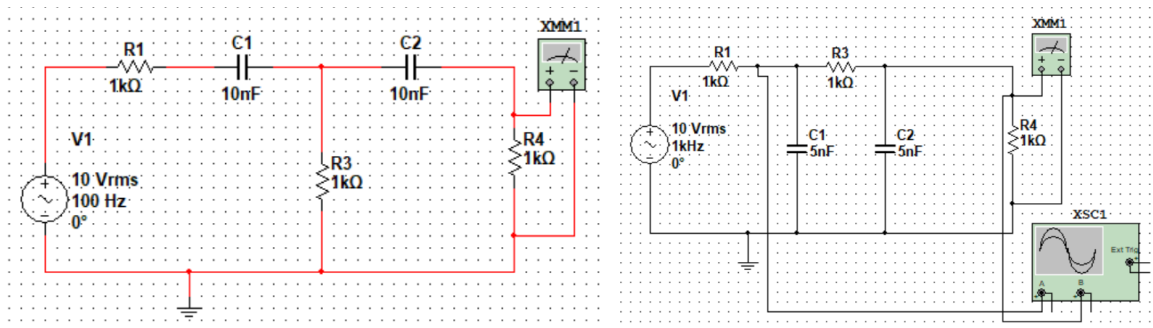


Рис.2

4. Исследование простейших резонансных фильтров, рис.3.

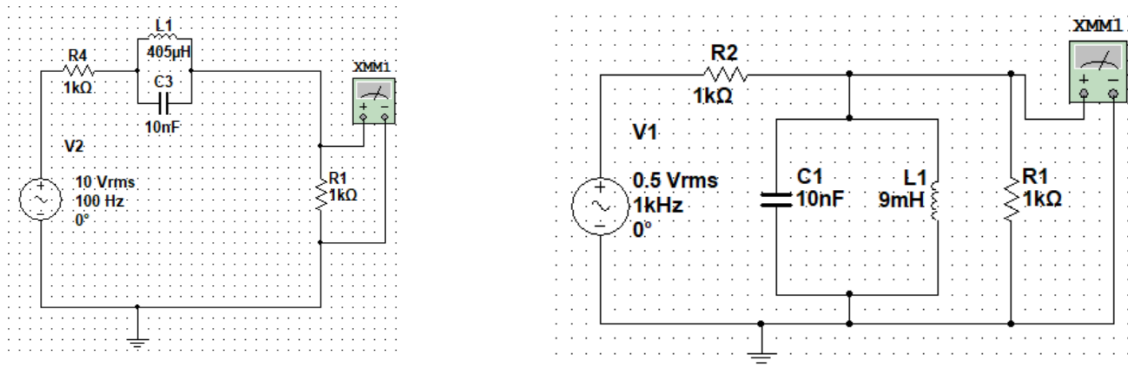


Рис. 3

Таблицы для фиксации измерений и построения графиков предлагаются следующего вида:

F, Гц									
U_{BX}									
$U_{ВЫХ}$									
$K = U_{ВЫХ}/U_{BX}$									
$\hat{K} = K/K_{max}$									

Содержание отчёта

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать результаты экспериментов в виде таблиц и графиков АЧХ фильтров с отметками граничных частот и выводы о влиянии емкостей конденсаторов, индуктивностей катушек, сложности схемы и сопротивлений нагрузки на граничные частоты фильтров.

В отчет следует включить схемы измерительных установок.

Лабораторная работа 4

СПЕКТРЫ СИГНАЛОВ

Цель работы – исследовать отличия спектрального и временного представления сигналов; освоить методику расчета амплитудных и фазовых спектров периодических сигналов; изучить основные параметры анализатора спектра и экспериментально исследовать амплитудные спектры типовых периодических сигналов.

Теоретические сведения

Рабочее место для выполнения лабораторной работы включает функциональный генератор сигналов, анализатор спектра, вольтметр и осциллограф (рис. 1). На измерительные приборы: анализатор, осциллограф и вольтметр сигнал поступает с функционального генератора.

Функциональный генератор в отличие от генератора гармонических сигналов вырабатывает различные по форме сигналы: гармонические, прямоугольные, пилообразные. Параметры сигналов устанавливаются с помощью регулировок.

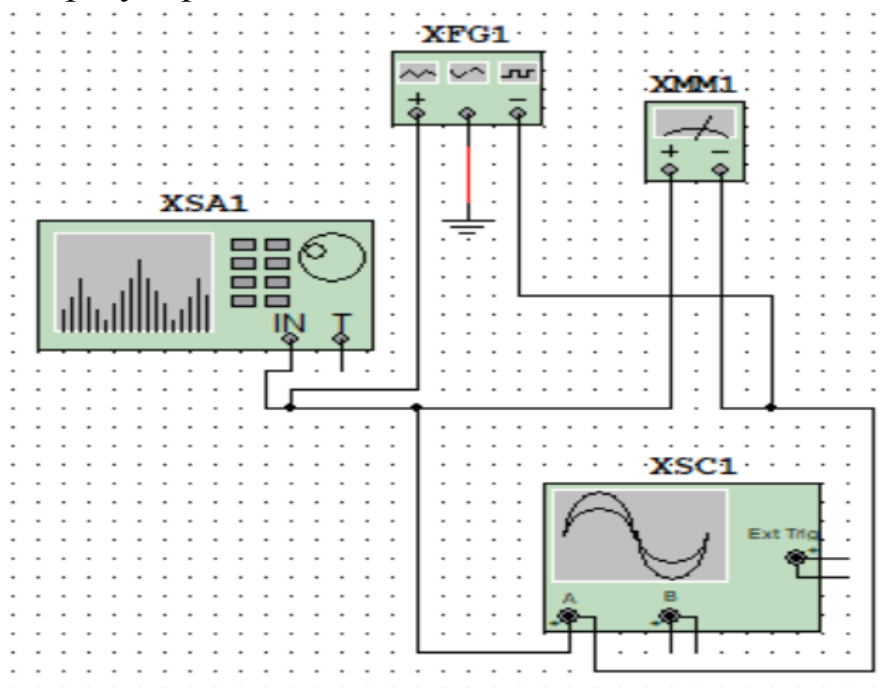


Рис. 1

Анализатор спектра предназначен для наблюдения амплитудных спектров непрерывных сигналов. Упрощенно схему анализатора спектра можно представить в виде автоматически перестраиваемого по частоте узкополосного резонансного полосового фильтра. Выходное напряжение с этого фильтра подается на пластины вертикального отклонения

электроннолучевой трубки. Чем больше амплитуда на выходе полосового фильтра, тем больше вертикальное отклонение луча на экране трубки.

Порядок выполнения работы

1. *Определение формы и спектра гармонического сигнала.* Подать от функционального генератора *гармонический* сигнал с амплитудой 1 В и с фиксированной выбранной частотой из диапазона от 2 до 10 кГц. Значение частоты должно лежать в пределах диапазона перестройки анализатора спектра по частоте. Зафиксировать форму (осциллограмму) этого сигнала с указанием масштабов по осям. Провести измерение спектра гармонического сигнала. При необходимости откалибровать анализатор спектра.

2. *Исследование зависимости спектра от формы сигнала.* Подавая на вход анализатора спектра треугольное, пилообразное и другие напряжения, генерируемые функциональным генератором, зарисовать форму и спектры сложных сигналов.

3. *Исследование спектра последовательности прямоугольных импульсов.* Подавая от генератора последовательность прямоугольных импульсов, определить зависимость спектра от частоты, длительности и амплитуды этих импульсов; зарисовать спектры и осциллограммы для трех-четырех случаев, изменяя параметры прямоугольных импульсов. Длительность импульсов регулировать путем изменения их скважности.

Содержание отчёта

Рассчитать с использованием формул, описывающих ряд Фурье, амплитудный и фазовый спектры последовательности прямоугольных импульсов для одного из вариантов экспериментального исследования (рассчитываются первые 5 гармоник, включая постоянную составляющую). Сравнить экспериментально и теоретически полученные амплитудные спектры друг с другом.

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать результаты экспериментов для каждого из исследованных сигналов в виде графиков (осциллограммы амплитудных спектров), расчетные формулы и результаты расчетов в виде таблицы и графика, выводы по лабораторной работе.

Лабораторная работа 5.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Цель работы: Экспериментально исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов. Изучить основные свойства, проводимость и параметры диодов. Исследовать практическое применение диодов в источниках питания.

Рабочее место для лабораторной работы включает персональный компьютер с предустановленной программой MultiSim 11. Для выполнения работы собирается схема, включающая исследуемый прибор, вспомогательные элементы, вольтметры, осциллограф.

Краткие теоретические сведения

К *полупроводникам* относят материалы, проводимость которых больше проводимости диэлектриков, но меньше проводимости проводников. Обычно это кристаллический материал с шириной запрещенной зоны от 0,5 до 2 эВ. В радиоэлектронике в качестве полупроводников наиболее часто используются кремний, германий, арсенид галлия, селен и др.

Полупроводник n-типа — это полупроводник с преобладающей электронной проводимостью. Преобладающая электронная проводимость возникает при добавлении донорных примесей, например пятивалентных сурьмы, мышьяка и т. п. к четырехвалентному кремнию. Атом примеси легко ионизируется, добавляя электрон к электронам собственной проводимости.

Полупроводник p-типа возникает при добавлении к химически чистому полупроводнику акцепторных примесей, например, при добавлении трехвалентных бора, алюминия и др. к четырехвалентному кремнию. Атом примеси ионизируется, принимая электрон от соседнего атома основного полупроводника и создавая тем самым дырку в полупроводнике. Примесные полупроводники называются *легированными*.

Наибольшее применение нашли полупроводники, одна часть которых легирована акцепторными примесями, а другая — донорными. Переход между двумя областями полупроводника с разными типами электропроводности называется электронно-дырочным или p-n- переходом (рис. 1).

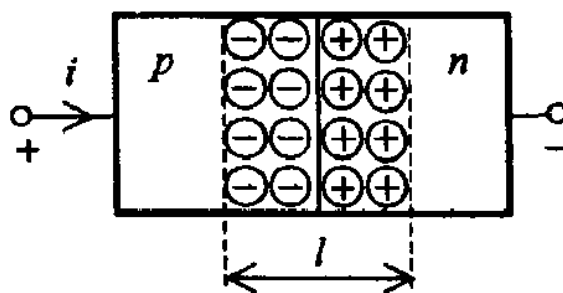


Рис. 1

После создания в полупроводнике p - и n -областей начинается *диффузионный ток* основных носителей заряда: дырок из p -области в n -область и электронов в обратном направлении. Диффундируя, электроны и дырки оставляют за собой соответственно положительно и отрицательно заряженные ионы примесей. Отметим, что эти ионы жестко закреплены в кристаллической решетке и перемещаться не могут. В n -области диффундирующие дырки рекомбинируют с электронами, резко уменьшая концентрацию электронов и дополнительно образуя нескомпенсированные положительные ионы. Аналогично в p -области диффундирующие электроны рекомбинируют с дырками, резко уменьшая концентрацию основных носителей заряда и дополнительно образуя нескомпенсированные отрицательные ионы.

Таким образом, вблизи границы p - и n -областей концентрация основных носителей заряда резко падает. Возникает обедненный носителями слой, где "обнажаются" не скомпенсированные отрицательные и положительные заряды акцепторных и донорных ионов. Ширина этого *обедненного слоя* для кремниевого перехода $l \approx 0,3$ мкм.

Появление противоположно заряженных ионов приводит к возникновению электрического поля в переходе. Это поле направлено так, что тормозит процессы диффузии. Возникшему электрическому полю соответствует *контактная разность потенциалов* ϕ_k .

Кроме p - n -перехода часто используется переход между металлом и n -полупроводником. В зависимости от используемых материалов этот переход может обладать односторонней проводимостью или иметь малое сопротивление. В первом случае выпрямляющий переход называют *переходом Шотки*. Во втором случае переход металл-полупроводник, имеющий малое сопротивление, называют *омическим*. Его используют

для создания электрических выводов из полупроводниковых областей. При изготовлении полупроводниковых приборов используется большое количество других электрических переходов, образованных различными материалами. Все эти переходы будут или омическими, или выпрямляющими.

На основе выпрямляющих переходов изготавливаются полупроводниковые диоды. *Полупроводниковый диод* — это прибор с одним выпрямляющим переходом и двумя выводами. Наибольшее распространение получили диоды, использующие *p-n*-переход. Электрод, подключенный к *p*-области, часто называют анодом, а электрод, соединенный с *n*-областью — катодом.

Реальные вольт-амперные характеристики диода приведены на рис. 2. Характерные особенности этих кривых следующие. Во-первых, при увеличении прямого напряжения экспоненциальное возрастание тока происходит только на начальном участке. В дальнейшем ток через диод увеличивается практически по линейному закону. Это объясняется наличием *объемных* сопротивлений *p*- и *n*-областей полупроводника. Во-вторых, при большом обратном напряжении возникает резкий рост обратного тока через диод. Это явление называют *пробоем диода*. Различают *лавинный* 1, *тепловой* 2 и *туннельный* 3 пробой (рис. 2).

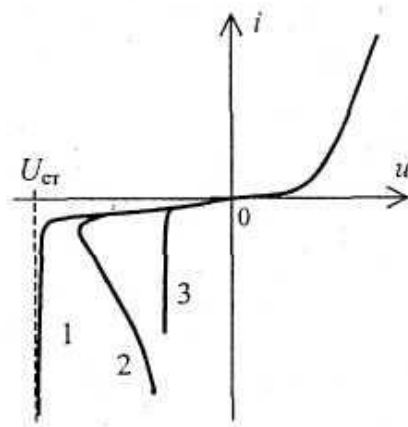


Рис. 2

Лавинный пробой возникает при большом обратном напряжении $U_{ст}$, создающем в переходе увеличенную напряженность электрического поля. В таком поле свободный электрон ускоряется и приобретает большую кинетическую энергию, достаточную для "выбивания" из атомов нескольких электронов. Появившиеся электроны, ускоряясь, выбивают

новые электроны и т. д. Развивается лавинный процесс увеличения числа электронов и, соответственно, увеличения обратного тока через диод.

Тепловой пробой возникает вследствие разогрева p - n -перехода. При этом резко возрастает число неосновных носителей, что увеличивает обратный ток и вызывает дополнительное увеличение температуры перехода.

Туннельный пробой обуславливается туннельным эффектом, возникающим в сильнолегированных, тонких p - n -переходах, внутри которых велика напряженность электрического поля и высока вероятность туннельного перехода. Как правило, только тепловой пробой вызывает необратимые изменения параметров диода. Лавинный и туннельный пробой не разрушают p - n -переход, если они не сопровождаются тепловым пробоем.

Стабилитрон — полупроводниковый диод, вольт-амперная характеристика которого имеет участок лавинного пробоя. Стабилитроны широко используются в источниках питания для получения стабильных выходных напряжений. Например, они используются в источниках питания компьютеров для создания высокостабильных напряжений питания микропроцессоров, микросхем на материнской плате, устройств внешней памяти и т. п.

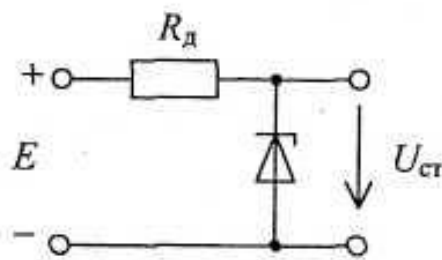


Рис. 3

Простейшая схема для получения стабилизированного напряжения приведена на рис. 3. Для ограничения тока при пробое последовательно с диодом включен дополнительный резистор. На вход схемы поступает напряжение E , величина которого нестабильна. На стабилитроне при лавинном пробое получаем стабильное выходное напряжение $U_{ст}$. Отметим, что рабочий режим стабилитрона обеспечивается подачей на диод не прямого, а обратного напряжения.

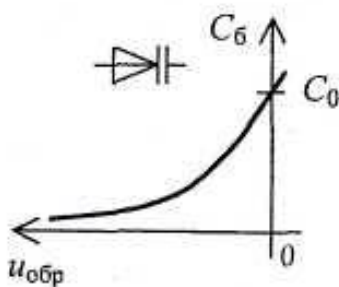


Рис. 4

Варикап — полупроводниковый диод, в котором используется зависимость барьерной емкости p - n -перехода от обратного напряжения (рис. 4). Варикап в электрических схемах, приемниках и передатчиках используется как конденсатор с изменяемой емкостью. В отличие от обычных диодов, емкость которых тоже изменяется при изменении обратного напряжения, варикапы имеют гарантированный и увеличенный диапазон изменения емкости.

Описание макета для исследования

Рабочее место для выполнения лабораторной работы включает блок питания и лабораторный стенд. Электрическая схема лабораторного стенда приведена на рис. 5.

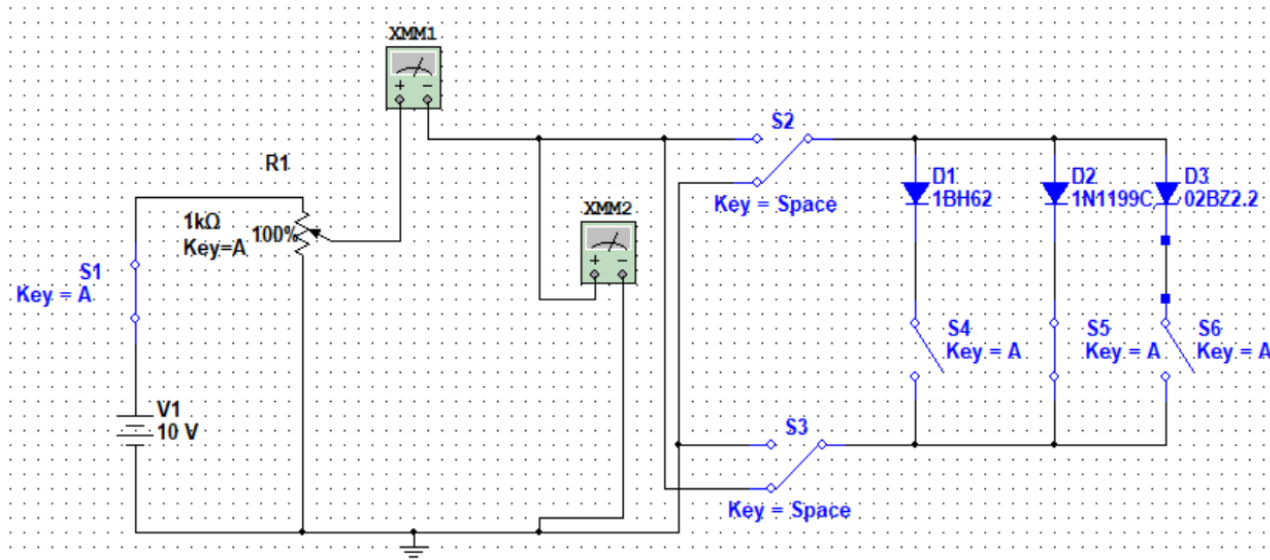


Рис. 5

С помощью переключателя S_1 на схему подается питающее напряжение. Напряжение на стенд необходимо подавать в последнюю очередь, когда все переключения в схеме уже сделаны.

Переменный резистор R предназначен для плавного изменения напряжения, подаваемого на диод. После каждого цикла измерений его

следует устанавливать в крайнее нижнее положение по схеме рис. 5. В этом случае напряжение на диодах равно нулю.

Переключатели $S_{2,3}$ позволяют получить прямое (указано на схеме рис. 5) и обратное включение диода. В схеме используются различные диоды (D_1 , D_2 и D_3). Диод D_3 – стабилитрон.

Последовательность проведения исследования

1. *Исследование прямых ветвей ВАХ диодов.* С блока питания подать на стенд напряжение 10 В. С помощью переключателя $S_{4,5,6}$ выбрать исследуемый диод. Результаты измерений вольт-амперной характеристики свести в таблицу (не менее 7 отсчетов) и построить график.

Для каждого из диодов выбрать самостоятельно рабочие точки на прямых ветвях ВАХ и в этих рабочих точках найти статические и динамические сопротивления. Сравнить сопротивления разных диодов.

Повторить измерения прямой ветви ВАХ для диодов D_2 и D_3 .

2. *Исследование обратных ветвей ВАХ полупроводниковых диодов D_1 и D_2 .* Переключатель $S_{2,3}$ "Обратное". С помощью переключателя $S_{4,5,6}$ выбрать исследуемый диод. С блока питания подать на стенд обратное напряжение 50 В. Изменяя сопротивление R , и увеличивая напряжение на диоде, фиксировать значения тока через диод. Данные (не менее 7 отсчетов) занести в таблицу. Повторить измерение обратной ветви для диода D_2 .

3. *Исследование обратной ветви ВАХ стабилитрона.* Переключатель $S_{2,3}$ установить в положение "Обратное". Выбрать исследуемый диод с помощью переключателя $S_{4,5,6}$. С блока питания подать напряжение питания 15 В. Изменяя сопротивление R , и увеличивая напряжение на диоде, фиксировать значения тока через диод. Особенно тщательно измерить ВАХ вблизи точки лавинного пробоя. Данные (не менее 8 отсчетов) занести в таблицу.

4. *Исследование стабилизированного источника питания.*

Собрать схему источника питания. Примерная схема представлена на рис.6. Используйте фильтр для получения линейного характера выпрямленного напряжения. Преобразуйте схему (рис.6) в стабилизированный источник питания.

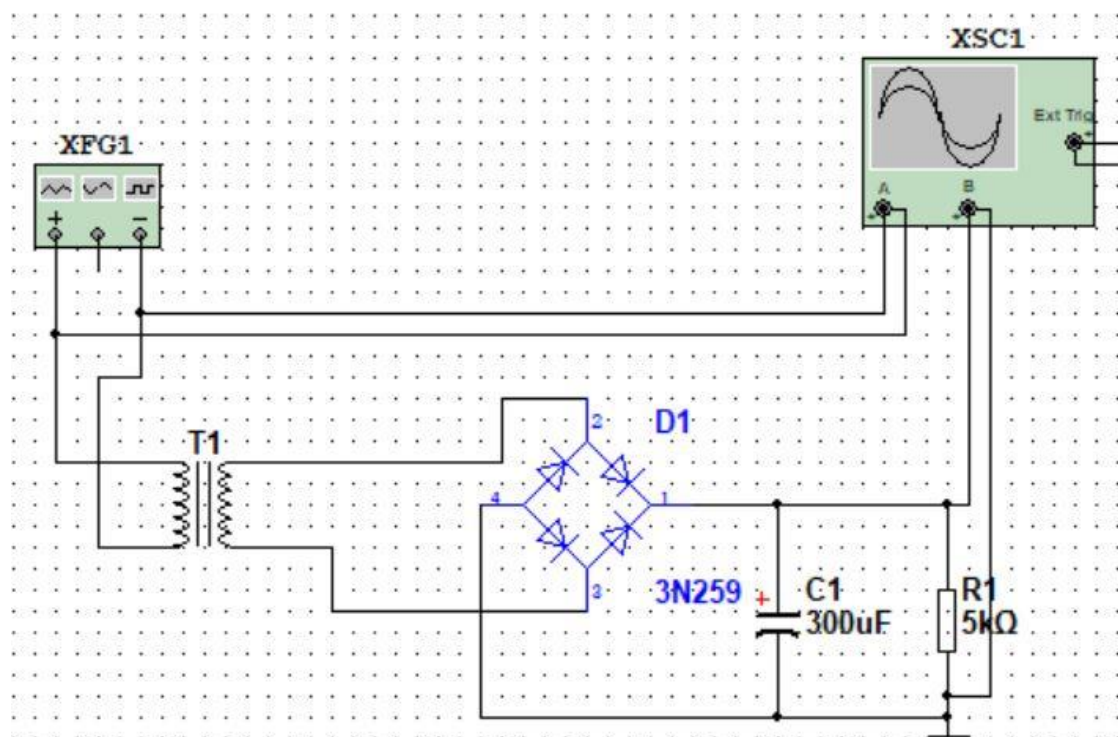


Рис. 6

Содержание отчёта

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать результаты экспериментов графики, таблицы и схемы. Расчеты статических и динамических сопротивлений. Выводы по исследованиям.

Контрольные вопросы

1. Учитывая одностороннюю проводимость диода, нарисуйте график тока через диод при подаче на него гармонического напряжения с амплитудой 5 В.
2. Как работает простая схема стабилизации напряжения? Приведите пример.
3. Как изменится напряжение стабилизации, если последовательно соединить два стабилитрона?
4. Почему не рекомендуется параллельное соединение двух стабилитронов?
5. Поясните работу источника питания по принципиальной схеме.

Лабораторная работа 6

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Цель работы

Провести экспериментальные исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзисторов и изучить основные параметры биполярных транзисторов.

Рабочее место для выполнения лабораторной работы включает персональный компьютер с предустановленной программой MultiSim 11. Для построения схемы рабочей установки понадобятся осциллограф, вольтметры, амперметры, исследуемые приборы, источники питания.

Теоретические сведения

Биполярный транзистор — это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими p - n -переходами и с тремя выводами (рис. 1). В зависимости от чередования легированных областей различают транзисторы n - p - n -типа (рис. 1 а) и p - n - p -типа (рис. 1, б).

На рис. 1, в и рис. 1, г даны условные обозначения транзисторов n - p - n - и p - n - p -типов, соответственно. На этих же рисунках обозначены выводы транзисторов: Э — эмиттер, Б — база, К — коллектор. Переход, возникающий между эмиттером и базой, называется эмиттерным переходом, а переход, возникающий между коллектором и базой — коллекторным.

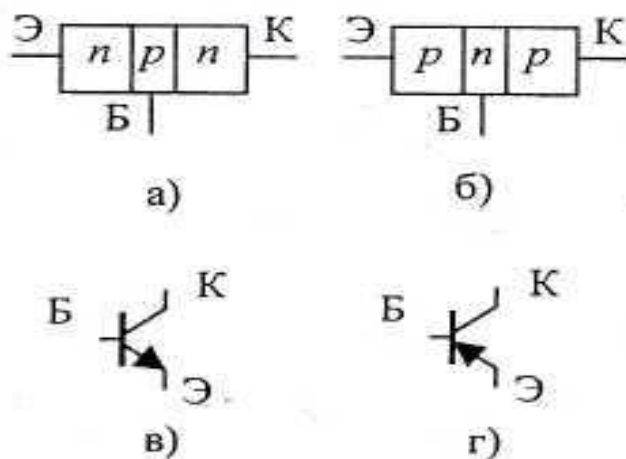


Рис. 1

На рис. 2 приведена схема включения транзистора с подключенными источниками постоянного напряжения и коллекторным резистором. В этой схеме с корпусом соединен вывод базы транзистора. Поэтому

му эту схему называют *схемой включения транзистора с общей базой (ОБ)*.

Различают четыре режима работы биполярного транзистора:

1) *активный режим* — открыт эмиттерный переход и закрыт коллекторный переход (этот режим представлен на рис. 2);

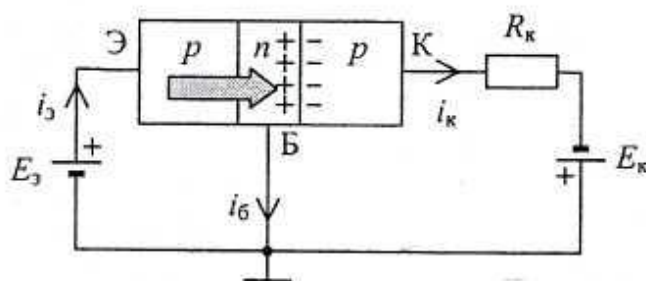


Рис. 2

2) *режим отсечки* — оба *p-n*-перехода закрыты, и существенного тока через транзистор нет (на рис. 2 для получения этого режима необходимо изменить полярность источника $E_э$ на противоположную);

3) *режим насыщения* — два *p-n*-перехода транзистора открыты и через них протекают прямые токи (на рис. 2 для получения этого режима необходимо изменить полярность источника $E_к$ на противоположную);

4) *инверсный режим* — открыт коллекторный переход и закрыт эмиттерный переход (на рис. 2 для получения этого режима необходимо изменить на противоположные полярности источников $E_к$ и $E_э$).

Для усиления и преобразования сигналов в основном используется активный режим работы. В этом режиме эмиттерный переход транзистора открыт. Открывающее напряжение равно $E_э = 0,4 \dots 0,7$ В. Через открытый эмиттерный переход течет ток $i_э$ ($i_э$ равен $0,1 \dots 10$ мА для мало-мощного транзистора).

Из анализа рис. 2 следует *уравнение для токов транзистора*:

$$i_э = i_к + i_б, \quad (1)$$

В этом уравнении ток базы много меньше тока эмиттера и тока коллектора, а ток коллектора практически равен току эмиттера транзистора.

Соотношения между токами в транзисторе характеризуются двумя параметрами: *коэффициентом передачи тока эмиттера* $\alpha = i_к / i_э$, и ко-

эффициентом передачи тока базы $\beta = i_k/i_{\text{б}}$. Используя (1), получим формулу взаимосвязи коэффициентов передачи:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Значения этих коэффициентов зависят от конструкции транзистора. Для большинства маломощных транзисторов, используемых в устройствах связи и в компьютерах, коэффициент $\beta=20\ldots200$, а коэффициент $\alpha=0,95\ldots0,995$.

Кроме рассмотренной выше схемы ОБ используются две другие схемы. При соединении с корпусом эмиттера транзистора получим схему с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 3), Схема ОЭ наиболее часто встречается на практике. При соединении с корпусом коллектора транзистора получим схему с общим коллектором (ОК). В этих схемах управляющее напряжение подается на базовый вывод транзистора.

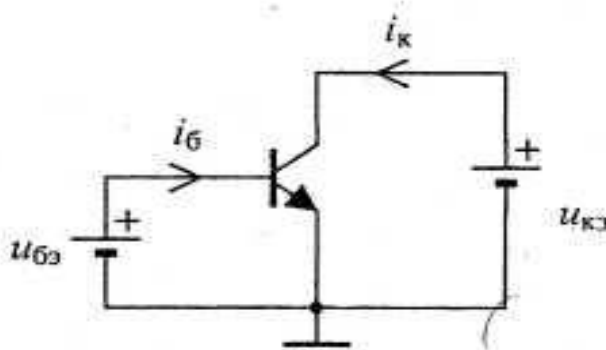


Рис. 3

Зависимости токов через выводы транзистора от приложенных к транзистору напряжений называют *вольт-амперными характеристиками (ВАХ)* транзистора.

Для схемы с общим эмиттером (рис. 3) ВАХ транзистора приведены на рис. 4, 5. Кривые рис. 4 называются *входными характеристиками* транзистора, так как они показывают зависимость входного тока от управляющего входного напряжения, подаваемого между базой и эмиттером транзистора. Входные характеристики транзистора близки к характеристикам *p-n*-перехода диодов.

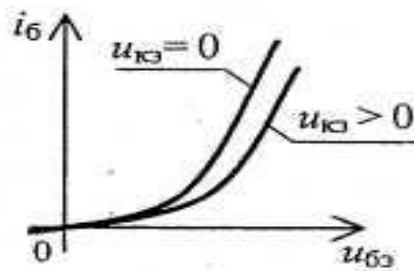


Рис. 4

Кривые рис. 5 называются *выходными характеристиками* транзистора. Их используют для определения коллекторного тока транзистора.

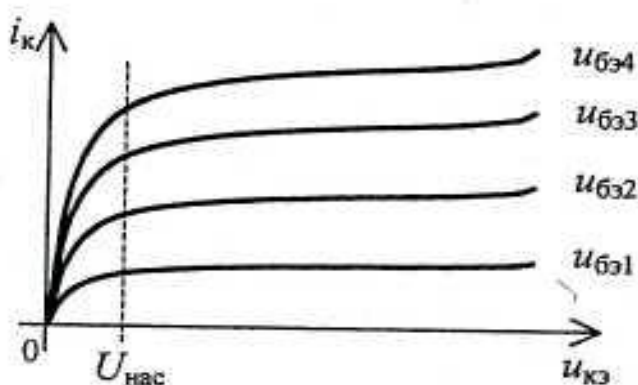


Рис. 5

Увеличению коллекторного тока на рис. 5 соответствует увеличение управляющего напряжения на базе транзистора: $u_{бэ4} > u_{бэ3} > u_{бэ2} > u_{бэ1}$.

Из анализа ВАХ транзистора следует, что транзистор, как и диод, относится к нелинейным элементам. Однако в активном режиме при $u_{кэ} > U_{нас}$ ток коллектора транзистора изменяется примерно прямо пропорционально приращению входного управляющего напряжения на базе транзистора — выходная цепь транзистора близка по свойствам к идеальному управляемому источнику тока. Ток коллектора в активном режиме практически не зависит от нагрузки, подключаемой к коллектору транзистора.

Описание макета исследования

Упрощенная электрическая схема лабораторного стенда для исследования транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ), приведена на рис. 6. С помощью переключателей S1 на схему подаются питающие напряжения.

Переменные резисторы R1 R2 предназначены для плавного изменения напряжений, подаваемых на транзистор. После каждого цикла из-

мерений их рекомендуется устанавливать в крайнее нижнее положение по схеме (рис. 6). В этом случае напряжения на выводах транзистора равны нулю. Вольтметры и миллиамперметры служат для измерения входных и выходных напряжений и токов.

Аналогичная схема используется для исследования ВАХ транзистора, включенного по схеме с общей базой (ОБ).

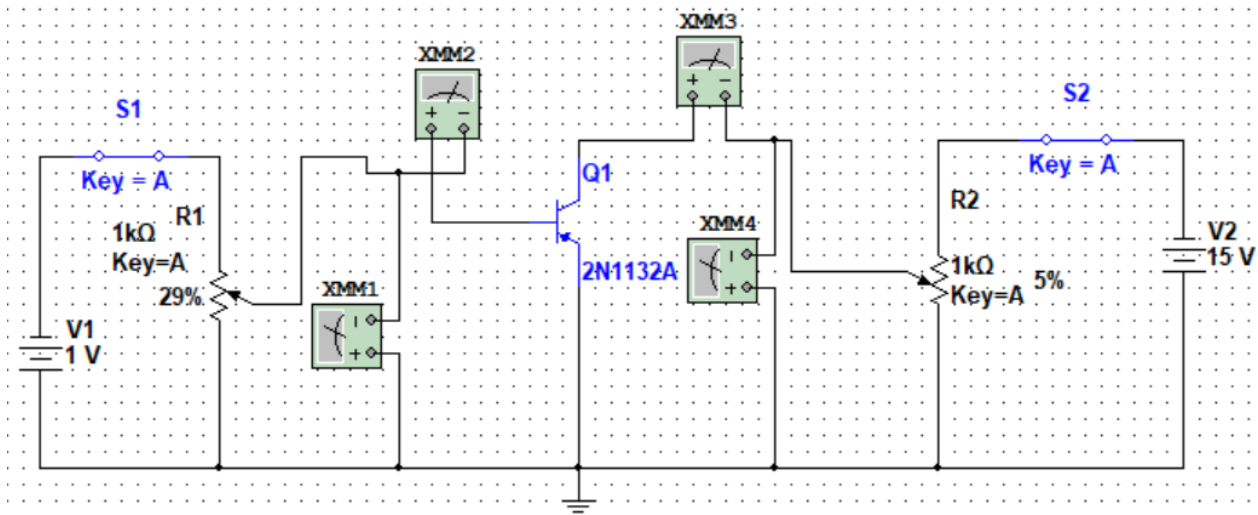


Рис. 6

Методика проведения исследования

1. Исследование ВАХ транзистора, включенного по схеме ОЭ

1.1. Исследование входных характеристик транзистора, включенного по схеме ОЭ. С блоков питания подать на клеммы E_1 напряжение 1 В, а на клеммы E_2 – напряжение 15 В. Установить напряжение на коллекторе транзистора $U_{КЭ} = 15$ В. Плавнo увеличивая напряжение на входе, снять зависимость тока базы от напряжения между базой и эмиттером: $I_B(U_{БЭ})$. Напряжение $U_{КЭ}$ при этом поддерживать постоянным. Данные (не менее 7 отсчетов) занести в таблицу. Повторить измерения при $U_{КЭ}$, равном 10 В и 5 В.

1.2. Исследование выходных характеристик транзистора, включенного по схеме ОЭ. Установить ток базы $I_B = 0,1$ мА. Плавнo увеличивая напряжение на коллекторе $U_{КЭ}$, снять зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе: $I_K(U_{КЭ})$. Входной ток при измерениях поддерживать постоянным. Данные (примерно 7 отсчетов) занести в таблицу. Повторить измерения для $I_B = 0,15$ мА и 0,2 мА (или 0,05 мА).

2. Исследование ВАХ транзистора, включенного по схеме ОБ

2.1. Исследование входных характеристик транзистора, включенного по схеме ОБ. Установить напряжение на коллекторе транзистора $U_{КБ} = 15$ В. Плавнo увеличивая напряжение на входе, снять зависимость тока эмиттера от напряжения между эмиттером и базой: $I_E(U_{БЭ})$. Напряжение $U_{КБ}$ при этом поддерживать постоянным. Данные (не менее 7 отсчетов) занести в таблицу. Повторить измерения для $U_{КБ}$, равном 10 В и 5 В.

2.2. Исследование выходных характеристик транзистора, включенного по схеме ОБ. Установить ток эмиттера $I_E = 2$ мА. Плавнo увеличивая напряжение на коллекторе $U_{КБ}$, снять зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе: $I_K(U_{КБ})$. Входной эмиттерный ток при измерениях поддерживать постоянным. Данные (5...7 отсчетов) занести в таблицу. Повторить измерения для тока эмиттера I_E , равном 4 мА и 8 мА.

Порядок выполнения работы

1. Создайте модель исследуемой цепи, согласно рис. 6 в программе Multisim.

2. Проведите исследования входных характеристик транзистора, включенного по схеме ОЭ для $U_{КЭ}=15$ В, 10 В и 5 В. Результаты исследования занесите в таблицу 1 и постройте графики.

Таблица 1

Напряжение $U_{БЭ}$, В							
Ток I_B , мА							

3. Проведите исследования выходных характеристик транзистора, включенного по схеме ОЭ. Для $I_B = 0,1$ мА, 0,15 мА и 0,2 мА результаты исследования занесите в таблицу 2 и постройте графики.

Таблица 2

Напряжение $U_{КЭ}$, В							
Ток I_K , мА							

4. Проведите исследования входных характеристик транзистора, включенного по схеме ОБ (рис. 7). Для $U_{КБ}=15$ В, 10 В и 5 В результаты исследования занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Напряжение $U_{БЭ}$, В							
-------------------------	--	--	--	--	--	--	--

Ток $I_{Э}$, мА							
------------------	--	--	--	--	--	--	--

5. Проведите исследования выходных характеристик транзистора, включенного по схеме ОЭ. Для $I_{Э} = 2$ мА, 4 мА и 8 мА результаты исследования занесите в таблицу 4.

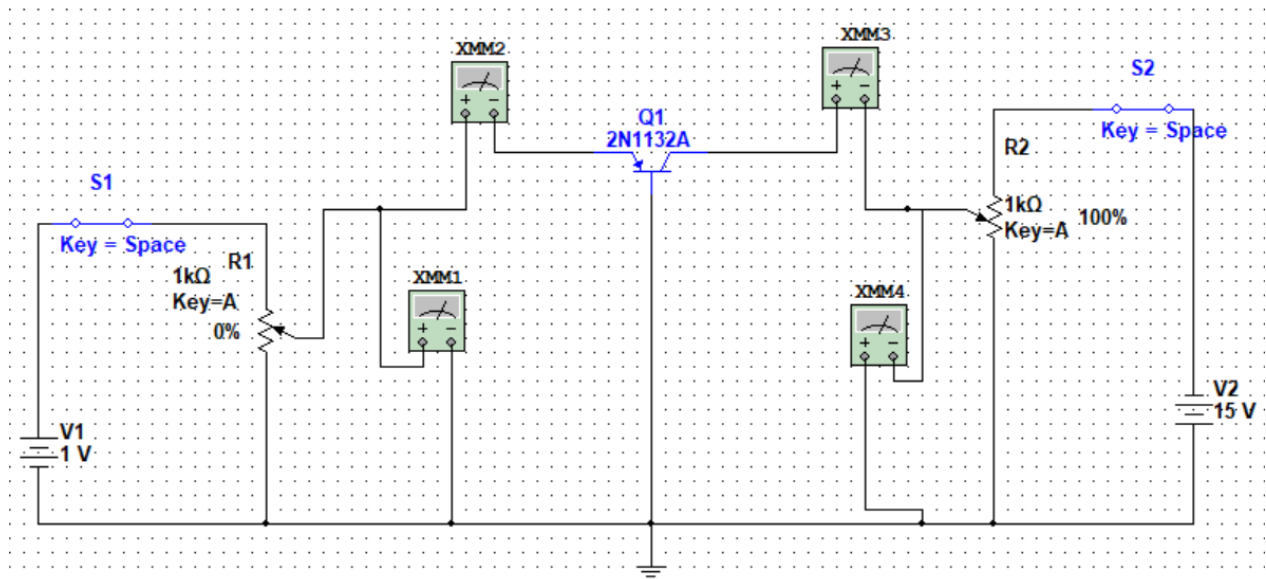


Рис. 7

Таблица 4

Напряжение $U_{КБ}$, В							
Ток $I_{К}$, мА							

6. Рассчитайте коэффициенты α и β транзистора в выбранных рабочих точках.

7. Составьте отчет по работе.

8. Представьте отчет к защите.

Содержание отчёта

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать схему измерения ВАХ транзистора, включенного по схеме ОЭ, схему измерения ВАХ транзистора, включенного по схеме ОБ, результаты экспериментов и рассчитанные коэффициенты α и β транзистора в самостоятельно выбранных точках характеристик.

Контрольные вопросы

1. Как влияет толщина базы биполярного транзистора на его усилительные свойства?

2. Почему два последовательно соединенных диода, имея похожую с транзистором структуру, не позволяют получить усиление мощности?

3. Объясните отличие процессов управления током стока в полевых транзисторах с p - n -переходом и в транзисторах с изолированным затвором.

4. Перечислите все разновидности биполярных и полевых транзисторов. Приведите их условные обозначения.

5. Чем вольт-амперные характеристики биполярного транзистора отличаются от вольт-амперных характеристик полевого транзистора?

РЕЗИСТИВНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ НА ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы

Изучить схемотехнику простейшего усилителя на биполярном транзисторе. Получить представление о принципе работы малых систем автоматического регулирования на примере схемы температурной стабилизации транзистора резистивного усилителя. Экспериментально снять и исследовать амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилительного каскада.

Теоретические сведения

Резистивный усилитель — это усилитель, у которого в качестве нагрузки используются резисторы. Так как в этом усилителе из-за отсутствия катушек индуктивности (индуктивностью выводов элементов пренебрегаем) не возникает колебательных процессов, то резистивный усилитель часто называют апериодическим усилителем. Резисторы в резистивном усилителе используются в качестве внутренней и внешней нагрузки.

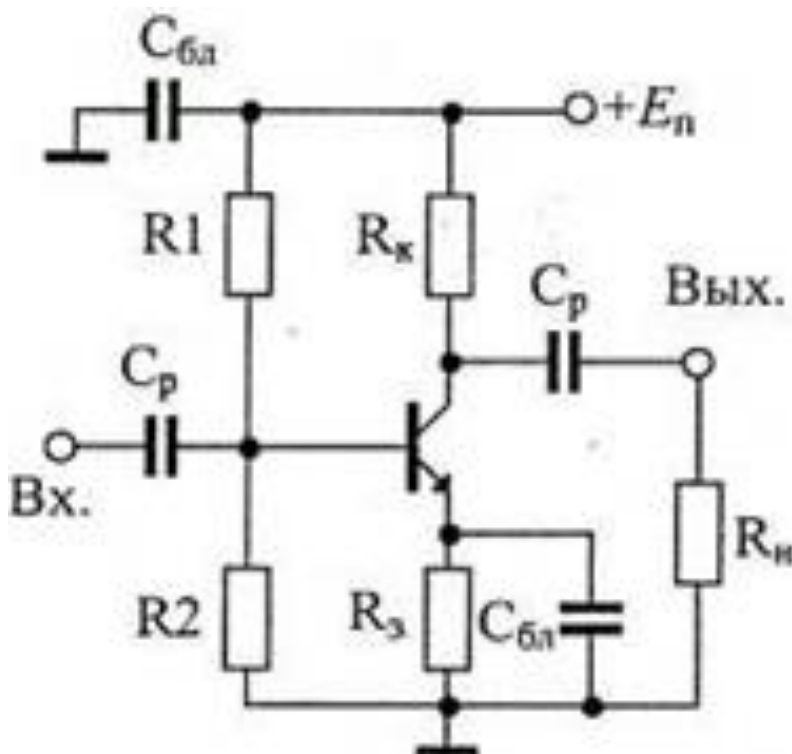


Рис. 1

На рис. 1 приведена наиболее часто используемая схема однокаскадного резистивного усилителя с общим эмиттером (ОЭ). Схема с ОЭ

при прочих равных условиях дает наибольший коэффициент усиления по мощности, т.к. происходит усиление и тока и напряжения. В качестве внутренней и внешней нагрузки используются резисторы R_K и R_H соответственно. Вместо R_H может использоваться громкоговоритель, реле, линия связи и т. п.

Особенности данной схемы. Первая — использование вместо источника смещения $E_{бэ}$ резистивного делителя напряжения, состоящего из резисторов $R1$ и $R2$. Сопротивления резисторов делителя подбирают так, чтобы на базу относительно эмиттера подавалось напряжение равное открывающему напряжению $E_{бэ} = 0,5 \dots 0,8$ В.

Вторая отличительная особенность схемы на рис. 1 — использование резистора $R_э$. Сопротивление этого резистора равно $R_э = 0,1 \dots 1$ кОм. Его назначение — обеспечить температурную стабилизацию параметров каскада. Сопротивление $R_э$ с параллельно включенным конденсатором $C_{бл}$ называют цепочкой автоматического смещения.

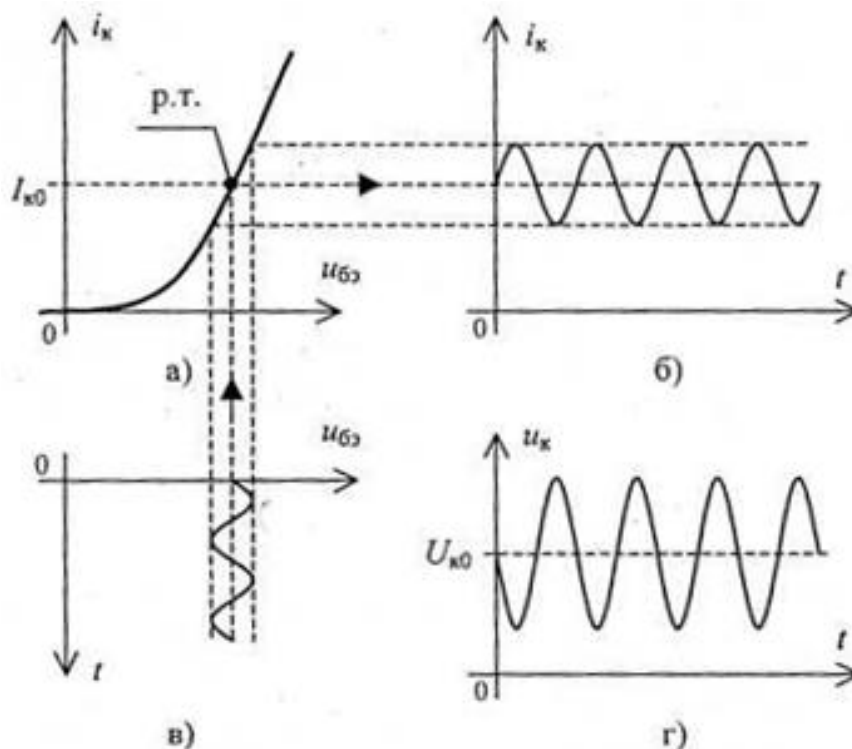


Рис. 2

Работа резистивного усилителя при подаче на вход гармонического сигнала иллюстрируется диаграммой токов и напряжений, показанной на рис. 2 а, б, в, г. На рис. 2а приведена *передаточная характеристика* транзистора. Это зависимость выходного тока коллектора от управляю-

щего напряжения между базой и эмиттером. На характеристике показана рабочая точка, соответствующая открывающему напряжению $E_{бэ} = 0,5 \dots 0,8$ В и постоянному току коллектора $I_{к0}$ (для маломощных транзисторов $I_{к0} = 0,1 \dots 10$ мА).

На рис. 2в приведена зависимость от времени напряжения на базе транзистора, равного сумме напряжения смещения $E_{бэ}$ и входного переменного сигнала. Амплитуда переменного сигнала для обеспечения линейного режима работы усилителя не должна превышать 0,1 В. Зависимость тока коллектора от времени, показана на рис. 2б. График получен на основе кривых рис. 2а и рис. 2в. Порядок построения показан стрелками и пунктирными линиями.

Как видим, при увеличении входного напряжения увеличивается ток коллектора транзистора. Переменная составляющая этого тока, протекая по резисторам R_K и R_H , создает на коллекторе транзистора переменное напряжение, показанное на рис. 2г. Отметим, что при увеличении тока коллектора напряжение на коллекторе уменьшается, так как увеличивается падение напряжения на резисторах R_K и R_H , – так возникает дополнительный фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями, равный 180° . Напряжение на выходе усилителя, возникающее на резисторе R_H , будет содержать только переменную составляющую. Постоянное напряжение на коллекторе транзистора, равное $U_{к0} = E_n - R_K I_{к0}$, отделено от резистора R_H выходным разделительным конденсатором.

АЧХ усилителя во многом зависит от характеристик транзистора и величин переходных емкостей.

Описание макета исследования

Рабочее место для выполнения лабораторной работы включает генератор гармонических сигналов, осциллограф, построитель частотных характеристик, блок питания и непосредственно схема усилителя. Электрическая схема лабораторного стенда приведена на рис. 3.

Резисторы R1 и R2 образуют делитель напряжения, который подает напряжение смещения на базу транзистора. Резистор R3 – нагрузочный, R4 = 2 кОм обеспечивает температурную стабилизацию каскада. Конденсаторы C1 и C3 = 1 мкФ – разделительные, C2 = 10 нФ и C4 =

100 нФ – блокировочные, C5 – шунтирующий, включён для ограничения полосы пропускания в области высоких частот.

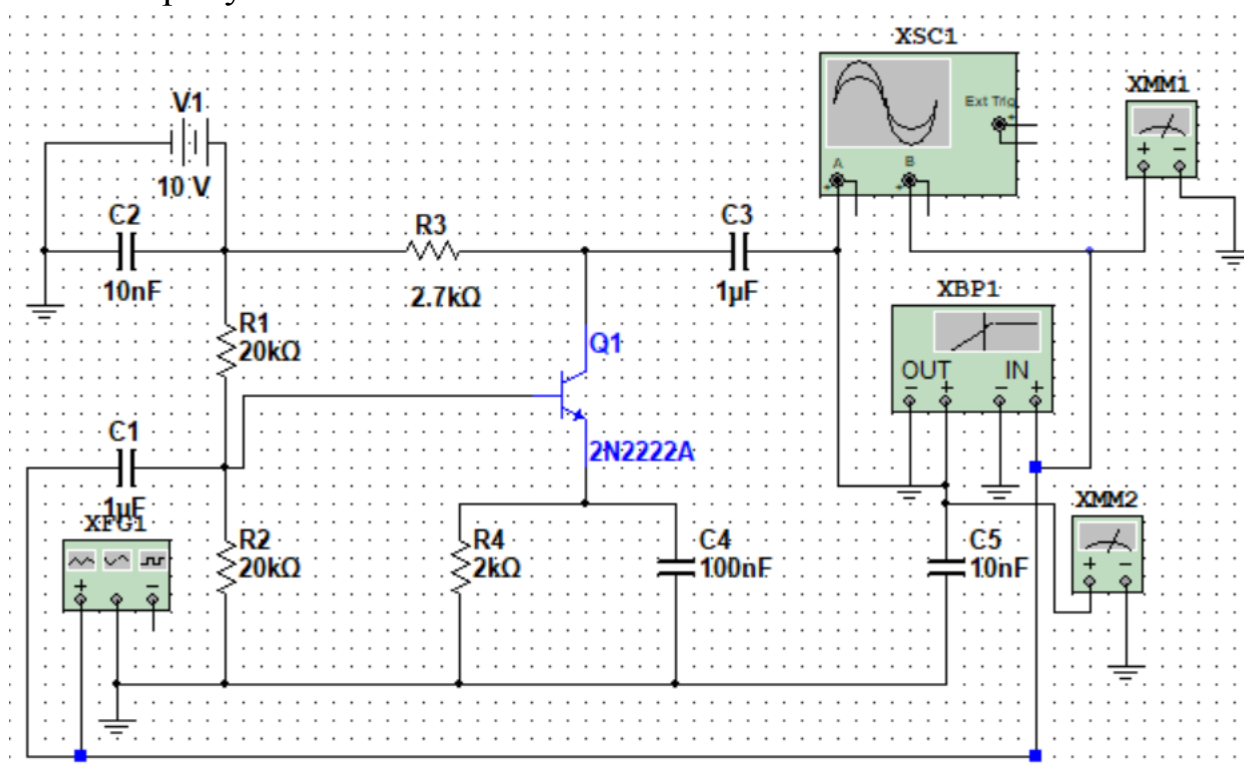


Рис. 3

Методика и последовательность проведения исследования

1. Исследование резистивного усилителя.

Установить малый уровень входного напряжения (от 5 до 50 мВ) универсального генератора гармонических сигналов для обеспечения работы усилителя в **линейном** режиме. При исследовании АЧХ частоту входного сигнала плавно изменять от низкой (100 Гц) до высокой (100...200 кГц). Число экспериментальных значений нужно увеличивать в областях низких и высоких частот (где АЧХ изменяется быстрее) и уменьшать в области средних частот усилителя. Общее число отсчетов АЧХ должно быть не менее 10..12. Построить АЧХ. Результаты измерений занести в таблицу. Убедится в сдвиге выходного сигнала на 180° .

2. Исследование влияния на АЧХ усилителя разделительных конденсаторов C1, C3.

Снять АЧХ для разных значений C1 (0,005 мкФ и 1 мкФ). Сравнить эти характеристики и сделать выводы. Снять АЧХ при величине C1 1 мкФ и величин емкости C3 0,001 мкФ и 0,8 мкФ. Сравнить характеристики и сделать выводы.

3. Исследование АЧХ усилителя при изменении C_4 и R_4 .

Изменяя емкость разделительного конденсатора C_4 исследовать его влияние на КУ усилителя. Обратить внимание, что усиленный сигнал должен быть гармоническим.

Провести исследование влияния величины сопротивления R_4 на КУ усилителя. Сделать выводы, объяснить физику процесса. Предложить практическое применение этого свойства.

4. Исследование АЧХ резонансного усилителя (рис. 4).

Собрать схему резонансного усилителя. Построить АЧХ. Определить резонансную частоту, полосу пропускания по графику и теоретически. Сравнить результаты. Сделать выводы.

Содержание отчёта

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать результаты экспериментов в виде рисунков, таблиц, расчетов и графиков АЧХ усилителя. Представить выводы по пунктам исследований и предложения по практическому использованию некоторых свойств усилителя.

Контрольные вопросы

1. Какой из усилителей: ОЭ, ОБ или ОК, потребляет от источника входного сигнала минимальный ток, а какой — максимальный?
2. Какой из двух усилителей: резистивный или резонансный следует использовать для усиления речевого сигнала, а какой — для усиления сигнала телевизионной станции? Что случится, если выбор усилителя будет сделан ошибочно?
3. Как используются резонансные явления в параллельном колебательном контуре для построения резонансного усилителя?
4. Предложите способ увеличения полосы пропускания резонансного усилителя.

Лабораторная работа 8

РС-АВТОГЕНЕРАТОР

Цель работы

Изучить процесс усиления и самовозбуждения генератора на операционном усилителе с цепями отрицательной и положительной обратной связями.

Теоретические сведения

Автогенератор — это устройство, в котором самопроизвольно (но не беспричинно) возникают, растут и устанавливаются колебания. Первопричинами, обуславливающими возникновение автоколебаний, являются внутренние шумы в автогенераторе, переходные процессы, возникающие в схеме при включении питания, а также помехи, наводки и т. п.. В автогенераторе осуществляется преобразование энергии источника питания в энергию колебаний. Автогенератор — одно из основных устройств в радиоэлектронике. Именно автогенераторы вырабатывают тактовую частоту, синхронизирующую работу устройств сложных электронных систем (компьютеры, смартфоны, модемы, электронные часы и т.д.).

Для построения автогенераторов используются *неустойчивые* электрические цепи, в которых после окончания малого по величине возмущения амплитуда оставшихся колебаний возрастает с течением времени. Для этого в схеме создаются условия. В общем случае, таких условий два — это амплитудные и фазовые условия. Эти условия выполняемы при формировании положительной обратной связи в схеме. Теоретическое доказательство необходимости этих двух условий достаточно сложное. Но оно существует. Для этого колебания в нелинейной электрической цепи представляются в виде дифференциального уравнения и далее решается уравнение с некоторыми предположениями и допущениями.

После самовозбуждения автогенератора колебания на его выходе с течением времени быстро возрастают. Как только амплитуда этих колебаний превысит 0,1 В из-за нелинейности ВАХ диодов или транзисторов, рост амплитуды колебаний в автогенераторе вначале замедляется, а затем, как показывает практика, прекращается. Наступает *стационарный*

(установившийся) режим работы автогенератора. В этом случае автогенератор будет преобразовывать в энергию колебаний максимально возможную часть энергии источника питания. В стационарном режиме автогенератор характеризуется двумя основными параметрами — частотой и амплитудой колебаний.

Пусть в автогенераторе с внешней обратной связью установились колебания. Напряжение обратной связи в автогенераторе будет равно напряжению на входе усилителя: $\dot{U}_{yc} = \dot{U}_{oc}$. Выходное напряжение автогенератора равно $\dot{U}_{вых} = K\dot{U}_{yc}$. Но выходное напряжение автогенератора является входным для цепи обратной связи. Поэтому напряжение на выходе цепи ОС равно $\dot{U}_{oc} = \beta\dot{U}_{вых}$. Перемножая левые и правые части двух последних формул, получим *уравнение стационарности автогенератора*

$$\beta K = 1 \quad (1)$$

Представляя все составляющие в формуле (1) в показательной форме: $K = Ke^{j\varphi_K}$; $\beta = \beta e^{j\varphi_{oc}}$; $1 = 1e^{+j0}e^{+j0}$, из равенства для комплексных величин получим два равенства для вещественных величин: *уравнение баланса амплитуд*

$$K\beta = 1 \quad (2)$$

и *уравнение баланса фаз*

$$\varphi_{oc} + \varphi_K = 0 \pm 2\pi n, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Из уравнения баланса амплитуд (2) следует, что в стационарном состоянии автогенератора во сколько раз усилитель увеличит амплитуду сигнала, во столько раз цепь обратной связи уменьшит эту амплитуду. При самовозбуждении произведение $K\beta$, как правило, много больше единицы из-за большого коэффициента усиления усилителя. При возрастании амплитуды колебаний транзисторы усилителя входят в нелинейный режим работы. В течение некоторой части периода в этом режиме транзистор практически закрыт и не усиливает сигнал. Поэтому с ростом амплитуды колебаний в автогенераторе коэффициент усиления усилителя K при $U_{yc} > 0,1$ В уменьшается. (рис. 2).

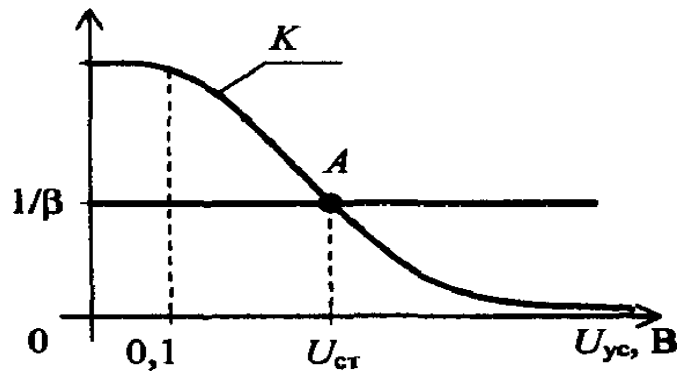


Рис. 2

Коэффициент передачи цепи обратной связи от амплитуды колебаний, как правило, не зависит, так как эта цепь выполняется с использованием пассивных элементов: резисторов, катушек и конденсаторов. На рис. 2 показана *прямая обратной связи*, соответствующая постоянной величине $1/\beta$. Точка А на этом рисунке определяет баланс амплитуд. В этой точке имеем $K\beta=1$. Амплитуда колебаний $U_{ст}$ на входе усилителя, соответствующая этой точке, равна стационарной установившейся амплитуде колебаний на входе автогенератора.

Из анализа уравнения баланса фаз (3) следует, что в автогенераторе устанавливаются такие и только такие колебания, у которых фазовый сдвиг, внесенный усилителем, компенсируется фазовым сдвигом, внесенным цепью обратной связи.

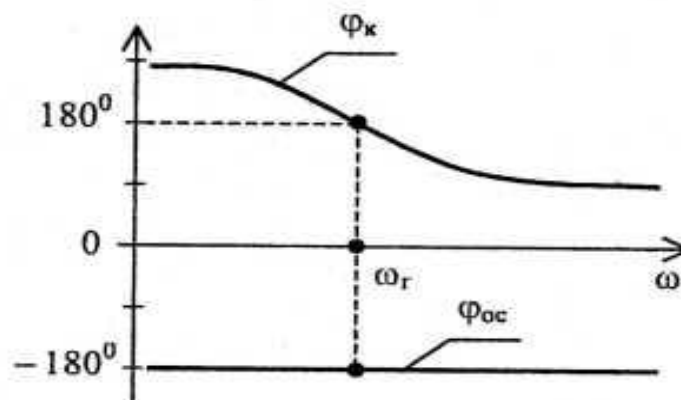


Рис. 3

Баланс фаз иллюстрируется на рис. 3. Из анализа графиков следует, что колебания возникают на единственной частоте $\omega_г$, на которой фазовый сдвиг в усилителе, равный $+180^\circ$, компенсируется фазовым сдвигом в цепи ОС, равным -180° .

В радиоэлектронике часто используется *RC-автогенератор* на

операционном усилителе, электрическая схема которого показана на рис. 4.

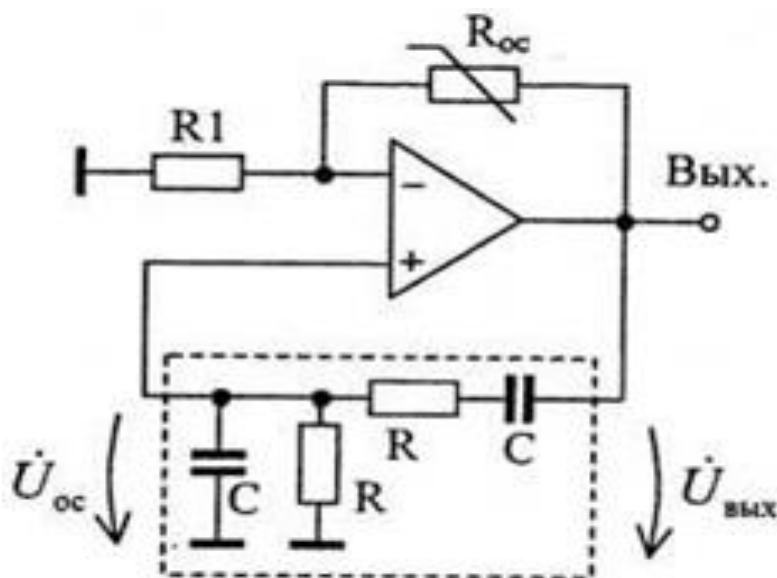


Рис. 4

На практике в качестве нелинейного резистора можно использовать терморезистор или два встречно-параллельно соединенных диода (анод первого из диодов должен быть подключен к катоду второго диода, а анод второго — к катоду первого).

Цепь положительной обратной связи автогенератора составлена из резисторов и конденсаторов. Используя законы Ома и Кирхгофа, можно рассчитать коэффициент передачи цепи положительной обратной связи:

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}_{вых}} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}.$$

Частоту колебаний RC -автогенератора можно перестраивать, если использовать сдвоенные переменные резисторы или сдвоенные переменные конденсаторы.

Описание макета для исследования

Макет для выполнения лабораторной работы включает генератор гармонических сигналов, осциллограф, построитель частотных характеристик, частотомер, вольтметры и непосредственно схема автогенератора. Электрическая схема лабораторного стенда приведена на рис. 5.

Схема RC - автогенератора построена на операционном усилителе (ОУ) U1. Численные значения параметров цепи: $R3 = 10 \text{ кОм}$, $R4 = 40 \text{ кОм}$, $C3 = 15 \text{ мкФ}$, D1 и D2 – модель ideal, U1 – LM741.

С помощью переключателей стенда можно осуществить три режима работы схемы.

1. Режим установившихся автоколебаний. Это основной режим работы автогенератора. В этом режиме в цепи отрицательной обратной связи (ООС) с помощью переключателя J2 подключаются R4. Переключатель J1 устанавливается в положении "замкнуто". При этом подключается цепь ПОС. Универсальный генератор отключается переключателем J3.

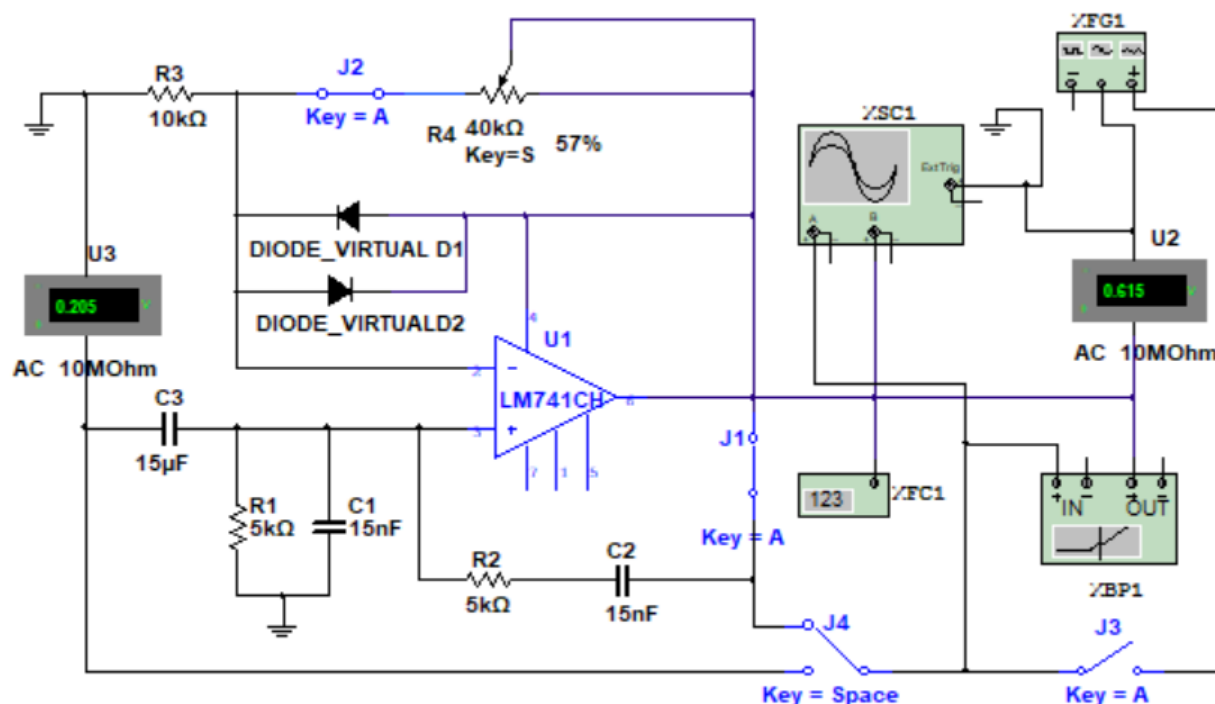


Рис. 5.

2. Режим усилителя с линейной отрицательной обратной связью. Этот режим отличается от предыдущего. Автогенерация не происходит. Сигнал на вход усилителя подается от универсального генератора. Переход в режим усиления осуществляется установкой переключателя J1 в положение выключено. Переключателями J3 и J4 формируется цепь подачи сигнала с усилителя на вход.

3. Режим нелинейного усилителя. В этом случае цепь положительной обратной связи размыкается: ключ J1 устанавливаем в положение "Отключено". Автоколебания в устройстве отсутствуют. Переключателем J2 отключаем от ОУ R4. Получаем схему нелинейного усилителя с ООС. На вход ОУ подаем колебания от внешнего генератора. Выходное негармоническое напряжение на усилителе измеряем с помощью

вольтметра (осциллографа).

Методика проведения исследования

1. Исследовать работу автогенератора. Получить гармонические колебания. Регулируя цепь ООС добиться изменения амплитуды колебаний. Зафиксировать результат рисунками. Изменяя параметры элементов цепи обратной связи получите другую частоту генерируемых колебаний. Сделайте выводы, представьте рисунки в отчете.

2. Сформируйте режим усиления с линейной ООС. Исследуйте влияние параметров цепи ООС на амплитуду и форму усиливаемого сигнала. Сделайте выводы, представьте рисунки в отчете.

3. Режим нелинейного усилителя.

Для формирования режима – отключить линейную ООС. Исследовать выходное напряжение усилителя. Измерить параметры, сделать выводы. Предложить использование негармонического сигнала на практике.

Содержание отчёта

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать результаты экспериментов, выводы и предложения. В отчете представляются характеристики схемы (АЧХ), измеренные прибором, значения частот генерируемых автогенератором для различных условий самовозбуждения..

Контрольные вопросы

1. При каком коэффициенте усиления усилителя и при каком коэффициенте ПОС возникает самовозбуждение? Каковы при этом должны быть фазовые сдвиги, вносимые усилителем и цепью ОС?

2. Зачем в автогенераторах после самовозбуждения используется отрицательная нелинейная ОС или нелинейный режим работы?

3. При каком коэффициенте усиления усилителя в автогенераторе устанавливается стационарный режим работы?

4. Чем условия стационарности отличаются от условий самовозбуждения?

Лабораторная работа 9
ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ
Цель работы

Исследовать статические и динамические параметры логических элементов (ЛЭ) транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). Изучить функционирование дешифратора.

Теоретические сведения

В цифровых устройствах, в компьютерах используются *импульсные сигналы* (рис. 1). В этом случае для передачи информации используется факт наличия или отсутствия импульса.

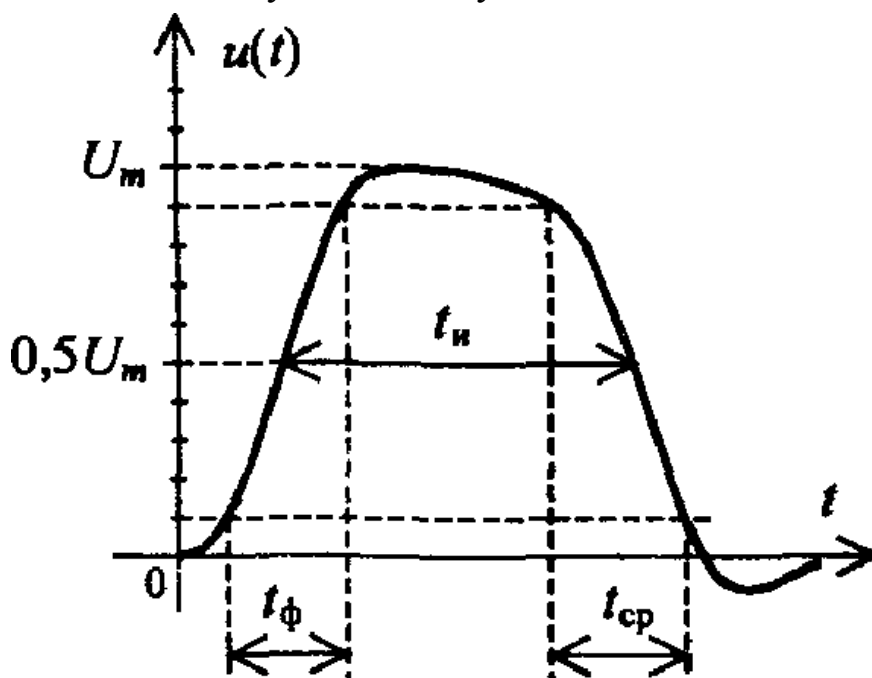


Рис. 1

Реальный импульсный сигнал, показанный на рис. 1, характеризуется следующими параметрами: U_m — амплитуда импульса, t_u — длительность импульса, определяемая по уровню 0,5 от амплитуды импульса, t_ϕ — длительность переднего фронта, $t_{ср}$ — длительность заднего фронта (среза) импульса. Длительности переднего и заднего фронтов определяются по уровням $0,1 U_m$ и $0,9 U_m$.

Именно суммарная длительность фронтов определяет предел быстродействия цифровых устройств. Чем меньше этот параметр — тем быстрее могут работать цифровые устройства. В современных сложных системах этот предел для существующей элементной базы практически достигнут. Дальнейшее повышение скорости возможно на других физи-

ческих принципах.

Как правило, значения сигнала с уровнем меньшим $0,1U_M$ соответствуют отсутствию импульса — логическому нулю (в положительной логике). Если уровень сигнала превышает $0,9U_M$, то импульс считается присутствующим — его значение соответствует логической единице (в положительной логике). Импульсные сигналы, по сравнению с аналоговыми, обладают информационной избыточностью. Но при этом импульсные сигналы с большей надежностью сохраняют информацию о логическом значении в условиях воздействия помех, наводок и шумов.

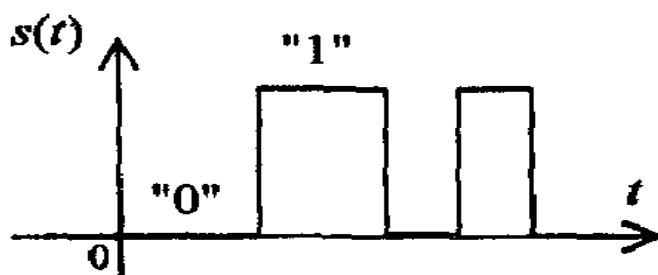


Рис 2

Используемые в ЭВМ импульсные сигналы несут двоичную информацию — большим значениям приписывается значение логической единицы, а малым — логического нуля (здесь и далее используем положительную логику). Импульсному сигналу соответствует в этом случае *логический сигнал* (рис. 2), равный в некоторые моменты времени логической единице, а в другие — логическому нулю. Отметим, что для простоты временные интервалы, при которых значение логического сигнала не определено, на рис. 2 не показаны.

Электронный ключ — это устройство, выполненное, как правило, на транзисторе и предназначенное для получения импульсного (логического) сигнала. Электронный ключ — основа для построения более сложных цифровых устройств, включая микропроцессоры.

Простейшая схема ключа на биполярном транзисторе с резистивной нагрузкой приведена на рис. 3. Аналогично строится схема простейшего ключа на полевом транзисторе. На входе ключа включен источник сигнала с внутренним сопротивлением, равным R_C . Нагрузкой каскада служит резистор R_K . Внешняя нагрузка для простоты не учитывается.

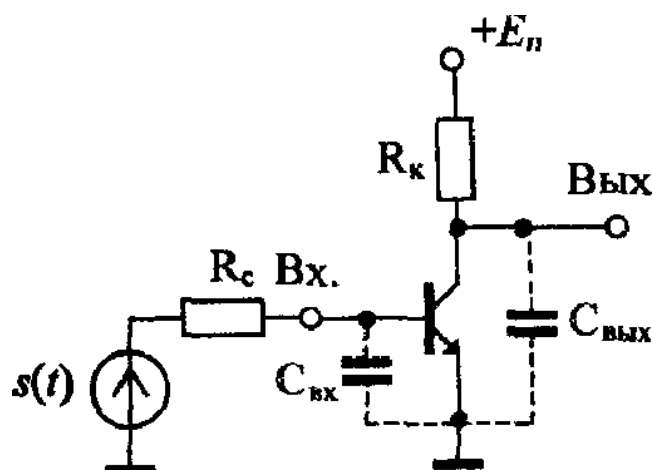


Рис. 3

На схеме пунктирными линиями показаны две паразитные емкости. Входная емкость $C_{вх}$ включает в себя емкость эмиттерного перехода и емкость монтажа, возникающую между элементами входной цепи и корпусом устройства. Выходная емкость $C_{вых}$ образована емкостью между коллектором и эмиттером транзистора и емкостью монтажа в выходной цепи.

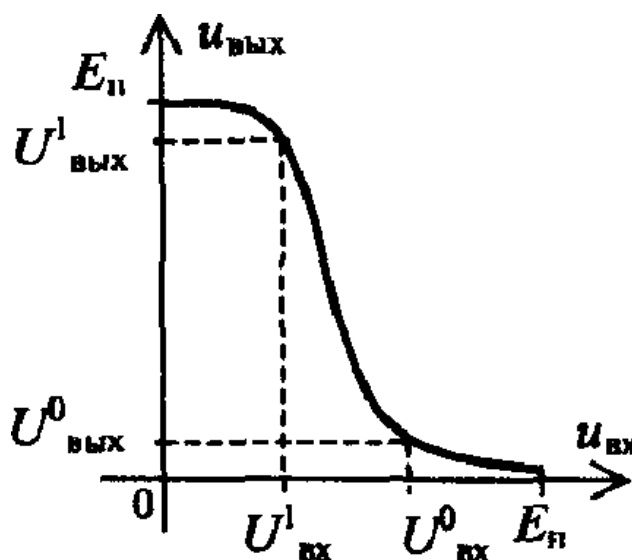


Рис 4

Переключательная (амплитудная) характеристика электронного ключа приведена на рис. 4. При малом входном напряжении $u_{вх} < U^1_{вх}$ транзистор закрыт и на выходе устанавливается высокое напряжение, соответствующее логической единице. Если напряжение $u_{вх} > U^0_{вх}$ транзистор полностью открывается. Через него в этом случае протекает большой ток коллектора, падение напряжения на нагрузочном резисторе $R_к$ будет большим, примерно равным напряжению питания $E_н$. Следовательно, потенциал коллектора будет близок к нулю. На выходе ключа

устанавливается низкий уровень напряжения, соответствующий логическому нулю.

Транзистор в составе электронного ключа удобно рассматривать как резистор с управляемым сопротивлением. При открытом транзисторе сопротивление между коллектором и эмиттером мало (ключ замкнут), при закрытом — велико (ключ разомкнут).

Напряжение $U^I_{\text{вх}}$ определяет *помехоустойчивость* закрытого ключа. Если уровень помех, наводок или шумов не превышает это напряжение, то переключения ключа в замкнутое состояние с логическим нулем на выходе схемы не возникает. Напряжение $U^0_{\text{вх}}$ определяет *помехоустойчивость* открытого ключа. Если напряжение на входе при воздействии помех, наводок или шумов не ниже этого напряжения, то перехода ключа в закрытое состояние не происходит. Переходную область, располагающуюся между напряжениями $U^I_{\text{вх}}$ и $U^0_{\text{вх}}$, стремятся сделать как можно меньше.

Для увеличения быстродействия электронного ключа при изготовлении современных микросхем и микропроцессоров используется простой, но эффективный метод — уменьшение геометрических размеров транзисторов. В микроэлектронике этого добиваются, переходя к субмикронной технологии изготовления микросхем. При этом уменьшаются площади р-п-переходов и их емкости, уменьшаются также паразитные емкости и время рассасывания неосновных носителей в уменьшенной по объему базе транзистора. На основе электронного ключа строятся логические элементы цифровых устройств.

Базовые логические элементы — это схемы, содержащие электронные ключи и выполняющие основные логические операции. Базовые логические элементы составляют основу для проектирования сложных цифровых устройств, выполняющих различные логические функции. Из алгебры логики известно, что сложные логические функции можно выразить через совокупность конечного числа *базисных логических функций*. Такие совокупности образуют: базисные логические функции НЕ (инверсия), И (конъюнкция), ИЛИ (дизъюнкция); логические функции НЕ, И; логические функции НЕ, ИЛИ и др. Указанные логические функции реализуются в базовых логических элементах.

Логические элементы являются базовыми при построении более сложных цифровых схем.

Комбинационная логическая схема — это преобразователь совокупности входных логических уровней (входного слова или входного кода) в выходное слово (выходной код) без запоминания. Условное обозначение комбинационной логической схемы приведено на рис. 5. При изменении входных сигналов практически мгновенно изменяется код на выходе устройства. Небольшая временная задержка, вносимая комбинационной схемой, обуславливается в основном инерционностью транзисторов. Отметим, что рассмотренные ранее логические элементы являются простейшими комбинационными схемами, имеющими несколько входов и один выход.

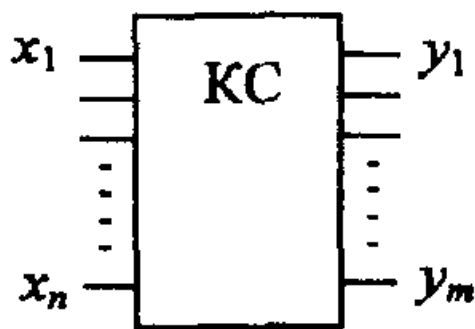


Рис. 5

Каждый из m выходных сигналов y , комбинационной схемы описывается булевой функцией

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где x_j — логический входной сигнал $j = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Запись логических функций осуществляется в различных формах. Наиболее часто используется *совершенная нормальная дизъюнктивная форма*, при которой логическая функция записывается в виде дизъюнкции слагаемых, каждое из которых есть конъюнкция всех аргументов или их инверсий. Причем учитываются только значения логической функции, равные единице, а в произведениях записывают инверсии тех аргументов, значения которых в этом случае равны нулю. Например, логическая функция элемента И-НЕ запишется в виде $y = \overline{x_1}x_2 + x_1\overline{x_2} + \overline{x_1}\overline{x_2}$. Для преобразования логических функций используются законы алгебры логики: коммутативности, ассоциативности, дистрибутивности, тавтологии: $xx = x$, $x + x = x$; поглощения: $x(x + y) = x$, $x + (xy) = x$; до-

полняемости: $x\bar{x} = 0$, $x + \bar{x} = 1$; Моргана: $\overline{x\bar{y}} = \bar{x} + y$, $\overline{x + y} = \bar{x}\bar{y}$; операций с константами: $x0 = 0$, $x1 = x$, $x + 0 = x$, $x + 1 = 1$. Например, логическую функцию для элемента И-НЕ легко преобразовать к виду $y = \overline{x_1x_2}$.

Дешифратор — это комбинационная схема, у которой логическая единица на одном выходе при нулевых сигналах на остальных выходах соответствует определенному коду на входе. Как правило, дешифратор предназначен для получения управляющего сигнала при поступлении на вход определенной комбинации логических сигналов. Если дешифратор имеет n входов, то максимальное число выходов дешифратора равно $m = 2^n$.

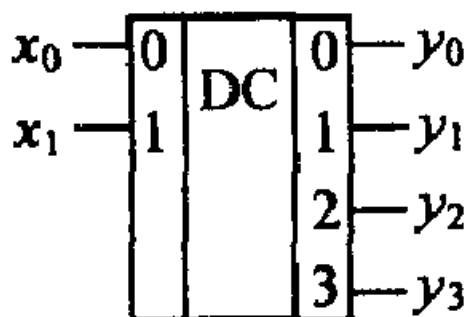


Рис. 6

На рис. 6 приведено условное обозначение дешифратора, имеющего два двоичных входа, работающих в коде 1-2, и четыре выхода. Работа этого дешифратора описывается следующими логическими функциями: $y_0 = \bar{x}_1\bar{x}_0$; $y_1 = \bar{x}_1x_0$; $y_2 = x_1\bar{x}_0$; $y_3 = x_1x_0$. Из анализа этих соотношений следует, что рассматриваемый дешифратор преобразовывает каждое двоичное двухразрядное число в одну и только одну логическую единицу на соответствующем выходе, помеченном десятичным числом. Такие дешифраторы широко используются в устройствах вывода цифровой информации, для индикации двоичного числа в десятичном виде, для определения адресной шины в микросхемах памяти и т. п. Функциональная схема дешифратора, составленная на основе записанных выше логических функций, показана на рис. 7. С помощью инверторов, включенных на входе дешифратора, на внутренней шине данных дешифратора формируется полный набор логических сигналов: $x_0, \bar{x}_0, x_1, \bar{x}_1$. С использованием элемента И формируются соответствующие выходные сигналы. Отметим, что полученная структура дешифратора не един-

ственная. При использовании других логических элементов на основе, например, конъюнктивной нормальной формы можно получить другие функциональные схемы дешифраторов.

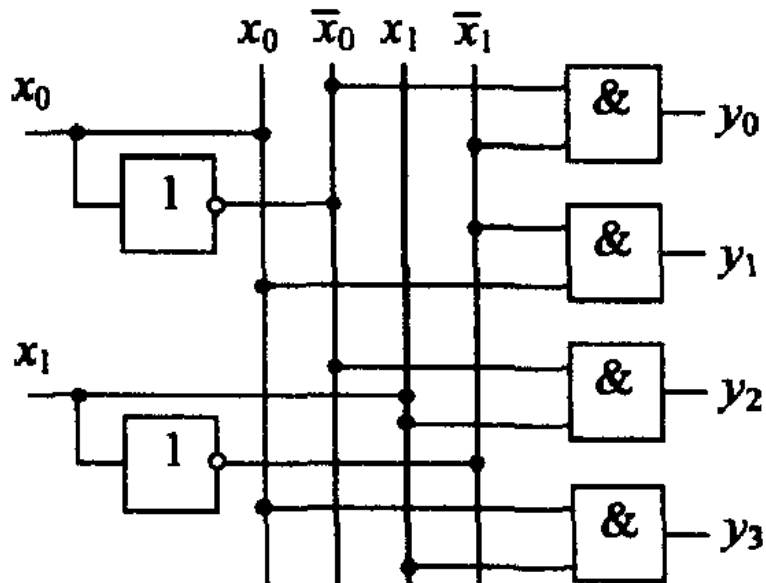


Рис. 7

Описание макета для исследования

Рабочее место для выполнения лабораторной работы включает осциллограф, мультиметр, блок питания, генератор логических сигналов и лабораторный стенд. Электрическая схема для исследования статических параметров логических элементов приведена на рис. 8. В верхней части схемы представлено последовательное соединение 4-х инверторов. Они используются для определения статических параметров ТТЛ.

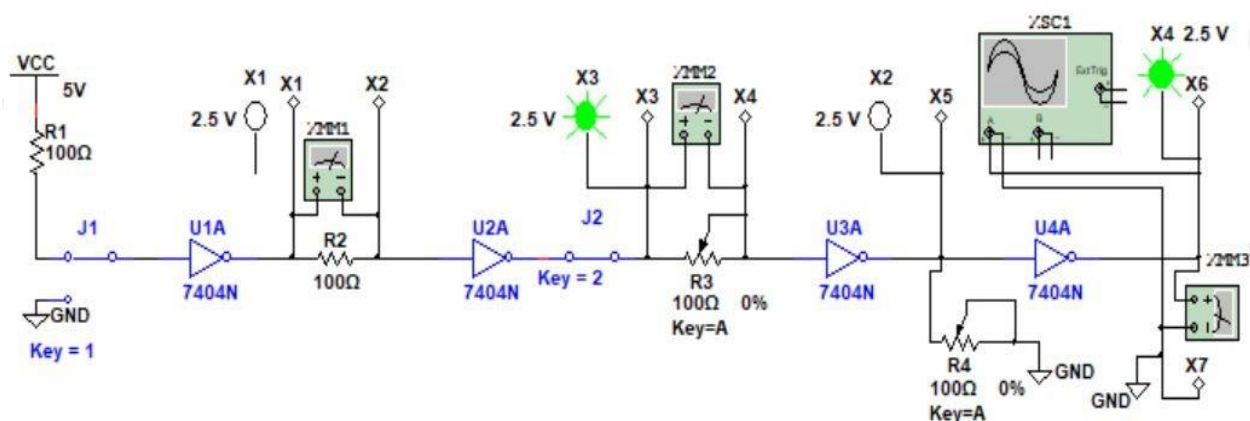


Рис 8

С помощью переключателя J1 через защитный резистор R1 на вход цепочки ЛЭ подаются логический ноль или логическая единица. Переключатель J2 замыкает или размыкает соединение элементов SC2 и SC3.

Если J2 разомкнут, то появляется возможность измерения мультиметром сопротивления резистора R3.

На рисунке 9 нарисована схема мультивибратора, предназначенного для исследования динамических характеристик ТТЛ.

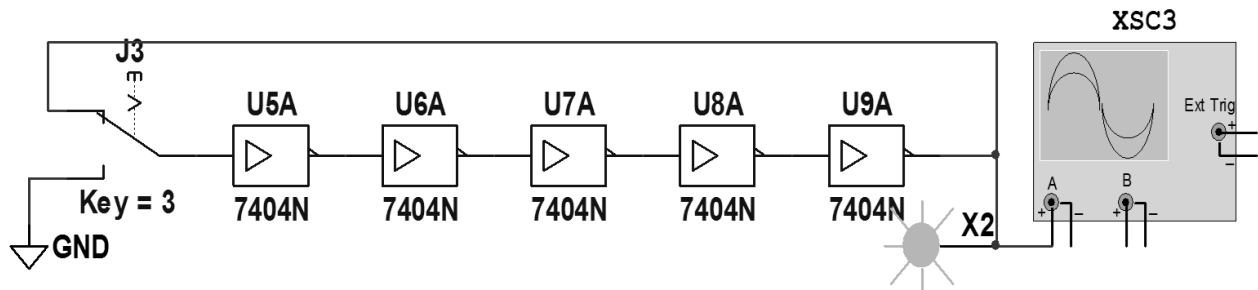


Рис. 9

С помощью переключателя J3 размыкается (положение "Выкл.") или замыкается (положение "Вкл.") цепь положительной обратной связи мультивибратора.

Схема дешифратора с тремя входами F, G, H показана на рис. 10. Сигналы на входы комбинационной схемы поступают от генератора логических уровней. Десятичное число, соответствующее двоичному коду на входе схемы, показывается светодиодным индикатором.

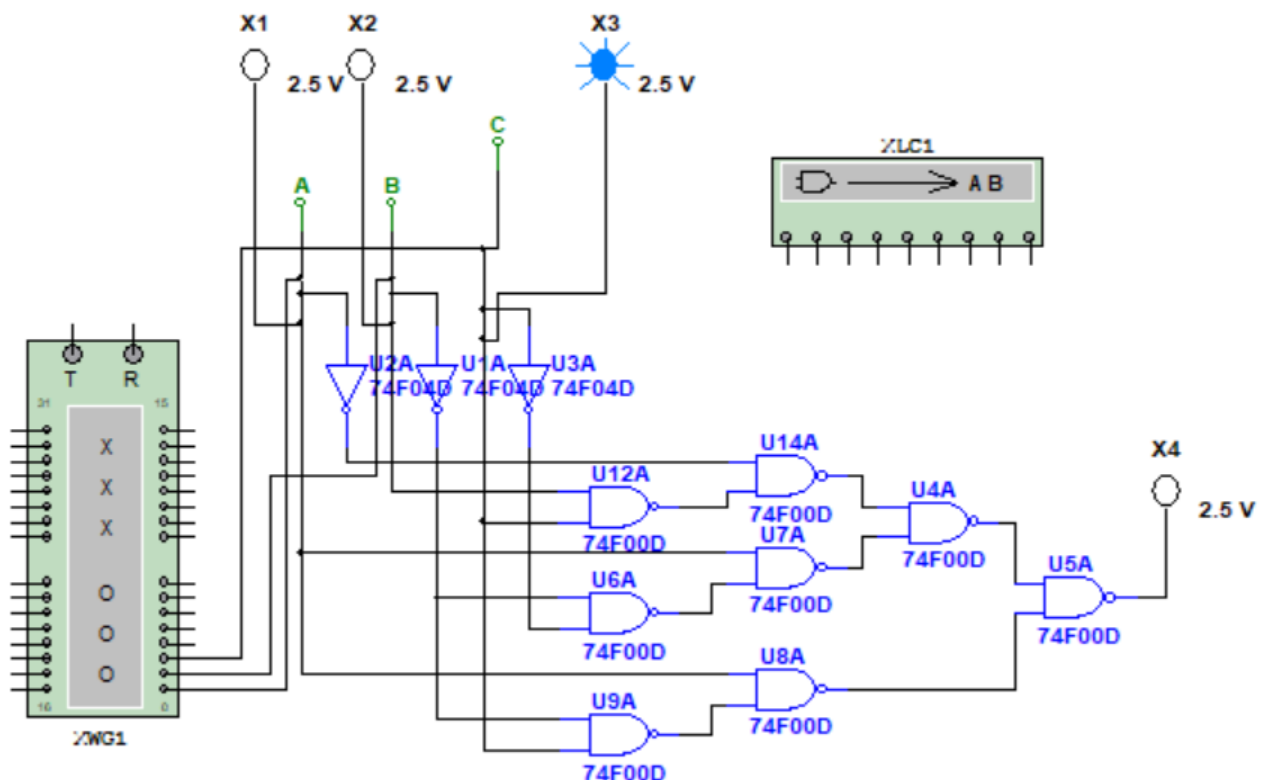


Рис. 10

На выходе комбинационной схемы включен индикатор логическо-

го состояния (Green Probe). Он загорается только тогда, когда на входе схемы имеется двоичный код, соответствующий трем десятичным числам: 3, 4, 5.

Методика проведения исследования.

1. *Исследования статических параметров логических элементов* (рис. 8). Установите ключ J2 в положение "Вкл.", переключатель J3 – в положение "Выкл.", ручки резисторов R3 и R4 – в крайнее положение, вращая их против часовой стрелки. После этого сопротивление переменного резистора R3 равно нулю, а сопротивление резистора R4 будет максимально большим.

1.1. *Измерить напряжения U_0 и U_1 , соответствующие логическим уровням 0 и 1.* Для этого измерить вольтметром напряжение между выводами X6-X7 при двух положениях переключателя J1.

1.2. *Измерить входные токи $I_{вх0}$ и $I_{вх1}$ логического элемента U2* при подаче на его вход через резистор R2 логических уровней 0 и 1 соответственно. Для этого вольтметром измерить падения напряжений ΔU_0 и ΔU_1 на образцовом резисторе R2 с сопротивлением $R2 = 100 \text{ Ом}$. Величины токов рассчитываются по формулам $I_{вх0} = \Delta U_0 / R_2$ и $I_{вх1} = \Delta U_1 / R_2$.

1.3. *Измерить допустимое значение сопротивления резистора R3,* включенного последовательно с входом ЛЭ, при котором нарушается работоспособность этого ЛЭ. Движок резистора R3 установить в крайнее положение против часовой стрелки – сопротивление резистора R3 в этом случае равно нулю. При замкнутом J2 подать логический 0 выключателем J1 на вход цепочки ЛЭ и, следовательно, – на вход элемента SC3. Увеличивая сопротивление резистора R3, получить изменение логического состояния сигнала на X6.

Примечание. При измерениях может возникать самовозбуждение ЛЭ, которое, как правило, считается нарушением работоспособности схемы – состояние ЛЭ при этом не определено.

Разомкнуть J2 и выключить напряжение питания схемы. Подключив мультиметр в режиме омметра к выводам X3-X4, измерить сопротивление входного резистора R3, при котором нарушается работоспособность ЛЭ.

1.4. *Измерить входное пороговое напряжение $U^0_{ВХ}$, при котором на выходе ЛЭ устанавливается 0.* Замкнуть J2. С помощью переключателя J1 установить на выходе SC2 логический ноль. Осциллограф подключить к выходу SC3 (выводы X5-X7). Движок резистора R3 установить в крайнее положение против часовой стрелки (сопротивление R3 равно нулю и на выходе SC3 устанавливается 1). Подключить мультиметр в режиме вольтметра к выводам X4-X7. Увеличивая сопротивление резистора R3, измерить и записать напряжение $U^0_{ВХ}$, при котором состояние на выходе схемы изменяется на противоположное.

1.5. *Измерить $U^1_{ВХ}$, при котором на выходе ЛЭ SC4 устанавливается 1 (рис. 2).* Установить R3 в исходное положение с минимальным сопротивлением. Замкнуть J2. Осциллограф подключить к выводам X6-X7. Установить на выходе схемы SC3 логический сигнал, равный 1. На выходе элемента SC4 и на клемме X6 установятся логические нули. Уменьшайте сопротивление резистора R4 до появления изменения сигнала на X6 (из 0 в 1). Подключить мультиметр в режиме вольтметра к выводам X5-X7 и измерить напряжение $U^1_{ВХ}$. Сравнить ранее измеренное значение $U^0_{ВХ}$ со значением $U^1_{ВХ}$.

1.6. *Измерение переключательной (амплитудной) характеристики ЛЭ SC3 (рис. 15).* Разомкнуть J2. Сопротивление резистора R4 установить максимально большим. К гнездам X5-X7 подключить мультиметр в режиме вольтметра. Подавая на вход элемента SC3 (гнездо X4) увеличивающееся от 0 до 5 В напряжение с шагом 0,1 В, снять переключательную характеристику ЛЭ. Отметить на этой характеристике $U^0_{ВХ}$ и $U^1_{ВХ}$. Сравнить эти величины с ранее измеренными значениями.

2. *Измерение среднего времени задержки $T_{ЗСР}$ импульсного сигнала в ЛЭ.* Переключателем J3 (рис.9) замкнуть кольцо инверторов и получить автоколебательный мультивибратор на собственных задержках. При помощи осциллографа, измерить период T колебаний автоколебательного мультивибратора. При самовозбуждении в схеме автоколебательного мультивибратора имеет место баланс фаз: нечетное число элементов обуславливает инвертирование фазы сигнала в цепочке ЛЭ на 180° , а дополнительный фазовый сдвиг на 180° создается собственными задержками $T_{ЗСР}$ в логических элементах (в пяти ЛЭ получим $5T_{ЗСР}$).

Следовательно, указанному дополнительному фазовому сдвигу на 180° соответствует задержка, равная $T/2$. Учитывая, что $T/2 = NT_{з\text{CP}}$, где N – количество однотипных элементов в кольце ($N = 5$), рассчитайте $T_{з\text{CP}}$ – среднее время задержки, вносимое одним логическим элементом.

3. *Исследование дешифратора.* Составить схему дешифратора – комбинационной схемы (КС), имеющей 3 входов и один выход. Сигнал на выходе дешифратора должен быть равен логической единице, когда двоичное число на входе равно 3, 4 и 5.

3.1. Перед началом моделирования необходимо заполнить данными и установить параметры генератора логических сигналов. Для удобства наблюдения частоту смены выходных кодов рекомендуется установить равной 1-10 Гц. В окне установки выходных логических сигналов устанавливаются шестнадцатеричные числа от 0000 до 001F. В этом случае при работе генератора на входе КС будут возникать все возможные комбинации двоичных сигналов, соответствующие десятичным числам от 0 до 31. Для того чтобы в циклическом режиме (Cycle) или в режиме пачк кодов (Burst) на выходе генератора возникали только внесенные данные, рекомендуется установить начальное (Initial = 0000) и конечное (Buffer size = 001F) значение адреса данных. Для получения десятичного числа, на выходе генератора рекомендуется подключить светодиодные (цифровые) индикаторы (рис. 10).

3.2. Для создания схемы дешифратора рекомендуется использовать логический преобразователь (Logic Converter). Предварительно необходимо записать логическую функцию КС в совершенной нормальной дизъюнктивной форме. Логическое отрицание переменной вводится символом, например логическая функция для рис.10: $y = A'BC + AB'C' + ABC$. Выполнить оптимизацию логической функции и преобразовать в схему дешифратора на элементах И-НЕ.

3.3. Подключить первую схему к генератору и убедиться в правильной работе дешифратора.

Содержание отчёта

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать измеренные и рассчитанные по результатам экспериментов статические и динамические параметры ТТЛ и выводы по отдельным пунктам и по ла-

бораторной работе в целом.

Контрольные вопросы

1. На электронный ключ последовательно подаются логические 0 и 1. Какие выходные сопротивления будет иметь электронный ключ в этих двух состояниях?

2. Укажите на переключательной характеристике диапазон входных и выходных напряжений, соответствующих неопределенному состоянию электронного ключа. Какое сопротивление имеет транзистор в этом состоянии ключа?

3. Принимая диаметр атома равным 10^{-8} см, рассчитать число атомов, размещаемых по ширине проводящей дорожки современного микропроцессора при норме 0,07 мкм. Учитывая закон Мура, найти время, по истечении которого наступит предел роста сложности микропроцессоров, при условии, что проводящая дорожка по ширине должна насчитывать не менее 100 атомов.

4. Нарисуйте схемы дешифраторов, имеющих один вход и два выхода, а также три входа и восемь выходов.

ТРИГГЕРЫ, СЧЁТЧИКИ И РЕГИСТРЫ

Цель работы

Изучить функционирования триггеров различных типов и экспериментально определить таблицы состояния (таблицы истинности) триггеров. Изучить функционирования счётчиков и регистров.

Теоретические сведения

Триггер — это устройство с двумя устойчивыми состояниями, одно из которых — логический ноль, а другое — логическая единица. Эти состояния триггера при бесперебойном питании и при отсутствии существенных помех и наводок могут сохраняться сколь угодно долго. Под действием управляющих сигналов триггер способен переключаться из одного состояния в другое. Основное назначение триггера — хранение двоичной информации. Например, в персональных компьютерах на триггерах собрана кэш-память первого и второго уровня.

Триггер, в отличие от комбинационных схем, относится к новому виду цифровых устройств — *цифровым автоматам*. Цифровые автоматы, кроме комбинационных схем, содержат элементы памяти. Если выходные сигналы цифрового автомата зависят как от входных сигналов, так и от состояния запоминающего устройства, то такие автоматы называют автоматами Мили. Если выходные сигналы определяются только состояниями запоминающего устройства, то получим автомат Мура. Триггер в соответствии с этой классификацией относят к автоматам Мура.

Различают несколько разновидностей триггеров: *RS*-триггер, *D*-триггер, *JK*-триггер. Если для изменения состояния триггера используется синхронизирующий сигнал, то триггер называется *синхронным* (синхронизируемым). Если синхронизирующие сигналы не используются, то триггер называется *асинхронным*.

Схема простейшего *асинхронного RS-триггера* приведена на рис. 1. В триггере использованы схемы ИЛИ-НЕ (стрелка Пирса) с перекрестными обратными связями. На рисунке введены следующие обозначения: *R* — вход установки триггера в 0, *S* — вход установки триггера в 1, *Q* — прямой выход триггера; \bar{Q} — вспомогательный (инверсный) выход триггера.

гера, сигнал на котором инвертирован относительно прямого выхода.

Рассмотрим работу RS -триггера. Пусть в нулевой момент времени при нулевых сигналах на входах R и S на триггер подано напряжение питания. Однако на выходах триггера в этот момент времени оба выходных сигнала будут равны нулю: $Q = \bar{Q} = 0$.

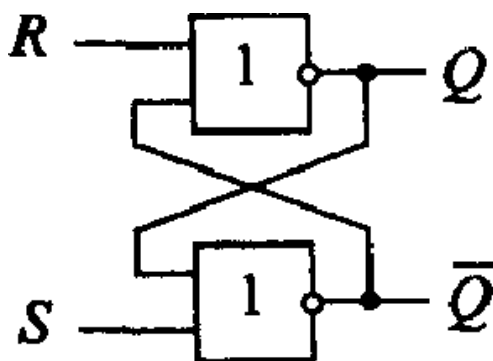


Рис 1

Из свойств элемента ИЛИ-НЕ следует, что при нулевых сигналах на его входах напряжение на его выходе должно возрасть до значения логической единицы. На практике, из-за неидентичности двух элементов ИЛИ-НЕ на одном из выходов: Q или \bar{Q} , напряжение возрастает быстрее. Пусть более быстро напряжение возрастает на выходе Q . Это напряжение поступает на второй логический элемент и начинает уменьшать напряжение на его выходе Q , устремляя его к нулю. В свою очередь уменьшающееся напряжение на выходе Q , попадая на первый логический элемент, еще больше ускоряет увеличение напряжения на выходе Q . Таким образом, благодаря положительной обратной связи быстро устанавливается единичное состояние триггера: $Q=1$; $\bar{Q}=0$.

Подавая на вход R логическую единицу при $S=0$ и используя свойства схемы ИЛИ-НЕ, получим: $Q=0$; $\bar{Q}=1$. Так производится операция установки триггера в нулевое состояние. Если после этого сигнал на входе R сделать равным 0, то новое состояние триггера сохраняется. При подаче единицы на вход S и при $R=0$ триггер устанавливается в единичное состояние: $Q=1$.

Если $R=S=1$, то на обоих выходах Q и \bar{Q} возникают нули, что противоречит определению выходов триггера. Такая комбинация управляющих сигналов запрещена (отметим, что после этого работоспособность триггера не теряется).

R	S	Q
0	0	Хранение
1	0	0
0	1	1
1	1	запрещено

Рис 2

Таблица состояний RS -триггера приведена на рис. 2. При хранении состояние триггера в данный момент времени определяется его состоянием в предыдущий момент времени: $Q(n) = Q(n - 1)$, где n — номер временного отсчета. Условное обозначение RS -триггера приведено на рис. 3.

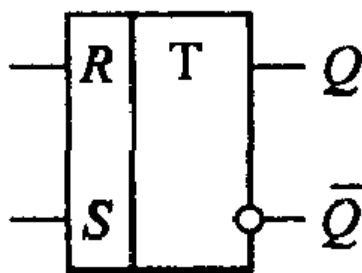


Рис. 3

Для повышения помехоустойчивости и для устранения "состязаний" используют синхронный RS -триггер, схема и условное обозначение которого приведены на рис. 4, а, б соответственно. Состояние синхронного триггера может измениться только при установлении логической единицы на входе синхронизации C . В этом случае элементы И "открываются" и управляющие сигналы поступают на входы асинхронного триггера. Отметим, что такая синхронизация называется *статической*.

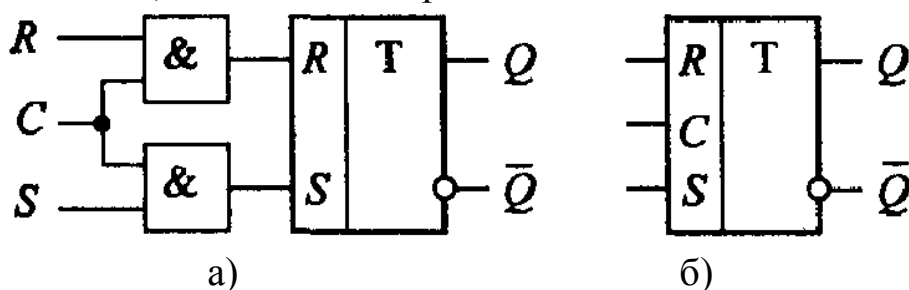


Рис. 4

Рассмотренные выше RS -триггеры невозможно использовать в цифровых устройствах с обратными связями из-за неопределенностей,

возникающих при работе. Действительно, выход Q триггера нельзя соединить с входами R или S , так как изменения на этих выводах происходят практически одновременно. Такие же неопределенности будут возникать в сложных цифровых устройствах с обратными связями, содержащих несколько триггеров и комбинационных схем.

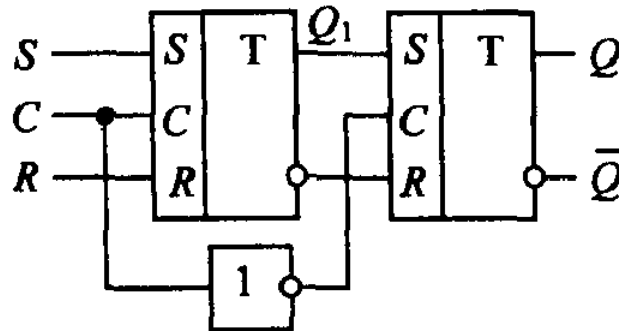


Рис. 5

При использовании *двухступенчатого RS-триггера*, схема которого приведена на рис. 5, допускается соединение его входов и выходов. Двухступенчатый триггер состоит из двух синхронных *RS*- триггеров и дополнительного элемента НЕ. При подаче входных управляющих сигналов и синхросигнала производится запись информации в первый триггер (момент t_1 на рис. 6). При этом второй триггер не изменяет своего состояния, так как на его синхровход с инвертора подается логический ноль. Только по окончании записи в первый триггер при изменении значения синхросигнала с единицы до нуля производится запись во второй триггер двухступенчатой схемы (момент t_2 на рис. 6).

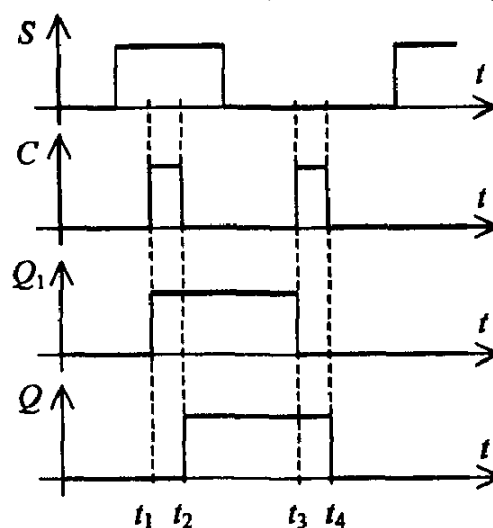


Рис. 6

Временные диаграммы работы двухступенчатого триггера на рис.

6 получены при условии — сигнал на входе R инвертирован по отношению к сигналу на входе S . Как видим, двухступенчатый RS -триггер переключается по заднему фронту синхронизирующего сигнала. Такая синхронизация называется *динамической*.

Условное обозначение двухступенчатого RS -триггера показано на рис. 7. Наличие динамической синхронизации отмечено наклонной чертой. Причем ее наклон соответствует заднему фронту синхроимпульса. В справочной и учебной литературе для обозначения динамической синхронизации могут также использоваться треугольник, звездочка, крестик и т. п. Использование двух ступеней отмечается на рис. 7 двумя буквами Т.

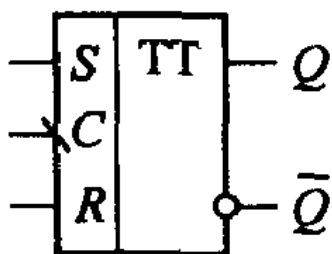


Рис. 7

Одним из самых широко используемых триггеров является D -триггер (*триггер задержки*). Чаще всего D -триггер выполняется на основе двухступенчатого RS -триггера при включении на входе дополнительного инвертора, связывающего R - и S -входы. Важное преимущество этого триггера состоит в том, что он имеет только один информационный вход. Схема D -триггера и его условное обозначение приведены на рис. 8, а, б соответственно. Информация в D -триггер записывается по заднему фронту синхронизирующего импульса. По этому сигналу на выходе Q при подаче n -го синхроимпульса появляется с задержкой на один такт: $Q(n) = Q(n - 1)$.

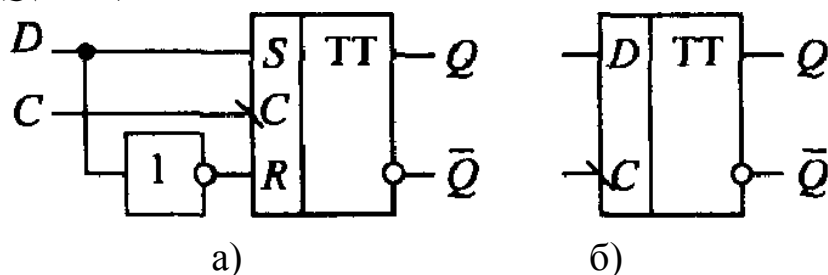


Рис. 8

Большими функциональными возможностями обладает JK -

триггер. Схема JK -триггера и его условное обозначение показаны на рис. 9, а, б соответственно. В схему включены два двухвходовых элемента И. Так как на их входы подаются выходные сигналы RS -триггера, то один из элементов И будет всегда закрыт для прохождения сигналов управления. По этой причине на входы JK -триггера можно одновременно подавать единичные сигналы. Как известно, такая комбинация входных сигналов запрещена у RS -триггера.

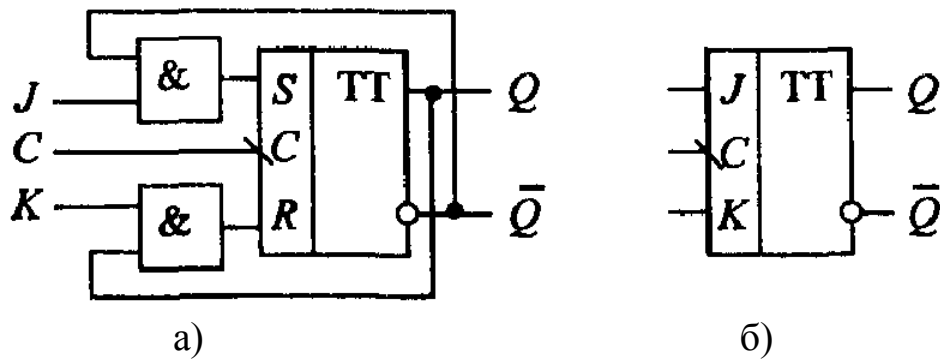


Рис. 9

Вход J триггера аналогичен входу S рассмотренного выше RS -триггера, а вход K — входу R RS -триггера. Если $J = K = 0$, то получим режим хранения. Если $J = K = 1$, то с приходом синхроимпульса триггер изменяет свое состояние на противоположное.

Счётчик - содержит несколько триггеров, состояние которых определяется числом поступивших на вход устройства импульсов.

У *суммирующего* счетчика выходное двоичное число, хранимое в триггерах схемы, увеличивается при поступлении на его вход первого импульса. Предполагается, что в исходном состоянии во всех триггерах счетчика записаны нули. Схема суммирующего трехразрядного счетчика приведена на рис. 10. Состояние счетчика определяется сигналами на выходах Q_0 , Q_1 и Q_2 .

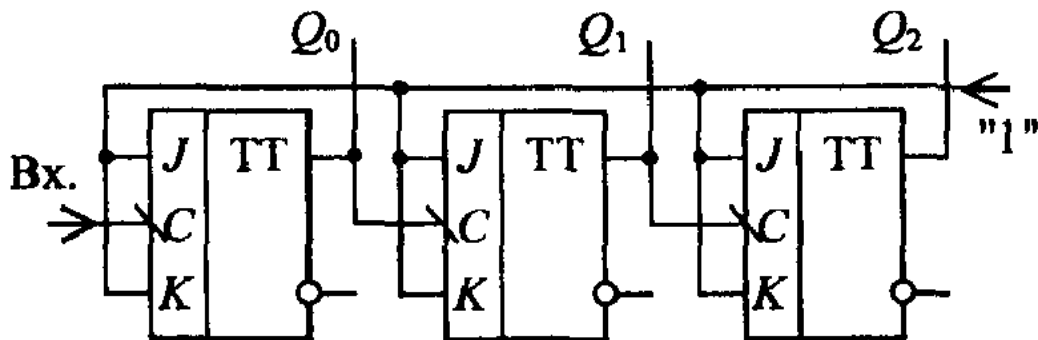


Рис. 10

Если первый входной импульс уменьшает выходное число, то счетчик — *вычитающий* (рис. 11). Предполагается, что в исходном состоянии во всех триггерах вычитающего счетчика записаны единицы.

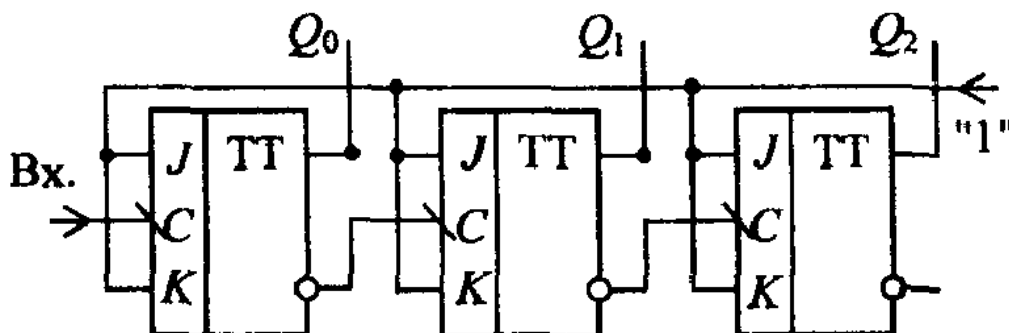


Рис. 11

Реверсивный счетчик может переключаться из режима суммирования в режим вычитания и наоборот. Такой счетчик содержит дополнительные логические элементы, на которые подается сигнал переключения режимов работы счетчика. Дополнительные логические элементы соединяют входы и выходы триггеров реверсивного счетчика.

Максимальное число различных состояний счетчика называют его *модулем* M , причем $M \leq 2^n$, где n — число двоичных разрядов (триггеров) счетчика. Если счетные импульсы поступают одновременно на входы всех используемых триггеров, то счетчик называют *параллельным*. В *последовательном* счетчике (рис. 10 и рис. 11) каждый последующий триггер управляется выходным сигналом предыдущего.

Наиболее часто используются последовательные двоичные счетчики. На рис. 10 и рис. 11 приведены схемы трехразрядных последовательных счетчиков, выполненных на JK-триггерах. В счетчиках на входы J и K триггеров подается логическая единица. Как следует из принципа работы JK-триггера, в этом случае с приходом очередного синхροимпульса триггер будет каждый раз изменять свое состояние на противоположное. В счетчиках, представленных на рис. 10 и рис. 11, триггеры переключаются по заднему фронту синхροимпульса.

Часто в счетчиках используют JK-триггеры с дополнительными R и S входами. Используя эти дополнительные входы и комбинационные схемы, можно осуществить начальную установку некоторого исходного заданного кода, а также осуществить сброс показаний счетчика при достижении другого заданного двоичного кода. Схема простого суммиру-

ющего счетчика по модулю 6, построенного на основе трехразрядного счетчика, приведена на рис. 12. Как только на выходах этого счетчика появляется код числа 6 элемент И вырабатывает сигнал сброса и показания счетчика мгновенно обнуляются.

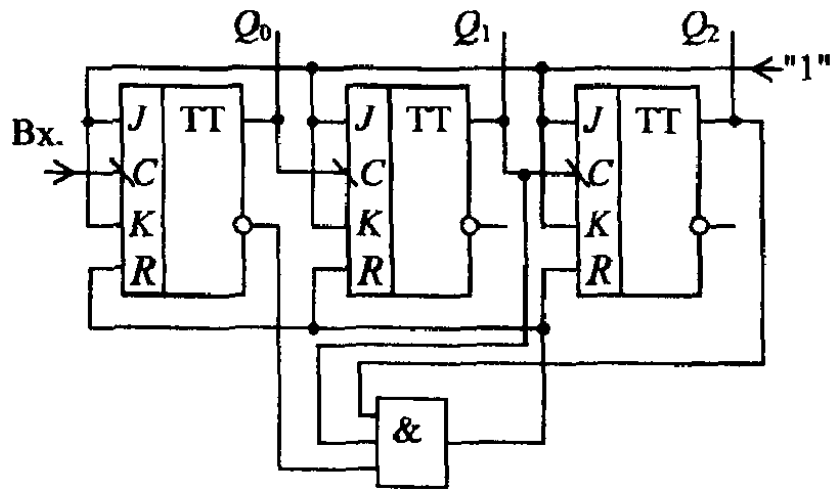


Рис. 12

Счетчики широко используются в компьютерах для получения последовательности адресов команд, для деления частоты задающего кварцевого генератора, а вместе с дешифраторами — для генерации заданной последовательности логических сигналов и т. п.

Регистром называется совокупность триггеров, предназначенная для хранения двоичного слова. В регистрах дополнительно предусмотрены операции записи двоичного числа, чтения, поразрядного сдвига, сброса регистра в нулевое состояние и т. п.

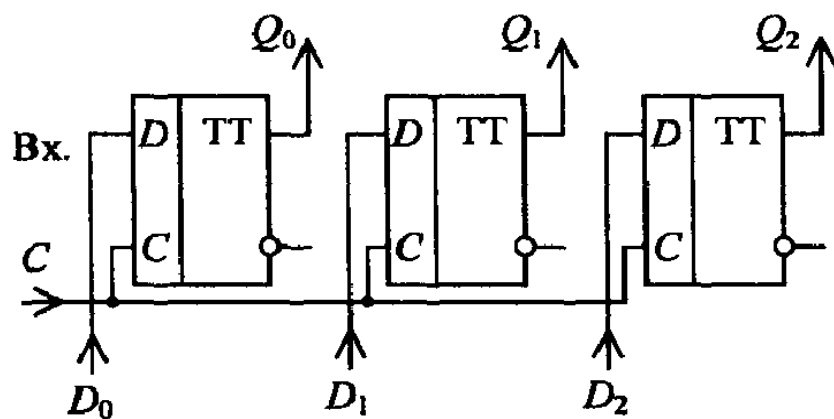


Рис. 13

Схема простейшего регистра на трех D-триггерах приведена на рис. 13. Входы D-триггеров используются для подачи записываемого двоичного слова. Запись осуществляется при появлении синхронизиру-

ющего импульса. Информацию из регистра можно прочесть с выходов Q_0 , Q_1 и Q_2 . Так как ввод и вывод кода в этом регистре происходят параллельно, то такой регистр называют *параллельным*.

В *последовательном* регистре (рис. 14), называемом также *сдвиговым* регистром, вводимый код подается на первый триггер регистра по разрядно, начиная со старшего разряда. Синхронизирующий импульс поступает на все триггеры регистра одновременно. При этом в каждом последующем триггере запоминается выходной сигнал от предыдущего триггера. Если регистр содержит N триггеров, то для его заполнения нужно подать N синхроимпульсов.

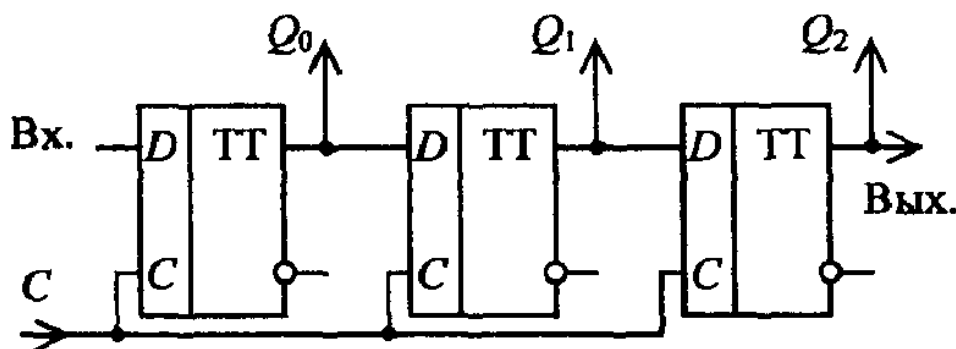


Рис. 14

Вывод хранимого кода можно производить или параллельно, или последовательно с выходного триггера регистра при подаче дополнительных синхроимпульсов.

Методика проведения исследования

1. Исследование асинхронного RS -триггера с инверсными входами (рис. 15)

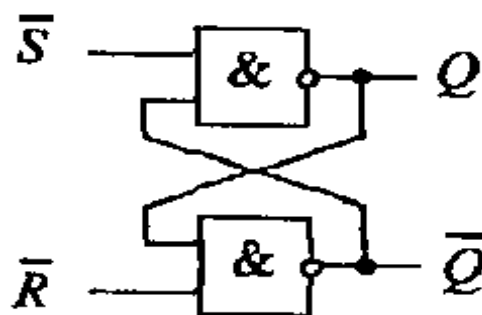


Рис. 15

В триггере использованы схемы И-НЕ с двумя входами. Подавая на входы триггера различные комбинации логических уровней, заполнить таблицу состояний асинхронного триггера с учетом включенных в

нее описаний полученных состояний.

2. Исследование синхронного RS-триггера (рис. 4)

Подавая на входы триггера различные комбинации логических уровней, составить таблицу состояний синхронного триггера и дать описание этих состояний. В таблицу состояний включить дополнительный столбец с указанием требуемых сигналов на входе С.

3. Исследование D-триггера (триггера задержки). Для измерений собрать D-триггер, используя синхронный RS-триггер и инвертор. Подавая на входы триггера различные комбинации логических уровней, заполнить таблицу состояний D-триггера с описаниями исследуемых состояний.

4. Исследование двухступенчатого триггера (MS-триггера, рис. 5). Собрать схему двухступенчатого триггера на основе двух синхронных RS-триггеров и инвертора. Устанавливая на входах триггера различные комбинации логических уровней и подавая перепады уровней на синхровход, заполнить таблицу состояний двухступенчатого триггера с описанием каждого состояния и с указанием требуемых перепадов сигналов на входе С. Обратить внимание на особенность запрещенного состояния MS-триггера.

5. Исследование JK-триггера. На основе синхронного MS-триггера собрать синхронный JK-триггер (рис. 16). Подавая на входы триггера различные комбинации логических уровней, заполнить таблицу состояний JK-триггера с описаниями состояний и с указанием требуемых перепадов сигналов на входе С.

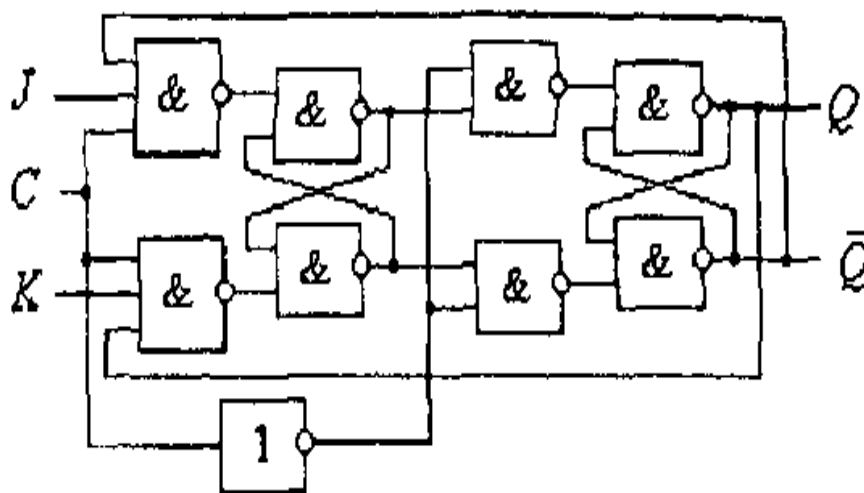


Рис. 16

6. Исследование суммирующего счётчика на JK -триггерах. На основе JK -триггеров 74107N собрать суммирующий счётчик (рис. 10). Примечание: на вход сброса триггера в 0 ($\sim 1CLR$) необходимо подать логическую 1. К входу C первого триггера подключить функциональный генератор. Рекомендуемые настройки генератора: частота 1-50 Гц, амплитуда 2,5 В, смещение 2,5 В. К выходам счётчика подключить анализатор логических уровней. Установить тактовую частоту (Clock rate) равную 100 Гц. С помощью анализатора логических сигналов получить временные диаграммы работы счётчика и убедиться в правильности его работы. Составить таблицу состояний счётчика.

7. Исследование вычитающего счётчика на JK -триггерах. На основе JK -триггеров 74107N собрать вычитающий счётчик (рис. 11). С помощью анализатора логических сигналов получить временные диаграммы работы счётчика и убедиться в правильности его работы. Составить таблицу состояний счётчика.

8. Исследование суммирующего счётчика на JK -триггерах с дополнительным входом \bar{R} . На основе JK -триггеров 74107N и элемента И-НЕ собрать суммирующий счётчик по модулю 6 (рис. 17). С помощью анализатора логических сигналов получить временные диаграммы работы счётчика и убедиться в правильности его работы. Составить таблицу состояний счётчика и выделить в этой таблице номер импульса, соответствующий установке триггеров счётчика в исходное состояние.

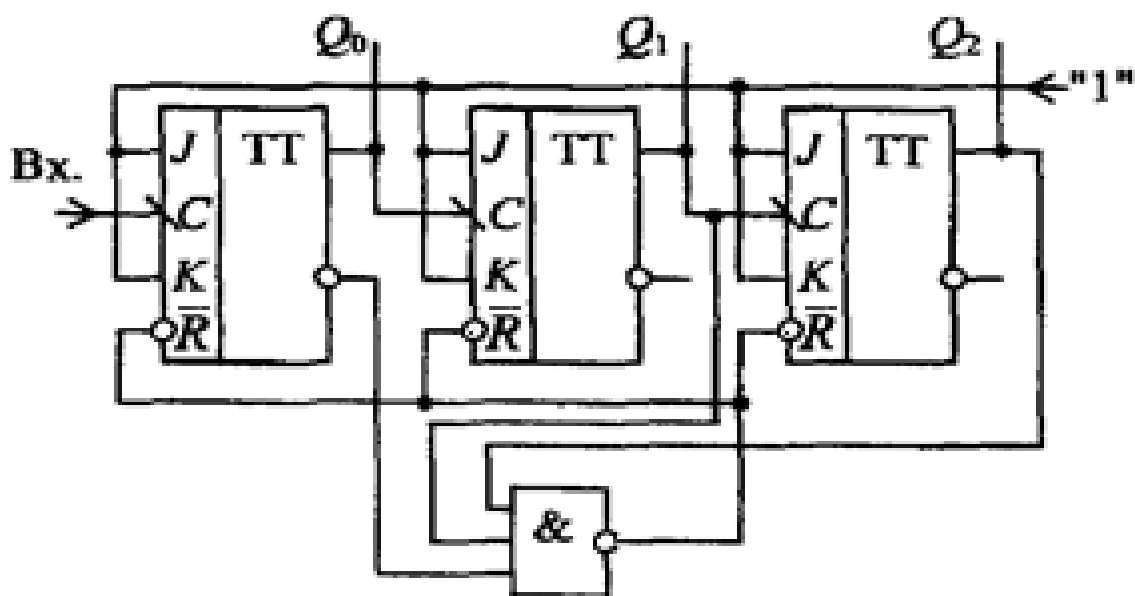


Рис 17

9. Исследование последовательного регистра на *D*-триггерах. На основе *D*-триггеров 7474N собрать суммирующий счётчик (рис. 14). Примечание: на вход сброса триггера в 0 ($\sim 1\text{CLR}$) необходимо подать логическую 1. К входу *C* первого триггера подключить функциональный генератор. К входу *D* первого триггера подключить переключатель, позволяющий подавать логический 0 или 1. С помощью анализатора логических сигналов получить временные диаграммы работы регистра при записи логических 0 и 1 в младший разряд и убедиться в правильности его работы. Составить таблицу состояний регистра.

Содержание отчёта

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать схемы исследуемых триггеров, счётчиков и регистра таблицы их состояний, временные диаграммы работы счётчиков и регистров и выводы о соответствии эксперимента и теории.

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте временные диаграммы установки синхронного *D*-триггера в нулевое и единичное состояния
2. Используя элемент И-НЕ, нарисуйте схему *D*-триггера со статической синхронизацией.
3. Можно ли собрать *JK*-триггер на основе асинхронного *RS*-триггера?
4. Постройте схему четырёхразрядного суммирующего двоичного счетчика с модулем, равным 12.
5. Нарисуйте схему трёхразрядного вычитающего счетчика с показаниями, изменяющимися от 7 до 2.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Цель работы

Изучить принципы преобразования сигнала из аналогового в цифровой и обратно. Изучить принцип функционирования аналогово-цифрового и цифро-аналогового преобразователей.

Теоретические сведения

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) — это преобразование параметров сигналов в цифру с помощью вычислительных устройств и представление их в заданной форме. Для ввода и вывода информации в ЭВМ используются аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.

Для осуществления ЦОС вначале проводится *дискретизация* аналогового сигнала $s(t)$, то есть взятие отсчетов в заданные моменты времени (рис. 1). Необходимость дискретизации сигнала обусловливается дискретным характером работы ЭВМ. Как правило, используется *равномерная* дискретизация, то есть взятие отсчетов через одинаковый промежуток времени t_d , называемый *периодом дискретизации*. На практике чаще используются конечные по длительности сигналы и конечные объемы выборки $N = 2^n$, где $n = 9, 10, 11, \dots$.

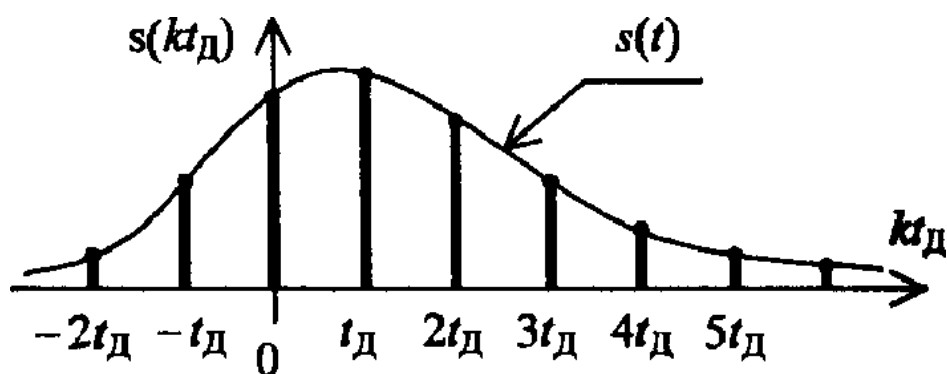


Рис. 1

Дискретизацию можно осуществить с помощью простой схемы, содержащей электронный ключ. Ключ через равные промежутки времени t_d на короткое время замыкается и на нагрузке возникает импульс, амплитуда которого соответствует значению сигнала в заданный момент времени. Очевидно, что в промежутках между отсчетами информация, содержащаяся в аналоговом сигнале, будет **потеряна**. Возникает так

называемая *погрешность дискретизации*.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) — это устройство, в котором осуществляются дискретизация и квантование и которое преобразует входной аналоговый сигнал в цифровой сигнал. Цифровой сигнал на выходе АЦП представлен, как правило, сигналами на шине данных.

Устройство *параллельного АЦП*, часто используется на практике. Электрическая схема этого АЦП показана на рис. 2. С помощью одинаковых резисторов R_1, R_2, \dots, R_N создаются уровни квантования с шагом квантования, равным падению напряжения на одном резисторе. Шаг и уровни квантования зависят от величины опорного стабилизированного напряжения

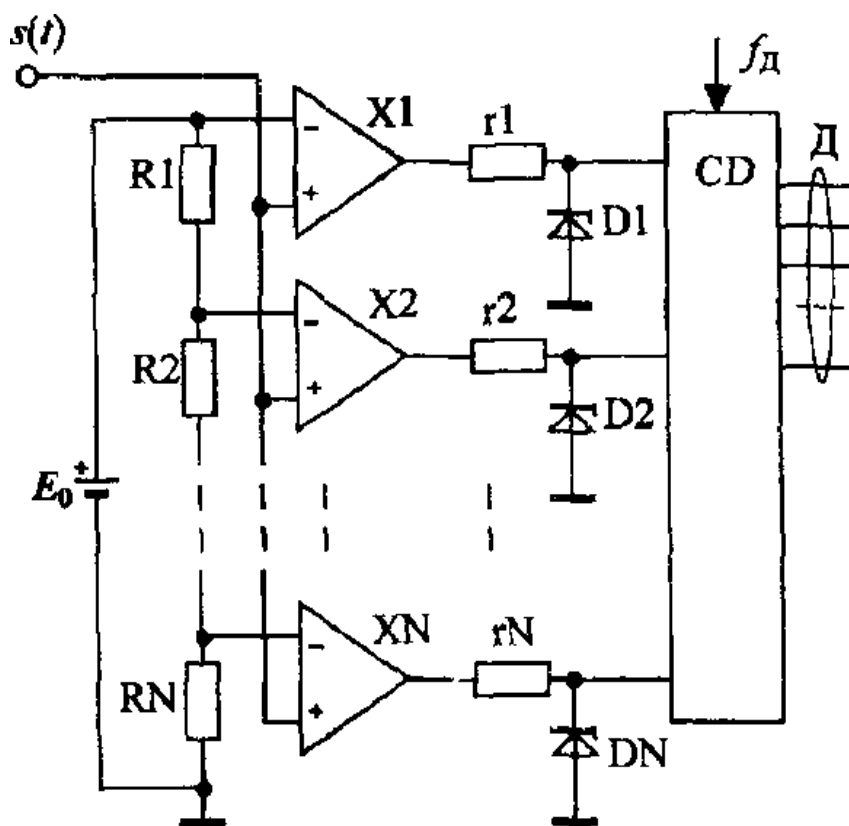


Рис. 2

Неосновная часть схемы АЦП — операционные усилители с резисторами и диодами. Эти усилители работают в качестве *компараторов* — устройств для сравнения уровней двух сигналов. Если напряжение входного сигнала на неинвертирующем входе превышает опорное напряжение на инвертирующем входе, то на выходе ОУ возникает большое положительное напряжение, которое с помощью добавочного резистора и стабилитрона преобразуется в логическую единицу. Если

входной сигнал $s(t)$ меньше опорного напряжения на инвертирующем входе, то на выходе операционного усилителя возникает отрицательное напряжение, которое с помощью открывающихся диодов $D1, D2, \dots, DN$ уменьшается практически до нуля и тем самым преобразуется в логический нуль. Если входное напряжение $s(t)$ равно нулю, то на выходах компараторов формируются логические нули. При плавном увеличении уровня входного сигнала компараторы будут последовательно, начиная с нижнего на рис. 1, срабатывать, выдавая на выходах логические единицы.

Шифратор CD осуществляет преобразование кода, поступающего с компараторов, в двоичный код шины данных Д. На шифратор АЦП поступает синхросигнал и изменения на шине данных происходят только при появлении синхроимпульса. Частота синхросигнала в этом случае будет задавать частоту дискретизации.

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) — это устройство, преобразующее последовательность входных кодов в соответствующий непрерывный выходной сигнал. Большинство ЦАП строятся с использованием цепочки R - $2R$. Электрическая схема цепочки приведена на рис. 3.

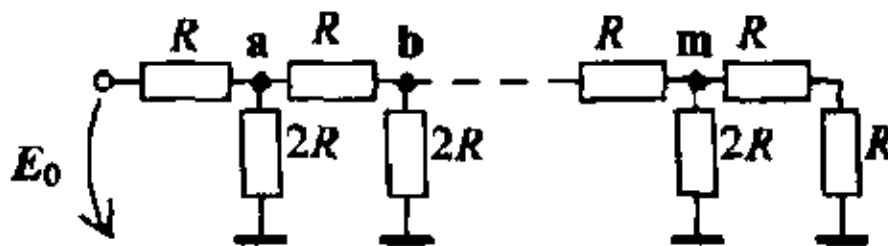


Рис 3

На входе цепочки подключается источник опорного напряжения. Несложный анализ схемы показывает, что напряжения в узлах цепочки a, b, \dots, m отличаются друг от друга в два раза. Например, напряжение в точке a равно $E_0/2$, так как сопротивление всех элементов цепочки, включенных между этим узлом и корпусом, равно R . Учитывая, что сопротивление между узлом a и клеммой опорного источника тоже равно R , получим резистивный делитель напряжения в два раза. Аналогично доказывается, что напряжение в точке b равно $E_0/4$ и т. д. Чем дальше от источника расположены узлы в цепочке, тем меньше напряжение на них.

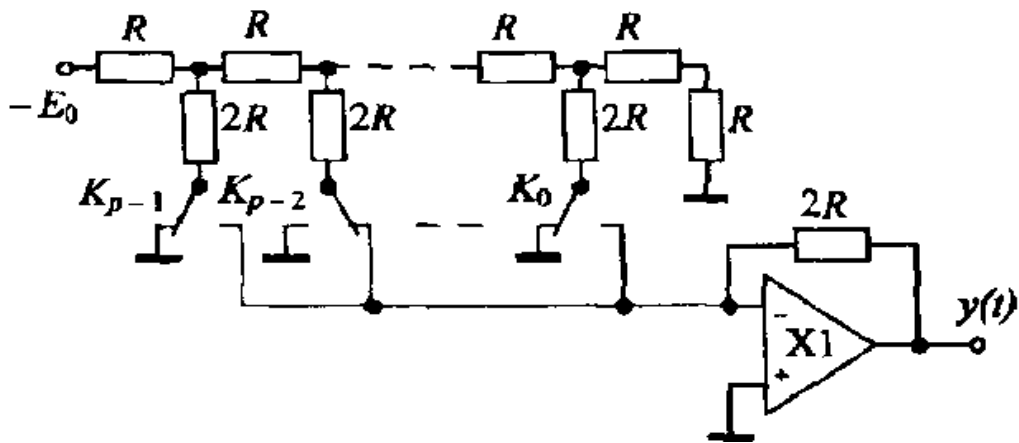


Рис. 4

Электрическая схема ЦАП, содержащая цепочку $R-2R$, приведена на рис. 4. Входное двоичное слово, имеющее p разрядов, управляет работой электронных ключей K_i , $i = 0, 1, 2, \dots, p-1$, схемы. Если в i -м разряде входного слова установлена логическая единица, то $K_i = 1$ и соответствующее напряжение с цепочки $R-2R$ с помощью электронного ключа подается на вход ОУ. Так как величина коэффициента усиления ОУ определяется отношением сопротивлений резисторов, включенных в цепи обратной связи и на входе схемы, а эти сопротивления одинаковы, то коэффициент передачи инвертирующего усилителя относительно напряжений в точках **a**, **b**, ..., **m** равен 1. Следовательно, с помощью операционного усилителя осуществляется суммирование тех напряжений в узлах цепочки $R-2R$, которые подключены к ОУ через электронные ключи. Учитывая, что наименьшее напряжение в точке **m** цепочки $R-2R$ соответствует шагу квантования сигнала, напряжение на выходе ЦАП записываем в виде

$$y = (2^{p-1}K_{p-1} + \dots + 2^1K_1 + 2^0K_0)\Delta,$$

где коэффициенты электронных ключей $K_i \in \{0,1\}$, а Δ — шаг квантования, равный $E/2^p$.

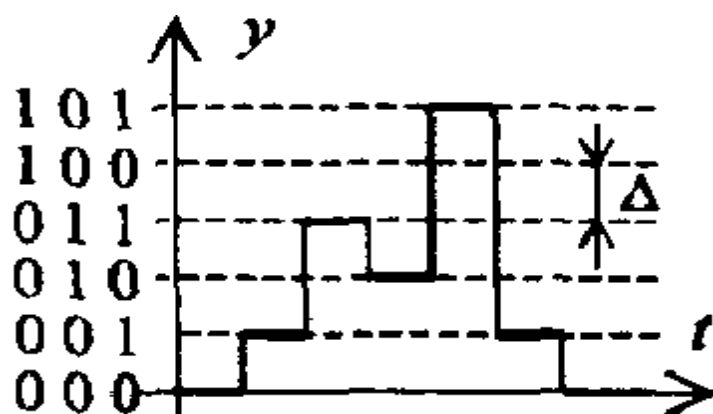


Рис 5

На рис. 5 приведен сигнал на выходе трехразрядного ЦАП. На вход ЦАП последовательно подаются следующие коды: 000, 001, 011, 010, 101, 001, 000. Выходное напряжение ЦАП имеет ступенчатый вид. Для уменьшения ступенек на выходе ЦАП обычно устанавливают фильтр низких частот.

Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи устанавливаются на входе и выходе устройства цифровой обработки сигналов. Центральное место в таких устройствах занимает ЭВМ и алгоритмы ее работы.

Описание макета для исследования

Рабочее место для выполнения лабораторной работы включает генератор гармонических сигналов, осциллограф, построитель частотных характеристик, источники питания, схемы ЦАП и АЦП.

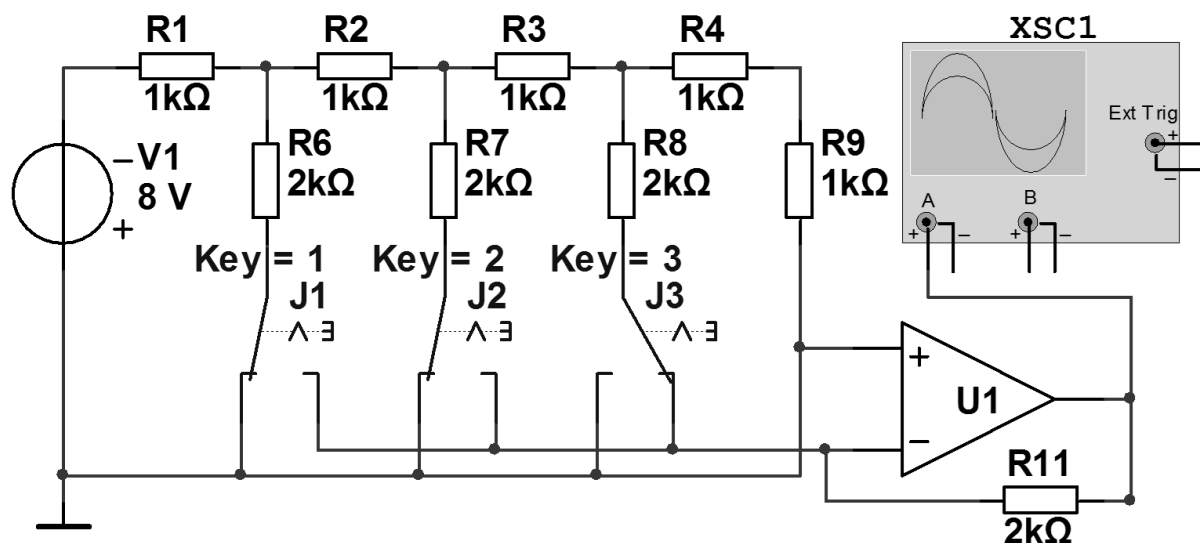


Рис. 6

Схема трехразрядного ЦАП, построенного на основе цепочки R-

$2R$, показана на рис. 6. Три входных двоичных сигнала управляют переключателями 0, 1, 2. Положение переключателей, показанное на схеме, соответствует подаче на усилитель напряжения, соответствующего шагу квантования Δ . Сопротивление резистора (2 кОм) в цепи обратной связи операционного усилителя (ОУ) равно сопротивлению в поперечной ветви цепочки R - $2R$. Поэтому коэффициент передачи усилителя равен 1 и выходное напряжение ЦАП будет также равно шагу квантования Δ . Величина шага квантования зависит от опорного напряжения E_0 и от числа звеньев в цепочке R - $2R$.

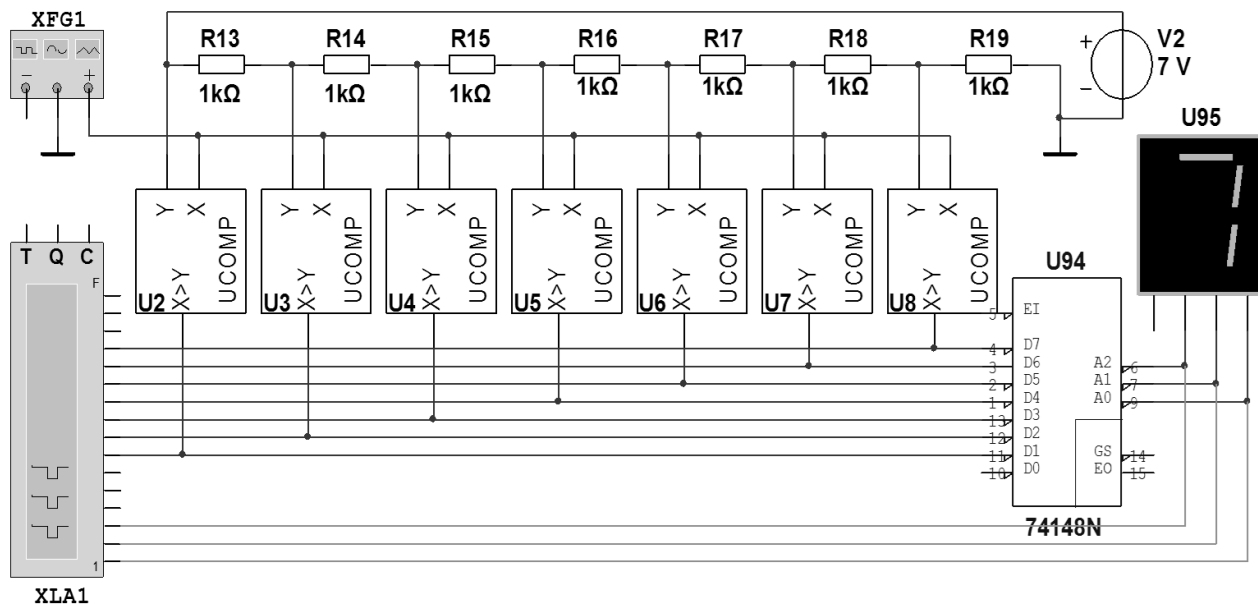


Рис. 7

Электрическая схема параллельного трёхразрядного АЦП приведена на рис. 7. В АЦП используются 7 компараторов (UCOMP), шифратор 74148N, источник опорного напряжения E_0 , и семь прецизионных резистора с сопротивлениями 1 кОм.

Методика проведения исследования

1. Рассчитать и установить опорное напряжение E_0 на источнике питания V1 для получения шага квантования $\Delta = 15$ мВ.

2. Подключая на выходе ЦАП осциллограф и коммутируя переключатели, измерить величину шага квантования Δ , и максимальную величину выходного напряжения ЦАП U_{\max} . Проверить равенства $\Delta = \Delta_0$ и $U_{\max} = (2^3 - 1)\Delta$. Занести в таблицу увеличивающиеся по величине входные двоичные коды и соответствующие им выходные напряжения (измерить первые 5...6 значений, начиная с нулевого напряжения, и 2...3

значения меньших или равных U_{\max}). Построить ступенчатый график зависимости выходного напряжения от входного кода (от 0 до U_{\max}).

3. Для измерения быстродействия ЦАП включить в схему вместо идеального ОУ реальный ОУ LM741. Установить все переключатели так, чтобы на вход ОУ напряжение не поступало. Заменить переключатель 0 на переключатель с задержкой времени (Time-Delay Switch), установив для последнего время включенного состояния (Time on) 1,5...2 мс и время выключенного состояния (Time off) 0,5 мс. Измерить и зарисовать возникающий на выходе ЦАП искаженный импульс напряжения. Определить и записать длительность переднего фронта импульса. Эта длительность примерно равна основному динамическому параметру ЦАП – времени установления выходного напряжения $t_{\text{уст}}$. В исследуемой схеме время $t_{\text{уст}}$ в основном определяется быстродействием операционного усилителя.

4. Рассчитать и установить опорное напряжение E_0 на источнике питания V2 для получения шага квантования $\Delta = 15$ мВ.

5. Подключая к входу АЦП генератор треугольных импульсов с очень низкой частотой 0,1 Гц и амплитудой положительных импульсов, несколько превышающей E_0 (при этом параметры: Amplitude $> E_0/2$, Offset $> E_0/2$), убедиться в правильной работе АЦП, наблюдая последовательную смену показаний семисегментного индикатора, изменение логических уровней на выходе АЦП и согласованные изменения входного сигнала.

6. Включить на входе АЦП источник постоянного напряжения. Увеличивая (от нуля) напряжение на входе АЦП, получить зависимость кода на выходе от входного напряжения. Проверить величину шага квантования Δ и найти максимальное входное напряжение $U_{\max} = (2^3 - 1)\Delta$ АЦП. Занести в таблицу увеличивающиеся по величине двоичные коды и соответствующие им входные напряжения. Построить ступенчатый график зависимости выходного кода от входного напряжения.

7. Подать на вход АЦП выходной сигнал ЦАП и проверить соответствие установленного двоичного кода на входе ЦАП и выходе АЦП.

Содержание отчёта

Отчет, представляемый студентом к защите, должен содержать вычисленные значения опорных напряжений АЦП и ЦАП, действующие схемы, их рисунки, графики.

Контрольные вопросы

1. Рассчитайте частоту дискретизации последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой 5 В, длительностью импульса $\tau = 1$ мс, периодом повторения импульсов $T = 5$ мс. Верхняя граничная частота этого сигнала определяется уровнем шума, с амплитудой, равной 10 мВ.

2. Как можно уменьшить шум квантования при программной реализации на ЭВМ цифровой обработки сигналов?

3. Как изменятся характеристики параллельного АЦП при подаче опорных уровней на неинвертирующие входы ОУ?

4. Изобразите выходной сигнал трехразрядного ЦАП, если на его входы поступают от трехразрядного двоичного счетчика возрастающие (от нуля) значения двоичных кодов. Чему будет равен период выходного сигнала, если коды на входе ЦАП изменяются с частотой 10 кГц?

Список литературы

1. Multisim 11 User Guide
2. *Антонью А.* Цифровые фильтры: анализ и проектирование. М.: Радио и связь, 1983.
3. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М. Высшая школа, 1984
4. Введение в Multisim. Трёхчасовой курс. – 2006
5. *Г.А. Кардашев* Цифровая электроника на персональном компьютере Electronics Workbench и Micro-Cap – Москва: Горячая линия – Телеком, 2003 – 311 с.
6. *Кучумов А.И.* Электроника и схемотехника М. «Гелиос АРВ» 2011.
7. *М.Е. Хернимер Multisim* Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств – Москва: Издательский дом ДМК-пресс, 2006. – 448 с.
8. *Супрун А.Ф.* Электроника и схемотехника, Спб изд. СПбГПУ, 2014.
9. *Супрун А.Ф.* Электроника и схемотехника Техническая защита информации. . Спб. Изд СПбПУ, 2021.

Супрун Александр Федорович

Электроника и схемотехника
Техническая защита информации
Лабораторный практикум

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать . Формат 60х84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. . Тираж 32. Заказ .

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором, в
типографии Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 550-40-14
Тел./факс: (812) 297-57-76