

Министерство образования Республики Беларусь

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГРОДНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ЯНКИ КУПАЛЫ»

**«Изучение электронных устройств с помощью  
программы MultiSim»**

Лабораторный практикум по курсам  
«Радиотехнические цепи и сигналы», «Элементы и узлы приборов  
информационно-измерительной техники»,  
«Электроника и микропроцессорная техника», «Электроника»,  
«Электронная и информационно-измерительная техника»  
для студентов специальностей 1-38 02 01 – Информационно-  
измерительная техника, 1-36 01 04 – Оборудование и технология  
высокоэффективных процессов обработки материалов, 1-53 01 04 –  
Автоматизация и управление энергетическими процессами, 1-43 01 02 –  
Электроэнергетические системы и сети

Гродно 2012

УДК 621.384(075)  
ББК 32.85я73  
Е50

Авторы – составители :

С.В. Васильев, доцент кафедры  
информационных систем и технологий;  
Ж.В. Царикович, преподаватель кафедры  
информационных систем и технологий.

Рецензенты:

Рекомендовано Советом инженерно-физического факультета ГрГУ им.  
Я Купалы.

**Изучение** электронных устройств с помощью программы  
MultiSim : лабораторный практикум Е50 / авт.- сост.: С.В. Васильев,  
Ж.В. Царикович. – Гродно : ГрГУ, 2007. – 93 с.

ISBN 985-417-

В лабораторном практикуме приведено краткое описание  
версии программы MultiSim 10.0 и восемь лабораторных работ,  
выполняемых с помощью программы MultiSim.

Лабораторный практикум адресован студентам, изучающим  
основы электроники.

**УДК 621.384 (075)**  
**ББК 32.85я73**

**ISBN 985-417-**

© ГрГУ им. Я. Купалы, 2012

## **ВВЕДЕНИЕ**

Программа MultiSim 10.0, разработанная компанией  
National Instruments, – одна из наиболее популярных в мире  
программ конструирования электронных схем, характеризуется  
сочетанием профессиональных возможностей и простоты,  
расширяемостью функций от простой настольной системы до  
сетевой корпоративной системы.

Разработка любого радиоэлектронного устройства  
сопровождается, как правило, физическим или математическим  
моделированием. Физическое моделирование связано с большими  
материальными затратами, поскольку требуется изготовление  
макетов и их исследование, которое может быть весьма  
трудоемким. Поэтому часто применяют математическое  
моделирование с использованием средств и методов  
вычислительной техники.

Электронная система моделирования Multisim имитирует  
реальное рабочее место исследователя – лабораторию,  
оборудованную измерительными приборами, работающими в  
реальном масштабе времени. С ее помощью можно создавать,  
моделировать как простые, так и сложные аналоговые и  
цифровые радиофизические устройства. Особенностью  
программы является наличие в ней контрольно-измерительных  
приборов, по внешнему виду, органам управления и  
характеристикам максимально приближенных к их  
промышленным аналогам, что способствует одновременно и  
приобретению практических навыков работы с наиболее  
распространенными приборами: мультиметром, осциллографом,  
измерительным генератором и т. д.

Широкое распространение Multisim получила в средних и  
высших учебных заведениях, где она используется в учебных  
целях в качестве лабораторного практикума по целому ряду  
предметов (физика, основы электротехники и электроники,  
основы вычислительной техники и автоматики и др.). Программа  
Multisim (Electronics Workbench) отличается простым и легко  
осваиваемым пользовательским интерфейсом.

В настоящем пособии описываются основные принципы работы с электронной системой моделирования Multisim 10.0. Для четкого понимания принципов ее работы необходимо:

- знание основных принципов работы операционной системы Windows;
- понимание принципов работы основных измерительных приборов (осциллограф, мультиметр, и т.п.);
- знание отдельных элементов радиоэлектронных устройств.

По итогам выполнения лабораторной работы должен быть составлен отчет, который включает в себя:

- 1) название и цель лабораторной работы;
- 2) схему лабораторной установки;
- 3) наименование каждого пункта исследования и полученные результаты (таблицы и графики) по каждому пункту исследования;
- 4) выводы по результатам исследований.

## КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО К ПРОГРАММЕ MULTISIM 10.0

### Интерфейс программы

MULTISIM является программой с многооконным графическим интерфейсом, позволяющим строить и редактировать схемы, модели и изображения компонентов, а также представлять результаты расчетов в удобном графическом виде. Пользовательский интерфейс программы на рис. 1 и состоит из следующих элементов:

**строка меню (1)** (главное меню) позволяет выбирать команды для всех функций;

**окно разработки (2)** позволяет управлять различными элементами схемы.

**окно схемы (3)** (рабочая область) предназначено для создания рабочей схемы;

**панель инструментов (4)** состоит из набора кнопок для доступа к моделям контрольно-измерительных приборов;

**панель компонентов (5)** содержит кнопки, которые позволяют открывать «лотки», содержащие семейства компонентов: источники тока и напряжения, аналоговые элементы, транзисторы, диоды, функциональные блоки, элементы транзисторно-транзисторной логики (TTL), КМОП-элементы, индикаторы, электромеханические элементы, «основные» (конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности, ключи, реле, клемники и др.) и др.;

**выключатель процесса моделирования (6)** предназначен для запуска, остановки процесса моделирования, а также для создания паузы.

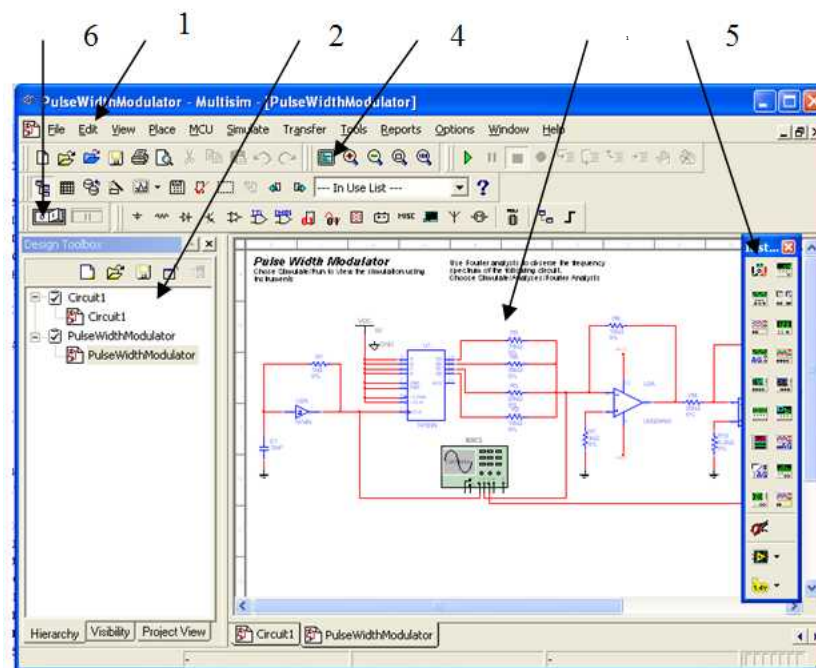


Рис. 1. Интерфейс программы MultiSim 10.0

## Система меню MultiSim 10.0.

Выбор элемента главного меню приводит к вызову другого меню (подменю), появляющегося под главным. Рассмотрим некоторые элементы меню

Меню **File** состоит из следующих элементов:

**New/Schematic Capture** – создать новый файл;

**Open** – открыть файл для редактирования и анализа;

**Open Samples** – открыть папку с примерами;

**Close** – закрыть текущее окно;

**Close All** – закрыть все открытые окна;

**Save** - сохранить текущую схему в файл, расширение .ms10 добавляется к названию файла автоматически;

**Save As** – сохранить текущую схему в файл с новым названием по указанному пути;

**Save All** – сохранить все открытые файлы;

**New Project** – создать новый проект;

**Open Project** – открыть проект;

**Save Project** – сохранить проект;

**Close Project** – закрыть открытый проект;

**Version Control** – создать резервную копию или восстановить проект;

**Resent Designs** – показать список из восьми последних открываемых или сохраненных схем;

**Resent Project** – показать список из восьми последних открываемых или сохраненных проектов.

В меню **Edit** содержатся следующие команды:

**Undo** – отменить последнюю команду редактирования;

**Redo** – повторить последнюю отмененную команду;

**Cut** – переместить выделенный объект в буфер обмена;

**Copy** – копировать выделенный объект в буфер обмена;

**Paste** – вставить содержимое буфера обмена в место расположения курсора мыши;

**Delete** – удалить выделенный участок схемы;

**Select All** – выделить все элементы в текущем окне;

**Delete Multi-Page** – удалить многостраничный файл;

**Paste as Subcircuit** – вставить выделенную часть схемы в виде отдельного блока (подсхемы);

**Find** – открыть диалоговое окно поиска;

**Graphic Annotation** содержит команды, позволяющие изменять настройки графических элементов, добавление элементов графики осуществляется при помощи меню **Place/Graphics**;

**Order** – переместить графические элементы на задний/передний план;

**Assign to Layer** – переместить выбранный элемент на другой слой;

**Layer Settings** - открыть диалоговое окно **Visibility**, доступное из меню **Options/Sheet Properties**;

**Title Block Position** – изменить позицию блока заголовка, блок заголовка содержит такую информацию, как название проекта, имя автора, имя редактора, дата последнего изменения, количество страниц и т.д.;

**Orientation** – изменить ориентацию выделенных элементов схемы;

**Symbol/Title Block** – изменить содержимое блока заголовка;

**Font** – изменить настройки фона;

**Comment** – редактировать контекст элемента (комментарий);

**Questions** – вызвать редактор **Edit Form** для создания текстовых форм;

**Properties** – показать свойства выделенного элемента.

В меню **View** содержатся следующие команды:

**Full Screen** – развернуть окно редактирования на весь экран;

**Parent Sheet** – показать родительское окно для текущей подсхемы;

**Zoom In** – увеличить масштаб схемы в процентном соотношении;

**Zoom Out** – уменьшить масштаб схемы в процентном соотношении;

**Zoom Area** – отобразить выделенный с помощью курсора мыши участок схемы на всю область рабочего окна;

**Zoom Fit to Page** – показать все рабочее пространство схемы;

**Zoom to magnification** – выбрать масштаб отображения рабочей области;

**Zoom Selection** – отобразить выделенную часть схемы на всю рабочую область;

**Show Grid** – показать/скрыть разметочную сетку;

**Show Border** – показать/скрыть рамку;

**Show Page Bounds** - показать/скрыть границы листа;

**Ruler Bars** - показать/скрыть масштабную линейку слева и сверху рабочей области;

**Status Bar** - показать/скрыть строку состояния;

**Design Toolbox** - показать/скрыть панель разработки, панель содержит следующие закладки:

**Visibility** (Видимость) - показать/скрыть слои схемы рабочей области;

**Hierarchy** (Иерархия) – показать открытый проект в виде иерархии файлов;

**Project** (Проект) – показать информацию об открытом проекте;

**Spreadsheet View** - показать/скрыть панель **Spreadsheet View**, панель отображается в виде таблицы для быстрого просмотра и редактирования различных параметров компонентов схемы;

**Circuit Description Box** - показать/скрыть текстовую форму;

**Toolbars** – добавить/удалить кнопки на панели инструментов для быстрого доступа к командам и элементам меню;

**Show Comment/Probe** - показать/скрыть комментарии

**Grapher** - показать/скрыть результаты моделирования в графическом или символьном виде.

Меню **Place** состоит из команд расположения элементов в окне редактирования схемы:

**Component** – открыть окно доступа к базам данных компонентов *Master Database*, *Corporate Database*, *User Database*;

**Junction** – добавить элемент «узел» в окно редактирования схемы;

**Wire** – добавить элемент «проводник» (соединительная линия), с помощью данного элемента производится коммутация выводов элементов и узлов схемы;

**Bus** – добавить элемент «шина», шины позволяют заменить большое число проводников и могут использоваться в пределах

рабочей области (страницы), между страницами, и во вложенных схемы (подсхемы и вложенные блоки); шина может функционировать в двух режимах: сетевом (net mode) и информационном (busline mode):

В сетевом режиме шина – набор соединений. При каждом новом подключении к шине соединение осуществляется с уже имеющимся выводом шины или формируется новый вывод соответствующий названию проводника.

В информационном режиме можно заранее определить номер и название для каждой линии шины.

**Connectors** – добавить элемент «Соединитель» (переходник), в программе используется четыре вида соединителей:

**HB/SC Connector** – предназначен для соединения элементов схемы и подсхемы;

**Bus HB/SC Connector** – предназначен для соединения элементов схемы с помощью шины;

**Off-Page Connector** – предназначен для межстраничного соединения элементов схемы;

**Bus Off-Page Connector** – предназначен для межстраничного соединения элементов схемы с использованием шины.

**New Hierarchical Block** – создать схему, которая отображается в родительском окне в виде прямоугольного блока с выводами; созданная схема не имеет элементов и находится на один уровень ниже в иерархической структуре;

**Replace by Hierarchical Block** – заменить выделенную часть схемы вложенным блоком;

**Hierarchical Block from File** – добавить вложенный блок в схему из файла;

**New Subcircuit** – создать новую подсхему;

**Replace by Subcircuit** – заменить выделенную часть схемы подсхемой;

**Multi-Page** – создать новую страницу одного уровня с текущей;

**Merge Bus** – объединить несколько шин в одну;

**Bus Vector Connect** – установить соединение между компонентами схемы при помощи шины;

**Connect** – добавить комментарий;

**Text** – добавить текстовую надпись;  
**Graphics** – добавить графический элемент;  
**Title Block**- добавить блок заголовка.

Меню **MSU**. В программе MultiSim имеется возможность подключения модуля имитации работы современных микроконтроллеров, комбинирующих в себе центральный процессор, память данных, память программы и периферийные устройства на единственном физическом кристалле. В меню **MSU** находятся команды для обеспечения написания и отладки программы с учетом особенностей разрабатываемого устройства.

В меню **Simulate** содержатся следующие команды:

**Run** – запустить/возобновить моделирование;

**Pause** – приостановить процесс моделирования с возможностью продолжения моделирования с момента приостановки;

**Stop** – остановить процесс моделирования;

**Instruments** – добавить виртуальный контрольно-измерительный прибор;

**Interactive Simulation Settings** позволяет установить настройки по умолчанию для приборов, которые основаны на анализе переходных процессов (таких как осциллограф, спектроанализатор и логический анализатор);

**Digital Simulation Settings** позволяет выбирать между оптимизацией по точности и по скорости моделирования при наличии цифровых компонентов в схеме;

**Analyses** содержит команды настройки параметров и выполнения анализа схемы;

**Postprocessor** – открыть диалоговое окно **Postprocessor**, которое позволяет объединить несколько исследований и отобразить результаты моделирования в графическом виде, для использования **Postprocessor** необходимо провести минимум одно исследование;

**Simulation Error Log/Audit Trail** – показать/скрыть журнал регистрации событий;

**Xspice Command Line Interface** - открыть окно ввода **Xspice**-команд;

**Load Simulation Settings** – загрузить ранее сохраненные настройки параметров моделирования;

**Save Simulation Settings** – сохранить настройки параметров моделирования;

**VHDL Simulation** – запустить модуль имитации **VHDL**;

**Dynamic Probe Properties** – отобразить диалоговое окно **Probe Properties**, предназначенное для изменения настроек инструмента **Measurement Probe** (измерительный пробник);

**Reverse Probe Direction** – изменить направление выделенного измерительного пробника;

**Clear Instrument Data** – очистить данные моделирования измерительных приборов, таких как осциллограф;

**Auto Fault Option** – добавить ошибки в модели компонентов схемы;

**Use Tolerances** – включить/выключить установленные допустимые отклонения для компонентов схемы.

В меню **Transfer** находятся команды импорта/экспорта данных в форматы файлов других программ.

В меню **Tools** находятся следующие команды:

**Component Wizard** – вызвать мастера создания компонентов;

**Database/Database Manager** – позволяет добавить группу компонентов, редактировать, копировать и удалять компоненты;

**Database/Save Component to DB** – сохранить выделенный компонент в базе данных;

**Database/Convert Database** – конвертировать компоненты из корпоративной или пользовательской базы данных в базу данных пакета;

**Database/Merge Database** – вызвать диалоговое окно **Merge Database** для объединения содержимого пользовательских и других баз данных;

**Circuit Wizards/555 Timer Wizard** – позволяет создавать автоколебательный или ждущий мультивибратор на таймере 555;

**Circuit Wizards/Filter Wizard** – позволяет создавать различные типы фильтров с требуемыми характеристиками;

**Circuit Wizards/Opamp Wizard** – позволяет создавать различные схемы на операционном усилителе;

**Circuit Wizards/CE BJT Amplifier Wizard** - позволяет создавать схему усилителя на биполярном транзисторе с общим эмиттером и с требуемыми характеристиками;

**Variant Manager** – открыть диалоговое окно **Variant Manager** для создания нескольких вариантов схем;

**Set Active Variant** – выбрать вариант схемы и сделать его текущим;

**Rename/Renumber Components** – изменить нумерацию компонентов схемы, отображаемых на экране;

**Replace Components** – заменить выделенный компонент схемы;

**Update Circuit Components** – обновить компоненты схемы, созданной в более ранней версии;

**Electrical Rules Check** – проверить наличие и корректность соединений элементов схемы;

**Toggle NC Marker** – установить метку «нет соединения» (маркер ошибки) для выводов компонентов схемы;

**Clear ERC Markers** – удалить маркеры ошибок;

**Symbol Editor** – вызвать редактор условно-графического отображения пользовательских элементов;

**Title Block Editor** – вызвать редактор блока заголовка;

**Description Box Editor** – запустить редактор поля **Circuit Description Box**;

**Edit Labels** – добавить/удалить метку в поле **Circuit Description Box**;

**Capture Screen Area** – копировать часть экрана в буфер обмена.

Меню **Reports** содержит следующие команды:

**Bill of Materials** – вывести перечень элементов схемы;

**Component Detail Report** – показать диалоговое окно описания компонентов, доступных в базе данных программы.

**Netlist Report** – вывести информацию о проводниках схемы;

**Cross Reference Report** – вывести список элементов текущей схемы;

**Schematic Statistics** – вывести статистическую информацию о схеме (количество элементов, количество соединителей и т.д.);

**Spare Gates Report** – вывести список незадействованных секций интегральных элементов;

Меню **Options** состоит из следующих пунктов:

**Global Preferences** – выполнить глобальные настройки программы;

**Sheet Properties** – открыть диалоговое окно для изменения цветовой гаммы схемы и ее объектов, типа и атрибутов шрифтов и других параметров, значения которых сохраняются в файле схемы;

**Customize User Interface** – настройка пользовательского интерфейса программы.

В меню **Windows** содержатся команды организации оконного интерфейса программы.

Меню **Help** содержит команды вызова файла помощи с детализацией возможностей программы, подробного описания семейств компонентов, а также информацию о последней версии программы.

### Панель инструментов

Панель инструментов является элементом графического интерфейса программы, объединяющим различные кнопки для быстрого доступа к командам меню. По умолчанию отображаются группы кнопок следующего назначения:

**Standart** – стандартная панель, включающая кнопки быстрого доступа к меню **File**;

**Main** – главная панель, включающая такие кнопки, как выбор режима анализа, создание пользовательского компонента.

**View** – панель масштабирования, включающая наиболее часто используемые кнопки для быстрого доступа к командам меню **View**;

**Simulation** – панель моделирования, включающая кнопки управления процессом моделирования:



**Simulation Switch** – включает кнопки запуска/завершения и приостановки моделирования:



Components – включает кнопки доступа к отдельным группам компонентов базы данных:



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

У реальных компонентов (рис.2), в отличие от виртуальных есть определенное, неизменяемое значение и свое соответствие на печатной плате. Виртуальные компоненты нужны только для эмуляции, пользователь может назначить им произвольные параметры. Например, сопротивление виртуального резистора может быть произвольным, даже 3,86654 Ом. 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 рис.3.

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



Рис. 2. Символы различных компонентов: логические элементы НЕ-И U2A, микроконтроллер U3 и транзистор Q1.

## Виртуальные компоненты

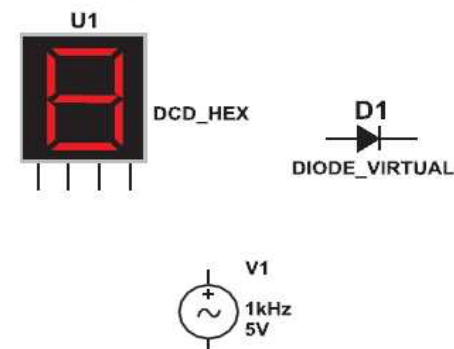


Рис. 3. Символы различных компонентов: 7-сегментный дисплей, диод D1, источник напряжений V1.



- Источники. В данной группе содержатся модели источников питания: однофазный источник питания

постоянного напряжения (DC\_POWER) – однофазный источник питания переменного напряжения (AC\_POWER) –

трехфазные источники питания, источники питания постоянного тока, заземление (GROUND), источники напряжения

(источник прямоугольного сигнала), кусочно-линейного

сигнала (PWL Voltage), источники тока .



- Базовые компоненты (включают резисторы, конденсаторы, индуктивности, трансформаторы, виртуальные механические ключи и т.д.).



- Диоды (содержатся модели компонентов, таких, как диод, стабилитрон (zener), светодиод, диодный мост (FWB), диод Шоттки, тиристор и др.).





Транзисторные компоненты (содержатся модели биполярных транзисторов (BJT), полевых транзисторов (JFET), МОП-транзисторов и др.).



Аналоговые компоненты (операционные усилители и компараторы);



Цифровые микросхемы по технологии ТТЛ.



Цифровые микросхемы по технологии КМОП.



Цифровые устройства (содержит идеальные модели цифровых устройств: логические элементы, триггеры, регистры, счетчики, мультиплексоры, декодеры, элементы арифметико-логических устройств и др., микросхемы цифровой обработки сигналов (DSP), программируемые логические интегральные схемы, микросхемы памяти, микроконтроллеры).



Индикаторные устройства (включают модели компонентов: индикаторы напряжения и тока, логические пробники, семисегментные индикаторы, звуковые индикаторы).

Добавление компонентов в схему осуществляется из меню **Place** или панели инструментов **Components**.

### Виртуальные приборы Multisim.

Виртуальные приборы Multisim – это программные модели контрольно-измерительных приборов. Добавление виртуального прибора в схему осуществляется с помощью курсора мыши и приборной панели или меню **Place**.



Мультиметр ( Multimeter ).

Внешний вид и лицевая панель мультиметра приведены на (рис. 4).



Рис. 4. Мультиметр.

Выбор режима осуществляется нажатием кнопок на панели прибора в соответствии с рис.5.

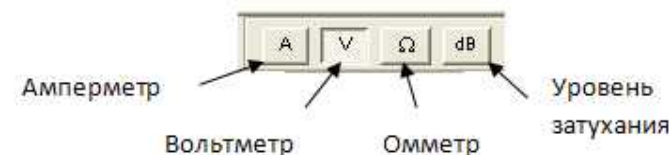


Рис.5.

Рис. 5. Режим работы.

Функциональный генератор ( Function Generator )

Функциональный генератор представляет собой источник сигнала синусоидальной, треугольной или прямоугольной формы. Внешний вид и лицевая панель генератора на рис. 6.

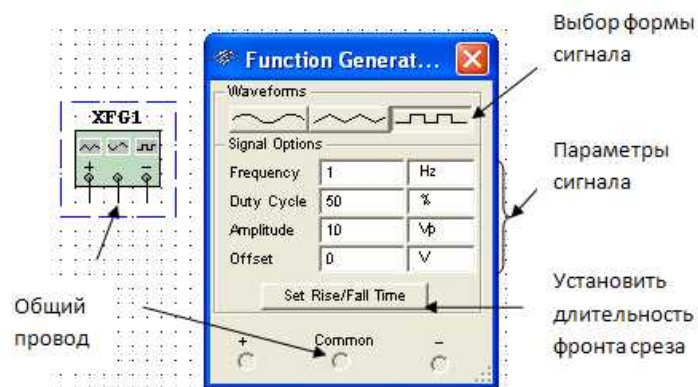


Рис.6.

Функциональный генератор.

Настройка параметров генерируемого сигнала осуществляется с помощью органов управления, объединенных в группу Signal Options:

Frequency (Частота) – установка частота выходного сигнала в диапазоне от  $10^{-15}$  Гц до  $10^{+15}$  Гц;

Duty Cycle – установка коэффициента заполнения в диапазоне от 1 % до 99 %, для импульсных сигналов это отношение длительности импульса к периоду повторения (величина обратная скважности), опция недоступна для синусоидального сигнала;

Amplitude – установка амплитуда выходного сигнала в диапазоне от  $10^{-15}$  Гц до  $10^{+15}$  В;

Offset – установка величины постоянной составляющей выходного сигнала в диапазоне  $10^{-15}$  Гц до  $10^{+15}$  В;

*Wattmeter (Wattmeter)*

Ваттметр MultiSim позволяет проводить измерение мощности постоянного и переменного тока, рассеиваемой в нагрузке, и коэффициента мощности (Power Factor). Внешний вид и лицевая панель ваттметра на рис. 7.

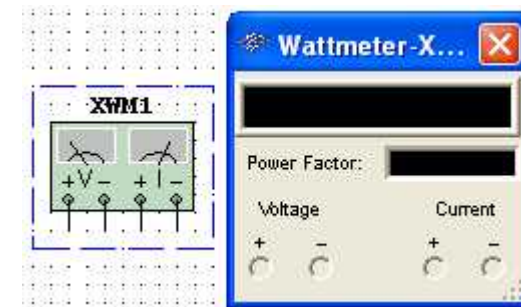


Рис. 7. Ваттметр.

Осциллограф (Oscilloscope)

Осциллограф позволяет проводить анализ сигналов во временной области. Внешний вид и лицевая панель осциллографа на рис. 8.

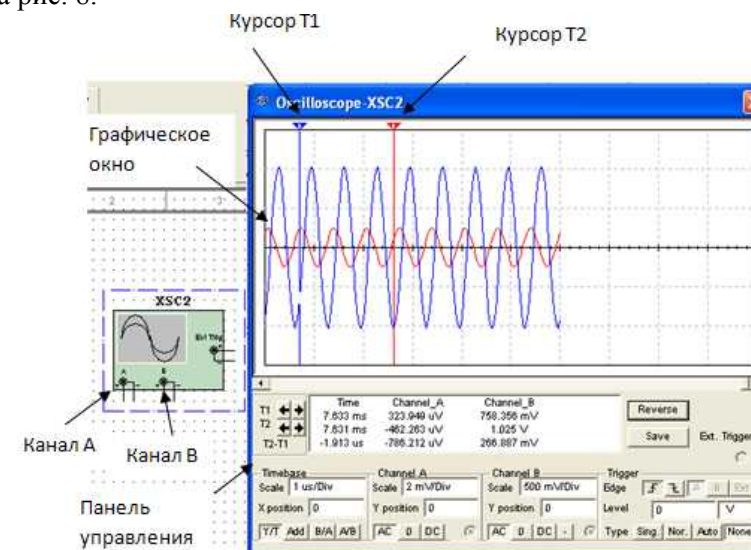


Рис. 8. Двухканальный осциллограф.

Модель имеет два канала А и В с отдельной регулировкой чувствительности в диапазоне от  $10^{-15}$  В/дел до  $10^{+15}$  В/дел, регулировкой смещения по горизонтали и по вертикали. Каждый канал помимо сигнального входа имеет контакт заземления. Если не использовать контакт заземления, осциллограф все равно

будет заземлен, так как он в программе MultiSim заземляется автоматически.

Для настройки отображения измеряемого сигнала используется панель управления осциллографом (рис.9). Выбор режима работы по входу осуществляется нажатием кнопок «АС», «0», «DC», «-» (инверсный режим – только для канала В). Режим АС равносителен введению емкостного фильтра в цепь сигнала, при этом отображается только переменная составляющая сигнала. В режиме 0 входной канал замыкается на землю. В режиме DC отображаются обе составляющие сигнала. В инверсном режиме сигнал инвертируется относительно положения нуля.

Для выбора режима развертки используются кнопки Y/T, Add, B/A, A/B. В режиме Y/T реализуется временная развертка для каждого канала, т.е. горизонтальная ось представляет собой ось времени, а сигнал канала А и/или В откладывается по вертикальной оси. Длительность развертки задается в поле Scale (Масштаб) параметра Timebase и варьируется в диапазоне от  $10^{-15}$  с/дел до  $10^{+15}$  с/дел. В режиме Add отображается суммарный сигнал каналов А и В. Для построения передаточной характеристики исследуемой схемы используются режимы В/А и А/В. В режиме В/А отображается сигнал канала В относительно сигнала канала А. В режиме А/В – наоборот.

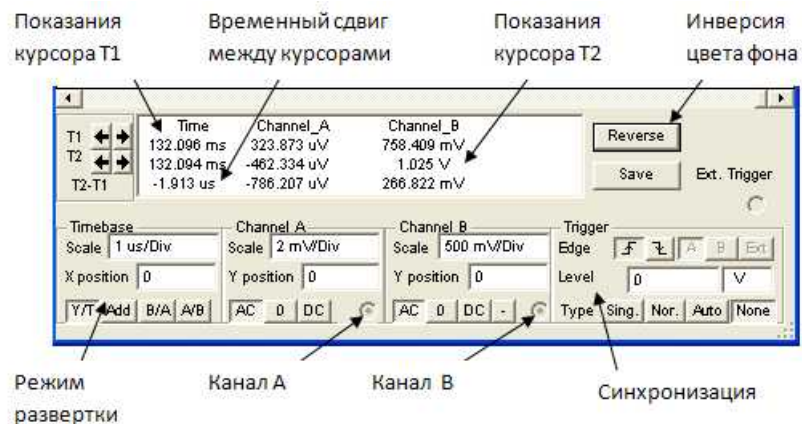


Рис. 9. Панель управления осциллографа.

Осциллограф MultiSim имеет три режима синхронизации – Single (Однократный), Normal (Обычный), Auto (Автоматический).

В режиме Normal сигнал на экране осциллографа отображается после поступления сигнала синхронизации. Далее осциллограмма остается неподвижной до момента прихода следующего сигнала.

Режим Single работает аналогично режиму Normal за исключением того, что на экране формируется только одна кривая. При активации опции Single осциллограф переходит в режим ожидания сигнала синхронизации.

В режим Auto сигнал синхронизации создается автоматически, а не путем сравнения заданного значения и уровня триггера. Режим автоматической синхронизации используется, когда невозможно создать сигнал запуска в обычном или одиночном режиме.

Во всех этих режимах используется один из источников синхронизации: канал А, канал В или External Trigger (Внешняя синхронизация). Опция Edge (Фронт) позволяет выбирать запуск по фронту  $\uparrow$  или по срезу  $\downarrow$  сигнала синхронизации при регулируемом уровне (Level) запуска.

При измерении напряжения постоянного тока выбираем режим None (синхронизация отсутствует), т.к. напряжение не изменяется и измеряемый сигнал не может пересечь уровень запуска.

Обычно осциллографы создают сигналы синхронизации с помощью сигналов, измеряемых на каналах А или В. Однако при измерении небольших сигналов могут возникнуть сложности с созданием сигнала синхронизации, и в результате осциллограммы будут беспорядочно перемещаться по экрану. Чтобы избежать этого, используется канал внешней синхронизации (Ext.Trigger).

*Измеритель АЧХ и ФЧХ ( Bode Plotter).*

Внешний вид и лицевая панель на рис.10.



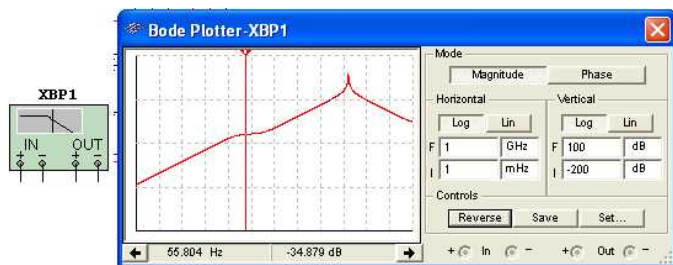


Рис. 10. Измеритель АЧХ и ФЧХ.

Измеритель предназначен для анализа амплитудно-частотных (при нажатой кнопке MAGNITUDE, включена по умолчанию) и фазо-частотных (при нажатой кнопке PHASE) характеристик при логарифмической (кнопка LOG, включена по умолчанию) или линейной (кнопка LIN) шкале по осям Y (VERTICAL) и X (HORIZONTAL). Настройка измерителя заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи и вариации частоты с помощью кнопок в окошках F – максимальное и I – минимальное значение. Значение частоты и соответствующее ей значение коэффициента передачи или фазы индицируются в окошках в правом нижнем углу измерителя. Значения указанных величин в отдельных точках АЧХ или ФЧХ можно получить с помощью вертикальной визирной линии, находящейся в исходном состоянии в начале координат и перемещаемой по графику мышью или кнопками , . Результаты измерения можно записать также в текстовый файл. Для этого необходимо нажать кнопку SAVE и в диалоговом окне указать имя файла (по умолчанию предлагается имя схемного файла). В полученном таким образом текстовом файле «\*.scr» АЧХ и ФЧХ представляются в табличном виде.

*Логический преобразователь (Logic Converter)*

Логический преобразователь предназначен для выполнения функциональных преобразований в схеме. Внешний вид логического преобразователя на рис.11.

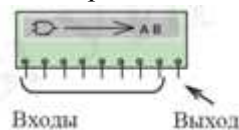


Рис. 11. Внешний вид логического преобразователя.

Логический преобразователь имеет восемь входов (А, В...Н) и один выход (Out), экран для отображения таблицы истинности исследуемой схемы, строку для отображения ее логического выражения, панель выбора преобразования (Conversions). Лицевая панель прибора на рис.12.

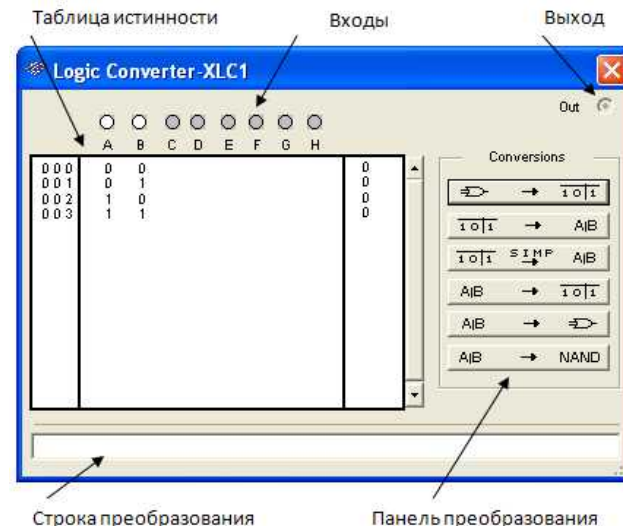


Рис. 12. Лицевая панель логического преобразователя.

С помощью преобразователя можно осуществить следующие операции.

Получение таблицы истинности. Для получения таблицы истинности необходимо подключить входы логического преобразователя ко входам исследуемой схем, выход логического преобразователя соединить с выходом схемы, запустить преобразование нажатием кнопки  $A|B \rightarrow 10|1$ .

Подключение прибора к исследуемой схеме осуществляется с помощью зажимов IN (вход) и OUT (выход). Левые клеммы зажимов подключаются соответственно к входу и выходу исследуемого устройства, а правые – к общей шине (земля). Ко входу устройства необходимо подключить функциональный генератор или другой источник переменного напряжения, при этом каких-либо настроек в этих устройствах не требуется.

### Получение логического выражения по таблице истинности.

Для этого необходимо задать количество аргументов и для каждого набора задать значение функции алгебры логики. Задание количества аргументов осуществляется с помощью экранных кнопок над буквами на лицевой панели прибора. Получить логическое выражение нажатием кнопки или логическое выражение в дизъюнктивной нормальной нажатием кнопки .

### Получение таблицы истинности по логическому выражению.

Для этого необходимо в строку преобразования ввести логическое выражение. Нажать . При выводе выражения инверсия обозначается апострофом «'», логическое сложение – «+», логическое умножение не обозначается.

### Синтез логического устройства по логическому выражению.

Для получения схемы, заданную логическим выражением, необходимо ввести выражение в строке преобразования и нажать кнопку .

Для построения схемы в базисе Шеффера (И-НЕ) нажать кнопку .

### Генератор слов (Word Generator)

Генератор слов предназначен для генерации 8192 32-разрядных двоичных слов. Внешний вид и лицевая панель на рис.13.

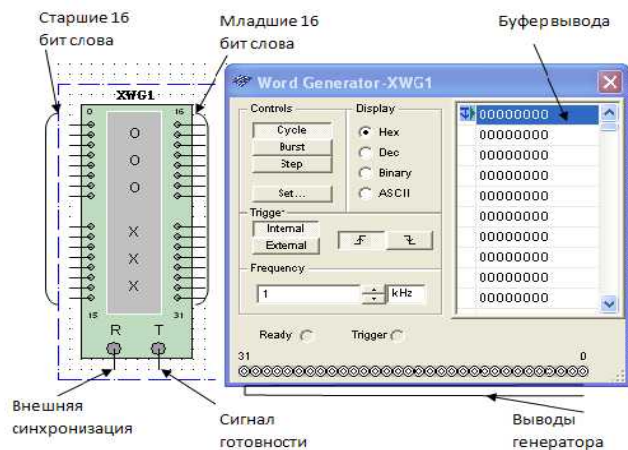


Рис. 13. Генератор слов

Ввод генерируемых слов производится в буфер ввода. Формат отображения кодовых слов выбирается с помощью кнопок Display (Hex – шестнадцатеричный, Dec – десятичный, Binary – двоичный, ASCII – символьный). Частота генерации кодовых слов задается в окне Frequency (Частота) и лежит в диапазоне от 1 Гц до 1000 МГц. В процессе работы на каждом выводе генератора появляется логический уровень согласно разряду двоичного кодового слова, при этом генератор работает в трех режимах:

- Step (Пошаговый) – каждый раз при подаче очередного слова на выход моделирование останавливается;
- Burst (Пакетный) – генерируется последовательность кодовых слов, начиная с начальной позиции и заканчивая конечной позицией, моделирование останавливается при достижении конечной позиции;
- Cycle (Циклический) – на выводах генератора последовательно появляются логические уровни согласно комбинации слов, генерирование осуществляется до тех пор, пока не будет остановлено моделирование или достигнута точка прерывания (Breakpoint .

Во время моделирования курсор в окне «буфер вывода» указывает на текущее генерируемое слово. Остановив моделирование, можно изменить положение курсора, начальную позицию, а также точку прерывания.

При нажатии кнопки «Set» открывается диалоговое окно свойств буфера (рис. 14):

- No Change – оставить без изменений;
- Load – загрузить кодовые слова из файла;
- Save – сохранить кодовые слова в файл;
- Clear buffer – обнулить содержимое буфера;
- Up Counter – заполнить буфер кодовыми словами, начиная с кода, указанного в поле Initial Pattern (по умолчанию 0x0000), с последующим увеличением на 1 в каждой следующей строке;
- Down Counter – заполнить буфер кодовыми словами, начиная с кода, указанного в поле Initial Pattern (по

умолчанию 0x0400), с последующим уменьшением на 1 в каждой следующей строке;

- Shift Right – заполнить буфер кодовыми словами, начиная с кода, указанного в поле Initial Pattern (по умолчанию 0x80000000), с последующим двоичным сдвигом вправо на 1 разряд в каждой следующей строке;
- Shift Left – заполнить буфер кодовыми словами, начиная с кода, указанного в поле Initial Pattern (по умолчанию 0x0001), с последующим двоичным сдвигом влево на 1 разряд в каждой следующей строке;

Запуск генератора может синхронизироваться как внутренним (Internal), так и внешним (External) сигналом синхронизации. На вывод Ready подается сигнал готовности.

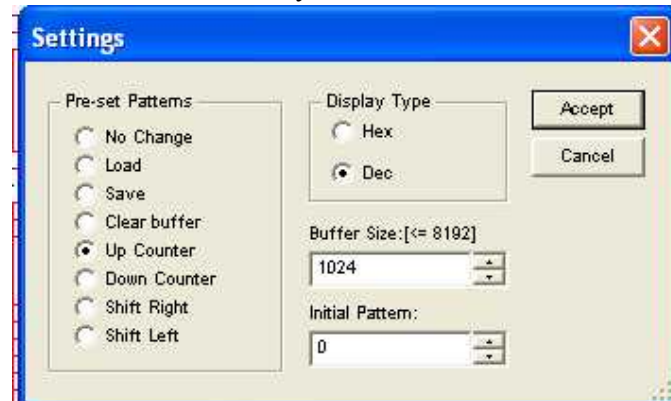


Рис. 14. Окно свойств буфера

*Логический анализатор (Logic Analyzer)*

Логический анализатор (ЛА) – устройство, предназначенное для диагностики цифровых схем. ЛА позволяет отслеживать и записывать состояния логических элементов цифровых электронных устройств, анализировать и визуализировать их. Внешний вид и лицевая панель на рис. 15.

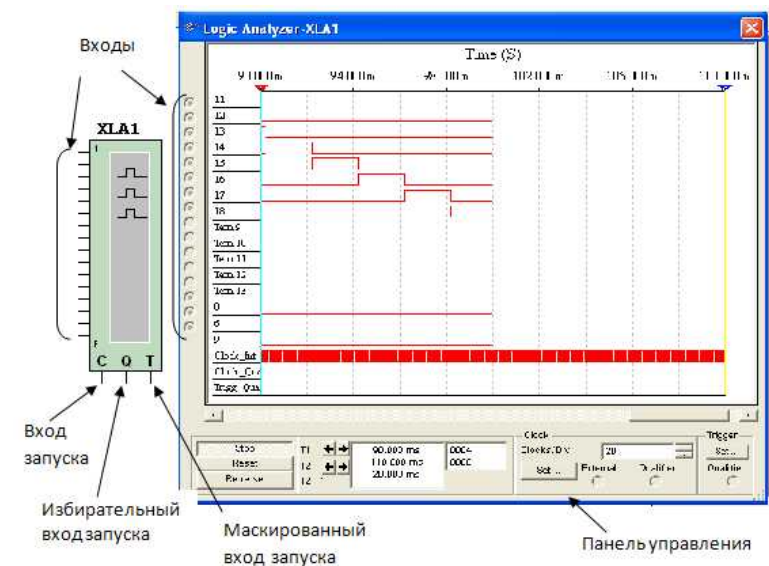


Рис. 15. Логический анализатор.

ЛА имеет 16 каналов для съема сигналов, а также несколько входов запуска. Кроме этого прибор снабжен двумя курсорами, позволяющими проводить измерения во временной области. Если вход 1 считать младшим разрядом, а вход 16 – старшим, то состояние всех входов может быть представлено 16-разрядным двоичным кодом. Код, соответствующий позиции курсора, отображается в поле «входной код» (рис. 16).

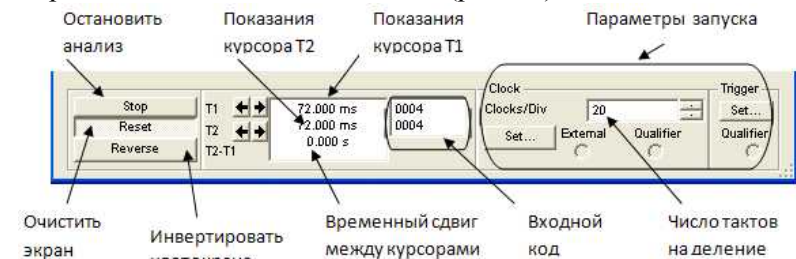


Рис. 16. Панель управления логического анализатора.

При нажатии кнопки «Set» в группе Clock (тактовый генератор) открывается диалоговое окно настройки параметров тактирования входных сигналов (рис. 17).



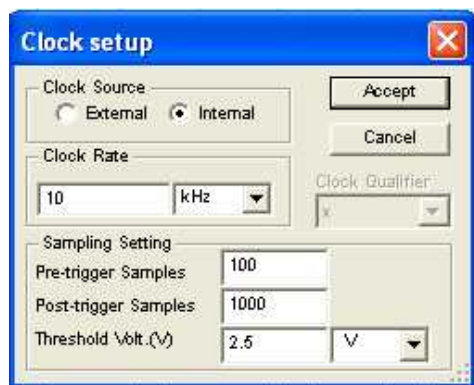


Рис. 17. Настройка параметров синхронизации.

Тактирование сигналов осуществляется с использованием внешнего (External) или внутреннего (Internal) источника. В поле Clock Qualifier устанавливается активный уровень синхронизации. В поле Clock Rate устанавливается частота выборки анализатора.

В группе Sampling Setting задаются параметры выборки сигналов:

- Pre-trigger Samples – сбор данных производится до поступления импульса запуска;
- Post-trigger Samples – сбор данных начинается после поступления импульса и продолжается до тех пор, пока не будет набрано заданное количество отчетов;
- Threshold Volt (V) – пороговая величина.

Дополнительные условия запуска анализатора осуществляются с помощью диалогового окна Trigger Setting (рис.18). В данном окне настраивается маска, по которой осуществляется фильтрация логических уровней и синхронизация входных каналов.

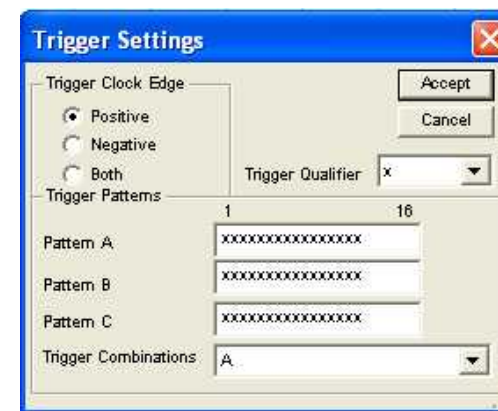


Рис. 18. Настройка дополнительных параметров синхронизации.  
*Спектроанализатор (Spectrum Analyzer)*

Спектроанализатор позволяет представить сигнал в виде гармонических составляющих в частотной области, измерить мощность сигнала и частотных компонентов, определить наличие гармоник в сигнале. Внешний вид и лицевая панель спектроанализатора на рис. 19.

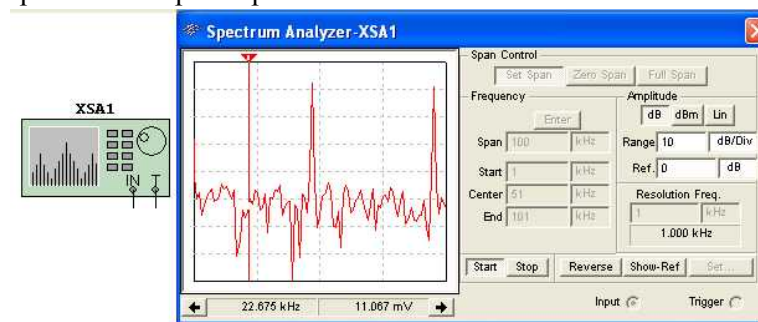


Рис. 19. Спектроанализатор.

### Создание схем

На рабочем поле MultiSim. размещают компоненты из библиотек программы в соответствии с подготовленным эскизом. Для открытия каталога нужной библиотеки необходимо подвести курсор мыши к соответствующей иконке и нажать один раз на левую кнопку. Необходимый для создания схемы значок (символ) компонента переносится из каталога на рабочее поле программы.

На этом этапе необходимо предусмотреть место для размещения контрольных точек и иконок контрольно-измерительных приборов. Рассмотрим процесс создания схемы на примере электронного транзисторного ключа. Размещения компонентов на рис. 20.

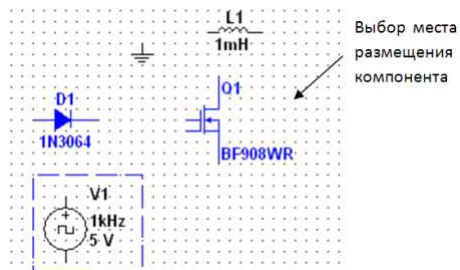


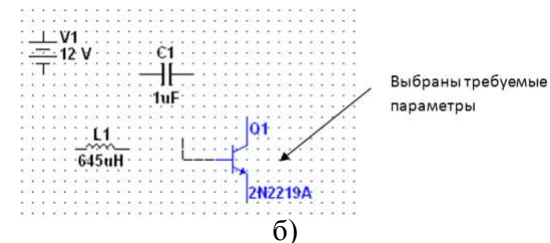
Рис. 20. Размещение компонентов схемы.

Далее устанавливается ориентация компонента (если это необходимо) с помощью команд всплывающего меню нажатием правой кнопки мыши на выбранном компоненте (рис.21, а) и изменяют параметры элементов питания (рис.21, б).

После размещения компонентов схемы производится соединение их выводов проводниками. При этом необходимо учитывать, что к выводу подключается один проводник. Для выполнения подключения курсор мыши подводится к выводу компонента и после изменения вида курсора устанавливается соединение (рис. 21, а). При изменении существующего соединения курсор отражается в виде (рис.21,б).



а)



б)

Рис. 21. Ориентация элементов (а), при их добавлении (б).

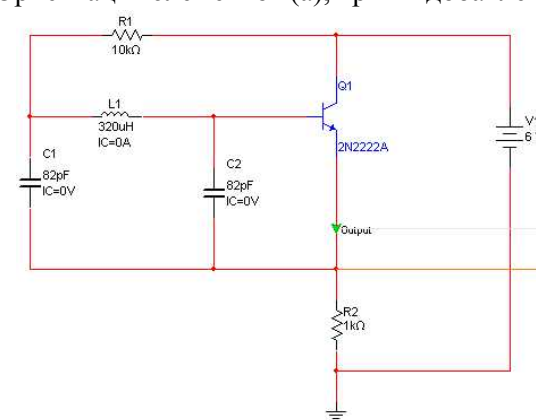


Рис. 22. Соединение элементов схемы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

**Краткая теория.** Для любого электрического прибора важна зависимость между током через прибор и приложенным напряжением. Зная эту зависимость, можно определить ток при заданном напряжении или, наоборот, напряжение, соответствующее заданному току.

Если сопротивление прибора постоянно, не зависит от тока или напряжения, то связь между током и напряжением выражается законом Ома:

$$i = u/R \text{ или } i = Gu \quad (1)$$



Ток прямо пропорционален напряжению. Коэффициентом пропорциональности является проводимость  $G = 1/R$ .

График зависимости между током и напряжением называется *вольтамперной характеристикой* данного прибора, или просто *характеристикой*. Для прибора, подчиняющегося закону Ома, характеристикой является прямая линия, проходящая через начало координат (рис. 23).

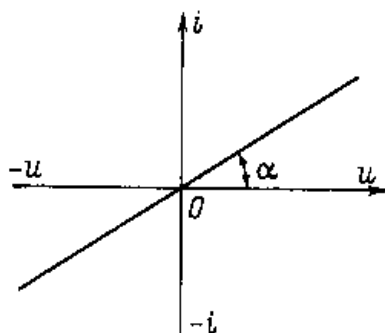


Рис. 23. Вольтамперная характеристика линейного прибора

Чем больше сопротивление  $R$ , тем меньше проводимость  $G$  и тем меньше ток при данном напряжении. Поэтому для больших сопротивлений характеристика идет более полого. Сопротивление  $R$  связано с углом наклона  $\alpha$  характеристики зависимостью:

$$R = u/I = k \operatorname{ctg} \alpha, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий единицы величин, входящих в формулу, и масштаб, в котором значения величин отложены на осях.

Иначе можно написать:

$$G = 1/R = i/u = k' \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где  $k' = 1/k$ .

Приборы, принцип действия которых подчиняется закону Ома, а вольтамперная характеристика имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат, называются *линейными*.

Существуют также приборы, у которых сопротивление не постоянно, а зависит от напряжения или тока. Для таких приборов связь между током и напряжением выражается не законом Ома, а более сложным образом, и вольтамперная характеристика не является прямой линией, проходящей через начало координат. Эти приборы называются *нелинейными*.

Электронно-дырочный переход, по существу, представляет собой полупроводниковый диод. Нелинейные свойства диода видны при рассмотрении его вольтамперной характеристики. Пример такой характеристики для диода небольшой мощности дан на рис. 24. Она показывает, что прямой ток в десятки миллиампер получается при прямом напряжении в десятые доли вольта. Поэтому прямое сопротивление бывает обычно не выше нескольких десятков Ом. Для более мощных диодов прямой ток составляет сотни миллиампер и больше при том же малом напряжении, а  $R_{пр}$  соответственно снижается до единиц и долей Ома.

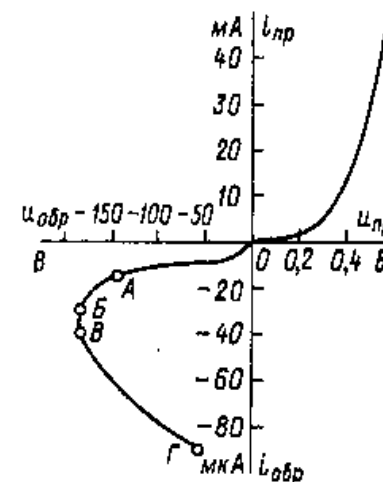


Рис. 24. Вольтамперная характеристика полупроводникового диода

Характеристику для обратного тока, малого по сравнению с прямым током, обычно показывают в другом масштабе, что и сделано на рис. 24. Обратный ток при обратном напряжении до сотен вольт у диодов небольшой мощности составляет единицы или десятки микроампер. Это соответствует сопротивлению несколько сотен килоОм и больше. Так как  $u_{обр} \gg u_{пр}$ , то эти напряжения также отложены в разных масштабах. Вследствие различия в масштабах получился излом кривой в начале координат. При неизменном масштабе характеристика была бы плавной кривой, без излома.

Характеристика для прямого тока вначале имеет значительную нелинейность, так как при увеличении  $u_{пр}$  сопротивление запирающего слоя уменьшается. Поэтому кривая идет со все большей крутизной. Но при напряжении в десятки доли вольта запирающий слой практически исчезает и остается только сопротивление  $n$ - и  $p$ -областей, которое приближенно можно считать постоянным. Поэтому далее характеристика становится почти линейной. Небольшая нелинейность здесь объясняется тем, что при увеличении тока  $n$ - и  $p$ -области нагреваются и от этого их сопротивление уменьшается.

Обратный ток при увеличении обратного напряжения сначала быстро возрастает. Это вызвано тем, что уже при небольшом обратном напряжении за счет повышения потенциального барьера в переходе резко снижается диффузионный ток, который направлен навстречу току проводимости. Следовательно, полный ток  $i_{обр} = i_{др} - i_{диф}$  резко увеличивается. Однако при дальнейшем повышении обратного напряжения ток растет незначительно. Рост тока происходит вследствие нагрева перехода за счет утечки по поверхности, а также за счет лавинного размножения носителей заряда, т. е. увеличения числа носителей заряда в результате ударной ионизации. Явление ударной ионизации состоит в том, что при более высоком обратном напряжении электроны приобретают большую скорость и, ударяя в атомы кристаллической решетки, выбивают из них новые электроны, которые, в свою очередь, разгоняются полем и также выбивают из атомов электроны. Такой процесс усиливается с повышением напряжения.

При некотором значении обратного напряжения возникает пробой  $n - p$ -перехода, при котором обратный ток резко возрастает и сопротивление запирающего слоя резко уменьшается. Следует различать электрический и тепловой пробой  $n - p$ -перехода. Электрический пробой, области которого соответствует на рис. 24 участок  $ABB$  характеристики, является обратимым, т. е. при этом пробое в переходе не происходит необратимых изменений (разрушения структуры вещества). Поэтому работа диода в режиме электрического пробоя допустима. Специальные диоды для стабилизации напряжения – полупроводниковые стабилитроны – работают на участке  $BB$  характеристики. Могут существовать два вида электрического пробоя, которые нередко сопутствуют друг другу: лавинный и туннельный.

Лавинный пробой объясняется лавинным размножением носителей за счет ударной ионизации и за счет вырывания электронов из атомов сильным электрическим полем. Этот пробой характерен для  $n - p$ -переходов большой толщины, получающихся при сравнительно малой концентрации примесей в полупроводниках. Пробивное напряжение для лавинного пробоя составляет десятки или сотни вольт.

Туннельный пробой объясняется явлением туннельного эффекта. Сущность последнего состоит в том, что при поле напряженностью более  $10^5$  В/см, действующем в  $n - p$ -переходе малой толщины, некоторые электроны проникают через переход без изменения своей энергии. Тонкие переходы, в которых возможен туннельный эффект, получаются при высокой концентрации примесей. Напряжение, соответствующее туннельному пробую, обычно не превышает единиц вольт.

Области теплового пробоя соответствует на рис. 24 участок  $BГ$ . Тепловой пробой необратим, так как он сопровождается разрушением структуры вещества в месте  $n - p$ -перехода. Причиной теплового пробоя является нарушение устойчивости теплового режима  $n - p$ -перехода. Это означает, что количество теплоты, выделяющейся в переходе от нагрева его обратным током, превышает количество теплоты, отводимой от перехода. В результате температура перехода возрастает, сопротивление

его уменьшается и ток увеличивается, что приводит к перегреву перехода и его тепловому разрушению.

Из-за нелинейности диода его нельзя характеризовать величиной сопротивления как линейный резистор. Отношение напряжения диода к току через него  $U/I$ , называемое статическим сопротивлением, зависит от величины тока. В ряде применений на постоянную составляющую тока диода накладывается небольшая переменная составляющая. В этом случае рассматривается дифференциальное (или динамическое) сопротивление  $dU/dI$ . Дифференциальное сопротивление можно оценить по наклону касательной к ВАХ в определенной точке.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему исследования диодов, изображенную на рисунке 25.

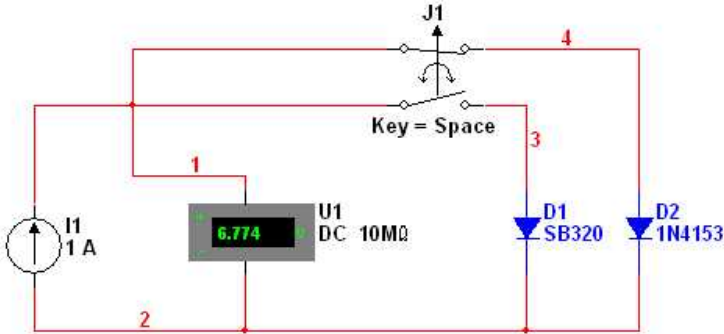


Рис. 25. Схема для снятия ВАХ диодов, включенных в прямом направлении

2. Изменяя ток генератора в соответствии с таблицей 1, записать показания вольтметра.
3. Подключить второй диод к источнику тока и повторить измерения.

Таблица 1

Прямой ток, $I_{пр}, \text{мА}$	0,02	0,05	0,1	1	5	10	20	50	100
Напряжение на диоде D1, $U_{пр1}, \text{мВ}$									
Напряжение на диоде D2, $U_{пр1}, \text{мВ}$									

4. Собрать схему, изображенную на рис.26.

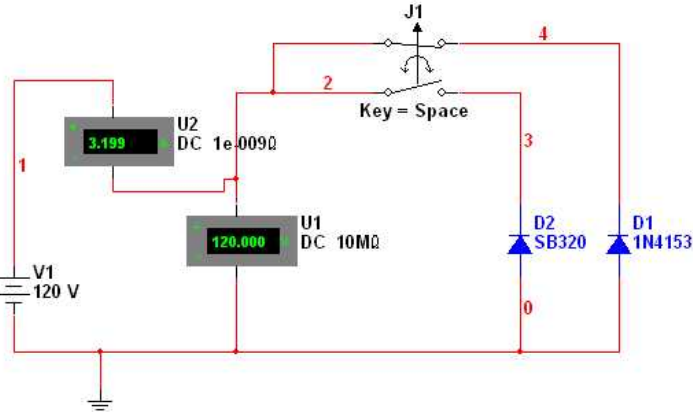


Рис. 26. Схема для снятия ВАХ диодов, включенных в обратном направлении

5. Снять обратные характеристики диодов, изменяя напряжение в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2

Обратное напряжение на диоде, $U_{обр}, \text{В}$	0,1	1	10	60	120,0	120,1	120,2	120,3	120,4
Ток через диод D1, $I_{обр1}, \text{мкА}$									
Ток через диод D2, $I_{обр2}, \text{мкА}$									

6. Построить ВАХ диодов в координатных осях.
7. Определить режим работы (рис.27), при  $E = 2\text{В}$ ,  $R1 = 39\text{В}$ . Найти сопротивление постоянному току и дифференциальное сопротивление диода.

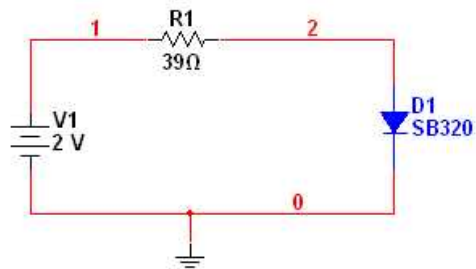


Рис. 27. Схема для задачи пункта 7

### Контрольные вопросы.

1. Какой вид ВАХ у линейных и полупроводниковых приборов?
2. Объясните вид прямой ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода.
3. Объясните вид обратной ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода.
4. Чем отличаются электрический и тепловой пробой  $n - p$ -перехода?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ПОЛУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

**Краткая теория.** Транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, пригодные для усиления мощности и имеющие три вывода или больше. В транзисторах может быть разное число переходов между

областями с различной электропроводностью. Наиболее распространены транзисторы с двумя  $n - p$ -переходами, называемые *биполярными*, так как их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков.

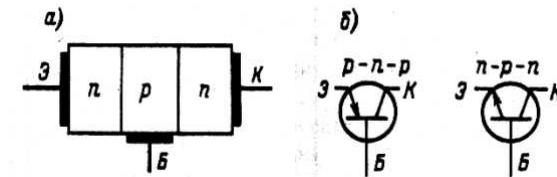


Рис. 28. Принцип устройства (а) и условное графическое обозначение (б) плоскостного транзистора

Устройство плоскостного биполярного транзистора показано схематически на рис. 28. Он представляет собой пластину германия, или кремния, или другого полупроводника, в которой созданы три области с различной электропроводностью. Для примера взят транзистор типа  $n - p - n$ , имеющий среднюю область с дырочной, а две крайние области – с электронной электропроводностью. Широко применяются также транзисторы типа  $p - n - p$ , в которых дырочной электропроводностью обладают две крайние области, а средняя имеет электронную электропроводность. Средняя область транзистора называется *базой*, одна крайняя область – *эмиттером*, другая – *коллектором*. Таким образом, в транзисторе имеются два  $n - p$ -перехода: *эмиттерный* – между эмиттером и базой и *коллекторный* – между базой и коллектором.

Зависимости между токами и напряжениями в транзисторах выражаются статическими характеристиками транзисторов, снятыми при постоянном токе и отсутствии нагрузки в выходной цепи. Характеристики необходимы для рассмотрения свойств транзисторов и для практических расчетов транзисторных схем.

В транзисторах взаимно связаны всегда четыре величины:  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  – входные и выходные токи и

напряжения. Одним семейством характеристик эту зависимость показать нельзя. Необходимо два семейства. Наиболее удобно рассматривать семейство *входных характеристик*  $i_1 = f(u_1)$  вместе с семейством *выходных характеристик*  $i_2 = f(u_2)$ .

Одна из возможных схем для снятия характеристик транзистора типа  $p - n - p$ , включенного по схеме ОЭ, показана на рис.29.

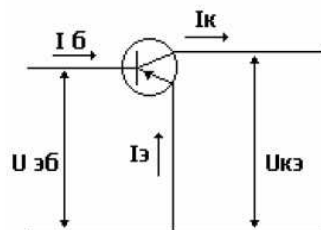


Рис. 29. Схема включения транзистора с общим эмиттером.

Параметры транзисторов являются величинами, характеризующими их свойства. С помощью параметров можно сравнивать качество транзисторов, решать задачи, связанные с применением транзисторов в различных схемах, и рассчитывать эти схемы.

Для транзисторов предложено несколько различных систем параметров, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Все параметры можно разделить на *собственные* (или *первичные*) и *вторичные*. Собственные параметры характеризуют свойства самого транзистора независимо от схемы его включения, а вторичные параметры для разных схем включения различны. В настоящее время основными считаются *смешанные* (или *гибридные*) параметры, обозначаемые буквой  $h$  или  $H$ . Название «смешанные» дано потому, что среди них имеются два коэффициента, одно сопротивление и одна проводимость.

Именно  $h$ -параметры приводятся во всех справочниках. Параметры системы  $h$  удобно измерять.

В систему  $h$ -параметров входят следующие величины.

1. *Входное сопротивление*

$$h_{11} = \Delta u_1 / \Delta i_1 \quad \text{при } u_2 = \text{const} \quad (4)$$

представляет собой сопротивление транзистора переменному входному току (между входными зажимами) при коротком замыкании на выходе, т. е. при отсутствии выходного переменного напряжения.

2. *Коэффициент обратной связи по напряжению*

$$h_{12} = \Delta u_1 / \Delta u_2 \quad \text{при } i_1 = \text{const} \quad (5)$$

показывает, какая доля выходного переменного напряжения передается на вход транзистора вследствие обратной связи в нем.

Условие  $i_1 = \text{const}$  в данном случае подчеркивает, что во входной цепи нет переменного тока, т. е. эта цепь разомкнута для переменного тока, и, следовательно, изменение напряжения на входе  $\Delta u_1$  есть результат изменения только выходного напряжения  $\Delta u_2$ .

3. *Коэффициент усиления по току (коэффициент передачи тока)*

$$h_{21} = \Delta i_2 / \Delta i_1 \quad \text{при } u_2 = \text{const} \quad (6)$$

показывает усиление переменного тока транзистором в режиме работы без нагрузки.

Условие  $u_2 = \text{const}$ , т. е.  $R_n = 0$ , и здесь задается для того, чтобы выходной ток  $\Delta i_2$  зависел только от входного тока  $\Delta i_1$ . Именно при выполнении такого условия параметр  $h_{21}$  будет действительно характеризовать усиление тока самим транзистором. Если бы выходное напряжение менялось, то оно влияло бы на выходной ток и по изменению этого тока уже нельзя было бы правильно оценить усиление.

4. *Выходная проводимость*

$$h_{22} = \Delta i_2 / \Delta u_2 \quad \text{при } i_1 = \text{const} \quad (7)$$

представляет собой внутреннюю проводимость для переменного тока между выходными зажимами транзистора.

Ток  $i_2$  должен изменяться только под влиянием выходного напряжения  $u_2$ . Если при этом ток  $i_1$  не будет постоянным, то его изменения вызовут изменения тока  $i_2$  и значение  $h_{22}$  будет определено неправильно.

Величина  $h_{22}$  измеряется в сименсах (См). Так как проводимость в практических расчетах применяется значительно реже, нежели сопротивление, то часто пользуются вместо  $h_{22}$  выходным сопротивлением  $R_{\text{вых}} = 1/h_{22}$ , выраженным в омах или килоомах.

Рассмотрим  $h$ -параметры для схем ОЭ и приведем их выражения для транзисторов небольшой мощности. Для схемы ОЭ  $i_1 = i_6$ ,  $i_2 = i_k$ ,  $u_1 = u_{6-3}$ ,  $u_2 = u_{k-6}$ , и поэтому  $h$ -параметры определяются по следующим формулам: входное сопротивление

$$h_{113} = \Delta u_{6-3} / \Delta i_6 \text{ при } u_{k-3} = \text{const} \quad (8)$$

и получается от сотен Ом до единиц килоом;

коэффициент обратной связи

$$h_{123} = \Delta u_{6-3} / \Delta u_{k-3} \text{ при } i_6 = \text{const} \quad (9)$$

и обычно равен  $10^{-3} - 10^{-4}$ , т. е. напряжение, передаваемое с выхода на вход за счет обратной связи, составляет тысячные или десятитысячные доли выходного напряжения;

коэффициент усиления тока есть известный нам параметр

$$h_{213} = \beta = \Delta i_k / \Delta i_6 \text{ при } u_{k-3} = \text{const} \quad (10)$$

и составляет десятки - сотни;

выходная проводимость

$$h_{223} = \Delta i_k / \Delta u_{k-3} \text{ при } i_6 = \text{const} \quad (11)$$

и равна десятым или сотым долям миллисименса, а выходное сопротивление  $1/h_{223}$  получается от единиц до десятков килоОм.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему исследования биполярного транзистора, изображенную на рис.30.

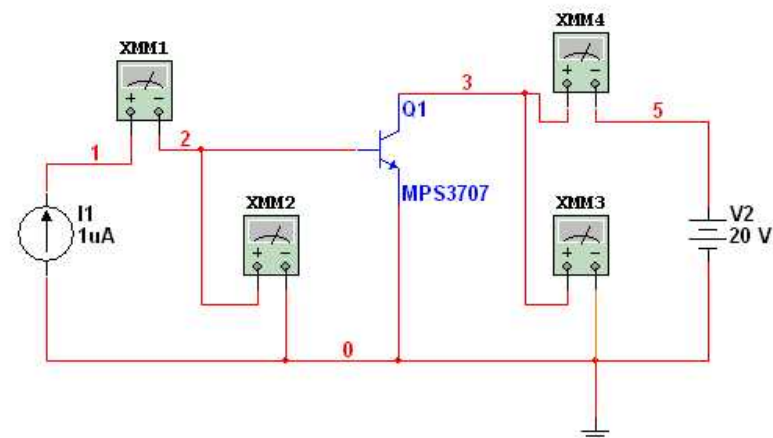


Рис. 30. Схема для снятия характеристик биполярного транзистора

2. Установит на источнике напряжения V2 напряжение  $U_{кэ1} = 0\text{В}$ .
3. Изменяя значение тока источника I1 от 1 500 мкА, записать соответствующие значения напряжения  $U_{бэ}$  (мультиметр XМ2) в таблицу 3.
4. Повторить измерения при выходном напряжении  $U_{кэ2} = 15\text{В}$ .

Таблица 3

Входной ток, $I_b$ , мкА	1	5	10	20	50	100	200	300	400	500
Входное напряжение, $U_{бэ}$ , мВ, при $U_{кэ1} = 0\text{В}$										
Входное напряжение, $U_{бэ}$ , мВ, при $U_{кэ2} = 15\text{В}$										

5. Установить на источнике тока  $I_1$  ток  $I_{Б1} = 100$  мкА.
6. Изменяя значения напряжения источника  $V_2$  от 0,1 до 35 В, записать соответствующие значения тока  $I_K$  (мультиметр ХМ4) в таблицу 4.

Таблица 4

Выходное напряжение, $U_{кэ}$ , В	0,1	1	2	5	10	15	20	25	30	35
Выходной ток, $I_K$ , мА, при входном токе, $I_{Б1} = 100$ мкА										
Выходной ток, $I_K$ , мА, при входном токе, $I_{Б1} = 300$ мкА										
Выходной ток, $I_K$ , мА, при входном токе, $I_{Б1} = 500$ мкА										

7. Повторить измерения при входных токах  $I_{Б2} = 300$  мкА и  $I_{Бэ} = 500$  мкА.
8. По результатам измерения построить входные и выходные характеристики транзистора.
9. Определить  $h$ -параметры транзистора по полученным характеристикам.

#### Контрольные вопросы.

1. Что такое биполярный транзистор?
2. Сколько  $p$ - $n$  переходов содержит биполярный транзистор
3. Нарисуйте условные графические обозначения транзисторов различных типов. Запишите названия выводов на рисунке.
4. Нарисуйте входные и выходные характеристики транзистора. Расскажите о процессах, соответствующих характерным участкам ВАХ.
5. Что можно сказать по выходным характеристикам о

зависимости тока коллектора от базы и напряжения коллектор-эмиттер?

5. Перечислите основные параметры транзисторов. Охарактеризуйте их.
6. Как определить  $h$ -параметры по характеристикам транзистора?
7. Расскажите об области применения транзисторов.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

#### ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ $n - p$ -ПЕРЕХОДОМ

**Краткая теория.** Принцип устройства и включения полевого транзистора с управляющим  $n - p$ -переходом, а также его условное графическое обозначение показаны на рис. 1. Пластика из полупроводника, например,  $n$ -типа имеет на противоположных концах электроды, с помощью которых она включена в выходную (управляемую) цепь усилительного каскада. Эта цепь питается от источника  $E_2$ , и в нее включена нагрузка  $R_n$ . Вдоль транзистора проходит выходной ток основных носителей. В нашем примере это электронный ток. Входная (управляющая) цепь транзистора образована с помощью третьего электрода, представляющего собой область с другим типом электропроводности. В данном случае это  $p$ -область. Источник питания входной цепи  $E_1$  создает на единственном  $n - p$ -переходе данного транзистора обратное напряжение. Напряжение другой полярности, т. е. прямое напряжение, на  $n - p$ -переход не подают, так как тогда входное сопротивление будет очень малым. Во входную цепь включен источник усиливаемых колебаний  $ИК$ .

Физические процессы в полевом транзисторе происходят следующим образом. При изменении входного напряжения изменяется обратное напряжение на  $n - p$ -переходе, и от этого изменяется толщина запирающего (обедненного) слоя, ограниченного на рис. 31 штриховыми линиями. Соответственно, меняется площадь поперечного сечения области, через которую

проходит поток основных носителей заряда, т. е. выходной ток. Эта область называется *каналом*.

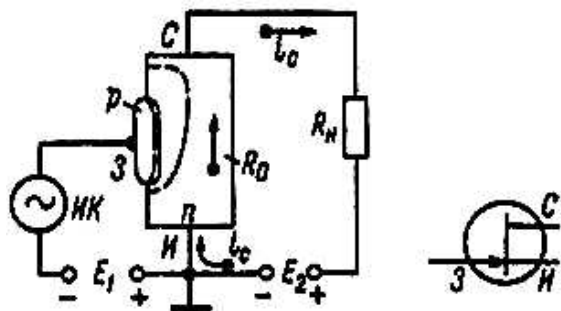


Рис. 31. Схема включения и условное графическое обозначение полевого транзистора с  $n - p$ -переходом и каналом  $n$ -типа.

Электрод, из которого в канал вытекают основные носители заряда, называют *истоком* ( $I$ ). Из канала носители проходят к электроду, который называется *стоком* ( $C$ ). Управляющий электрод, предназначенный для регулирования площади поперечного сечения канала, называется *затвором* ( $З$ ), и в какой-то степени он аналогичен базе биполярного транзистора, хотя, конечно, по физическому принципу работы затвор и база различны.

Если увеличивать напряжение затвора  $u_{з-и}$ , то запирающий слой  $n - p$ -перехода становится толще и площадь поперечного сечения канала уменьшается. Следовательно, его сопротивление постоянному току  $R_0$  возрастает, и ток стока  $i_c$  становится меньше. При некотором запирающем напряжении  $u_{з-и.зап}$  площадь поперечного сечения канала станет равной нулю и ток  $i_c$  будет весьма малым. Транзистор запирается. А при  $u_{з-и} = 0$  сечение канала наибольшее, сопротивление  $R_0$  наименьшее, например, несколько сотен ом, и ток  $i_c$  получается наибольшим. Для того, чтобы входное напряжение, возможно, более эффективно управляло выходным током, материал основного полупроводника, в котором создан канал, должен быть высокоомным, т. е. с невысокой концентрацией примесей. Тогда запирающий слой в нем получается большей толщины. Кроме того, начальная толщина самого канала (при  $u_{з-и} = 0$ ) должна

быть достаточно малой. Обычно она не превышает нескольких микрон. Запирающее напряжение  $u_{з-и.зап}$  при этих условиях составляет единицы вольт.

Поскольку вдоль канала потенциал повышается по мере приближения к стоку, то ближе к стоку обратное напряжение  $n - p$ -перехода увеличивается и толщина запирающего слоя получается больше.

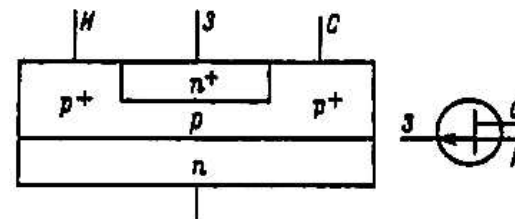


Рис. 32. Принцип устройства и условное графическое обозначение планарно-эпитаксильного полевого транзистора с каналом  $p$ -типа.

Полевые транзисторы с  $n - p$ -переходом могут быть изготовлены сплавлением или диффузией. Лучшими являются диффузионные транзисторы. На рис. 32 изображен принцип устройства диффузионного полевого транзистора, изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии. Для примера показан канал  $p$ -типа (конечно, он может быть и  $n$ -типа). Области истока и стока обычно делают с повышенной проводимостью (электропроводность  $p^+$ -типа), чтобы уменьшить бесполезное падение напряжения и потерю мощности в этих областях. Повышенную проводимость имеет и область затвора (электропроводность  $n^+$ -типа). Это обеспечивает увеличение толщины запирающего слоя главным образом в сторону канала, т. е. усиливает управляющее действие затвора. Кристалл транзистора (подложка) является областью  $n$ -типа, от которой часто делают вывод. Тогда кристалл может быть использован как дополнительный затвор. Подавая, например, на него некоторое постоянное напряжение, устанавливают начальную толщину канала.

Сплавные полевые транзисторы являются низкочастотными, а диффузионные могут работать на частотах до десятков и даже



сотен мегагерц. Следует отметить, что само перемещение основных носителей по каналу происходит под действием ускоряющего поля очень быстро, и поэтому предельная частота определяется не этим процессом, а влиянием собственных емкостей транзистора.

#### *Характеристики и параметры полевых транзисторов.*

Управляющее действие затвора наглядно иллюстрируют *управляющие (стокзатворные) характеристики*, выражающие зависимость  $i_c = f(u_{з-н})$  при  $u_{с-н} = \text{const}$ . Однако эти характеристики неудобны для расчетов, и поэтому на практике пользуются выходными характеристиками.

*Выходные (стоковые) характеристики* полевого транзистора:  $i_c = f(u_{с-н})$  при  $u_{з-н} = \text{const}$ . Полевой транзистор характеризуется следующими параметрами. Основной параметр – крутизна  $S$ , аналогичная параметру  $y_{21}$  биполярных транзисторов. Крутизна определяется по формуле:

$$S = y_{21} = \Delta i_c / \Delta u_{з-н} \text{ при } u_{с-н} = \text{const} \quad (12)$$

и может быть до нескольких миллиампер на вольт.

Крутизна характеризует управляющее действие затвора. Например,  $S = 3 \text{ мА/В}$  означает, что изменение напряжения затвора на 1 В создает изменение тока стока на 3 мА.

Второй параметр – *внутреннее (выходное) сопротивление*  $R_i$ , аналогичное величине  $1/y_{22}$  биполярного транзистора. Этот параметр представляет собой сопротивление транзистора между стоком и истоком (сопротивление канала) для переменного тока и выражается формулой

$$R_i = 1/y_{22} = \Delta u_{с-н} / \Delta i_c \text{ при } u_{з-н} = \text{const}. \quad (13)$$

На пологих участках выходных характеристик значение  $R_i$  достигает сотен килоом и оказывается во много раз больше сопротивления транзистора постоянному току  $R_0$ .

Иногда пользуются третьим параметром – *коэффициентом усиления*  $\mu$ , который показывает, во сколько раз сильнее действует на ток стока изменение напряжения затвора, нежели изменение напряжения стока. Коэффициент усиления определяется формулой

$$\mu = - \Delta u_{с-н} / \Delta u_{з-н} \text{ при } i_c = \text{const}, \quad (14)$$

т. е. выражается отношением таких изменений  $\Delta u_{с-н}$  и  $\Delta u_{з-н}$ , которые компенсируют друг друга по действию на ток  $i_c$ , в результате чего этот ток остается постоянным. Так как для подобной компенсации  $\Delta u_{с-н}$  и  $\Delta u_{з-н}$  должны иметь разные знаки (например, увеличение  $u_{с-н}$  должно компенсироваться уменьшением  $u_{з-н}$ ), то в правой части формулы (3) стоит знак «минус». Иначе, можно вместо этого взять абсолютное значение правой части. Коэффициент усиления связан с параметрами  $S$  и  $R_i$  простой зависимостью

$$\mu = S R_i. \quad (15)$$

Для пологих участков выходных характеристик  $\mu$  достигает сотен и даже тысяч. В начальной области этих характеристик (при малых  $u_{с-н}$ ) значения всех трех параметров уменьшаются.

*Входное сопротивление* полевого транзистора определяется, как обычно, по формуле

$$R_{вх} = \Delta u_{з-н} / \Delta i_3 \text{ при } u_{с-н} = \text{const}. \quad (16)$$

Поскольку ток  $i_3$  – обратный ток  $n - p$ -перехода, а значит, очень мал, то  $R_{вх}$  достигает единиц и десятков мегаом. Полевой транзистор имеет также *входную емкость* между затвором и истоком  $C_{з-н}$ , которая является барьерной емкостью  $n - p$ -перехода и составляет единицы пикофард у диффузионных транзисторов и десятки пикофард у сплавных. Меньшие значения имеет проходная емкость между затвором и стоком  $C_{з-с}$ , а самой малой является выходная емкость между истоком и стоком  $C_{с-н}$ .

#### **Порядок выполнения работы**

1. Собрать схему исследования полевого транзистора, изображенную на рис. 33.

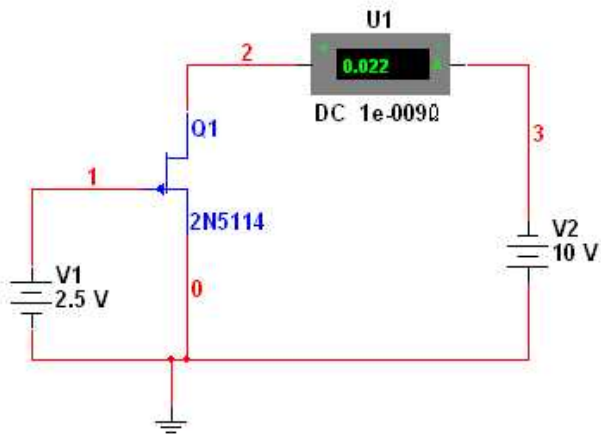


Рис. 33. Схема для исследования полевого транзистора.

2. Произвести измерения и занести полученные данные стоко-затворных характеристик в таблицу 5.

Таблица 5. Данные для построения стоко-затворных характеристик

Напряжение затвор-исток, $U_{зи}$ , В		0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
Ток стока $I_C$ , мА, при напряжении сток-исток $U_{си}$ , В	2											
	10											

3. Произвести измерения и занести полученные данные для стоковых характеристик в таблицу 6.

Таблица 6. Данные для построения стоковых характеристик

Напряжение сток-исток, $U_{си}$ , В		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ток стока $I_C$ , мА, при напряжении затвор-исток $U_{зи}$ , В	0										
	0,6										
	1,2										

4. Построить стоко-затворные и стоковые характеристики в координатных осях.
5. Определить необходимые параметры и рассчитать крутизну стоко-затворной характеристики и активную выходную проводимость.

#### Контрольные вопросы.

1. Что такое полевой транзистор?
2. Объясните принцип работы полевого транзистора.
3. Нарисуйте условное графическое обозначения полевого транзистора и подпишите название выводов на рисунке..
4. Нарисуйте стоко-затворные и стоковые характеристики полевого транзистора. Расскажите о процессах, соответствующих характерным участкам ВАХ.
5. Перечислите основные параметры полевых транзисторов. Охарактеризуйте каждый из них.
6. Как определяется крутизна стоко-затворной характеристики и активная выходная проводимость?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.

#### ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

**Краткая теория.** Операционный усилитель – это модульный многокаскадный усилитель с дифференциальным входом, по своим характеристикам приближающийся к воображаемому

«идеальному усилителю». Идеальный усилитель должен отвечать следующим свойствам:

- 1) бесконечный коэффициент усиления по напряжению ( $A \rightarrow \infty$ );
- 2) бесконечное полное входное сопротивление ( $Z_{вх} \rightarrow \infty$ );
- 3) нулевое полное выходное сопротивление ( $Z_{вых} = 0$ );
- 4) равенство нулю выходного напряжения ( $U_{вых} = 0$ ) при равных напряжениях на входах ( $U_1 = U_2$ );
- 5) бесконечная ширина полосы пропускания (отсутствие задержки при прохождении сигнала через усилитель).

На рис. 34 показаны внешние выводы операционного усилителя:

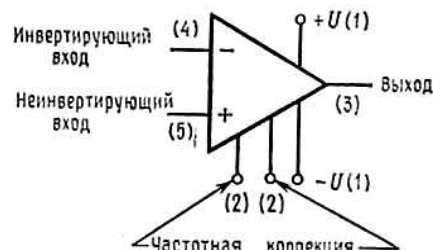


Рис. 34. Условно графическое обозначение и цоколевка операционного усилителя

(1)  $+U, -U$ . Выводы для напряжений питания.  
(2) *Частотная коррекция*. Эти выводы (иногда их называют выводами стабилизации, задержки или сдвига фазы) используются для предотвращения генерации операционного усилителя, если последний не имеет внутренней коррекции.

(3) *Выход*. Вывод, с которого снимается усиленное напряжение.

(4) *Инвертирующий вход*. Если неинвертирующий вход заземлен и сигнал подан на инвертирующий вход, то сигнал на выходе окажется сдвинутым по фазе на  $180^\circ$  относительно сигнала на входе.

(5) *Неинвертирующий вход*. Если инвертирующий вход заземлен, а сигнал подан на неинвертирующий вход, то сигнал на выходе окажется синфазным с сигналом на входе.

Схема на рис. 35, а позволяет использовать операционный усилитель в качестве неинвертирующего усилителя с высоким

полным входным сопротивлением, причем коэффициент усиления всей схемы по напряжению может быть жестко задан с помощью сопротивлений  $R_1$  и  $R_{о.с.}$ . Полное входное сопротивление всей схемы оказывается высоким, так как единственным путем для тока между входом и землей (входного тока) является высокое полное входное сопротивление операционного усилителя.

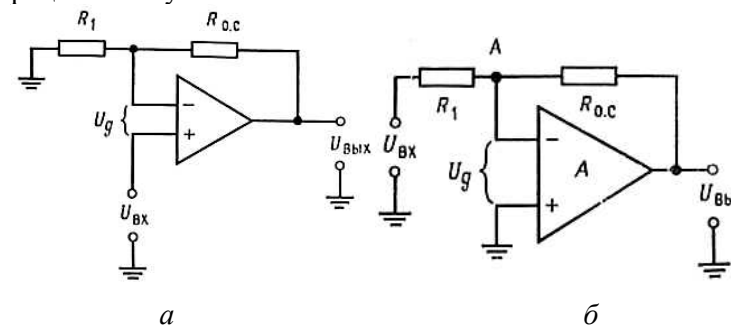


Рис. 35. Неинвертирующий (а) и инвертирующий (б) усилители

Сопротивления  $R_1$  и  $R_{о.с.}$  образуют делитель напряжения с очень малой нагрузкой, в силу того, что ток, необходимый для управления усилителем, очень мал ( $I_{см} \sim 0$ ). Поэтому через  $R_1$  и  $R_{о.с.}$  течет одинаковый ток, и напряжение, приложенное к инвертирующему входу, равно  $U_{вых} R_1 / (R_1 + R_{о.с.})$ .

Чтобы получить выражение для коэффициента усиления схемы 35 а, напомним, что  $I_{R_1} = I_{R_{о.с.}}$ , так как  $R_{вх} \rightarrow \infty$ . Имеем  $I_{R_1} = U_{вх} / R_1$  и  $I_{R_{о.с.}} = (U_{вых} - U_{вх}) / R_{о.с.}$ . Напряжение на инвертирующем входе усилителя равно  $U_{вх} + U_{д}$ , поэтому

$$I_{R_1} = (U_{вх} + U_{д}) / R_1, \quad I_{R_{о.с.}} = [U_{вых} - (U_{вх} + U_{д})] / R_{о.с.}$$

Следовательно,

$$(U_{вх} + U_{д}) / R_1 = [U_{вых} - (U_{вх} + U_{д})] / R_{о.с.}$$

Поскольку  $U_{вых} = AU_{д}$  и  $U_{д} = U_{вых} / A$ , то если, как мы предположили,  $A \rightarrow \infty$  и  $U_{д} \sim 0$ , можно написать

$$U_{вх} / R_1 = (U_{вых} - U_{вх}) / R_{о.с.}$$

Отсюда найдем коэффициент усиления схемы  $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ , который обычно называют *коэффициентом усиления с замкнутой обратной связью*  $K_{\text{о.с}}$  или *коэффициентом усиления замкнутого усилителя*. Решая уравнение

$$U_{\text{вх}} R_{\text{о.с}} = R_1 U_{\text{вых}} - R_1 U_{\text{вх}}, \text{ получим}$$

$$U_{\text{вх}} (R_{\text{о.с}} + R_1) = R_1 U_{\text{вых}}, \quad (R_{\text{о.с}} + R_1) / R_1 = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = K_{\text{о.с}}.$$

Таким образом, значения сопротивления  $R_{\text{о.с}}$  и  $R_1$  определяют коэффициент усиления схемы по напряжению. Формула для коэффициента усиления с замкнутой обратной связью неинвертирующего усилителя

$$K_{\text{о.с}} = (R_{\text{о.с}} + R_1) / R_1 = R_{\text{о.с}} / R_1 + 1 \quad (17)$$

верна в случае, когда  $A \gg K_{\text{о.с}}$ . Вторым видом выражения для коэффициента усиления ( $K_{\text{о.с}} = R_{\text{о.с}} / R_1 + 1$ ) удобнее пользоваться при решении задач.

Использование сопротивлений  $R_1$  и  $R_{\text{о.с}}$  для того чтобы подать часть выходного напряжения на вход, как это сделано в рассмотренном неинвертирующем усилителе, называют введением *обратной связи*. Это весьма важное понятие. Заметим, что сопротивление  $R_1 + R_{\text{о.с}}$  следует выбирать таким, чтобы общий ток нагрузки с учетом этого сопротивления не превышал максимального выходного тока усилителя.

Если надо задать коэффициент усиления с обратной связью неинвертирующего усилителя, когда  $R_1$  уже выбрано, следует разрешить выражение для коэффициента усиления с обратной связью относительно  $R_{\text{о.с}}$ :

$$K_{\text{о.с}} = R_{\text{о.с}} / R_1 + 1, \quad K_{\text{о.с}} - 1 = R_{\text{о.с}} / R_1 \text{ так, что } R_{\text{о.с}} = R_1 (K_{\text{о.с}} - 1).$$

Теперь найдем выражение для коэффициента усиления инвертирующего усилителя. Как следует из самого названия, входной и выходной сигналы инвертирующего усилителя сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ .

Чтобы получить выражение для коэффициента усиления с обратной связью, еще раз напомним, что  $I_{R_1} = I_{R_{\text{о.с}}}$ , а  $R_{\text{вх}}$  усилителя велико. Поскольку

$$I_{R_1} = (U_{\text{вх}} - U_{\text{д}}) / R_1 \text{ и } I_{R_{\text{о.с}}} = -(U_{\text{вх}} - U_{\text{д}}) / R_{\text{о.с}},$$

можно написать, что

$$(U_{\text{вх}} - U_{\text{д}}) / R_1 = -(U_{\text{вх}} - U_{\text{д}}) / R_{\text{о.с}}.$$

Знак минус перед правой частью этого равенства означает, что выход инвертирован. Полагая  $U_{\text{д}} = 0$  (так как  $A \gg 8$ ), получим

$$U_{\text{вх}} / R_1 = -U_{\text{вых}} / R_{\text{о.с}}.$$

Коэффициент усиления с обратной связью равен

$$K_{\text{о.с}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = -R_{\text{о.с}} / R_1. \quad (18)$$

Входное сопротивление схемы инвертирующего усилителя равно  $R_1$ , в силу того, что, благодаря обратной связи, в точке  $A$  на рис. 35 сохраняется приблизительно нулевой потенциал. Сопротивление  $R_1$  должно быть выбрано так, чтобы не нагружать источник напряжения  $U_{\text{вх}}$ , и, естественно,  $R_{\text{о.с}}$  должно быть достаточно большим, чтобы чрезмерно нагружать операционный усилитель.

Инвертирующий сумматор формирует алгебраическую сумму двух напряжений и меняет ее знак на обратный. Чтобы понять, как это происходит, обратимся к рис. 36, на котором приведена схема инвертирующего сумматора. В этой схеме входные сопротивления имеют ту же величину, что и сопротивление обратной связи.

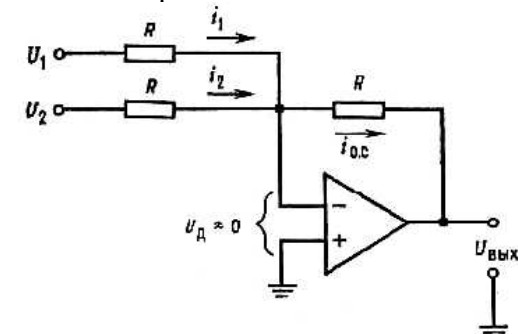


Рис. 36. Инвертирующий сумматор.  $U_{\text{вых}} = -(U_1 + U_2)$ .

Если  $R_{\text{вх}}$  операционного усилителя достаточно велико и ток смещения пренебрежимо мал по сравнению с током обратной связи (именно так обычно и бывает), то по закону Кирхгофа

$$i_1 + i_2 = i_{o.c.} \quad (19)$$

Если теперь коэффициент усиления без обратной связи тоже достаточно велик, так что  $U_d \sim 0$  (для операционных усилителей, которые используются в суммирующих схемах, это обычно имеет место), то  $i_1 = U_1/R$ ,  $i_2 = U_2/R$ ,  $i_{o.c.} = -U_{\text{вых}}/R$ . Теперь можно переписать соотношение (5.1) в виде  $U_1/R + U_2/R = -U_{\text{вых}}/R$ . Умножая обе части равенства на  $R$ , получаем  $U_1 + U_2 = -U_{\text{вых}}$ , поэтому  $U_{\text{вых}} = -(U_1 + U_2)$ . Подобные рассуждения можно провести для любого числа входов, так что для  $n$  входов получим

$$U_{\text{вых}} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n). \quad (20)$$

Для осуществления простого суммирования, при котором  $U_{\text{вых}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$  можно построить специальный вариант схемы сложения-вычитания. Предположим, что нам надо получить  $U_{\text{вых}} = U_1 + U_2$ . Зададим  $R'_{o.c.} = R'_1 = R'_2$  и  $R_1 = R_{o.c.}/n$ , где  $n$  – число входов (в данном случае два). Такая схема показана на рис. 37.

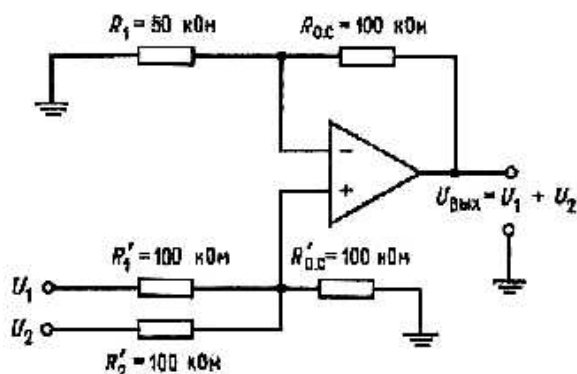


Рис. 37. Неинвертирующий сумматор с двумя входами

Мы можем также осуществить суммирование с весами; например, можно сформировать  $U_{\text{вых}} = U_1 + 2U_2$ . Обязательно только соблюдение условия для  $n$  входов:

$$R_{o.c.}/R_1 = R'_{o.c.}/R'_1 + R'_{o.c.}/R'_1 + R'_{o.c.}/R'_2 + \dots + R'_{o.c.}/R'_n.$$

Описанные суммирующие схемы могут работать как при постоянных, так и при переменных напряжениях. Если суммируются переменные напряжения, то ответы приходится вычислять в виде  $U = U_a \sin \omega t$ ; в частном случае, когда все входные переменные напряжения *синфазны*, можно использовать пиковые или, если это удобнее, эффективные значения напряжений.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему инвертирующего усилителя на ОУ, изображенную на рис.38.

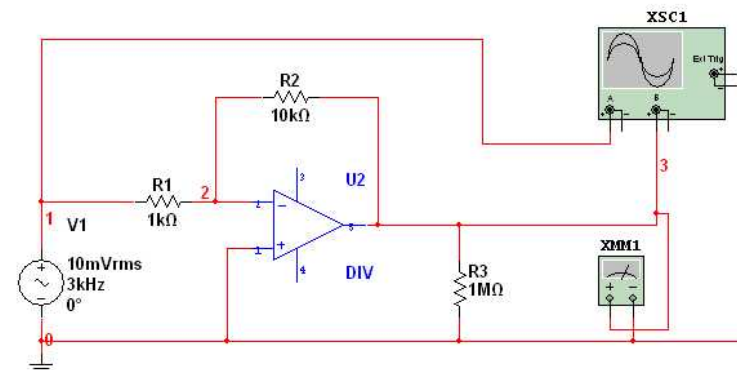


Рис. 38. Схема для исследования инвертирующего усилителя на ОУ.

2. Рассчитать сопротивление резистора  $R_2$  для коэффициента усиления  $K$  = (номер студента в журнале  $\times 5$ ).
3. Установить значение сопротивления резистора  $R_2$ .
4. Установить мультиметр на измерение переменного напряжения.
5. Включить схему.
6. Записать показания мультиметра и рассчитать коэффициент усиления.

7. По показаниям осциллографа, изменяя чувствительность и длительность развертки, определите коэффициент усиления и сравните его с результатами полученными в п.6.
8. Собрать схему неинвертирующего усилителя, изображенную на рис.39.

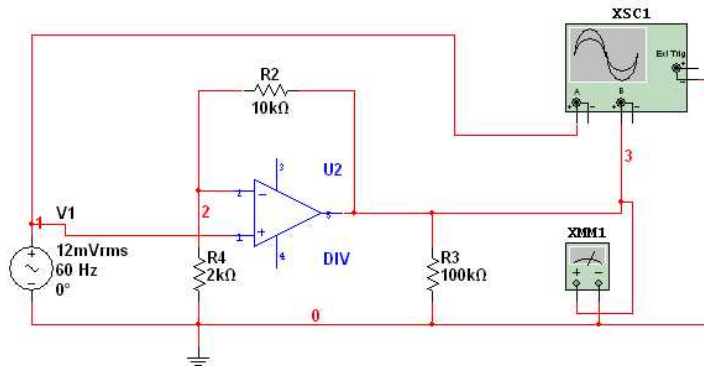


Рис. 39. Схема для исследования инвертирующего усилителя на ОУ.

9. Рассчитать значение сопротивления резистора  $R2$  для коэффициента усиления  $K = (\text{номер студента в журнале} \times 5)$ .
10. Установить мультиметр на измерение переменного напряжения.
11. Включить схему.
12. Записать показания мультиметра и рассчитать коэффициент усиления.
13. По показаниям осциллографа, изменяя чувствительность и длительность развертки, определите коэффициент усиления и сравните его с данными результатами, полученными в п.12.
14. Собрать схему неинвертирующего сумматора, изображенную на рис.40.

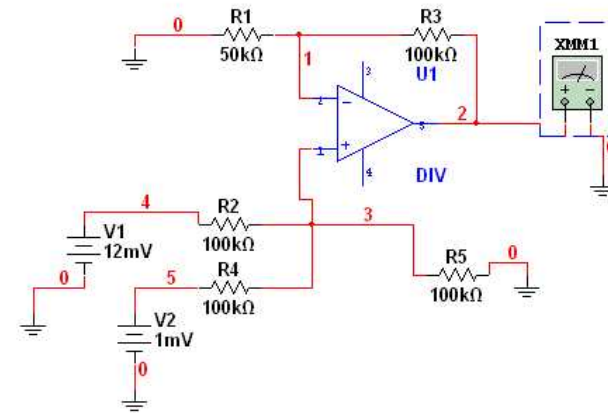


Рис. 40. Схема неинвертирующего сумматора

15. Сложить два напряжения  $U1 = (\text{номер студента в журнале} \times 5)$  и  $U2 = (\text{номер студента в журнале} \times 10)$ .
16. Собрать схему неинвертирующего сумматора, изображенную на рис.41.

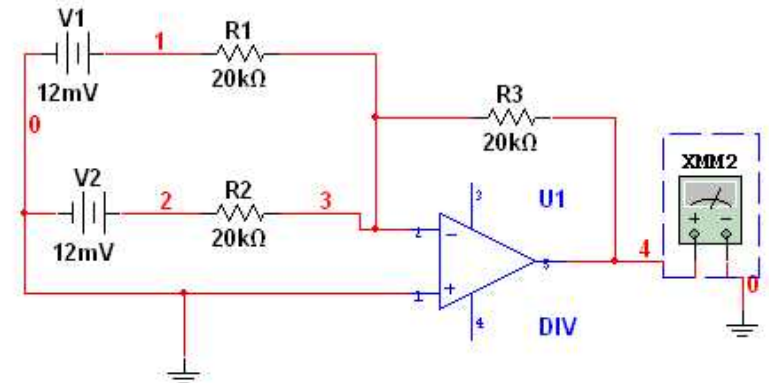


Рис. 41. Схема инвертирующего сумматора

17. Сложить два напряжения  $U1 = (\text{номер студента в журнале} \times 5)$  и  $U2 = (\text{номер студента в журнале} \times 10)$ .

### Контрольные вопросы.

1. Что такое операционные усилители? Нарисуйте условно графическое обозначение ОУ.
2. Как называются и для чего предназначены входы ОУ?
3. Назовите основные свойства идеального ОУ.
4. Нарисуйте схему инвертирующего усилителя на ОУ. Чем определяется коэффициент усиления такого усилителя, по какой формуле его можно рассчитать?
5. Нарисуйте схему неинвертирующего усилителя на ОУ. Чем определяется коэффициент усиления такого усилителя, по какой формуле его можно рассчитать?
6. Что такое сумматор? Расскажите его назначение.
7. Нарисуйте схему инвертирующего сумматора. Поясните принцип его работы.
8. Нарисуйте схему неинвертирующего сумматора. Поясните принцип его работы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИХ И ИНТЕГРИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ

#### Краткая теория.

Рассмотрим RC-цепь, изображенную на рис. 1, а. Пусть на входе этой цепи действует напряжение  $u_1(t)$ .

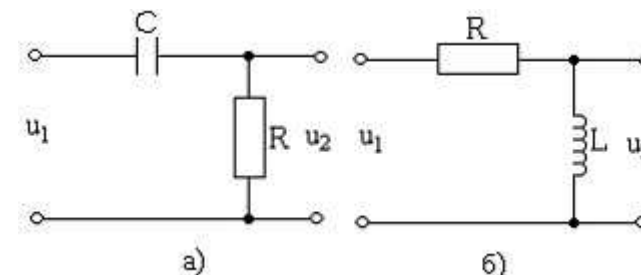


Рис. 42. Дифференцирующие RC-(а) и RL-(б) цепи

Тогда для этой цепи справедливо соотношение

$$u_1(t) = Ri + \frac{1}{C} \int i dt$$

и с учетом преобразований будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{dt} &= R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i, \\ \frac{du_1}{dt} &= \frac{d}{dt}(Ri) + \frac{1}{RC}(Ri), \\ \frac{du_1}{dt} &= \frac{du_R}{dt} + \frac{1}{RC} u_R \end{aligned} \quad (21)$$

Если для данного сигнала выбрать постоянную времени цепи  $\tau = RC$  настолько большим, что вкладом второго члена правой части уравнения (21) можно пренебречь, то переменная составляющая напряжения  $u_R \sim u_1$ . Это значит, что при больших постоянных времени напряжение на сопротивлении  $R$  повторяет входное напряжение. Такую цепь применяют тогда, когда необходимо передать изменения сигнала без передачи постоянной составляющей.

При очень малых значениях  $\tau$  в (21) можно пренебречь первым слагаемым. Тогда

$$u_R \approx RC \frac{du_1}{dt} = \tau \frac{du_1}{dt},$$

т. е. при малых постоянных времени  $\tau$   $RC$ -цепь (рис. 42,а) осуществляет дифференцирование входного сигнала, поэтому такую цепь называют дифференцирующей  $RC$ -цепью.

Аналогичными свойствами обладает и  $RL$ -цепь (рис. 42,б).

Сигналы при прохождении через  $RC$ - и  $RL$ -цепи называют быстрыми, если

$$\frac{du}{dt} \gg \frac{u}{\tau},$$

или медленными, если

$$\frac{du}{dt} \ll \frac{u}{\tau}.$$

Рассмотрим  $RC$ -цепь, изображенную на рис. 43,а. Она описывается уравнением

$$u_1 = Ri + u_C$$

или

$$u_1 = RC \frac{du_C}{dt} + u_C.$$

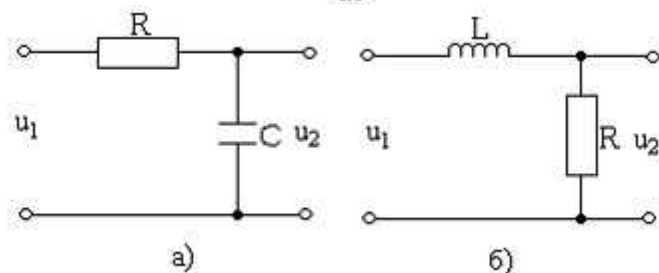


Рис. 43. Интегрирующие  $RC$ -(а) и  $LC$ -(б) цепи.

При малых  $\tau = RC$  (для «медленных» сигналов)  $u_C \sim u_1$ . Для «быстрых» сигналов напряжение  $u_1$  интегрируется:

$$u_C \approx \frac{1}{\tau} \int u_1 dt.$$

Поэтому  $RC$ -цепь, выходное напряжение которого снимается с емкости  $C$  называют интегрирующей цепью.

При равных постоянных времени такими же свойствами обладает  $RL$ -цепь, изображенная на рис. 43,б.

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему дифференцирующей цепи, изображенную на рис. 44.

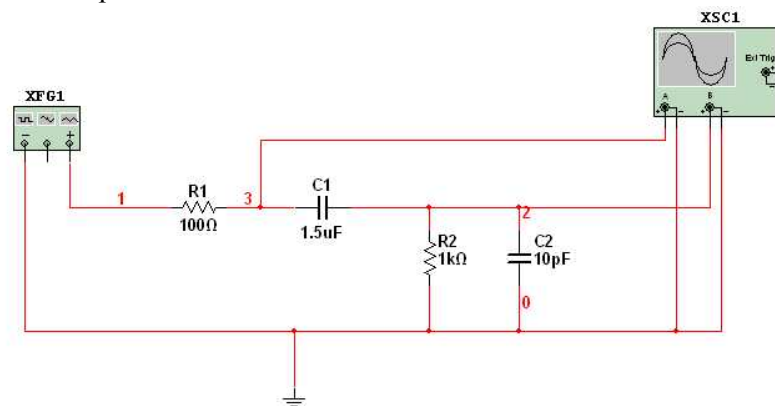


Рис. 44. Схема дифференцирующей цепи

2. Настроить функциональный генератор. Форма импульса прямоугольная. Частота 50 Гц соответствует длительности импульса 10 мкс при коэффициенте заполнения 50%.
3. Включить схему.
4. Развернуть и настроить осциллограф, изменяя чувствительность и длительность развертки. Наблюдать входной сигнал и результат его обработки дифференцирующей цепью.
5. Используя показания осциллографа рассчитать параметры выходного импульсного сигнала.
6. Изменяя параметры элементов проследить за изменением выходного сигнала.
7. Собрать схему интегрирующей цепи, изображенную на рис. 45.
8. Настроить функциональный генератор (форма импульса прямоугольная, частота – 5 Гц, амплитуда – 10 В, коэффициент заполнения 50%).



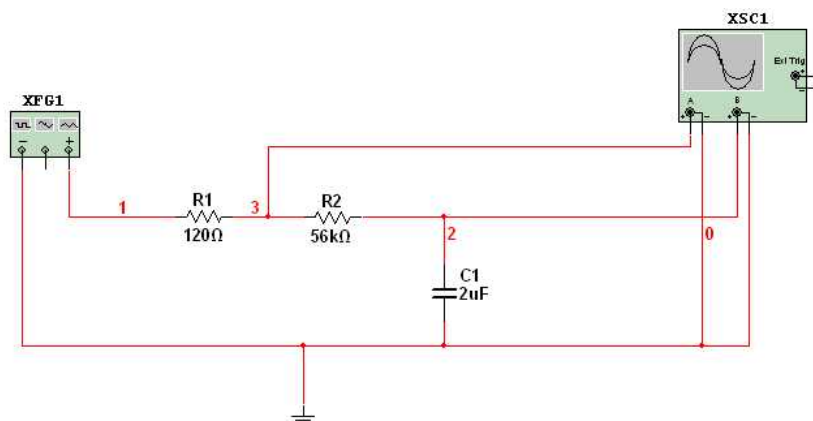


Рис. 45. Схема интегрирующей цепи

9. Включить схему.
10. Развернуть и настроить осциллограф, изменяя чувствительность и длительность развертки. Наблюдать входной сигнал и результат его обработки интегрирующей цепью.
11. Рассчитать амплитуду выходного сигнала интегрирующей цепи при подаче на его вход прямоугольного импульса с амплитудой  $E = 10 \text{ В}$  и длительностью  $100 \text{ мкс}$ . Сопротивление генератора входного сигнала –  $120 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 56 \text{ Ом}$ ,  $C_1 = 2 \text{ мкФ}$ . Как изменится амплитуда входного сигнала при подключении нагрузки  $R_n = 5,6 \text{ Ом}$ ? Сравнить расчетные данные с результатами проведенных измерений.
12. Изменяя параметры элементов проследить за изменением выходного сигнала.
13. Повторить исследования для схемы, изображенной на рис.46 и 47 самостоятельно выбрав настройки функционального генератора.

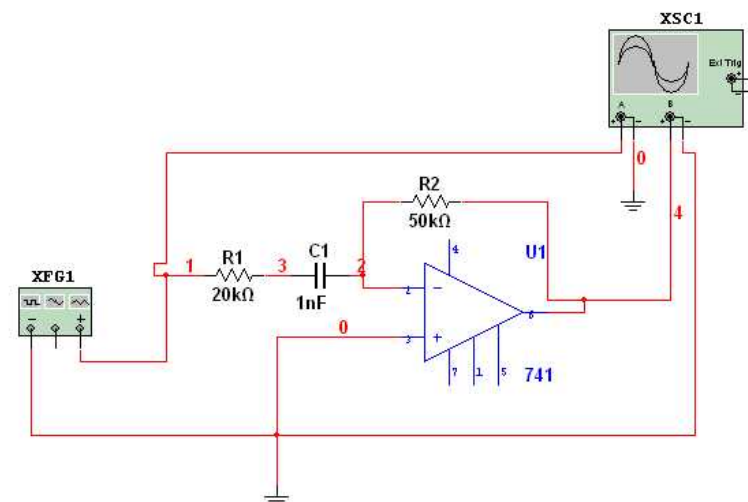


Рис. 46. Схема дифференциатора на ОУ.

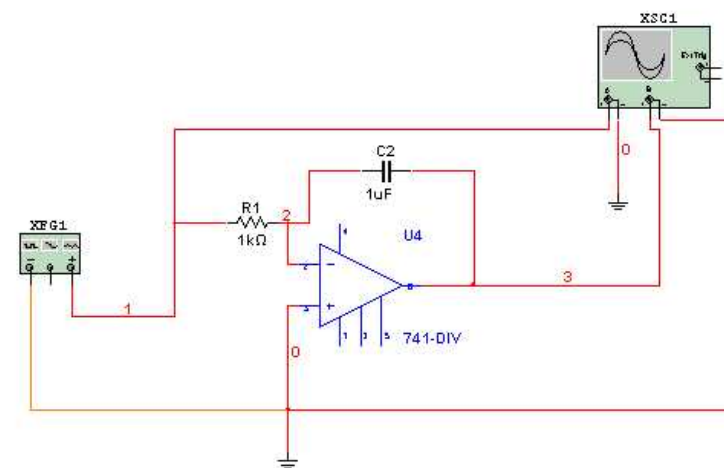


Рис. 47. Схема интегратора с ОУ.

### Контрольные вопросы.

1. Расскажите о назначении и элементном составе времязадающих цепей.

2. В каких случаях применяются дифференцирующие цепи?
3. Нарисуйте схему дифференцирующей цепи и поясните принцип ее работы.
4. Запишите формулу для определения постоянной времени.
5. При каких условиях данная цепь является дифференцирующей?
6. В каких случаях применяются интегрирующие цепи?
7. Нарисуйте схему интегрирующей цепи и поясните принцип ее работы.
8. Нарисуйте схему дифференциатора на ОУ и поясните принцип работы.
9. Нарисуйте схемы интегратора на ОУ и поясните принцип работы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

**Краткая теория.** Электронным генератором сигналов называется устройство, посредством которого энергия сторонних источников питания преобразуется в электрические колебания требуемой формы, частоты и мощности.

Обобщенная структурная схема генератора с внешней обратной связью приведена на рис.48. Она содержит усилитель с коэффициентом усиления  $K$ , частотно-избирательную цепь положительной обратной связи с коэффициентом передачи  $\beta$  и цепь отрицательной обратной связи с коэффициентом передачи  $m$ . Функционирование генератора можно разделить на два этапа: этап возбуждения генератора и этап стационарного режима. На этапе возбуждения колебаний в генераторе появляются колебания и амплитуда их постепенно нарастает. На втором этапе амплитуда колебаний стабилизируется и генератор переходит в стационарный режим.

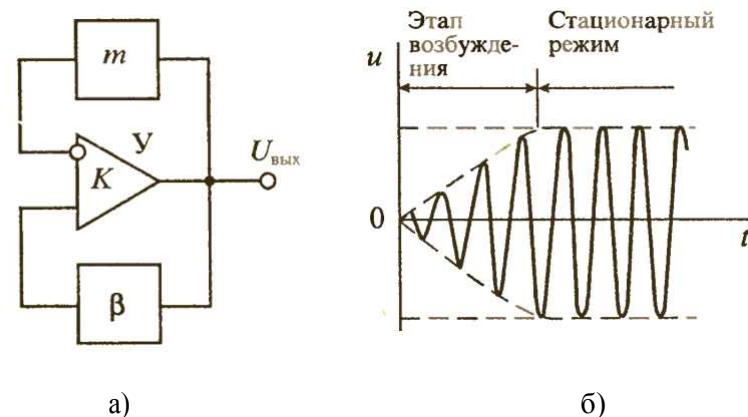


Рис. 48. Обобщенная структурная схема генератора (а) и процесс установления колебаний в генераторе (б).

На этапе возбуждения колебаний основную роль играет цепь положительной обратной связи. Эта цепь определяет условие возбуждения колебаний, их частоту и скорость нарастания амплитуды. После возникновения колебаний их амплитуда нарастает до тех пор, пока действие нелинейной отрицательной обратной связи не ограничит их рост.

Условие возникновения колебаний записывается в виде двух, которые принято называть условиями баланса амплитуд и фаз:

$$\begin{cases} |K\beta| = 1 \\ \arg(K\beta) = \varphi_K + \varphi_\beta = 0 \end{cases} \quad (22)$$

Первое из условий означает, что в стационарном режиме модуль коэффициента усиления усилителя должен быть равен модулю обратной величины коэффициента передачи звена положительной обратной связи. Иначе говоря, насколько сигнал ослабляется при передаче через цепь обратной связи  $\beta$ , настолько он должен усиливаться усилителем. Если  $|K| < |\beta^{-1}|$ , то колебания в схеме генератора будут затухающими, и наоборот, при  $|K| > |\beta^{-1}|$  будут нарастающими.

Второе условие, называемое условием баланса фаз означает, что полный фазовый сдвиг в замкнутом контуре генератор должен быть равен  $2\pi n$ , где  $n$  – любое целое число. Условие

баланса фаз позволяет определить частоту генерируемых колебаний.

В генераторах гармонических колебаний цепь положительной обратной связи выполняется таким образом, чтобы условие баланса фаз выполнялось для одной частоты. Наиболее распространенными генераторами гармонических сигналов являются генераторы, в которых цепь положительной обратной связи выполнена на последовательных или параллельных резонансных контурах, на фазосдвигающих  $RC$ -или  $RL$ -цепях.

Автогенератор – это узкополосный усилитель с положительной обратной связью.

Автогенератор представляет собой устройство, в котором осуществляется преобразование энергии источника постоянного тока в энергию переменных электрических колебаний без подведения к нему внешнего переменного напряжения.

Для возбуждения колебаний в автогенераторах используется положительная обратная связь или активный прибор, имеющий участок характеристики с отрицательным наклоном

Частоту колебаний резонансных контуров в первом приближении можно рассчитывать по формулам:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} \quad (23)$$

Для схемы автогенератора с мостом Вина:

$$\omega = (CR)^{-1} \quad (24).$$

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему автогенератора, изображенную на рис. 49.

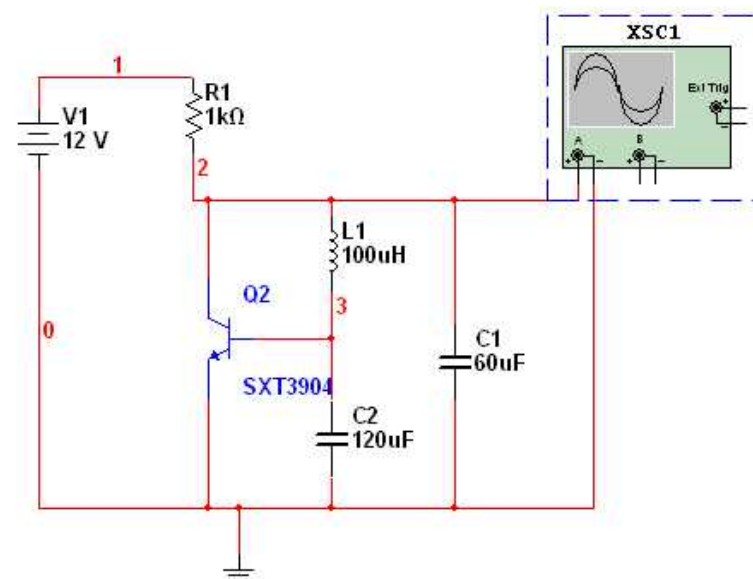


Рис. 49. Схема для исследования автогенератора, собранного по схеме емкостной трехточки

2. Развернуть и настроить осциллограф, изменяя чувствительность и длительность развертки.
3. По осциллограмме посчитать длительность этапа возбуждения и частоту колебаний в стационарном режиме.
4. Произвести расчет параметров схемы для частоты  $f =$  номер в журнале  $\cdot 1000$  Гц.
5. Подставить в схему полученные значения.
6. Повторить пункт 3.
7. Определив период колебаний по осциллограмме рассчитать частоту генерации и сравнить результат с расчетными данными.
8. Собрать схему автогенератора, изображенную на рисунке 50.
9. Развернуть и настроить осциллограф, изменяя чувствительность и длительность развертки.

- Определив период колебаний по осциллограмме рассчитать частоту генерации и сравнить результат с расчетными данными.
- Меняя значение сопротивления  $R2$ , установить, как оно влияет на режим генерации.

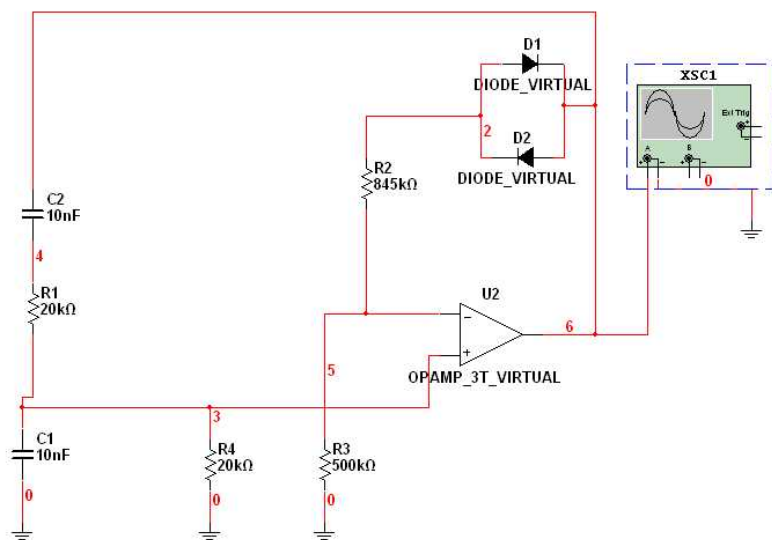


Рис. 50. Схема для исследования автогенератора на операционном усилителе с мостом Вина.

### Контрольные вопросы.

- Что такое электронный генератор?
- Нарисуйте обобщенную структурную схему электронного генератора.
- Каковы условия возникновения колебаний в генераторе?
- Что представляет собой автогенератор?
- Как определяется частота колебаний резонансных контуров?
- Поясните назначение элементов схемы автогенераторов, представленных в данной лабораторной работе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИЗУЧЕНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРА НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

**Краткая теория** Мультивибратор – релаксационный генератор электрических колебаний прямоугольного типа с крутыми фронтами. Термин предложен голландским физиком ван дер Полем, так как в спектре мультивибратора присутствует множество гармоник – в отличие от генератора синусоидальных колебаний («моновибратора»).

Мультивибратор является одним из самых распространенных генераторов импульсов прямоугольной формы, представляющий собой двухкаскадный резистивный усилитель с глубокой положительной обратной связью (рис.51). В электронной технике используются самые различные варианты схем мультивибраторов, которые различаются между собой по типу используемых элементов (ламповые, транзисторные, тиристорные, микроэлектронные и так далее), режиму работы (автоколебательный, ждущий синхронизации), видам связи между усилительными элементами, способам регулировки длительности и частоты генерируемых импульсов и так далее.

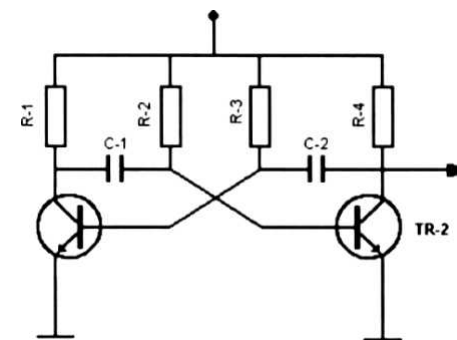


Рис. 51. Схема мультивибратора.

Отнесение мультивибратора к классу автогенераторов оправдано лишь при автоколебательном режиме его работы. В ждущем режиме мультивибратор вырабатывает импульсы только

тогда, когда на его вход поступают специальные запускающие сигналы. Режим синхронизации отличается от автоколебательного лишь тем, что в этом режиме с помощью внешнего управляющего (синхронизирующего) напряжения можно изменять частоту генерируемых колебаний.

Симметричным мультивибратор называют при попарном равенстве сопротивлений  $R1$  и  $R4$ ,  $R2$  и  $R3$ , ёмкостей  $C1$  и  $C2$ , а также параметров транзисторов  $T1$  и  $T2$ .

Симметричный мультивибратор генерирует сигнал «меандрового» типа, то есть сигнал, в периоде которого длительность импульса и длительность паузы одинакова.

Симметричный мультивибратор широко используется для учебных и демонстрационных целей в качестве простейшего по устройству генератора электрических колебаний. Данная схема обладает понятностью и очевидностью, а также не требует для реализации неудобных в расчётах и сборке индуктивностей и трансформаторов.

Практическое применение мультивибраторов на двух транзисторах ограничено сверху частотами в единицы мегагерц. На более высоких частотах оба транзистора с большой вероятностью запираются и для восстановления работы устройство надо отключать от источника питания и запускать заново, что во многих случаях неприемлемо.

Мультивибраторы применяются во многих устройствах мигающего света (елочные, игрушечные, сигнализационные, в реле указателей поворота автомашин и т. п.), полуавтоматических телеграфных ключах для любительской коротковолновой аппаратуры, автоматических манипуляторах передающих устройств дистанционного управления.

Так же существуют ждущие мультивибраторы. Такой мультивибратор генерирует импульсы тока (или напряжения) при подаче на его вход запускающих сигналов от другого источника, например от автоколебательного мультивибратора.

Бистабильный мультивибратор – разновидность ждущего мультивибратора, который имеет два стабильных состояния, характеризующихся разными уровнями напряжения на выходе. Как правило, переключаются эти состояния сигналами,

поданными на разные входы. В этом случае бистабильный мультивибратор представляет собой триггер  $RS$ -типа. В некоторых схемах для переключения используется один вход, на который подаются импульсы различной либо одной полярности.

Одностабильный мультивибратор – это разновидность ждущего мультивибратора, имеющего одно стабильное состояние и одно неустойчивое. При поступлении переключающего импульса одностабильный мультивибратор переключается в неустойчивое состояние на некоторый период времени, а затем возвращается в устойчивое состояние. Иногда также называется одновибратором. Одновибраторы применяются для преобразования формы импульсов в расширителях импульсов.

Сигналы прямоугольной формы широко применяются в электронике. Такие сигналы характеризуются скважностью, т.е. отношением времени периода  $T$  к длительности импульса  $t_n$ :

$S = T / t_n$ . Например, если время паузы равно времени импульса, то скважность  $S = T / t_n = T / 0,5T = 2$ .

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему мультивибратора на ОУ, изображённую на рис. 52.

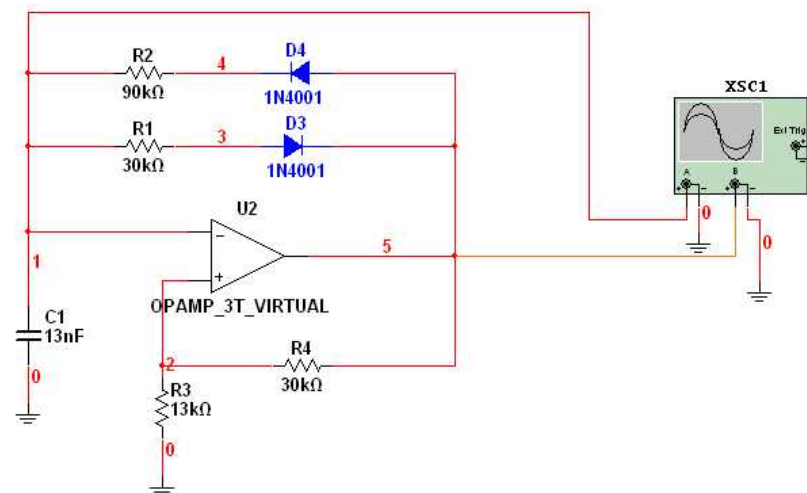


Рис. 52. Схема для мультивибратора на ОУ



2. Включить схему.
3. Развернуть и настроить осциллограф, изменяя чувствительность и длительность развертки. На экране можно наблюдать изменение напряжения на конденсаторе и выходной сигнал.
4. Используя показания осциллографа рассчитать параметры выходного импульсного сигнала.
5. Изменяя постоянную времени цепи заряда и разряда конденсатора, добиться скважности импульсов равной 2,4,10.

#### Контрольные вопросы.

1. Что такое мультивибратор.
2. Назовите и охарактеризуйте режимы работы мультивибратора.
3. Для чего применяются мультивибраторы?
4. Для чего применяются сигналы прямоугольной формы?
5. Что такое одностабильный мультивибратор?
6. Что такое бистабильный мультивибратор?
7. Что такое скважность сигнала?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

#### ИЗУЧЕНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

**Краткая теория.** Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное. Основное назначение выпрямителя заключается в сохранении направления тока в нагрузке при изменении полярности приложенного напряжения.

В состав выпрямителя могут входить: силовой трансформатор СТ, вентильный блок ВБ, фильтрующее устройство ФУ и стабилизатор напряжения СН (рис.53).

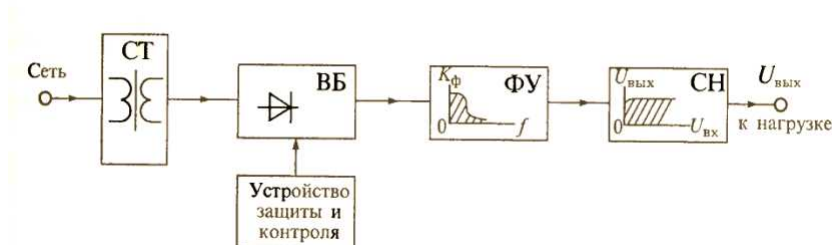


Рис. 53. Обобщенная структурная схема выпрямителя.

Трансформатор СТ выполняет следующие функции: преобразует значение напряжения сети, обеспечивает гальваническую изоляцию нагрузки от силовой сети, преобразует количество фаз силовой сети.

Вентильный блок ВБ является основным звеном выпрямителя, обеспечивая однонаправленное протекание тока в нагрузке. В качестве вентилей могут использоваться электровакуумные, газоразрядные или полупроводниковые приборы, обладающие односторонней электропроводностью.

Фильтрующее устройство ФУ используется для ослабления пульсаций выходного напряжения. В качестве фильтрующего устройства обычно используются фильтры нижних частот, выполненные на пассивных  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементах.

Стабилизатор напряжения СН предназначен для уменьшения влияния внешних воздействий: изменения напряжения питающей сети, температуры окружающей среды, изменения нагрузки и др., - на выходное напряжение выпрямителя.

Однофазный однополупериодный выпрямитель, схема которого приведена на рис.54 а, является простейшим. Такой выпрямитель пропускает на выход только одну полуволну питающего напряжения. Такие выпрямители находят ограниченное применение в маломощных устройствах, так как они характеризуются плохим использованием трансформатора и сглаживающего фильтра.

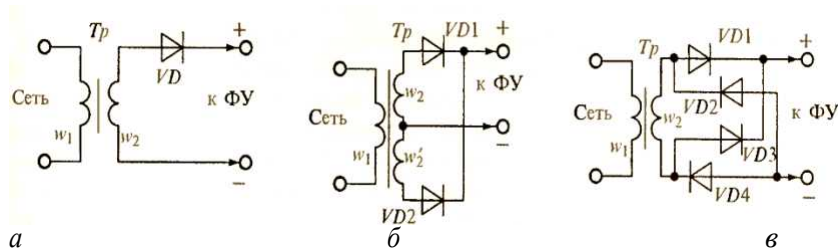


Рис. 54. Схемы выпрямителей: однополупериодный (а), двухфазный двухполупериодный (б), однофазный мостовой (в).

Двухфазный двухполупериодный выпрямитель, приведенный на рис.54 б, представляет собой параллельное соединение двух половин вторичной обмотки  $w_2$  и  $w_2'$ . С помощью этих полуобмоток создаются два противофазных питающих выпрямители напряжения. Этот выпрямитель характеризуется лучшим использованием трансформатора и фильтра. Его часто называют выпрямителем со средней точки вторичной обмотки трансформатора.

Однофазный мостовой выпрямитель рис.54 в является двухполупериодным выпрямителем, питаемым от однофазной сети. В отличие от предыдущей схемы его можно использовать для выпрямления напряжения сети и без трансформатора. К его недостаткам относится удвоенное число выпрямительных диодов, однако трансформатор в таком выпрямителе используется наиболее полно, так как нет подмагничивания магнитопровода постоянным током и ток во вторичной обмотке протекает в течении обоих полупериодов.

Среднее значение выходного напряжения  $U_d$  (постоянная составляющая) однополупериодного выпрямителя вычисляется по формуле:

$$U_d = U_m / \pi \quad (25)$$

Значение  $U_d$  двухполупериодного выпрямителя вдвое больше:

$$U_d = 2U_m / \pi \quad (26)$$

Среднее значение выходного напряжения  $U_d$  (постоянная составляющая) мостового выпрямителя вычисляется по формуле:

$$U_d = 2U_{2m} / \pi \quad (27),$$

где максимум вторичного напряжения на полной обмотке трансформатора  $U_{2m}$  вычисляется по формуле:

$$U_{2m} = U_{1m} (n_2 / n_1),$$

где  $U_{1m}$  – максимальное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора.

Коэффициент трансформации определяется отношением числа витков первичной обмотки  $n_1$  к числу витков вторичной обмотки трансформатора  $n_2$ .

Если включить на выход любого из выпрямителей конденсатор, то переменная составляющая выходного напряжения будет ослаблена.

Среднее значение выходного напряжения  $U_d$  выпрямителя с емкостным фильтром может быть приближенно оценено из соотношения:

$$U_d = (U_{2\max} + U_{2\min}) / 2 = U_{2\max} - \Delta U_2 / 2 \quad (28),$$

где  $U_{2\max}$  и  $U_{2\min}$  – максимум и минимум выходного напряжения,  $\Delta U_2 = U_{2\max} - U_{2\min}$ .

Для оценки качества фильтра обычно используют коэффициент пульсаций  $q$  выходного напряжения, который вычисляется из соотношения:

$$q = (\Delta U_2 / U_d) \times 100 \% \quad (29)$$

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему однополупериодного выпрямителя, изображенную на рис. 55.

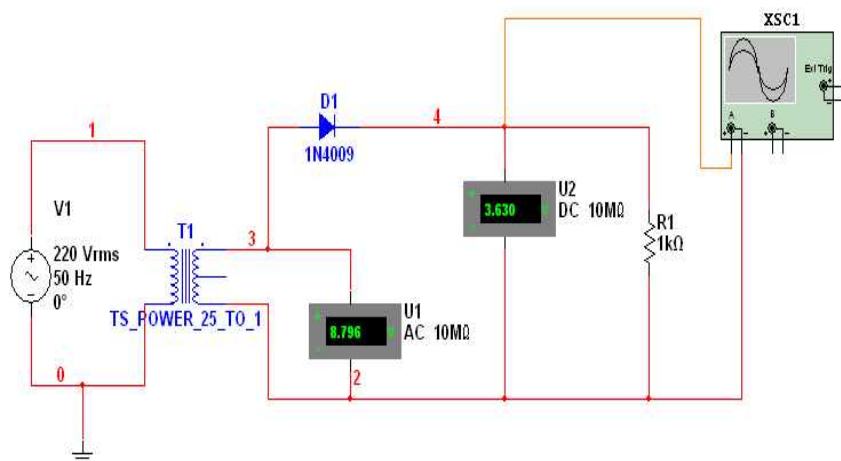


Рис. 55. Схема однополупериодного выпрямителя

2. По показаниям приборов определить напряжение на выходе трансформатора и среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке.
3. По показаниям осциллографа определите максимальное напряжение на нагрузке  $U_m$  и период выходного сигнала.
4. Проверьте правильность выполнения формулы (25). Определите коэффициент трансформации трансформатора.
5. Собрать схему двухполупериодного выпрямителя, изображенную на рисунке 56.
6. По показаниям вольтметра определить среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке.
7. По показаниям осциллографа определите максимальное напряжение на нагрузке  $U_m$  и период выходного сигнала.
8. Проверить правильность выполнения формулы (26).

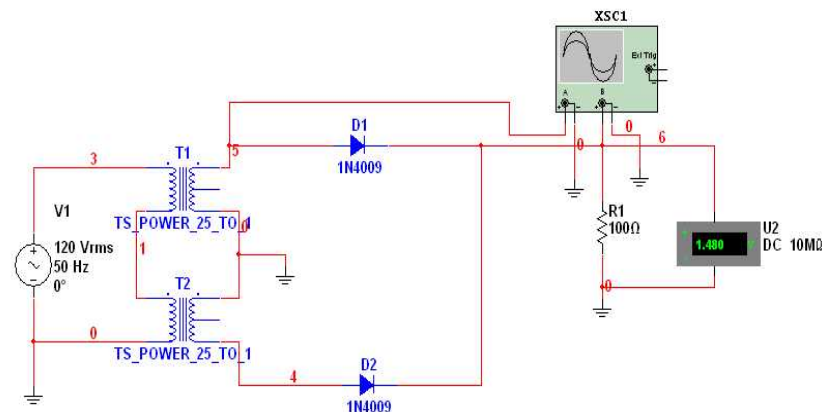


Рис. 56. Схема двухполупериодного выпрямителя

9. Собрать схему мостового выпрямителя, изображенную на рисунке 57.
10. По показаниям вольтметра определить среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке.
11. По показаниям осциллографа определите максимальное напряжение на нагрузке  $U_m$  и период выходного сигнала.
12. Проверить правильность выполнения формулы (26).

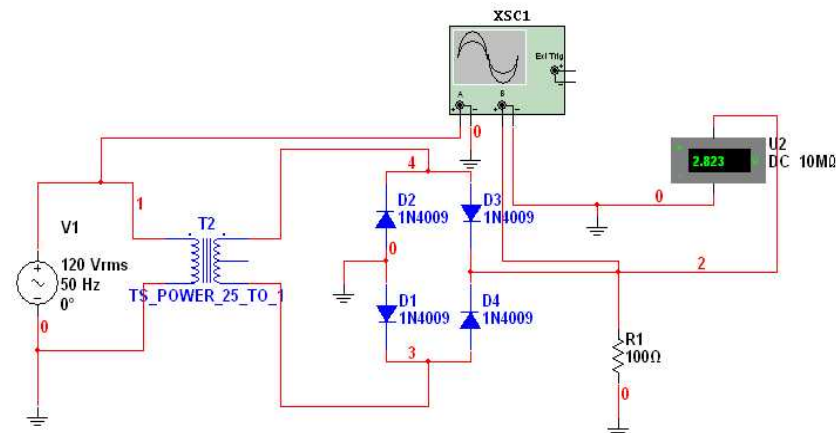


Рис. 57. Схема мостового выпрямителя



13. Собрать схему двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром, изображенную на рис. 58.
14. Увеличивая значение емкости  $C_1$  до 500 мкФ, построить график зависимости коэффициента пульсаций от емкости.

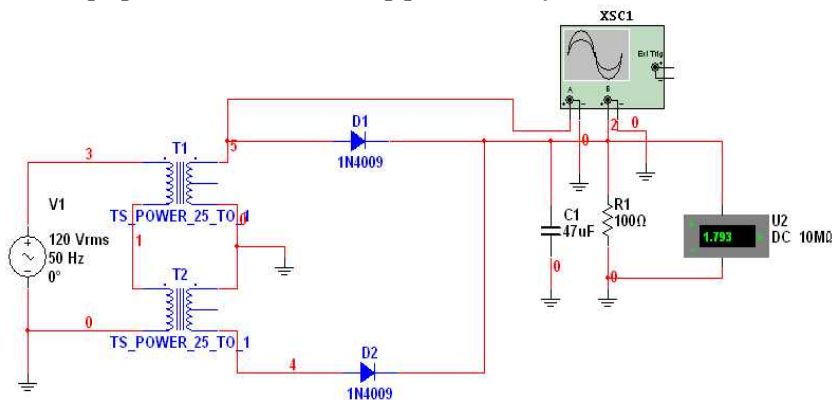


Рис. 58. Схема двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

### Контрольные вопросы.

1. Каковы различия между входным и выходным сигналами однополупериодного выпрямителя?
2. Зачем необходимы трансформаторы в схемах выпрямителей?
3. Чем отличается выходное напряжение в схемах однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя?
4. Как соотносятся частоты входного и выходного напряжений двухполупериодного выпрямителя с частотами входного и выходного напряжений для однополупериодного выпрямителя?
5. По осциллограммам выходного напряжения определите, осуществляет ли выпрямительный мост однополупериодное или двухполупериодное выпрямление?
6. Чем отличаются выходные напряжения в схемах с выпрямительным мостом и двухполупериодного с отводом от средней точки трансформатора?

7. Как соотносятся частоты входного и выходного напряжений выпрямительного моста с частотами входного и выходного напряжений двухполупериодного выпрямителя?
8. Какие факторы влияют на величину коэффициента пульсаций выпрямителя с емкостным фильтром на выходе?

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы радиоэлектроники. / Е.И. Манаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
2. Основы теории электрических цепей и электроники. / В.П. Бакалов [и др.]. – М.: Радио и связь, 1989. – 528 с.
3. Радиотехнические цепи и сигналы. / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
4. Техническая электроника: учеб. пособие для ст-тов вузов. / Ф.А. Ткаченко. – Минск: Дизайн-ПРО, 2002. – 351 с.
5. Электронные приборы. / Ю.Д. Денискин, А.А. Жигарев, Л.П. Смирнов. – М.: Энергия, 1980. – 282 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО К ПРОГРАММЕ MULTISIM 10.0.....	4
Интерфейс программы.....	4
Система меню MultiSim 10.0.....	6
Панель инструментов.....	13
Виртуальные приборы Multisim. ....	16
Создание схем.....	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 .....	31
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 .....	38
ПОЛУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА.....	38
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 .....	45
ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ $n - p$ -ПЕРЕХОДОМ.....	45
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ....	51
ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ .....	51
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 .....	60
ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИХ И ИНТЕГРИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ .....	60
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 .....	66
ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ .....	66

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 .....	71
ИЗУЧЕНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРА НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ .....	71
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 .....	74
ИЗУЧЕНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ .....	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	81

Учебное издание

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ  
ПРОГРАММЫ MULTISIM

Лабораторный практикум

Авторы – составители:  
**Васильев** Сергей Валерьевич  
**Царикович** Жанна Владимировна

Редактор *М.В. Вахмянина*  
Компьютерная верстка: *С.В. Васильев, Ж.В. Царикович*  
Дизайн обложки: *О.В. Канчуга*

Сдано в набор 20.09.2007. Подписано в печать  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Печать RISO. Гарнитура Таймс.  
Усл.печ.л. 5,58. Уч.-изд.л. . Тираж экз. Заказ .

Учреждение образования «Гродненский государственный  
университет имени Янки Купалы».  
ЛИ № 02330/0133257 от 30.04.2004. Ул. Пушкина, 39, 230012, Гродно.

Отпечатано на технике издательского центра  
Учреждения образования «Гродненский государственный  
университет имени Янки Купалы»  
ЛП № 02330/0056882 от 30.04.2004. Ул. Пушкина, 39, 230012, Гродно