

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Управляющие и вычислительные системы»

ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКУ

Методическое пособие к лабораторным работам

Факультет электроэнергетический

Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль Электропривод и автоматика

Вологда
2014

УДК 621.3.01, 621.396.6

Введение в электроавтоматику: методическое пособие к лабораторным работам - Вологда: ВоГУ, 2014. – 59 с, ил.

Методическое пособие предназначено для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль – электропривод и автоматика).

В методическом пособии приведены краткие сведения о программе моделирования «Electronics Workbench», позволяющей в виртуальной лаборатории создавать и исследовать компьютерные модели различных устройств электроники и автоматики в процессе выполнения многовариантных заданий лабораторного практикума.

Пособие также может использоваться студентами других направлений при изучении практической электроники и для самостоятельной работы при освоении специальных дисциплин, где рассматриваются вопросы аналоговой и цифровой схемотехники и автоматики.

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГУ

Составители: А.Н. Андреев, канд. техн. наук, доцент
М.А. Андреев, канд. техн. наук, доцент

Рецензент В.Б. Анкудинов, канд. техн. наук, доцент каф. АВТ

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум предназначен для приобретения первичных знаний в области современной электроавтоматики, первичных навыков компьютерного моделирования отдельных элементов современного электропривода, получаемых студентами при выполнении лабораторных работ. Все задания являются многовариантными и выполняются с использованием виртуальной лаборатории Electronics Workbench.

1. КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ПРОГРАММЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ «ELECTRONICS WORKBENCH»

Пользовательский программный интерфейс Electronics Workbench (продукт фирмы Interactive Image Technologies Ltd.) в максимальной степени приближен к реальным условиям создания и отладки макетных образцов электронных устройств. Модель электрической схемы «собирается» в поле редактирования (моделирования) из элементов, извлекаемых из библиотек, и электрических связей, вводимых по желанию пользователя. Дополнительно в схему включаются измерительные приборы для визуального отображения и документирования получаемых результатов.

Большинство программ моделирования содержат в базах данных информацию как о пассивных элементах электронных устройств (резисторы, конденсаторы, индуктивности), так и активных (диоды, транзисторы, аналоговые и цифровые микросхемы и т.п.) Модели чаще всего представлены эквивалентными схемами. Чем сложнее структура элемента, тем сложнее его эквивалентная схема. Далеко не всегда реализованная схема модели с высокой степенью адекватности соответствует реальному электронному устройству. Абсолютный уровень соответствия может быть оценен лишь путем сопоставления результатов моделирования и физического эксперимента для реально существующего объекта.

Расчеты, выполняемые программами моделирования, базируются на внутренних описаниях схем. Уравнения электрических цепей составляются на основе известных законов (Ома, Кирхгофа) с применением классических методов узловых потенциалов и контурных токов [1]. Полученные уравнения решаются путем применения хорошо известных численных методов. Обычно уравнения решаются для разных видов сигналов, а именно: на постоянном токе (DC – direct current) и на переменном токе (AC - alternating current). Также реализуется режим расчета переходных процессов (Transient).

Результаты расчетов выводятся для анализа в различном виде: традиционном цифровом и графическом. Наряду с классическими измерительными

приборами (амперметр, вольтметр) широко применяются другие виртуальные приборы: мультиметр, осциллограф, функциональный генератор, анализатор частотных характеристик, генераторы и анализаторы цифровых сигналов.

1.1. Интерфейс пользователя программы Electronics Workbench

Версия Electronics Workbench V5.xx (EWB) требует операционной системы Windows 95/98/Me/NT/2000/XP. Система окон и меню аналогична их конфигурации в программах Microsoft Office. Внешний вид главного окна с примером схемы приведен на рис.1.1.

В верхней части экрана расположено основное текстовое меню File, Edit, Circuit, Analysis, Window, Help. Ниже основного меню расположены две строки с пиктограммами. В первой строке в виде символов продублированы команды текстового меню, а во второй (нижней) строке сконцентрированы пиктограммы библиотек различных элементов и измерительных приборов. Основная часть экрана является масштабируемым полем для сборки модели электронного устройства и подключения измерительных приборов. На рис.1.1 схема с подключенным осциллографом (Oscilloscope) расположена в левой верхней части поля моделирования. Редуцированный (неполноформатный) экран осциллографа в приведенном примере располагается в правом нижнем углу. Переключение в полноформатный режим осуществляется при нажатии клавиши **Expand** на лицевой панели осциллографа. Обратное переключение – при нажатии клавиши **Reduce**.

На экране осциллографа и в окне графопостроителя (правый верхний угол) представлен процесс самовозбуждения генератора синусоидальных колебаний, реализованного на элементах, извлеченных из библиотек, которые показаны в левой нижней части поля моделирования. Результат моделирования зафиксирован во время паузы. Включение и выключение режима моделирования осуществляется командами основного меню Analysis:

Activate – Ctrl+G	Пуск (активизация схемы);
Resume – F9	Резюме (промежуточный результат);
Stop – Ctrl+T	Стоп (прекращение моделирования).

Команды Activate и Stop продублированы выключателем в правом верхнем углу экрана, а команда Resume там же – клавишей Pause (Resume).

Если схема активизирована, то нажатие клавиши F9 (или кнопки Pause) останавливает процесс моделирования, а их повторное нажатие возобновляет.

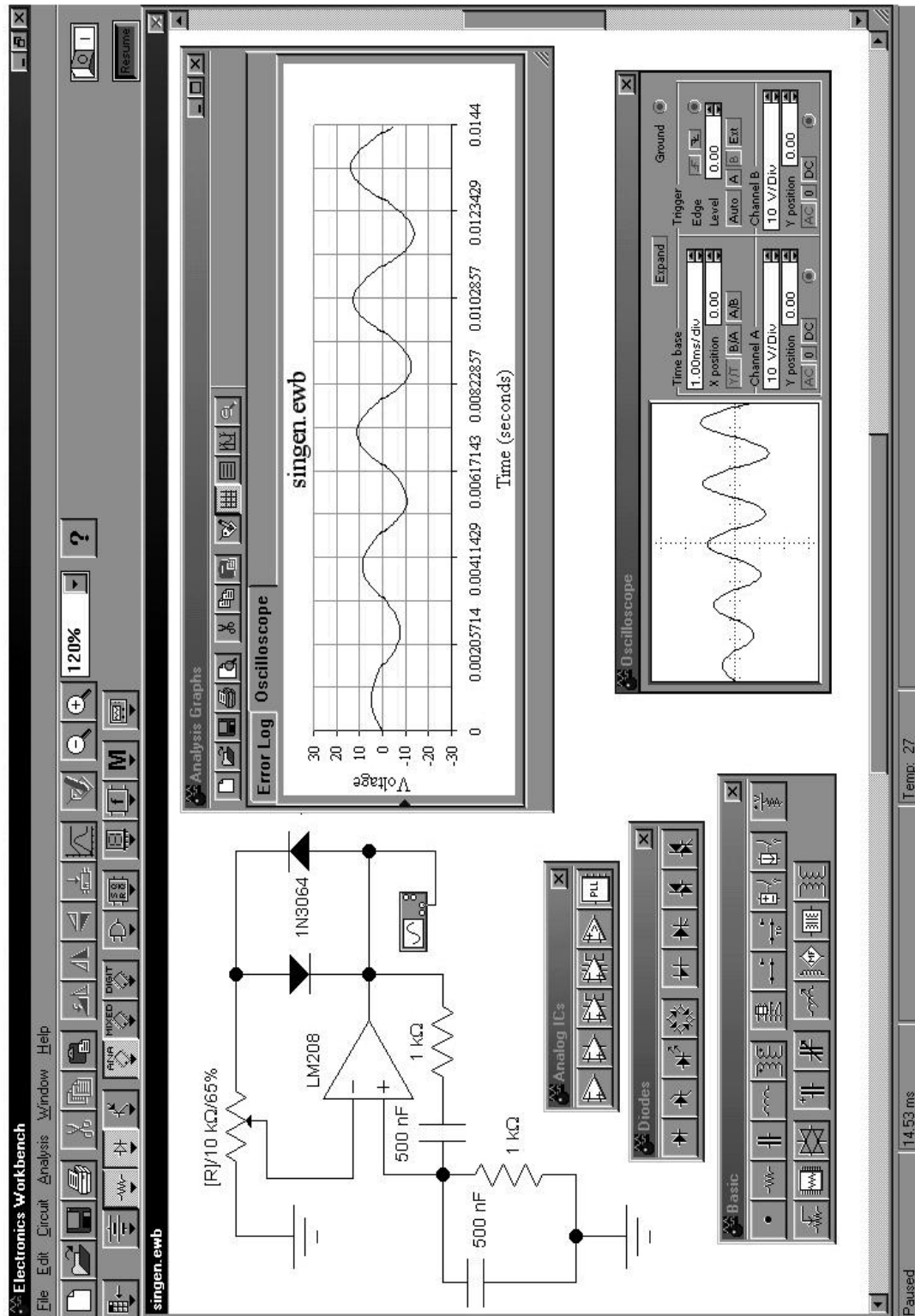


Рис.1.1. Главное окно Electronics Workbench

Нажатие клавиш Ctrl+T (или выключение схемы выключателем) завершает процесс текущего сеанса моделирования. В этом случае возможен только повторный пуск (активизация).

Примечание: если схема длительное время находится в активизированном состоянии, то при большом количестве вычислений (в программе используется модифицированный метод Ньютона–Рафсона для численного решения нелинейных дифференциальных уравнений) может накопиться большая ошибка, ведущая к некорректному результату и завершению работы программы. Повторная активизация схемы чаще всего не приводит к сбросу накопленных ошибок. Их сброс осуществляется только при повторном запуске программы Electronics Workbench.

При работе с программой Electronics Workbench выполняются 4 основных этапа:

- ввод данных в виде схемы с подключенными измерительными приборами;
- формирование структурированного описания на основе преобразования и проверки введенных данных;
- решение уравнений электрических цепей и формирование массивов данных для последующей обработки;
- вывод полученных результатов в форме удобной и понятной пользователю.

1.2. Ввод данных для моделирования

Ввод данных для моделирования осуществляется путем выполнения следующих манипуляций:

- поиск и извлечение элементов и приборов из библиотек;
- размещение элементов на поле моделирования;
- соединение элементов проводниками;
- задание параметров элементов в соответствии со схемным решением.

Для выполнения большинства вышеперечисленных действий используется мышь, а для задания численных параметров и других атрибутов – клавиатура. Для двухклавишной мыши левая клавиша является командной, а правая – клавишей контекстной подсказки (help) и других действий применительно к элементам схемы (вырезание – cut; копирование – copy; удаление – delete и др.). Использование контекстной подсказки уменьшает количество ошибок моделирования.

Компьютерные модели электронных компонентов и приборов сконцентрированы в библиотеках:

Sources	Источники электрических сигналов
Basic	Пассивные элементы
Diodes	Полупроводниковые диоды
Transistors	Транзисторы
Analog Ics	Аналоговые микросхемы
Mixed Ics	ЦАП и АЦП
Digital Ics	Цифровые микросхемы
Logic Gates	Логические элементы
Digital	Цифровые элементы
Indicators	Индикаторы, включая амперметр и вольтметр
Controls	Элементы структурных схем САУ
Miscellaneous	Разное
Instruments	Измерительные приборы

Элементы должны быть размещены на поле моделирования без наложения друг на друга как относительно условных графических изображений, так и их контактов. Электрические цепи создаются путем соединения контактов элемента с помощью мыши. При перемещении курсора мыши (стрелка) в зону контакта элемента, последний выделяется в виде черной точки. Нажатие и удерживание левой клавиши позволяет провести электрическую цепь к другому контакту, который также выделяется. Отпускание клавиши фиксирует электрическое соединение. Возможно проведение цепи от контакта к уже существующему проводнику. При этом на проводнике образуется коннектор (точка Т-образного соединения). Дополнительно коннектор представлен в библиотеке в виде отдельного элемента с четырьмя контактами, расположенными ортогонально. Кроме элементов и проводников? в моделируемую схему должна быть включена точка привязки (отсчета). Функцию этой точки выполняет элемент **Ground (GND)**. Он должен присутствовать в любой моделируемой схеме и быть подключенным. Элементы, не включенные в схему, желательно удалить во избежание ошибок моделирования.

Масштабирование изображения осуществляется при нажатии на соответствующие пиктограммы (+, -) в строке меню или при использовании контекстного меню (нажатие правой клавиши мыши в свободном месте поля моделирования). При этом используются пункты Zoom In, Zoom Out.

Изменение пространственной ориентации компонентов схемы (повороты), задание параметров и другие манипуляции осуществляются путем использования контекстного меню или соответствующих пиктограмм. Двойной щелчок левой клавиши мыши на контуре элемента непосредственно вызывает пункт подменю **Properties** (свойства). Численные значения параметров задаются в соответствии с предварительными расчетными данными.

Для пассивных элементов (резисторы, конденсаторы, индуктивности) задается Value (величина) сопротивления, емкости и индуктивности. Для активных элементов, начиная с диодов, выбираются их модели из представленных списков библиотек.

Удаление элементов осуществляется путем использования контекстного меню. Выделенный элемент (красный цвет контура) также удаляется при нажатии клавиши Delete на клавиатуре.

Возможны групповые операции перемещения, удаления и копирования при условии предварительно созданного окна для названных действий. Прямоугольное окно создается с помощью мыши при удерживании левой клавиши. Элементы, попавшие в окно, выделяются красным цветом контуров.

Дополнительные параметры для моделируемой схемы могут быть заданы при использовании пункта контекстного меню Schematic Options или при использовании основного меню Circuit (тот же пункт подменю). Внешний вид окна Schematic Options приведен на рис. 1.2.

Использование пункта Grid позволяет установить сетку поля моделирования. Пункт Fonts позволяет выбрать шрифты для надписей. Активизация пункта меню Show/Hide позволяет вывести на экран или скрыть позиционные обозначения элементов, вводимые пользователем (labels); позиционные обозначения, присваиваемые системой автоматически (reference ID); наименования используемых моделей элементов (models); значения параметров пассивных элементов (values); номера узлов схемы (nodes).

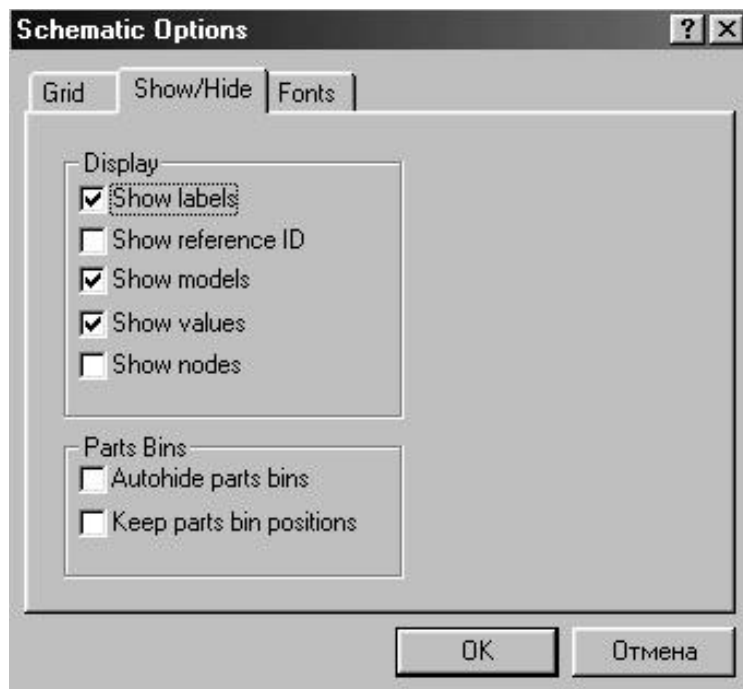


Рис. 1.2. Параметры схемы

Electronics Workbench позволяет использовать элементы с иерархией (вложенные). Такие элементы создаются в виде подсхем из участков схем с элементами и электрическими связями, чем обеспечивается компактная графическая форма моделируемого электронного устройства. Подсхема (иерархический элемент) создается путем включения в прямоугольное окно требуемого участка исходной схемы. Границы окна долж-

ны пересекать электрические цепи схемы, которые должны стать входами и

выходами (выводами) создаваемого иерархического элемента. Обработка выделенного окна командой **Create Subcircuit** меню **Circuit** трансформирует пересечения цепей в контакты иерархического элемента и помещает его в библиотеку **Favorites** с именем, которое задается пользователем. Полученные иерархические элементы доступны только для данной схемы. Включение их в другие схемы возможно путем копирования в буфер обмена Windows или создания файла, содержащего требуемые иерархические элементы.

1.3. Использование измерительных приборов

Кроме традиционных измерительных приборов (вольтметр и амперметр), размещенных в библиотеке **Indicators**, пользователю доступны 7 измерительных приборов из библиотеки **Instruments**.

Количество вольтметров и амперметров, включаемых в схему, не ограничено. Приборы из библиотеки **Instruments** могут присутствовать в схеме в единственном экземпляре.

В библиотеку **Instruments** включены:

Multimeter	- мультиметр (авометр);
Function Generator	- функциональный генератор;
Oscilloscope	- осциллограф;
Bode Plotter	- анализатор частотных характеристик;
Word Generator	- генератор слов;
Logic Analyzer	- логический анализатор;
Logic Converter	- логический преобразователь.

Все перечисленные приборы являются виртуальными и извлекаются на поле моделирования в виде прямоугольников с клеммами для подключения к схеме. Двойное нажатие клавиши мыши на поле прибора позволяет получить увеличенное окно для настройки параметров и визуального отображения результатов моделирования.

Мультиметр

Внешний вид панели мультиметра и схема его подключения в режиме измерения постоянного напряжения показана на рис.1.3.

Используется мультиметр для измерения действующих (среднеквадратичных, эффективных) значений напряжения или тока, для измерения сопротивления и падения напряжения между двумя точками схемы в децибеллах.

Диапазон измерения прибора настраивается автоматически.

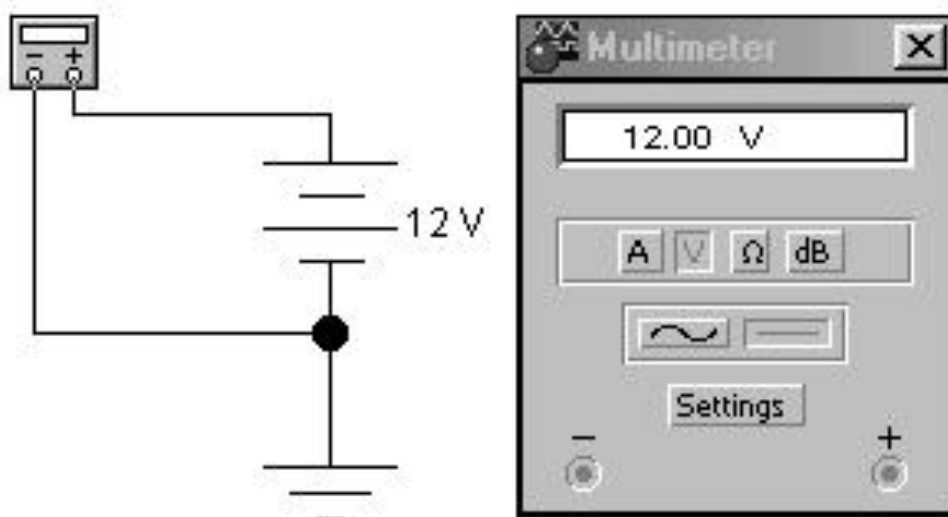


Рис.1.3. Мультиметр

Измерение сопротивления ведется на постоянном токе (DC).

Величина коэффициента k в децибеллах (режим dB) вычисляется по формуле $k = 20\lg(A)$, где A является измеряемой величиной.

Функциональный генератор

На выходах функционального генератора (рис.1.4) формируются периодические сигналы трех типов: синусоидальной, треугольной и прямоугольной формы. При этом в широком диапазоне регулируются: амплитуда (Amplitude), частота (Frequency) и напряжение смещения (Offset). Дополнительно для сигнала прямоугольной формы регулируется длительность импульса (Duty cycle) в процентах от длительности периода.

При включении генератора в схему точка прибора Common (общий) подключается к элементу ground (земля) для обеспечения единой точки привязки с нулевым потенциалом, что необходимо для корректного выполнения расчетов при моделировании.

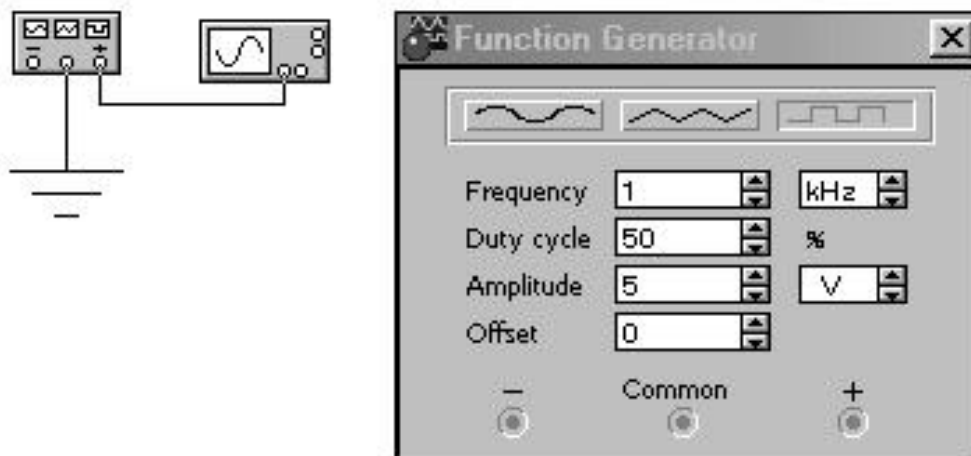


Рис.1.4. Функциональный генератор

Осциллограф

Двухлучевой виртуальный осциллограф, схема подключения которого и редуцированная (Reduce) форма его лицевой панели показаны на рис.1.1, позволяет одновременно наблюдать сигналы по каналам А и В. Внешний вид развернутой лицевой панели (Expand) представлен на рис.1.5.

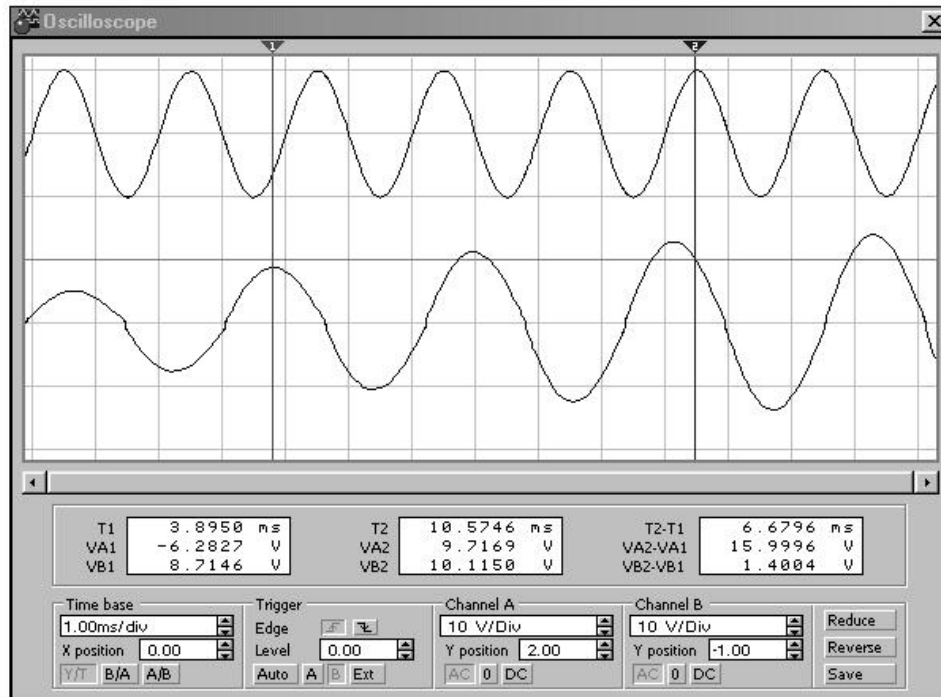


Рис.1.5. Осциллограф

Масштабы вертикальной (амплитуда) и горизонтальной (время) разверток настраиваются пользователем в зависимости от амплитуды и частоты наблюдаемых сигналов. Установка цены деления временной развертки устанавливается в окне Time base, а цены деления вертикальной развертки – в окнах Channel A и Channel B. Возможны смещения лучей вверх и вниз по каналам путем изменения параметра Y position, как показано на рис.1.5.

В режиме AC (переменный ток) фиксируется только переменная составляющая сигнала, в режиме DC (постоянный ток) – и переменная, и постоянная составляющие.

В режиме Expand два вертикальных перемещаемых визира позволяют измерить точные значения напряжения в двух точках временной оси.

Кнопка Reverse позволяет получить негативное отображение экрана осциллографа.

Две правые вертикальные клеммы осциллографа в схеме подключения считаются заземленными по умолчанию в том случае, если в схеме присутствует элемент Ground.

Для фиксации изображения на экране осциллографа необходимо в меню **Analysis** выбрать подменю **Analysis options**, а в нем в пункте **Instruments** установить флаг в строке **Pause after each screen** (пауза после каждого экрана). В этом случае после полной прорисовки экрана осциллографа программа автоматически переходит в режим паузы. После нажатия на кнопку **Resume** прорисовывается следующий экран и т.д.

Анализатор частотных характеристик

Анализатор частотных характеристик (рис.1.6) позволяет получить АЧХ – амплитудно-частотные (Magnitude) и ФЧХ – фазочастотные (Phase) характеристики динамических звеньев, фильтров, четырехполюсников и др.

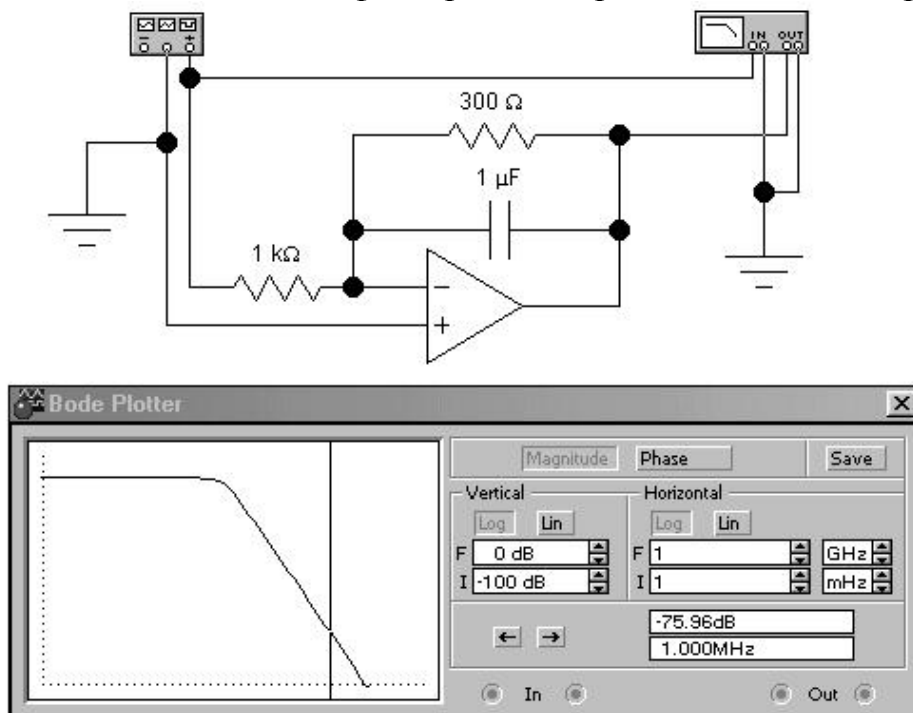


Рис.1.6. Анализатор частотных характеристик

Входные цепи подключаются к контактам IN анализатора, а выходные – к контактам OUT. При этом в схему устройства дополнительно должен быть подключен источник синусоидального напряжения без задания его параметров, например, функциональный генератор. Недействующие клеммы IN и OUT подключаются к шине GND.

Схема правильного подключения показана на рис.1.6. Линейный (Lin) или логарифмический (Log) масштаб измерения, частотный диапазон, параметры выходных величин задаются по результатам предварительных расчетов и пробного модельного эксперимента.

Визирная линия позволяет получить точные значения АЧХ и ФЧХ для конкретных значений частот. Перемещение визира осуществляется либо не-

посредственно с помощью мыши, либо при нажатии мышью на стрелки ← →, размещенные на панели анализатора.

Генератор слов

Генератор слов предназначен для формирования испытательных сигналов для цифровых устройств. Разрядность слова в двоичном формате равна 16. Младшему двоичному разряду соответствует правая клемма. Значения кодов задаются пользователем в двоичном, шестнадцатеричном или ASCII формате, либо выбираются из образцов (Patterns), показанных на рис. 1.7.

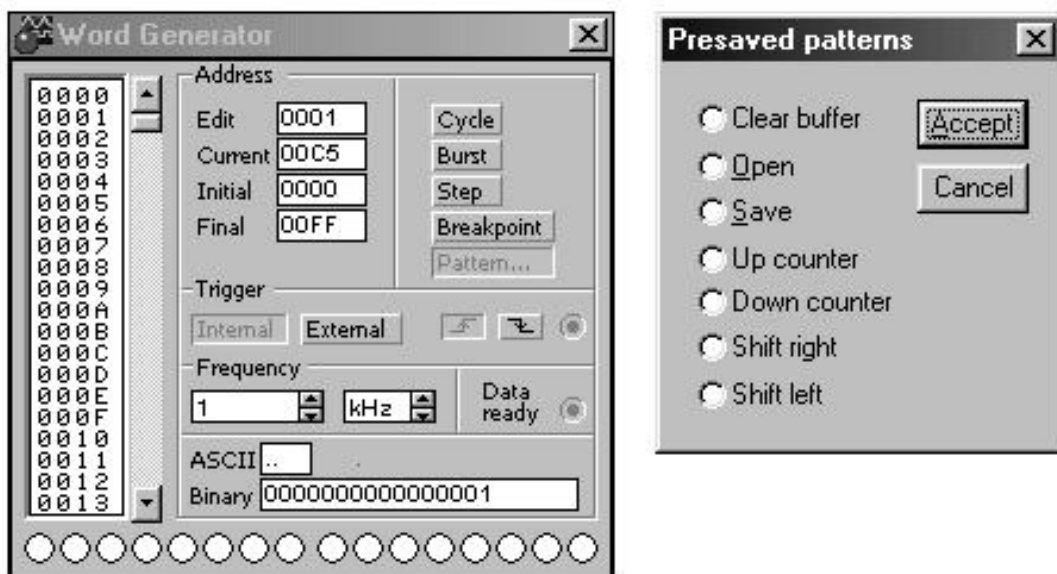


Рис.1.7. Генератор слов

Среди образцов кода представлены последовательности, генерируемые элементами типа:

- Up counter - суммирующий счетчик;
- Down counter - вычитающий счетчик;
- Shift right - регистр сдвига вправо;
- Shift left - регистр сдвига влево.

Дополнительные возможности дает обнуление буфера (Clear buffer), а также сохранение (Save) и применение (Open) ранее созданных образцов.

Формы генерации слов имеют три варианта:

- Cycle - циклический от начального (Initial) до конечного (Final) адреса с последующим повторением;
- Burst - от начального до конечного адреса;
- Step - в шаговом режиме (слово за словом последовательно).

Также может быть назначена точка останова (Breakpoint) с последующим продолжением с этой же точки.

Логический анализатор

Логический анализатор предназначен для отображения в виде временных диаграмм электрических сигналов в цифровых устройствах. Прибор может регистрировать цифровые сигналы по 16 каналам. На рис. 1.8 приведена схема подключения прибора к контрольным точкам цифрового устройства и внешний вид лицевой панели с временными диаграммами.

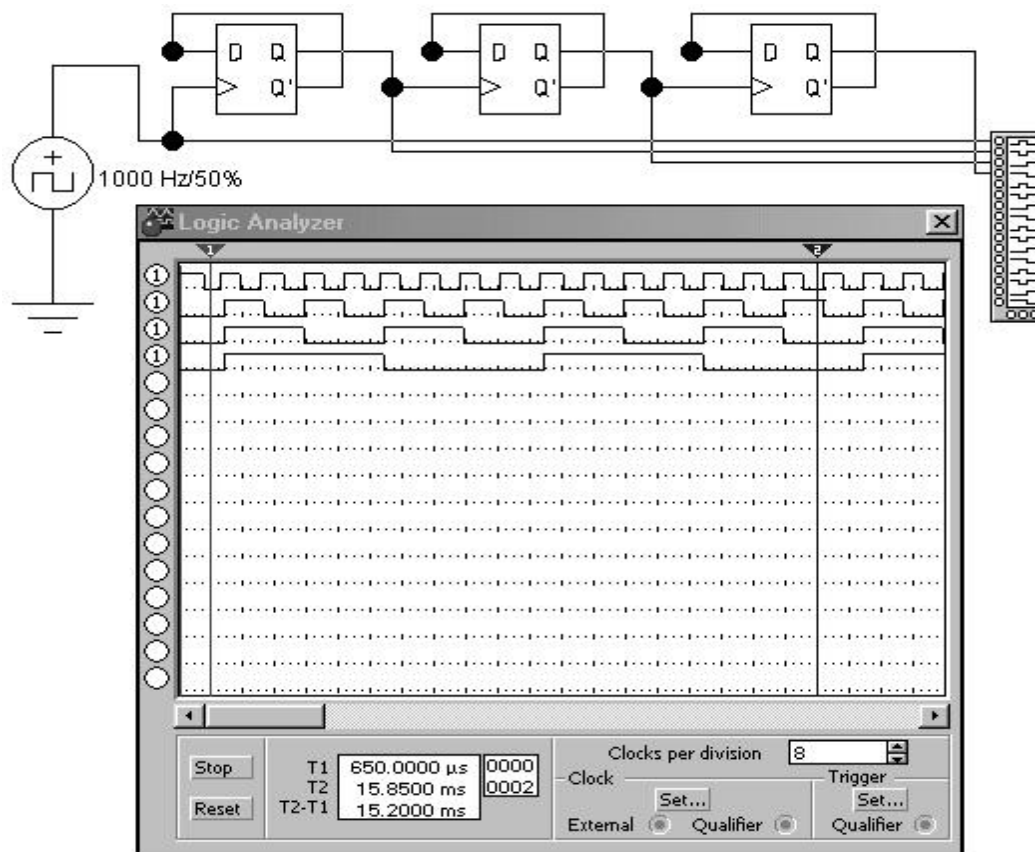


Рис.1.8. Логический анализатор

При установке параметров (Set) необходимо внутреннюю частоту анализатора (Internal clock rate) установить существенно выше, чем частота сигналов в контрольных точках. Параметр количества импульсов на деление (Clocks per division) устанавливается в диапазоне от 1 до 128 с шагом, кратным степени двойки, то есть (1, 2, 4, 8, ..., 128). Параметр подбирается по критерию удобства визуального анализа временных диаграмм. Два вертикальных визира позволяют точно измерять требуемые временные интервалы.

Логический преобразователь

Указанный прибор является исключительно виртуальным и не имеет реального аппаратного аналога. Вычисления, выполняемые преобразователем, связаны с областью классической алгебры логики. Исходная логическая

функция, максимальное количество переменных которой равно 8, может быть задана в виде таблицы истинности, аналитического выражения и логической схемы. Пользователю доступны следующие преобразования (Conversions):

- | | | |
|----------------------|---|----------------------------------|
| логическая схема | → | таблица истинности; |
| таблица истинности | → | логическое выражение; |
| логическое выражение | → | таблица истинности; |
| таблица истинности | → | логическая схема (полный базис); |
| таблица истинности | → | логическая схема (базис И-НЕ). |

Логические выражения приводятся в дизъюнктивной нормальной форме. Знаком инверсии является апостроф после имени переменной. Логическое выражение может быть минимизировано при использовании функции SIMP. Для этой цели в программе использован метод Квайна-Маккласки. Внешний вид прибора, минимизированного логического выражения для заданной таблицы истинности и логической схемы (полный логический базис) приведены на рис.1.9.

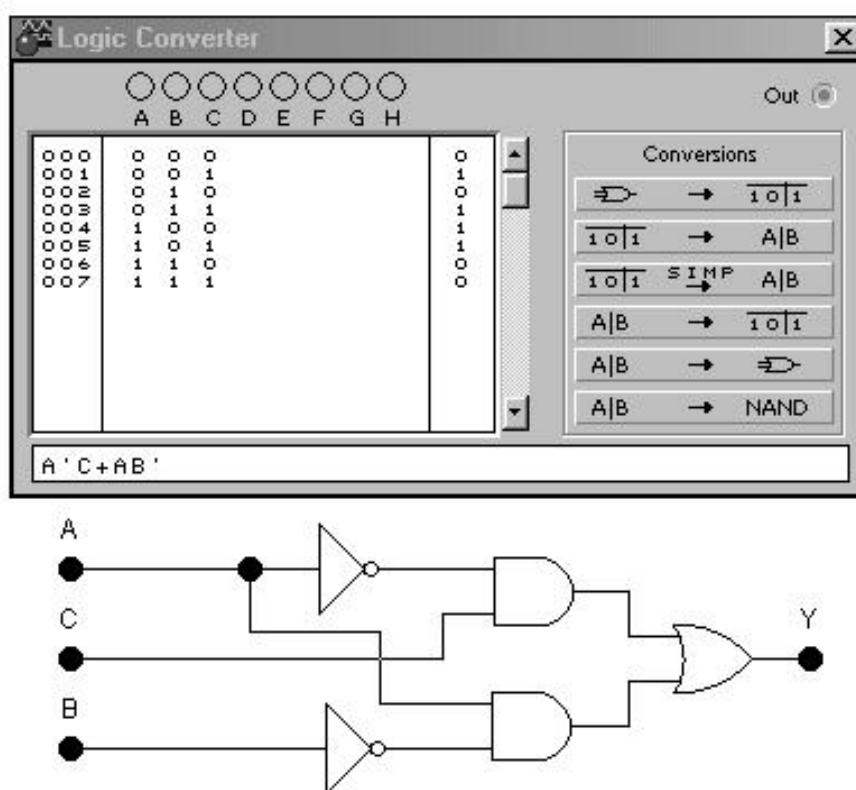


Рис.1.9. Логический преобразователь

1.4. Анализ моделей электронных схем

Основное преимущество EWB и других подобных программ состоит в том, что наиболее трудоемкая часть, связанная с расчетами процессов, происходящих в реальных электронных устройствах, заменяется компьютерным моделированием.

Вместе с тем, смоделировать можно все, кроме реальности, так как смоделированная реальность таковой уже не является. Поэтому во всех модельных экспериментах доверять полученным результатам нужно с определенной долей осторожности, так как это всего лишь результат расчетов компьютера и не более того.

Неабсолютная достоверность результатов при моделировании связана как с объективными, так и с субъективными причинами. К объективным причинам могут быть отнесены: неадекватность моделей элементов реальным элементам; погрешности вычислительных методов; погрешности вычислений. Основной субъективной причиной являются человеческие ошибки на всех этапах (создание программы, создание моделей элементов, создание моделей схем и т.д.) процесса общения с компьютером. То есть, если «человеку свойственно ошибаться, то все запутать окончательно может только компьютер».

Поэтому для получения достоверных результатов моделирования даже для простых устройств автоматики необходимы знания о физической природе электронных компонентов, правилах их включения, правилах использования реальных измерительных приборов, общих законах физики и электротехники.

Иными словами: компьютер должен работать, а человек – думать и использовать предоставленный ему инструмент.

Выбор вида анализа в программе EWB осуществляется автоматически в зависимости от того, какие приборы подключены к схеме моделируемого устройства.

Анализ по постоянному току (**DC Operating Point**) выполняется при подключении амперметров, вольтметров и мультиметра, если все они работают в режиме измерения по постоянному току.

Расчет частотных характеристик (**AC frequency**) выполняется при подключении анализатора частотных характеристик, а также измерительных приборов в режиме измерения по переменному току.

Переходные процессы (**Transient**) автоматически рассчитываются при подключении осциллографа.

Активизация названных режимов осуществляется выключателем или командами Activate (Ctrl+G)/Stop (Ctrl+T).

Дополнительно для любой схемы можно реализовать все три вида анализа путем использования соответствующих команд меню Analysis. Результаты расчетов в этом случае выводятся в переключаемое окно Analysis Graphs. Требуемые параметры анализа настраиваются в диалоговых окнах, аналогичных окнам настройки параметров измерительных приборов.

Особое внимание необходимо уделить настройкам параметров численного интегрирования, так как параметры, установленные по умолчанию, не всегда позволяют корректно завершить процесс моделирования.

При появлении сообщений «Time step too small» (слишком маленький шаг интегрирования) или «No convergence in the transient analysis» (нет сходимости при анализе переходного процесса) необходимо воспользоваться пунктом меню **Analysis\Analysis Options\Transient** и изменить значения следующих параметров:

ITL4 - Transient time point iterations (количество итераций) в сторону увеличения до 50 ... 1000. Увеличение шага ведет к увеличению времени расчета.

TRTOL - Transient error tolerance factor (фактор допустимой ошибки) в сторону уменьшения до 1 ... 0,01.

Остальные параметры для большинства случаев можно оставить без изменения.

EWB позволяет выполнять и другие виды анализа, которые в реальной практике встречаются значительно реже. К ним относятся: спектральный анализ (**Fourier**), анализ собственных шумов (Noise) анализ нелинейных искажений (Distortion), анализ влияния параметров элементов схемы (**Parameter sweep**), анализ влияния температуры (Temperature sweep). Программой также могут быть рассчитаны: нули и полюса передаточной функции (Pole-Zero), передаточная функция (Transfer Function), чувствительность (Sensitivity), наихудший вариант влияния разброса параметров элементов (Worst Case) и статистический анализ методом Монте Карло (Monte Carlo), когда параметры элементов изменяются по случайному закону (в программе принято распределение Гаусса).

Для проведения спектрального анализа (**Fourier**) необходимо выполнить настройки в диалоговом окне, которое появляется после выполнения команды Analysis\Fourier (рис.1.10).

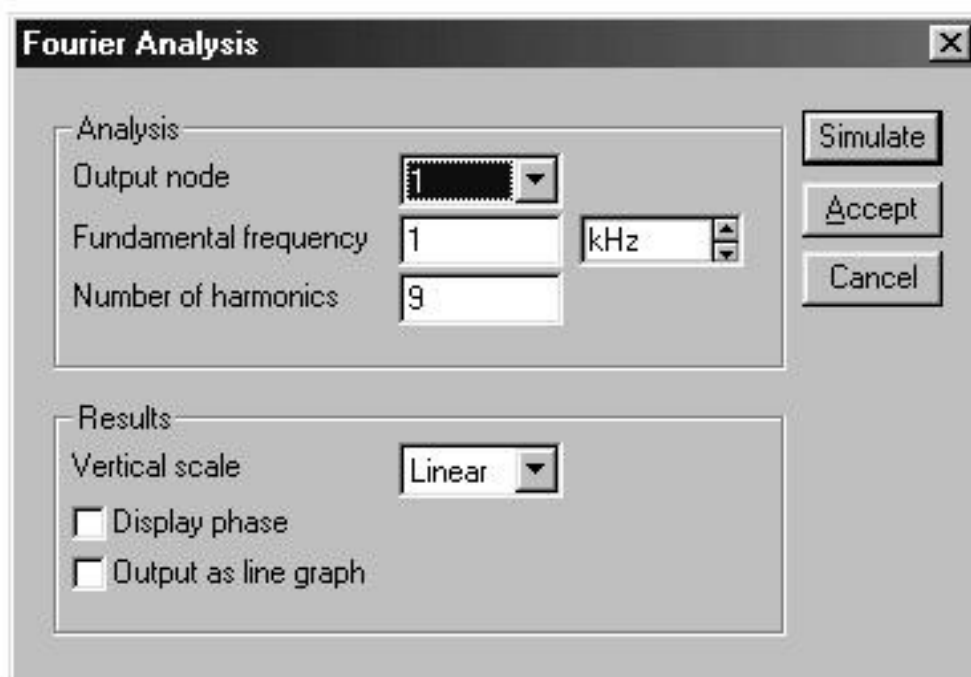


Рис.1.10. Диалоговое окно Analysis\Fourier

Настройки заключаются в задании номера узла (output node) схемы; частоты первой (основной) гармоники (fundamental frequency) спектрального анализа. Эта частота может, например, совпадать с частотой анализируемого периодического сигнала или с частотой основной гармоники модулированного сигнала. Также указывается количество рассчитываемых гармоник. На рис.1.11 показаны амплитуды 1-й, 3-й, 5-й и 7-й гармоник прямоугольного симметричного периодического сигнала с частотой 1 кГц, полученные с помощью EWB. Форма отображения может быть и иной, например в виде линейного графа (line graph), если в соответствующей позиции окна настройки установлен флажок. Точное измерение амплитуды гармоник осуществляется с помощью двух перемещаемых вертикальных визиров, активизируемых пунктом (Toggle Cursors) меню окна Analysis graphs.

Параметрический анализ (**Parameter Sweep**) удобен для построения различных зависимостей, например, передаточных характеристик. В меню настройки (рис.1.12) выбирается компонент и варьируемый параметр (пункты Component и Parameter). Устанавливается диапазон изменения выбранного параметра (Start value и End value), приращение (Increment step size) для выбранного диапазона, способ изменения параметра (линейный, через декаду или октаву), а также номер узла, где анализируется напряжение. Дополнительно указывается для какого из основных видов анализа (по постоянному току, переменному току или для переходных процессов) будет выполняться параметрический анализ.

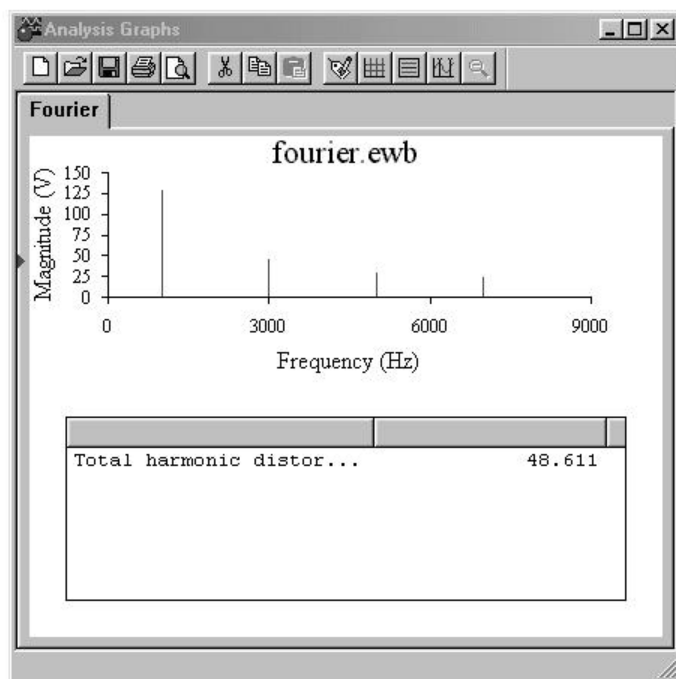


Рис.1.11. Результат спектрального анализа

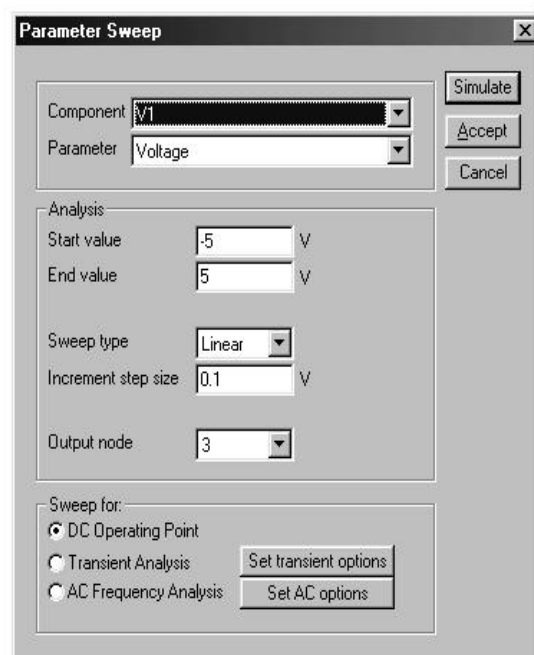


Рис.1.12. Окно настройки для параметрического анализа

Результаты параметрического анализа отображаются в окне Analysis Graphs. Для получения точных значений величин предназначены два вертикальных визира. На рис. 1.13 приведены результаты параметрического анализа для схемы инвертирующего усилителя. Изменяемым параметром является входное постоянное напряжение. Зависимость выходного напряжения от входного представлена в виде графика.

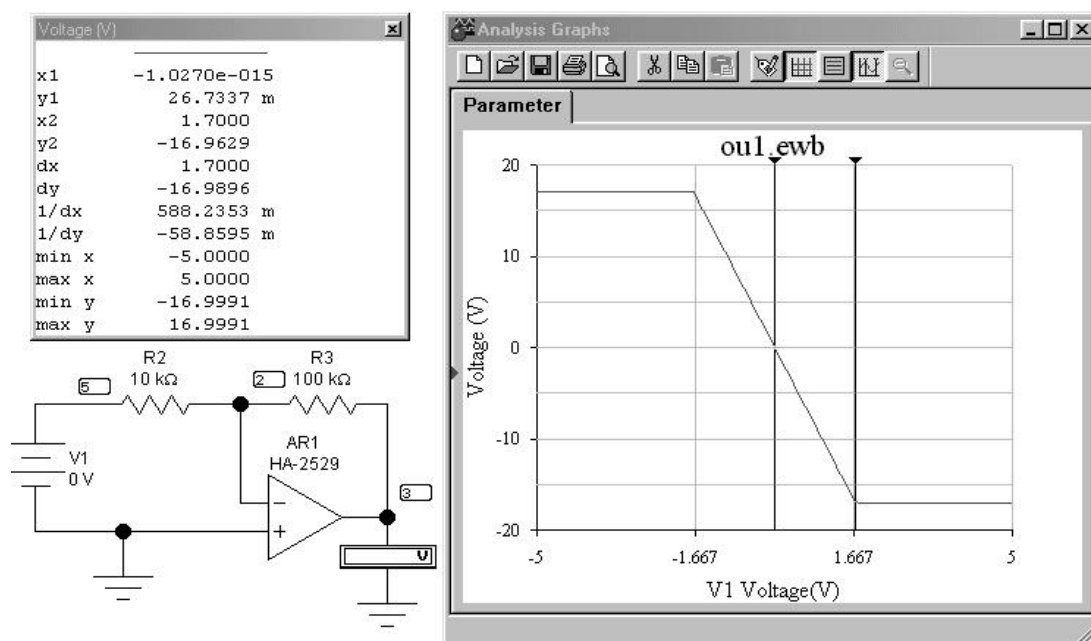


Рис.1.13. Результаты параметрического анализа

2. ЗАДАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

2.1. Исследование полупроводниковых диодов

2.1.1. Цель работы

Исследование и построение вольтамперных характеристик полупроводниковых диодов.

2.1.2. Краткие теоретические сведения

Полупроводниковый элемент с односторонней проводимостью – это самое краткое определение для диода. Подобное определение характеризует идеальный диод, вольт-амперная характеристика (ВАХ) которого (рис. 2.1) также является идеальной. В этом случае для прямого тока диод представляет собой замкнутый ключ, а для обратного – разомкнутый. Промежуточное значение между идеальной и реальной характеристиками занимает идеализированная характеристика полупроводникового диода (рис.2.1). При этом для прямого тока диод представляет собой небольшое сопротивление $R_{пр.}$, а для обратного – большое сопротивление $R_{обр.}$. Отношение этих сопротивлений $R_{обр.}/R_{пр.}$ лежит в диапазоне $10^3 \dots 10^5$ [2].

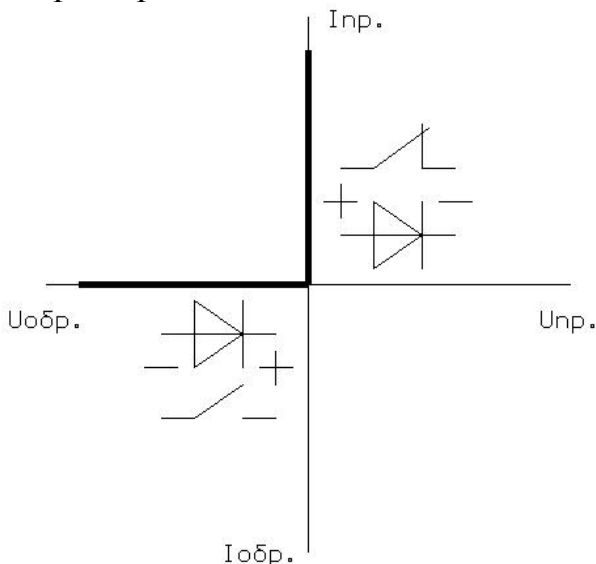


Рис.2.1. ВАХ идеального диода

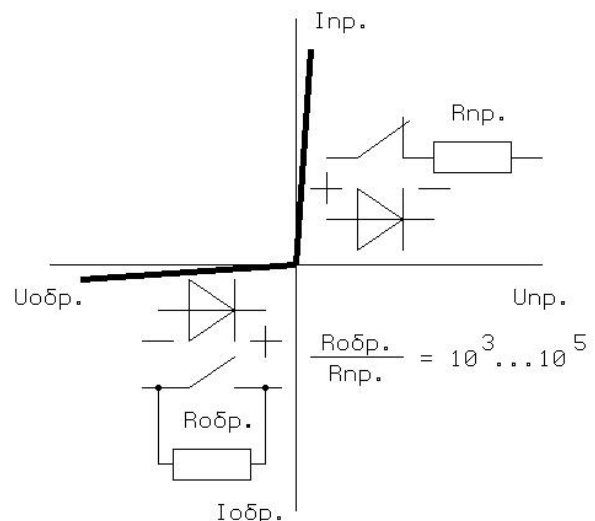


Рис.2.2. ВАХ идеализированного диода

Вольтамперная характеристика идеального р-п-перехода описывается выражением [3]

$$I = I_0 e^{(U_d / \varphi_T)} - 1,$$

где U_d – напряжение на р-п-переходе; $\phi_T = kT/q$ – тепловой потенциал, равный контактной разности потенциалов на границе р-п-перехода при отсутствии внешнего напряжения (при $T=300K$) $\phi_T = 0,025V$; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – заряд электрона.

В приведенном выражении применительно к реальному диоду не учитываются токи утечки, наличие примесей в полупроводниках, конечные размеры р-п-перехода, лавинные процессы для обратного смещения и др. ВАХ диода, близкая к реальной, показана на рис.2.3. Меньшее значение прямого падения напряжения характерно для германиевых диодов, большее – для кремниевых. На обратной ветви ВАХ изображен участок обратимого электрического пробоя.

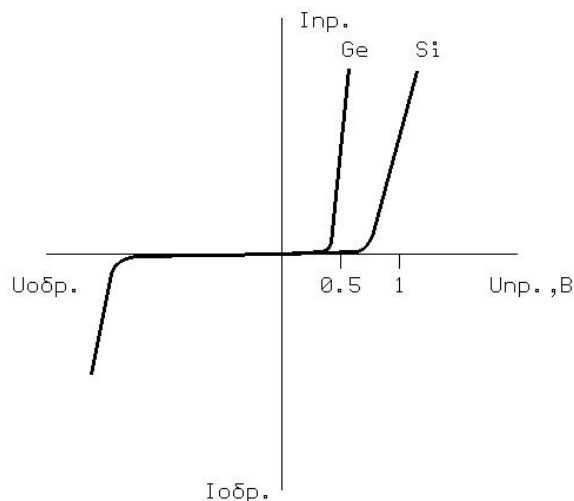


Рис.2.3. ВАХ диода, близкая к реальной

Если возрастающий обратный ток при росте обратного напряжения ничем не ограничить, то тепло, выделяемое вследствие роста мощности ($P=U_{обр} \cdot I_{обр.}$), приводит к росту температуры. Рост температуры увеличивает обратный ток и еще больше повышает температуру р-п-перехода. Вследствие перегрева р-п-переход разрушается.

В справочной литературе обычно не приводятся ВАХ диодов вследствие их низкой воспроизводимости даже для элементов одной партии. Поэтому в качестве основных параметров чаще всего даются усредненные значения следующих величин:

- $I_{пр.}$ - прямой ток;
- $U_{пр.}$ - прямое падение напряжения;
- $I_{обр.}$ - обратный ток;
- $U_{обр.}$ - максимальное обратное напряжение.

Значения указанных величин характерны для низких частот (обычно до 50Гц, если не оговорена иная частота). Для более высоких частот необходимо учитывать собственные емкости диода, различные для прямого и обратного смещения и зависящие от величины приложенного напряжения.

Прямую ветвь статической ВАХ можно построить по результатам эксперимента, реализуемого в схеме, изображенной на рис.2.4. При исследовании реального диода последовательно с ним в схему включается резистор, ограничивающий ток на уровне $I_{пр.}$ при максимальном значении входного напряжения.

Для эксперимента с моделью диода сопротивление переменного резистора выбирается в диапазоне 100 – 500 Ом. Инкремент (шаг изменения сопротивления выбрать равным 1%), клавишу клавиатуры для изменения сопротивления назначить по собственному желанию. Максимальному значению (100%) соответствует нижнее положение подвижного контакта резистора, то есть напряжение на диоде в этом случае равно нулю. Уменьшение сопротивления в % ведет к росту напряжения, подаваемого на диод. Общее количество точек для диапазона изменения сопротивления от 100% до 5-3% выбрать равным 15-20 таким образом, чтобы на участке перегиба характеристики их было больше, чем на начальном и конечном участках. Для построения характеристики и оформления результатов можно воспользоваться, например, средствами Microsoft Excel.

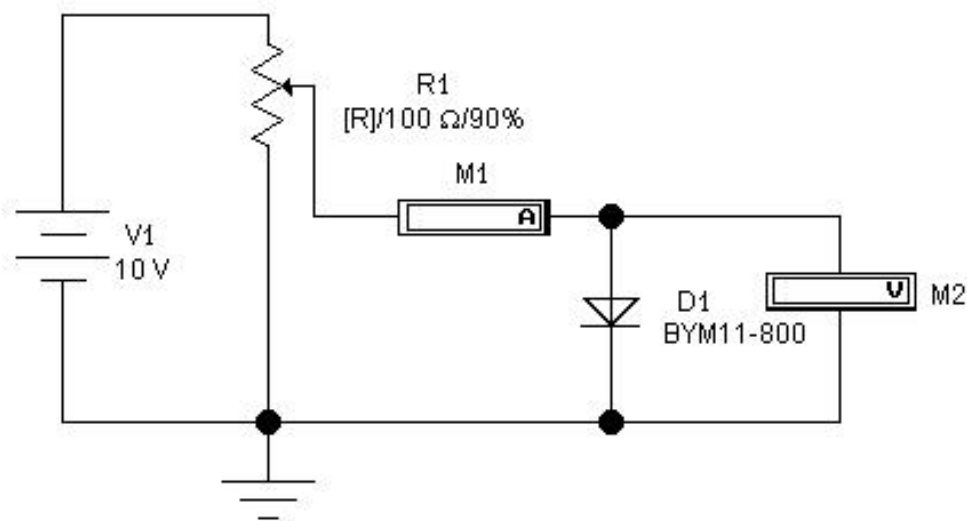


Рис.2.4. Схема для прямой ветви ВАХ полупроводникового диода

Для получения обратной ветви ВАХ используется схема, приведенная на рис.2.5. Напряжение источника питания в этом случае выбирается больше, чем $U_{обр.}$ диода. В этом случае на характеристике можно получить участок обратимого электрического пробоя. Величина сопротивления переменного резистора выбирается в диапазоне 100 – 500кОм. Количество точек выбирается произвольно таким образом, чтобы участок начала электрического пробоя (резкое возрастание обратного тока) был воспроизведен большим количеством точек. Значения токов и напряжений для обратной ветви ВАХ необходимо записывать со знаком минус.

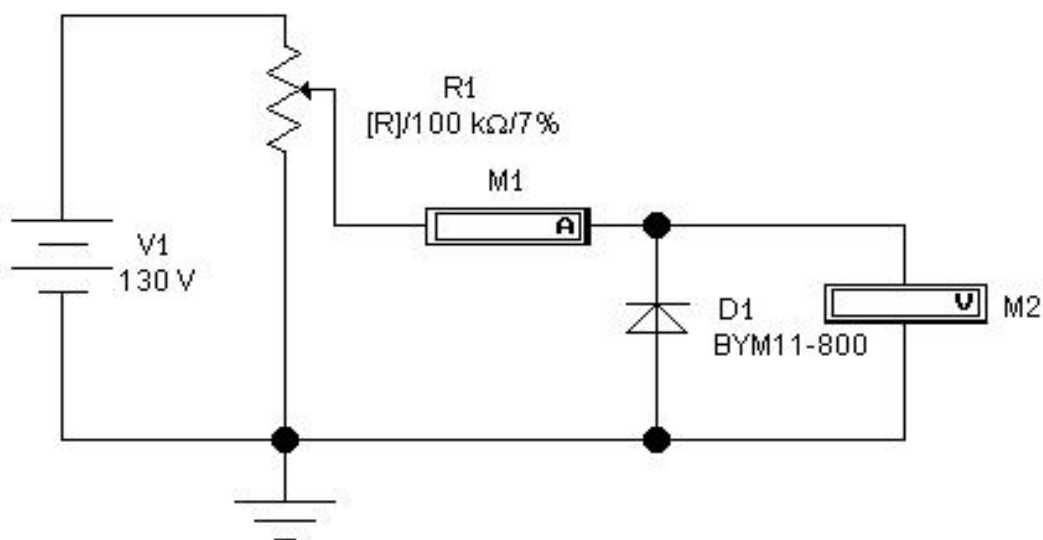


Рис.2.5. Схема для обратной ветви ВАХ полупроводникового диода

Так как измерительные приборы EWB автоматически изменяют диапазон измерения, необходимо внимательно следить за их показаниями и не путать мили- и микроамперы, мили- и микровольты.

2.1.3. Порядок выполнения работы

Используя программу моделирования «Electronics Workbench», соберите схему для исследования прямой ветви ВАХ полупроводникового диода в соответствии с рис.2.4. Полупроводниковый диод выберите из библиотеки по указанию преподавателя (General, Motorola, National, ...). Номер исследуемого диода в библиотеке должен соответствовать порядковому номеру студента в группе.

Руководствуясь указаниями по снятию прямой ветви ВАХ диода, занесите полученные данные в таблицу и постройте график прямой ветви вольт-амперной характеристики.

Определите статическое сопротивление диода $R_{ст.}$ как отношение $U_{пр.}/I_{пр.}$ в области рабочей точки. В качестве рабочей точки выбрать любую их точек в диапазоне $U_{пр.} = 0.8 - 1В$.

Для выбранной рабочей точки, не изменяя сопротивления резистора, включите последовательно с источником постоянного напряжения источник переменного напряжения с амплитудой сигнала 1В, частотой 50Гц. Амперметр и вольтметр переключите на измерение переменной составляющей сигнала (АС). Активизируйте схему и определите динамическое сопротивление диода $r_{дин.}$ в области рабочей точки, как отношение показаний вольтметра и амперметра. Так как $r_{дин.} = du/di \approx \Delta U/\Delta I$, то выполненные измерения при ма-

лых значениях амплитуды переменной составляющей входного сигнала достаточно корректны.

Сравните значения статического и динамического сопротивления, объясните результат.

Установите частоту источника переменного напряжения равной 500кГц. Снимите показания приборов и рассчитайте $r_{\text{дин.}}$. Увеличьте частоту до 5МГц и еще раз определите $r_{\text{дин.}}$. Объясните полученные результаты.

Трансформируйте схему к виду (рис.2.5) для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики.

Руководствуясь указаниями по снятию обратной ветви ВАХ диода, занесите полученные данные в таблицу и постройте график обратной ветви вольтамперной характеристики.

Определите обратное статическое сопротивление диода на участке характеристики, далеко от зоны электрического пробоя, как отношение $R_{\text{обр.}} = U_{\text{обр.}}/I_{\text{обр.}}$.

Рассчитайте соотношение между обратным и прямым статическими сопротивлениями.

2.1.4. Содержание отчета

Титульный лист. Схемы для исследования ВАХ. Таблицы экспериментальных данных. Графики прямой и обратной ветвей ВАХ. Расчетные формулы и примеры расчетов. Выводы по каждому пункту работы.

2.1.5. Контрольные вопросы

1. В каких случаях можно использовать модель идеального полупроводникового диода?
2. В каких случаях можно использовать модель идеализированного полупроводникового диода?
3. К чему приведет параллельное соединение диодов относительно прямой ветви ВАХ?
4. К чему приведет последовательное соединение диодов относительно обратной ветви ВАХ?
5. Может ли динамическое сопротивление диода быть отрицательным?

2.2. Исследование полупроводниковых выпрямителей

2.2.1. Цель работы

Знакомство со схемами выпрямителей и исследование их характеристик.

2.2.2. Краткие теоретические сведения

Выпрямители являются наиболее распространенными среди электронных устройств. Они присутствуют и в маломощных источниках питания и в мощных силовых энергетических установках. Определение выпрямителя как преобразователя переменного напряжения в постоянное, не является совсем точным. Оно может быть принято как базовое в том смысле, что знак напряжения на нагрузке не изменяется, в то время как его амплитуда не остается постоянной.

С точки зрения классификации относительно количества фаз входного напряжения выпрямители могут быть разделены на однофазные и многофазные.

По разновидности схем среди однофазных выпрямителей могут быть выделены: однополупериодный, двухполупериодный со средней точкой и мостовой выпрямители. Среди многофазных наиболее часто встречающимися являются нулевые и мостовые выпрямители.

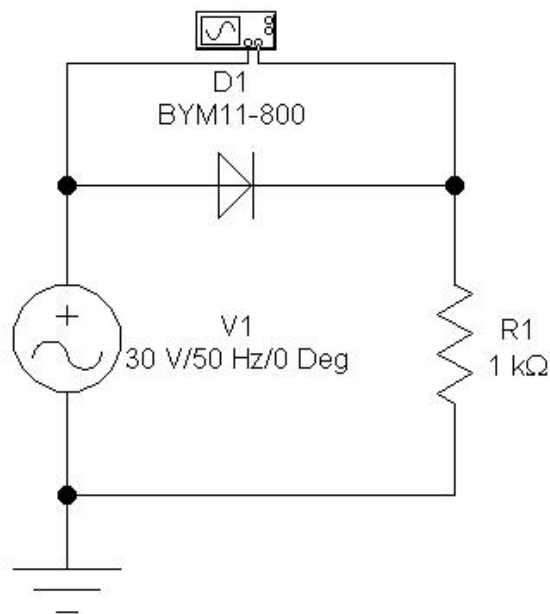


Рис.2.6. Однополупериодный выпрямитель

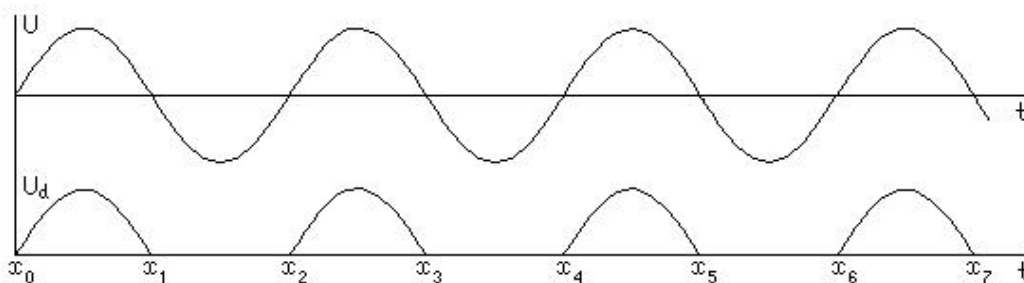


Рис. 2.7. Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя

По возможности регулирования выходного напряжения выпрямители разделяются на управляемые и неуправляемые.

Далее рассматриваются схемы и характеристики только для неуправляемых выпрямителей.

Схемы выпрямителей даны в конфигурации, применимой для моделирования в EWB. Осциллограф, включенный в схемы, позволяет оценить форму и амплитуду выходного напряжения выпрямителя.

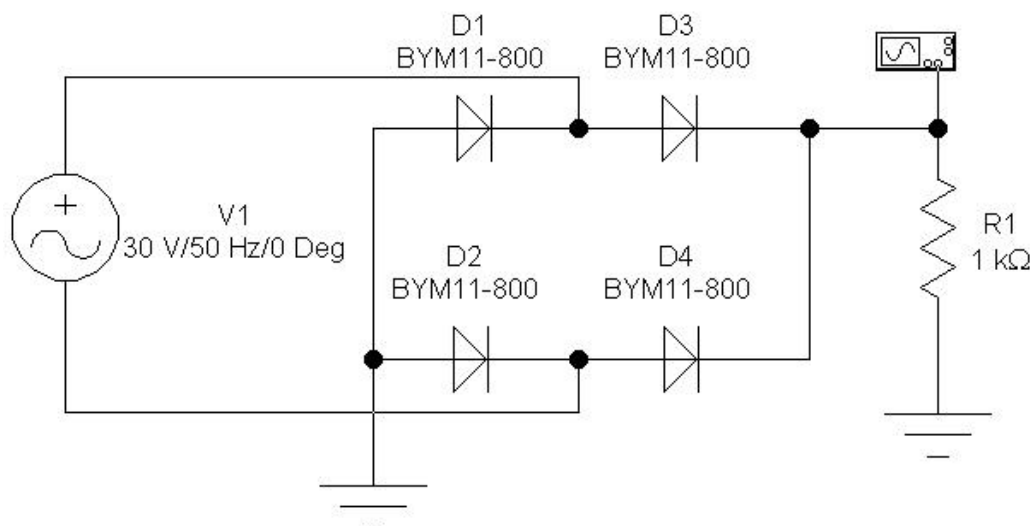


Рис.2.8. Однофазный мостовой выпрямитель

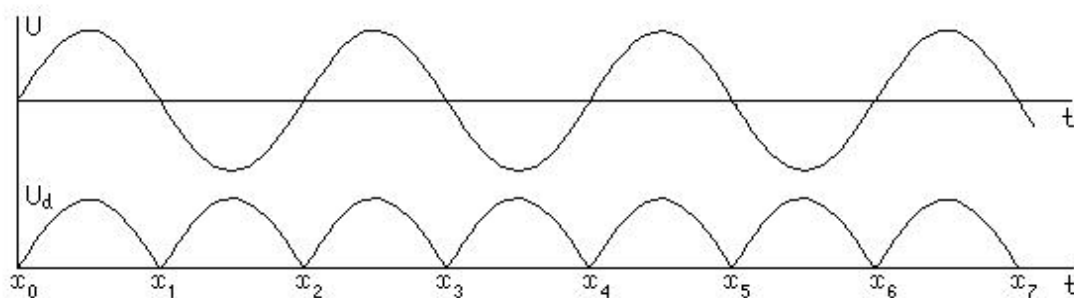


Рис.2.9. Временные диаграммы однофазного мостового выпрямителя

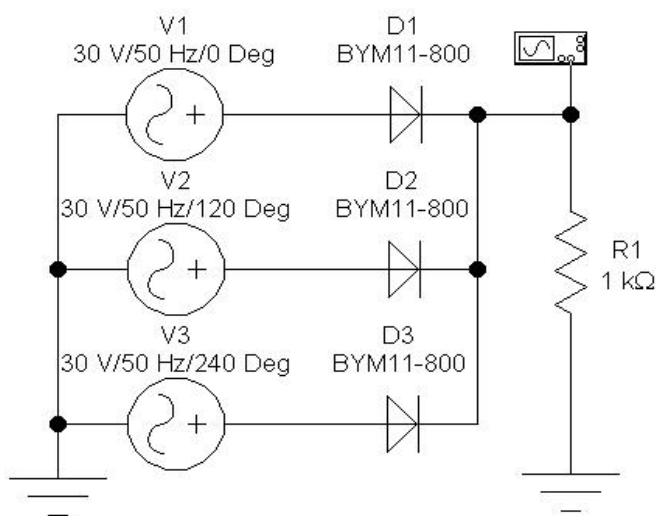


Рис.2.10. Трехфазный нулевой выпрямитель

Напряжение U – входное напряжение выпрямителя (напряжение сети или напряжение на выходе понижающего трансформатора). Напряжение U_d – среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке. Точки $x_0, x_1, x_2, \dots$, нанесенные на графики, называются точками естественной коммутации (переключения). В этих точках меняется условие проводимости для диода (групп диодов).

Для схем трехфазных выпрямителей модель трехфазной сети реализована с помощью трех источников переменного напряжения, для каждого из которых задан требуемый фазовый сдвиг.

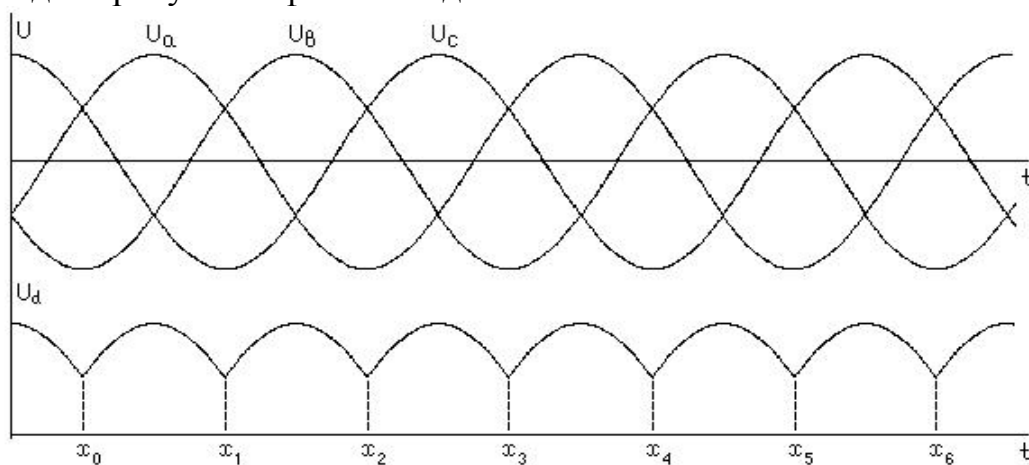


Рис.2.11. Временные диаграммы трехфазного нулевого выпрямителя

В мостовых схемах одновременно проводят ток два диода: один в анодной, второй в катодной группе. В трехфазной нулевой схеме одновременно проводит ток только один диод.

Форма U_d для различных схем выпрямителей различна и представляет собой: для однополупериодного – один чередующийся положительный полупериод сети; для однофазного мостового – два положительных полупериода; для трехфазного нулевого – огибающую фазных напряжений, а для трехфазного мостового – разность фазных напряжений на интервалах проводимости.

Для схемы однофазного мостового выпрямителя и схем многофазных выпрямителей величина U_d может быть рассчитана через коэффициент схемы:

$$U_d = kU,$$

где

$$k = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}.$$

Величина параметра m зависит от схемы выпрямителя и равна числу пульсаций выпрямленного напряжения на периоде сети, то есть для однофазной мостовой схемы $m=2$, трехфазной нулевой $m=3$, трехфазной мостовой $m=6$.

Дополнительно при расчете значения U_d следует учитывать тот факт, что схемы однофазного мостового и трехфазного нулевого выпрямителей преобразуют фазное напряжение, а схема трехфазного мостового – линейное.

Если выпрямители используются в маломощных источниках питания, то для сглаживания пульсаций на выходе выпрямителя устанавливается емкостной фильтр. Амплитуда пульсаций выпрямленного напряжения зависит как от

величины тока нагрузки, так и от величины емкости сглаживающего конденсатора.

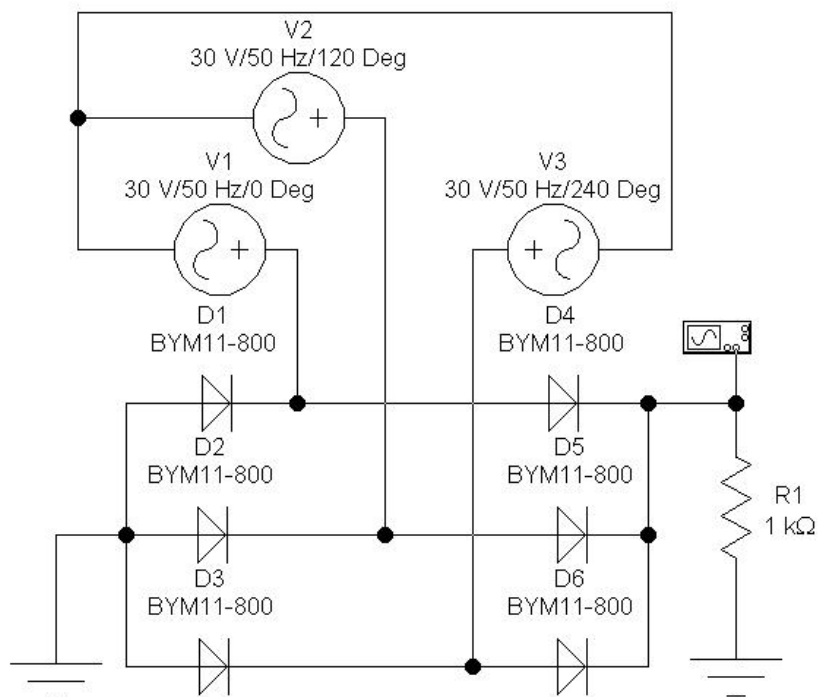


Рис.2.12. Трехфазный мостовой выпрямитель

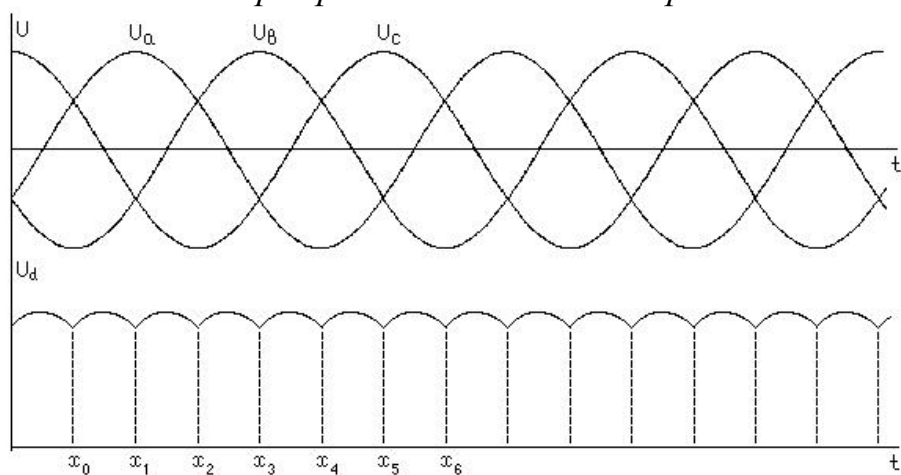


Рис.2.13. Временные диаграммы трехфазного мостового выпрямителя

2.2.3. Порядок выполнения работы

Используя программу моделирования «Electronics Workbench», соберите схему выпрямителя, руководствуясь указаниями преподавателя. Используйте те же диоды, что и в предыдущей лабораторной работе.

Выберите рабочее напряжение источников переменного напряжения в соответствии с порядковым номером в списке группы.

Для трехфазных выпрямителей установите фазовые сдвиги напряжений у источников для имитации трехфазной сети.

Рассчитайте коэффициент схемы выпрямителя и величину напряжения U_d .

Измерьте вольтметром в режиме DC напряжение на выходе схемы выпрямителя при отключенной нагрузке.

Сравните расчетное значение U_d с измеренным.

С помощью осциллографа и графопостроителя оцените форму и амплитуду входного и выходного напряжения выпрямителя. Для удобства считывания временных меток окно графопостроителя растяните по горизонтали или разверните в полный экран.

Таблица 2.1

Варианты для выбора напряжений источников

№	1	2	3	4	5	6	7	8
U, В	7	9	11	13	15	17	19	21
№	9	10	11	12	13	14	15	16
U, В	23	25	27	29	31	33	35	37
№	17	18	19	20	21	22	23	24
U, В	39	41	43	45	47	49	51	53
№	25	26	27	28	29	30	31	32
U, В	55	57	59	61	63	65	67	69

Временные диаграммы зарисуйте или скопируйте окно графопостроителя в буфер обмена с целью его помещения, например, в документ Word.

Измерьте амплитуду пульсаций и их период с помощью осциллографа или графопостроителя.

Подключите параллельно нагрузке конденсатор и для разных значений сопротивления нагрузки и емкости конденсатора получите временные диаграммы и поместите их в таблицу, пример которой показан после контрольных вопросов к лабораторной работе. Изменяя масштаб вертикальной развертки осциллографа в режиме измерения переменной составляющей сигнала (AC), измерьте амплитуду пульсаций в каждом опыте и занесите данные в таблицу.

2.2.4. Содержание отчета

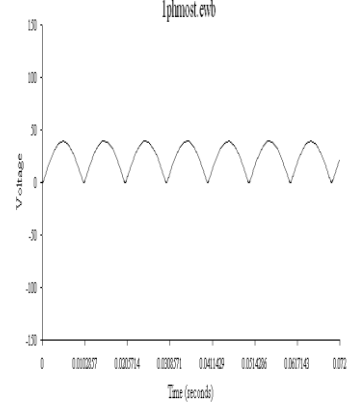
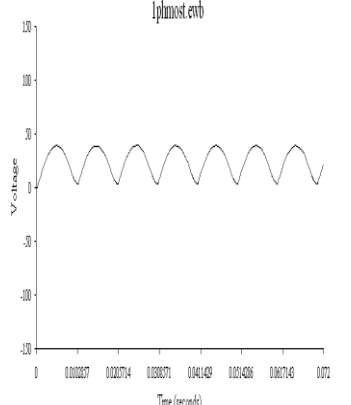
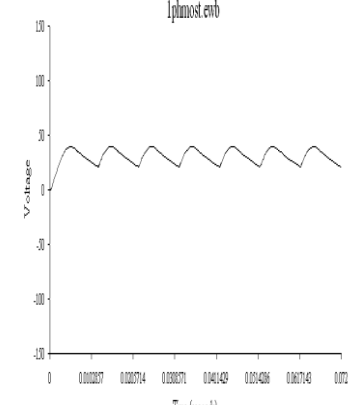
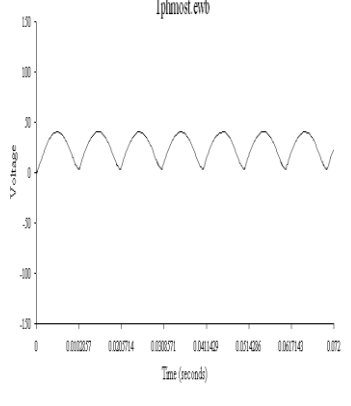
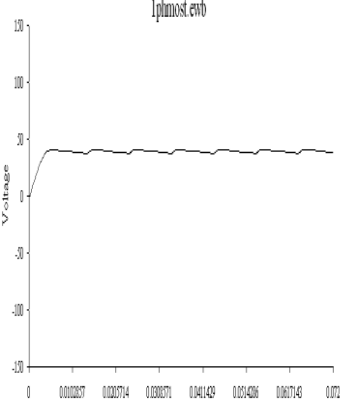
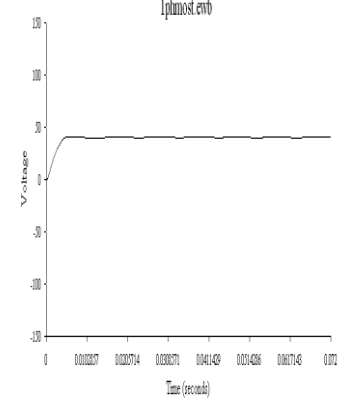
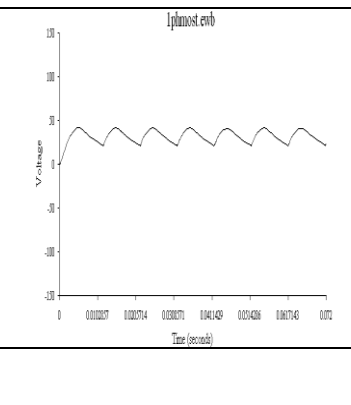
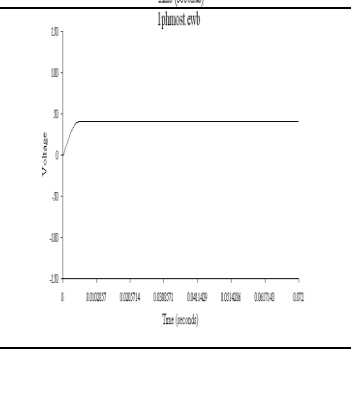
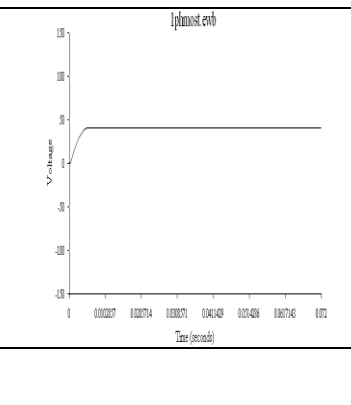
Титульный лист. Схема исследуемого выпрямителя. Временные диаграммы напряжения на выходе выпрямителя. Результаты измерений. Таблица временных диаграмм. Расчетные формулы и примеры расчетов. Выводы по каждому пункту работы.

2.2.5. Контрольные вопросы

- 1. Сколько диодов одновременно проводят ток в трехфазной нулевой схеме выпрямителя?
- 2. Какой из выпрямителей имеет максимальный коэффициент схемы?
- 3. Можно ли в схеме однофазного мостового выпрямителя при непосредственном включении в сеть ~220В использовать диоды с $U_{обр.} = 220В$?
- 4. Что произойдет со схемой трехфазного мостового выпрямителя, если один из диодов выйдет из строя (неисправность типа обрыв)?

Таблица 2.2

Пример таблицы с временными диаграммами

	C = 1мкФ	C = 100мкФ	C = 1000мкФ
R=10 Ом			
R=1 кОм			
R=10 кОм			

2.3. Исследование параметрического стабилизатора напряжения

2.3.1. Цель работы

Знакомство со схемами параметрических стабилизаторов напряжения и исследование их характеристик.

2.3.2. Краткие теоретические сведения

Основным элементом параметрического стабилизатора (рис.2.14) является стабилитрон. Стабилитрон представляет собой специальный диод, работающий на обратной ветви вольтамперной характеристики в области обратного электрического пробоя.

Основными параметрами стабилитрона являются:

$U_{ст}$ - напряжение стабилизации (при заданном токе стабилизации);

$I_{ст.мин}$ - минимально допустимый ток стабилизации;

$I_{ст.макс}$ - максимально допустимый ток стабилизации;

$r_{ст}$ - дифференциальное сопротивление на участке пробоя ($r_{ст} = du/di$).

Величины напряжений и токов указываются положительными.

При токе стабилизации меньше $I_{ст.мин}$ уменьшается коэффициент стабилизации, так как возрастает динамическое сопротивление стабилитрона, а при токе стабилизации больше чем $I_{ст.макс}$ происходит перегрев p-n – перехода, что приводит к невозстановимому тепловому пробую, то есть к выходу из строя.

Величина нестабилизированного напряжения $V1$ как правило существенно больше напряжения стабилизации. Величина сопротивления нагрузки R_H обычно многократно больше динамического сопротивления стабилитрона $r_{ст}$. В этих условиях установка рабочей точки стабилитрона в схеме осуществляется с помощью резистора $R_{огр}$, сопротивление которого может быть рассчитано по приближенной формуле, где не учитывается $r_{ст}$.

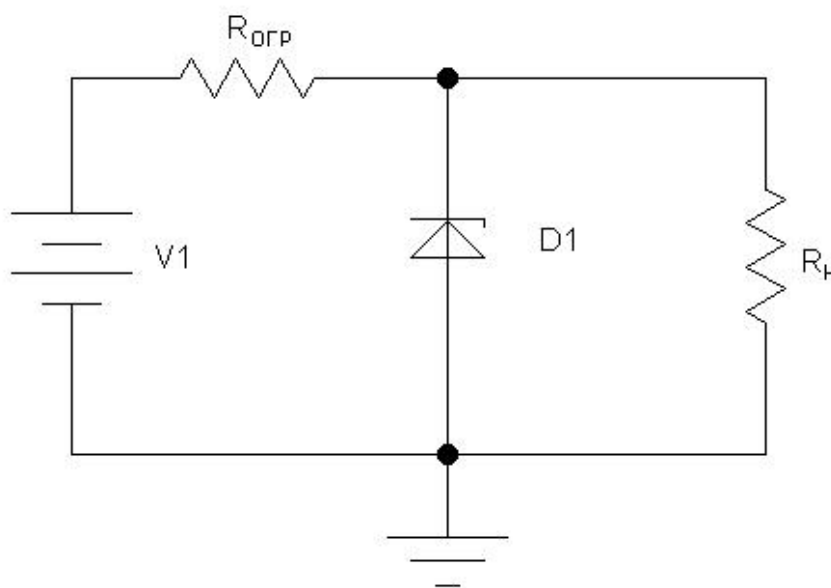


Рис.2.14. Схема параметрического стабилизатора

$$R_{огр} = \frac{E - U_{ст}}{I_{ст}},$$

где E – величина нестабилизированного напряжения; $U_{ст}$ и $I_{ст}$ – паспортные данные напряжения и тока стабилизации для выбранного стабилитрона.

2.3.3. Порядок выполнения работы

Используя программу моделирования «Electronics Workbench», соберите схему параметрического стабилизатора.

Стабилитрон выберите из библиотеки по указанию преподавателя (General, Motorola, National, Philips...). Номер стабилитрона в библиотеке должен соответствовать порядковому номеру студента в группе.

Величину напряжения E источника питания $V1$ выберите равной $1,8 \div 2,2 U_{ст}$.

Рассчитайте и установите величину $R_{огр}$. Используйте при расчетах паспортные данные стабилитрона. Для чтения паспортных данных выполнить двойной щелчок левой кнопкой мыши по стабилитрону. В открывшемся окне выбрать кнопку **Edit**. После ее активизации считать данные Zener test voltage (напряжение стабилизации) и Zener test current (ток стабилизации)

Величину R_n выберите равной $8 \div 12 R_{огр}$.

Установите в схему параметрического стабилизатора измерительные приборы для измерения тока, протекающего через стабилитрон, тока и напряжения нагрузки (рис.2.15).

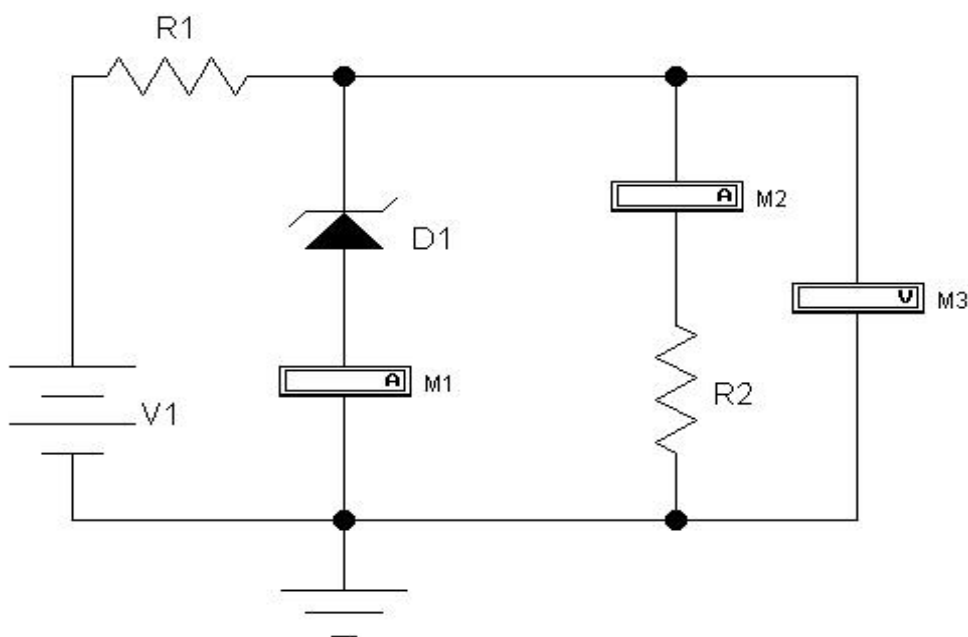


Рис.2.15. Схема для исследования параметрического стабилизатора

Изменяя величину сопротивления нагрузки в сторону уменьшения с произвольным шагом до минимально возможного значения, снимите зависимость напряжения на нагрузке от тока нагрузки $U_H=f(I_H)$. Уменьшите шаг изменения сопротивления на нелинейном участке характеристики. Полученные данные занесите в таблицу, постройте график зависимости $U_H=f(I_H)$.

Проведите параметрический анализ в схеме, осуществив предварительно визуализацию узлов с помощью меню Schematic Options и установив режим параметрического анализа по постоянному току. Изменяемой величиной при анализе должно быть сопротивление нагрузки. Для анализируемой величины напряжения нагрузки должен быть указан соответствующий ей узел схемы. Полученный на графоанализаторе результат подготовьте для документирования и включения в отчет.

Включите встречно-последовательно со стабилитроном полупроводниковый диод. Повторите параметрический анализ. Сравните результаты с предыдущими. Подготовьте данные для документирования и включения в отчет.

Для определения динамического сопротивления стабилитрона включите последовательно с источником постоянного напряжения источник переменного напряжения ($U = 1\text{В}$, $f = 50\text{Гц}$). Измерительные приборы переключите в режим измерения переменного тока. При малых значениях отклонений величин выражение $r_{ст} = du/di$ может быть заменено выражением $r_{ст} = \Delta u/\Delta i$. Поэтому отношение показаний вольтметра и амперметра, измеряющего ток стабилизации, можно считать равным динамическому сопротивлению стабилитрона. Рассчитайте величину $r_{ст}$.

Коэффициент стабилизации $k_{ст}$ определяется как отношение $(\Delta E/E)/(\Delta U/U)$. За величину E можно принять напряжение источника $V1$, а за величину ΔE - напряжение источника переменного напряжения, включенного последовательно с ним. Величина ΔU – показание вольтметра по переменному току, а U – по постоянному. Для удобства измерения можно включить в схему два вольтметра, работающие в разных режимах. Рассчитайте величину коэффициента стабилизации.

2.3.4. Содержание отчета

Титульный лист. Схема параметрического стабилизатора с подключенными измерительными приборами. Результаты измерений в виде таблиц и графических зависимостей. Расчетные формулы и примеры расчетов требуемых параметров и коэффициентов. Выводы по каждому пункту работы.

2.3.5. Контрольные вопросы

1. К чему приведет последовательное включение стабилитронов?
2. В каком случае обеспечивается оптимальный режим работы стабилитрона?
3. Зависит ли коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора от тока нагрузки?
4. Какое условие должно выполняться при каскадном включении стабилитронов?

2.4. Исследование транзисторных ключей

2.4.1. Цель работы

Ознакомление с основными схемами транзисторных ключей, расчет параметров ключевых схем, исследование статических и динамических свойств.

2.4.2. Краткие теоретические сведения

Транзисторный ключ является базовым элементом всех цифровых устройств. В области силовой электроники и преобразовательной техники также очень широко используются устройства с мощными транзисторными ключами.

Знание основных характеристик ключевых транзисторных схем крайне необходимо при разработке силовых импульсных устройств.

Транзисторные ключи выполняются как на биполярных, так и на полевых транзисторах различного типа. В мощных преобразовательных устройствах широко применяются IGBT-ключи, представляющие собой (в упрощенной трактовке) симбиоз полевого и биполярного транзистора.

Простейший транзисторный ключ на биполярном транзисторе с резистивной нагрузкой в цепи коллектора показан на рис. 2.16. Обычно для ключа рассматриваются два режима: статический (установившийся) и динамический (включение и выключение) [4].

До момента времени t_1 р-п-переход база-эмиттер смещен в обратном направлении, транзистор находится в режиме отсечки (закрит). Обратными токами р-п-переходов можно пренебречь и считать все токи равными нулю. Падение напряжения на резисторе в цепи базы = 0. $U_{бэ} = -U_{вх}$. $U_{кэ} = U_{вых} = E$. В интервале времени $t_1 \dots t_2$ транзистор открыт. Для минимизации напряжения $U_{кэ}$ величина $U_{вх}$ должна быть такой, чтобы транзистор находился в режиме насыщения или режиме, близком к режиму насыщения.

Токи в транзисторе в этом случае определяются следующим образом:

$$I_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{v}x} - U_{\bar{b}\bar{z}}}{R_{\bar{o}}} \approx \frac{U_{\bar{v}x}}{R_{\bar{o}}}, \quad I_{\kappa} = \frac{E - U_{\kappa\bar{z}}}{R_{\kappa}} \approx \frac{E}{R_{\kappa}}.$$

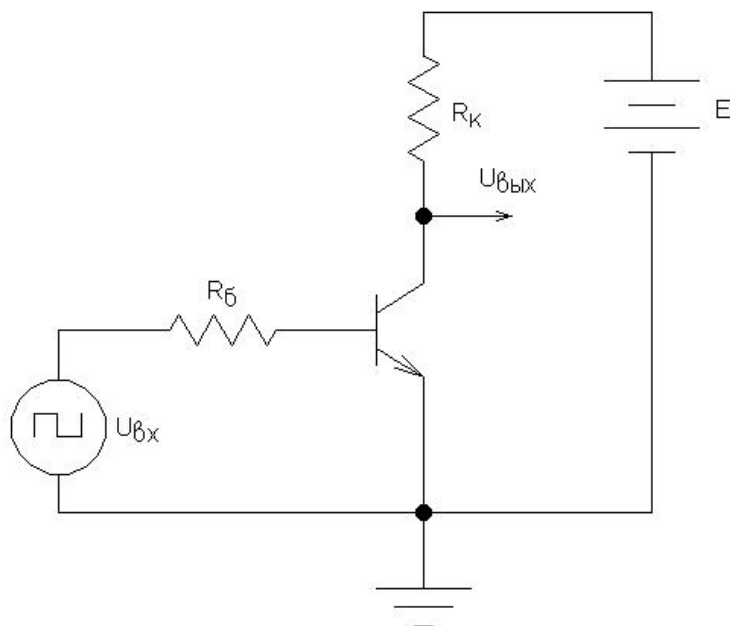


Рис.2.16. Схема ключа на биполярном транзисторе

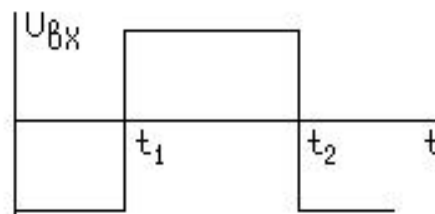


Рис.2.17. Диаграмма входного напряжения транзисторного ключа

Для режима насыщения $I_{\kappa.нас} \approx \frac{E}{R_{\kappa}}$. Падение напряжения $U_{\kappa\bar{z}}_{нас}$ для различных типов транзисторов различно и лежит в диапазоне 0.08 – 1В.

Для численной оценки степени насыщения транзистора используется коэффициент насыщения $q_{нас}$, показывающий, во сколько раз ток базы превосходит минимальное значение, необходимое для обеспечения режима насыщения.

Значение минимального тока базы для режима насыщения определяется как

$$I_{\bar{o}.нас.мин} \approx \frac{I_{\kappa.нас}}{\beta_{ст}} = \frac{E}{R_{\kappa}\beta_{ст}},$$

а величина коэффициента насыщения

$$q_{нас} = \frac{I_{\bar{o}}}{I_{\bar{o}.нас.мин}} = \frac{U_{\bar{v}x}/R_{\bar{o}}}{E/R_{\kappa}\beta_{ст}}$$

В практических приложениях обычно известны: сопротивление нагрузки (R_{κ}), напряжение источника питания (E), статический коэффициент усиления ($\beta_{ст}$) для выбранного типа транзистора. Входное управляющее напряжение

также чаще всего известно. Поэтому для обеспечения ключевого режима работы транзистора требуется рассчитать величину сопротивления в цепи базы R_b на основании имеющихся данных и выбранного коэффициента насыщения.

$$R_b = \frac{U_{вх} R_k \beta_{ст}}{q_{нас} E}$$

При выборе значения коэффициента насыщения руководствуются следующими соображениями [4]:

- Режим насыщения должен обеспечиваться для всех экземпляров выбранного типа транзисторов. Поэтому, если величина $\beta_{ст}$ задана диапазоном значений, то выбирается минимальное значение из диапазона.
- Увеличение тока базы в режиме насыщения уменьшает падение напряжения между эмиттером и коллектором, что уменьшает рассеиваемую мощность выходной цепи транзистора, но это уменьшение прекращается при $q_{нас} \approx 3$.
- Чрезмерное увеличение тока базы ведет к неоправданному увеличению рассеиваемой мощности во входной цепи транзистора.

Кроме перечисленных моментов, относящихся к установившемуся режиму работы, необходимо учитывать влияние тока базы на длительность переходных процессов. При больших токах базы транзистор быстро входит в насыщение (включается), но длительность выключения при этом возрастает.

На практике величина $q_{нас}$ чаще всего не превышает 5, а рекомендуется выбирать равной 1,5 ... 3.

Более подробную информацию о переходных режимах включения и вы-

ключения транзисторного ключа на биполярном транзисторе можно найти в [4, с. 302-307] и [3, с. 390-394].

Наиболее распространенными ключами на основе полевых транзисторов являются ключи, где используется полевой транзистор с индуцированным каналом. В этом случае полярности входного и выходного напряжения ключа одинаковы, что упрощает его реализацию.

Пример такого ключа изображен на рис. 2.18.

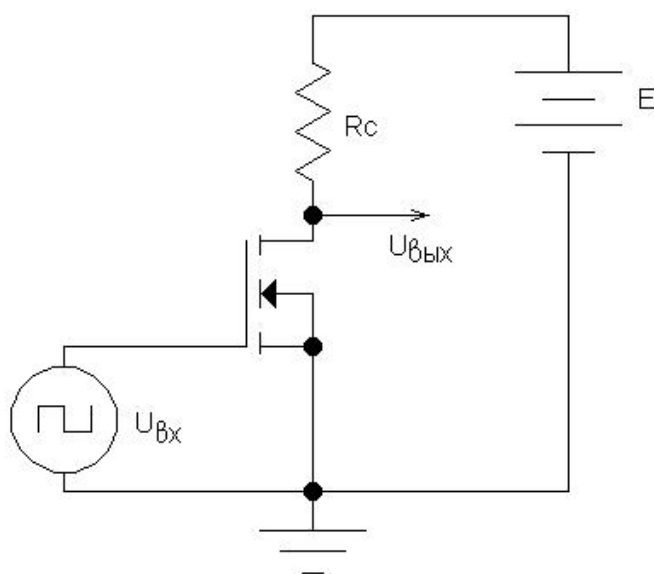


Рис.2.18. Ключ на МДП-транзисторе с индуцированным каналом

При нулевом входном сигнале транзистор закрыт, а выходное напряжение $U_{\text{вых}} = U_{\text{си}} = E$. Если входное напряжение превышает пороговое значение $U_{\text{зи.порог}}$, то транзистор открывается, а выходное напряжение уменьшается. Величина выходного напряжения при открытом ключе зависит от величины сопротивления в цепи стока R_c , величины входного сигнала и стоковых характеристик применяемого транзистора. Время переходных процессов (включения и выключения) определяется сопротивлением R_c , выходной емкостью $C_{\text{и}}$ и собственными частотными свойствами транзистора.

2.4.3. Порядок выполнения работы

Используя программу моделирования «Electronics Workbench», соберите схему ключа на биполярном транзисторе.

Транзистор выберите из библиотеки по указанию преподавателя (General, Motorola, National, Philips...). Номер транзистора в библиотеке должен соответствовать порядковому номеру студента в группе.

В качестве источника входного напряжения выберите источник постоянного напряжения (гальванический элемент).

Величину сопротивления резистора в цепи коллектора, напряжение источника питания E и значение коэффициента насыщения ключа выберите из таблицы в соответствии с номером варианта.

Рассчитайте требуемую величину сопротивления резистора в цепи базы транзистора и установите это значение, считая, что $U_{\text{вх}} = 0.5 E$

Таблица 2.3

Варианты для выбора значений E , R_c и $q_{\text{нас}}$.

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$E, В$	3	4	5	6	9	12	15	20
$R_c, К$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$q_{\text{нас}}$	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
№	9	10	11	12	13	14	15	16
$E, В$	24	27	27	24	20	15	12	9
$R_c, К$	0.9	1	2	3	4	2	1	0.9
$q_{\text{нас}}$	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4
№	17	18	19	20	21	22	23	24
$E, В$	6	5	4	3	3	4	5	6
$R_c, К$	0.2	0.1	0.1	0.07	0.05	0.1	0.2	0.3
$q_{\text{нас}}$	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
№	25	26	27	28	29	30	31	32
$E, В$	9	12	15	20	24	27	30	50
$R_c, К$	0.4	0.5	0.6	0.7	1	2	2.4	5
$q_{\text{нас}}$	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6

Проведите параметрический анализ в схеме, осуществив предварительно визуализацию узлов с помощью меню Schematic Options и установив режим параметрического анализа по постоянному току. Изменяемой величиной при анализе должно быть напряжение $U_{\text{вх}}$. Диапазон изменения для $U_{\text{вх}} = 0 \dots E$. Для анализируемой величины выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ должен быть указан соответствующий ей узел схемы. Полученную на графоанализаторе характеристику переключения подготовьте для документирования и включения в отчет.

Установите $U_{\text{вх}} = 0.5E$ и проведите параметрический анализ. Изменяемой величиной при анализе должно быть сопротивление резистора в цепи базы. Анализируемой величиной является выходное напряжение. Диапазон изменения сопротивления $0.1 \dots 1.5R_{\text{б,расч}}$. Полученную зависимость подготовьте для документирования и включения в отчет.

Определите по характеристике значение сопротивления $R_{\text{б}}$, при котором транзистор попадает в режим насыщения. Сравните полученное значение с расчетным.

Установите на входе схемы генератор импульсов из библиотеки источников. Величину напряжения генератора задайте равной $0.5E$. Подключите осциллограф к выходу генератора и выходу схемы. Частоту генератора подберите таким образом, чтобы время включения и выключения транзистора примерно равнялось половине полупериода импульсов. Полученные осциллограммы подготовьте для документирования и включения в отчет.

Определите с помощью осциллографа или графоанализатора времена включения и выключения транзистора.

Подключите параллельно резистору в цепи базы конденсатор емкостью 1нФ . Получите осциллограммы и подготовьте их для документирования. Изменяя частоту генератора в сторону увеличения, оцените (приблизительно) во сколько раз увеличилось быстродействие транзисторного ключа.

Объясните влияние конденсатора на ускорение процессов коммутации ключа.

Соберите схему ключа на базе полевого транзистора с индуцированным каналом.

Транзистор выберите из библиотеки по указанию преподавателя (Intrntnl, Philips...). Номер транзистора в библиотеке должен соответствовать порядковому номеру студента в группе.

Величину E оставьте без изменения, на вход схемы подключите источник постоянного напряжения, величину сопротивления в цепи стока транзистора увеличьте в 10 раз по сравнению с сопротивлением в цепи коллектора биполярного транзистора.

Выполните параметрический анализ по постоянному току. Изменяемой величиной при анализе должно быть напряжение $U_{вх}$. Диапазон изменения для $U_{вх} = 0 \dots 0.3E$. Для анализируемой величины выходного напряжения $U_{вых}$ должен быть указан соответствующий ей узел схемы. По полученной характеристике переключения определите (приблизительно) $U_{зи.порог}$. Уменьшите диапазон изменения входного напряжения, приблизив его к полученному значению $U_{зи.порог}$, с одновременным уменьшением приращения $U_{вх}$. Выполните указанные действия повторно, если это требуется. Окончательный результат характеристики подготовьте для документирования.

2.4.4. Содержание отчета

Титульный лист. Схемы транзисторных ключей с подключенными измерительными приборами. Результаты измерений в виде таблиц и графических зависимостей. Расчетные формулы и примеры расчетов требуемых параметров и коэффициентов. Осциллограммы динамических режимов работы транзисторных ключей. Выводы по каждому пункту работы.

2.4.5. Контрольные вопросы

1. В чем основное отличие ключевого режима работы транзистора от линейного режима?
2. Как можно увеличить быстродействие ключа на биполярном транзисторе?
3. Что такое коэффициент насыщения биполярного транзистора?
4. Почему время включения биполярного транзистора меньше времени его выключения?
5. В чем основное отличие ключей на основе полевых транзисторов от ключей на биполярных транзисторах?

2.5. Исследование схем на операционных усилителях

2.5.1. Цель работы

Ознакомление с основными схемами на основе операционных усилителей, расчет параметров, исследование свойств и построение характеристик.

2.5.2. Краткие теоретические сведения

Операционный усилитель (ОУ) – унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока [3], реализованный в виде микросхемы или входящий в состав других, более сложных интегральных компонентов.

Основные параметры операционного усилителя:

очень большой собственный коэффициент усиления – до 10^6 ;

высокое входное сопротивление – не менее 10^6 Ом;

низкое выходное сопротивление – не превышает 10^3 Ом;

близкое к нулю дифференциальное входное напряжение;

при $U_{вх}=0$ $U_{вых} \rightarrow 0$;

широкий диапазон усиливаемых частот – превышает 10^8 Гц для некоторых серий микросхем.

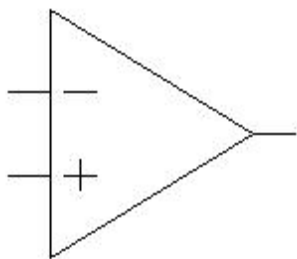


Рис.2.19. Операционный усилитель

Наиболее часто встречающимся условным графическим обозначением ОУ является вариант, приведенный на рис.2.19.

Символом (-) обозначен инвертирующий вход ОУ, а символом (+) – неинвертирующий. Выводы питания, частотной коррекции и балансировки нуля в приведенном обозначении не показаны.

Операционные усилители широко применяются при построении различных аналоговых устройств. Большинство схем с отрицательной обратной связью обеспечивают линейный режим работы ОУ и поэтому используются при построении различных усилителей.

Схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителей на основе ОУ приведены на рис. 2.20 и 2.21 соответственно.

Коэффициенты усиления по напряжению названных схем определяются параметрами резисторов и равны:

для инвертирующего усилителя $k_U = - R_2/R_1$;

для неинвертирующего усилителя $k_U = 1 + R_2/R_1$.

Суммирующий усилитель чаще всего реализуется на основе инвертирующего усилителя. Пример схемы суммирования для двух напряжений приведен на рис. 2.22.

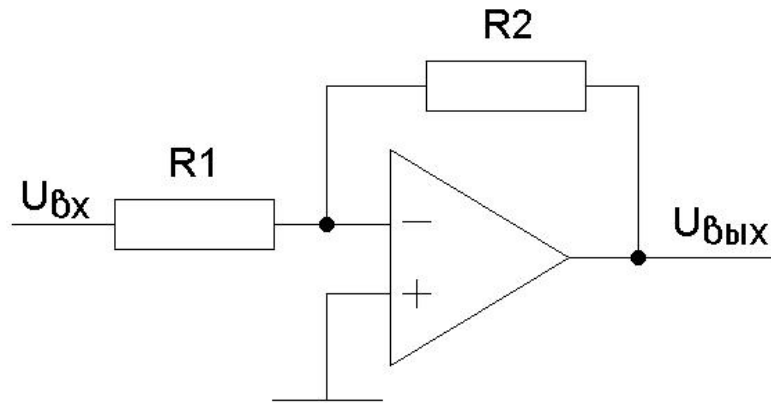


Рис.2.20. Инвертирующий усилитель на основе ОУ

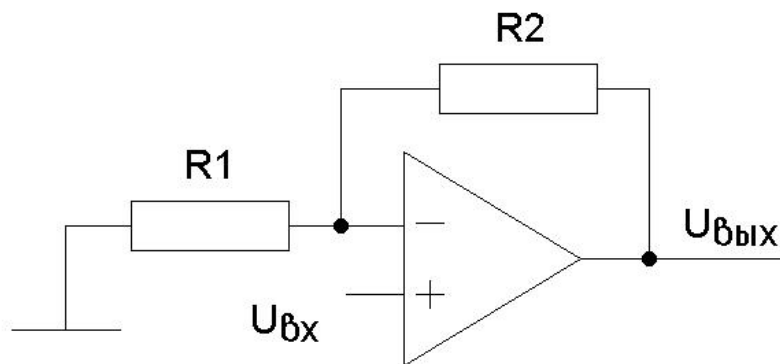


Рис.2.21. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ

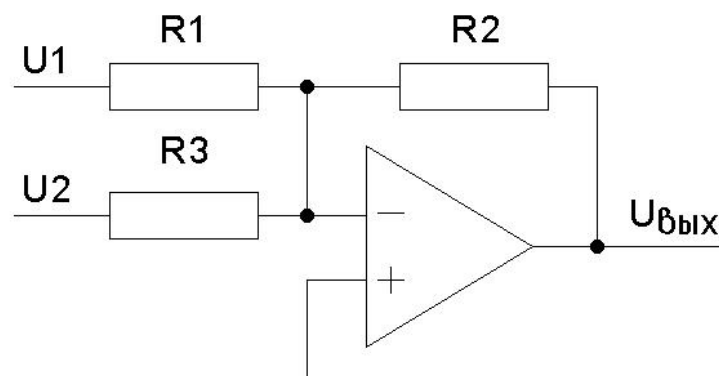
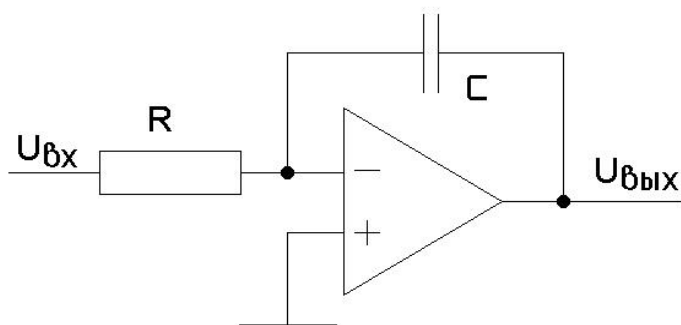


Рис.2.22. Суммирующий усилитель на основе ОУ

Выходное напряжение в схеме определяется как инверсная сумма входных напряжений с весовыми коэффициентами, которые определяются через параметры резисторов в соответствии с выражением

$$U_{вых} = -\left(\frac{R2}{R1}U1 + \frac{R2}{R3}U2\right).$$

В общем случае количество суммируемых напряжений может быть любым. Выходное напряжение в этом случае определяется как



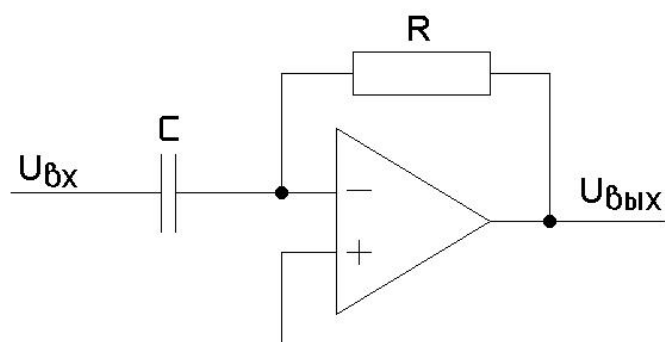
$$U_{вых} = - \sum_{i=1}^n \frac{R}{R_i} U_i .$$

Схема идеального интегрирующего усилителя показана на рис.2.23.

Рис.2.23. Инвертирующий интегратор

Напряжение на выходе интегратора определяется как

$$U_{вых} = - \frac{1}{RC} \int U_{вх}(t) dt .$$



Для реальных интеграторов в цепь обратной связи параллельно конденсатору обычно включается резистор с сопротивлением $\ll R$ или схема обнуления на основе транзисторного ключа.

Схема идеального дифференцирующего усилителя изображена на рис.2.24.

Рис.2.24. Дифференцирующий усилитель

Напряжение на выходе дифференцирующего усилителя определяется как

$$U_{вых} = -RC \frac{dU_{вх}(t)}{dt} .$$

Для реальных дифференцирующих усилителей последовательно конденсатору обычно включается резистор с сопротивлением $\ll R$.

2.5.3. Порядок выполнения работы

Используя программу моделирования «Electronics Workbench», проведите комплекс исследований для различных схем.

Операционный усилитель выберите из библиотеки по указанию преподавателя.

Варианты для выбора значений сопротивлений резисторов и напряжений суммирующего усилителя приведены в таблице 2.4.

Соберите схему в соответствии с конфигурацией, приведенной на рис.2.25.

Определите напряжение смещения ОУ (показание вольтметра) при нулевом значении входного напряжения.

1. Инвертирующий усилитель

Проведите параметрический анализ в схеме, изменяя входное напряжение от -10 до $+10$ В. Полученную зависимость подготовьте для документирования.

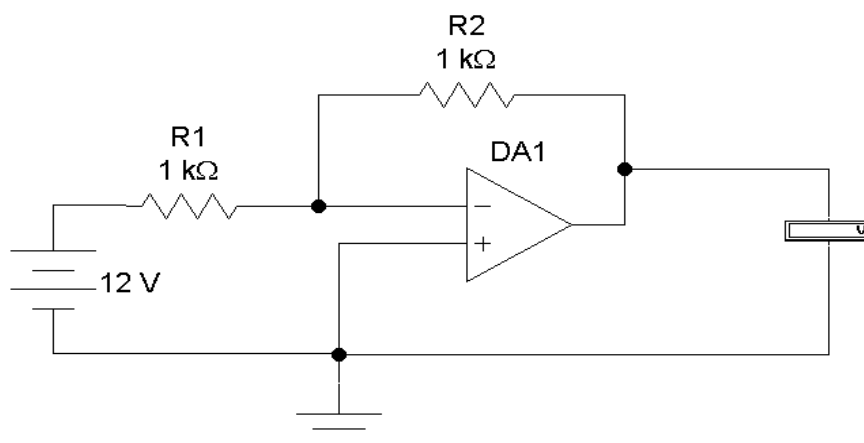


Рис. 2.25. Схема для исследования инвертирующего усилителя

2. Неинвертирующий усилитель

Трансформируйте предыдущую схему в соответствии с рис.2.26. Величины сопротивлений резисторов не изменяйте.

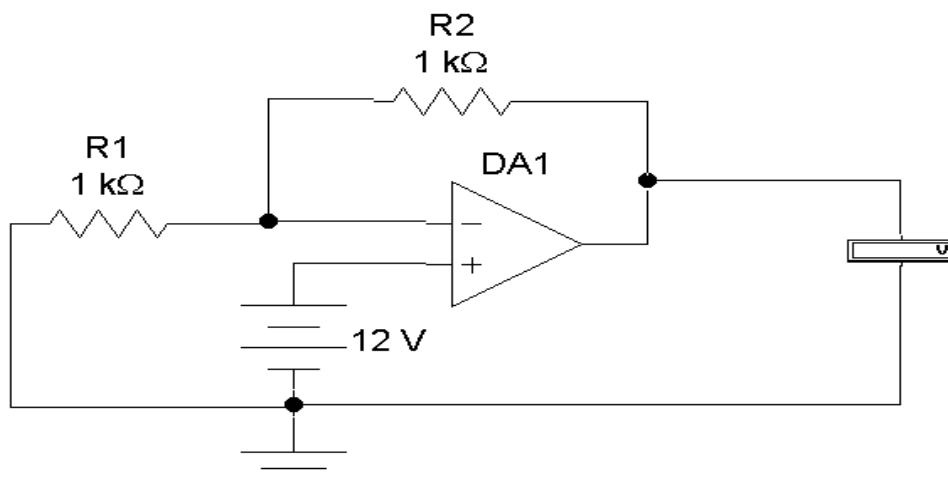


Рис. 2.26. Схема для исследования неинвертирующего усилителя

Проведите параметрический анализ в схеме, изменяя входное напряжение от -10 до $+10$ В. Рассчитайте теоретические значения коэффициентов

усиления по параметрам резисторов. Полученную зависимость подготовьте для документирования.

Таблица 2.4

Варианты для выбора значений R1, R2, R3, U1 и U2.

№	1	2	3	4	5	6	7	8
R1,K	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
R2,K	6	6	6	7	7	7	8	8
R3,K	7	7	7	8	8	8	9	9
U1,B	0.1	0.15	0.2	0.25	0.1	0.15	0.2	0.25
U2,B	0.25	0.2	0.15	0.1	0.25	0.2	0.15	0.1
№	9	10	11	12	13	14	15	16
R1,K	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
R2,K	8	9	10	10	12	12	14	14
R3,K	9	10	11	11	13	13	15	15
U1,B	0.1	0.15	0.2	0.25	0.1	0.15	0.2	0.25
U2,B	0.25	0.2	0.15	0.1	0.25	0.2	0.15	0.1
№	17	18	19	20	21	22	23	24
R1,K	2.8	2.9	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
R2,K	14	14	15	15	18	18	18	20
R3,K	15	15	16	16	19	19	19	21
U1,B	0.1	0.15	0.2	0.25	0.1	0.15	0.2	0.25
U2,B	0.25	0.2	0.15	0.1	0.25	0.2	0.15	0.1
№	25	26	27	28	29	30	31	32
R1,K	3.7	3.8	3.9	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
R2,K	22	22	22	22	24	24	24	27
R3,K	23	23	23	23	25	25	25	28
U1,B	0.1	0.15	0.2	0.25	0.1	0.15	0.2	0.25
U2,B	0.25	0.2	0.15	0.1	0.25	0.2	0.15	0.1

Рассчитайте практические значения коэффициентов усиления, как отношения приращений выходного напряжения к приращениям входного $\Delta U_{\text{вых}}/\Delta U_{\text{вх}}$ на линейных участках полученных характеристик. Для этой цели также можно воспользоваться измерительными маркерами в окне графопостроителя.

Сравните полученные значения коэффициентов усиления с теоретическими, полученными из соотношений сопротивлений резисторов, сделайте выводы.

3. Суммирующий усилитель

Измените схему усилителя в соответствии с рис. 2.27.

Для схемы суммирующего усилителя рассчитайте теоретическое значение выходного напряжения. Результат сравните с показаниями вольтметра. Объясните результат.

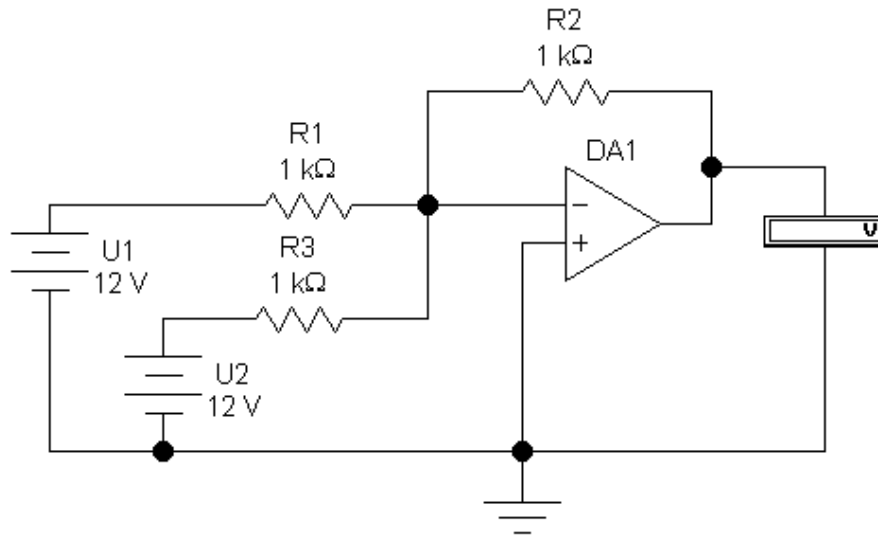


Рис. 2.27. Схема для исследования суммирующего усилителя

4. Интегрирующий усилитель

Измените схему усилителя в соответствии с рис.2.28.

Используйте в схеме модель идеального ОУ.

При указанных на схеме параметрах резисторов и конденсатора, изменяя частоту генератора импульсов, получите изображение на осциллографе, близкое к изображенному на рис.2.29.

Измените величину емкости (3мкФ и 0,3мкФ). Сравните осциллограммы. Объясните полученные результаты.

Замените идеальный ОУ на используемый в предыдущих опытах. Сравните осциллограммы напряжений.

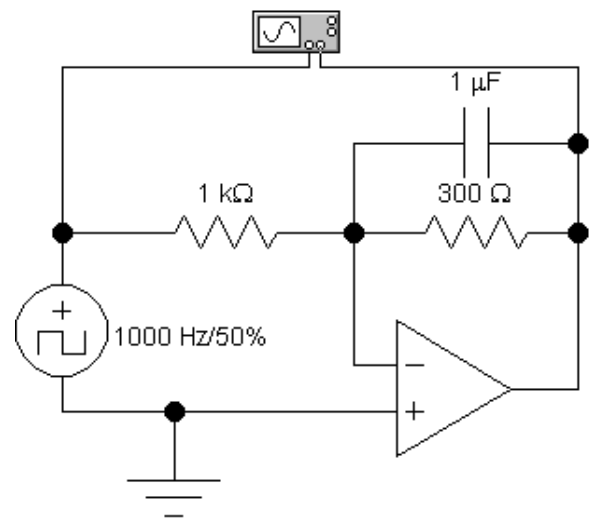


Рис. 2.28. Схема для исследования интегрирующего усилителя

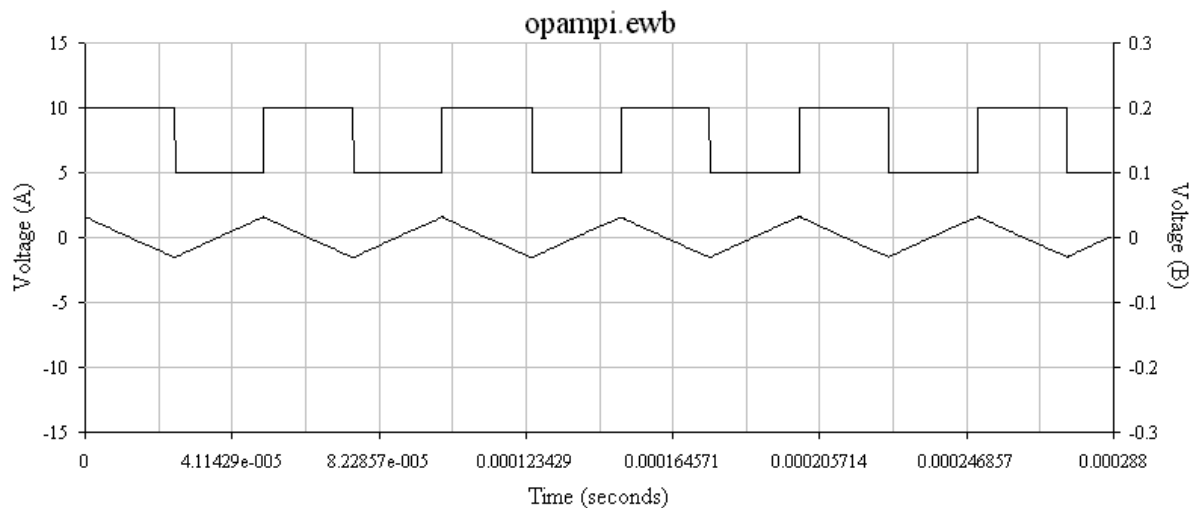


Рис. 2.29. Осциллограммы входного и выходного напряжений интегрирующего усилителя

5. Дифференцирующий усилитель

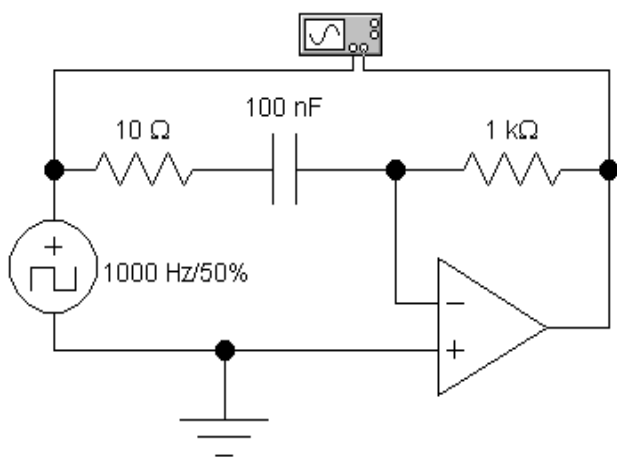


Рис. 2.30. Схема для исследования дифференцирующего усилителя

Измените схему усилителя в соответствии с рис.2.30.

Используйте модель идеального ОУ.

При указанных на схеме параметрах резисторов, конденсатора и частоты генератора получите изображение на осциллографе, близкое к изображенному на рис. 2.31.

Измените величину емкости (300нФ и 50 нФ). Сравните осциллограммы. Объясните полученные результаты.

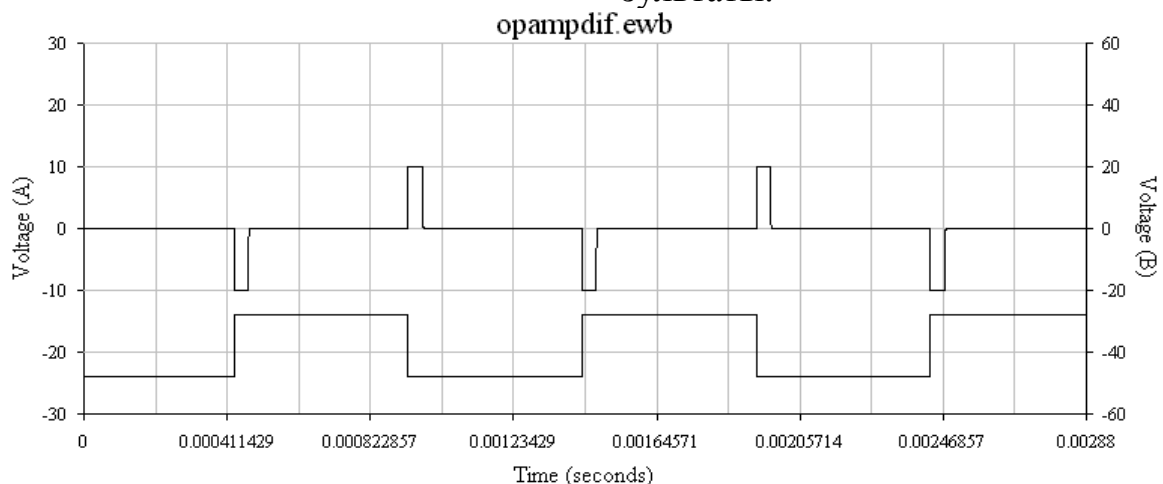


Рис. 2.31. Осциллограммы входного и выходного напряжений усилителя

Замените идеальный ОУ на используемый в предыдущих опытах. Сравните осциллограммы напряжений.

2.5.4. Содержание отчета

Титульный лист. Схемы усилителей для каждого опыта. Графики. Расчетные формулы и значения рассчитанных величин. Осциллограммы напряжений. Выводы по каждому пункту исследований.

2.5.5. Контрольные вопросы

1. Чем отличаются передаточные характеристики инвертирующего и неинвертирующего усилителя?
2. Почему коэффициент усиления неинвертирующего усилителя не может быть меньше единицы?
3. Почему при нулевом входном сигнале на выходе операционного усилителя может быть ненулевой сигнал?
4. Как соотносится максимальное значение выходного напряжения ОУ и напряжение питания?
5. В чем отличие реального и идеального дифференцирующего усилителя?
6. Почему при прямоугольном входном сигнале дифференцирующий усилитель вырабатывает импульсы разной полярности?

2.6. Исследование нелинейных преобразователей

2.6.1. Цель работы

Ознакомление со схемами нелинейных преобразователей на основе ОУ, расчет параметров, исследование свойств и построение характеристик.

2.6.2. Краткие теоретические сведения

При построении реальных электронных устройств в ряде случаев требуются нелинейные зависимости выходных величин от входных. Реализация подобных преобразователей базируется на использовании различных комбинаций линейных и нелинейных элементов. Если нелинейная зависимость выходной величины от входной является монотонной функцией, то в этом случае используется метод кусочно-линейной аппроксимации. Коэффициент передачи преобразователя при этом должен иметь несколько дискретных значений. Для достижения указанной цели внешние цепи операционного усилителя

строятся с использованием различных комбинаций линейных и нелинейных элементов.

На рис. 2.32 показана схема усилителя, в котором входная цепь является нелинейной и состоит из стабилитронов и резисторов. Предположив, что напряжение стабилизации VD1 больше напряжения стабилизации VD2, а стабилитроны VD1 и VD2 идеальны, рассмотрим работу усилителя при отрицательных значениях входного напряжения с учетом того, что инвертирующий вход DA1 является точкой виртуального нуля ($U_{\text{инв.}}=0$). При входном напряжении из диапазона $0 < U_{\text{вх.}} < U_{\text{ст. VD2}}$ оба стабилитрона закрыты (не проводят ток). Коэффициент передачи усилителя определяется из соотношения сопротивлений R4 и R1, то есть $k = -R4/R1$. При входном напряжении, лежащем в диапазоне $U_{\text{ст. VD2}} < U_{\text{вх.}} < U_{\text{ст. VD1}}$ пробивается стабилитрон VD1 и коэффициент усиления определяется соотношением сопротивлений R4, R3 и R1. При этом R3 и R1 соединены параллельно. При входном напряжении $U_{\text{вх.}} > U_{\text{ст. VD1}}$ оба стабилитрона находятся в состоянии пробоя, коэффициент усиления определяется соотношением сопротивлений R4, R3, R2 и R1. При этом R1, R2 и R3 соединены параллельно.

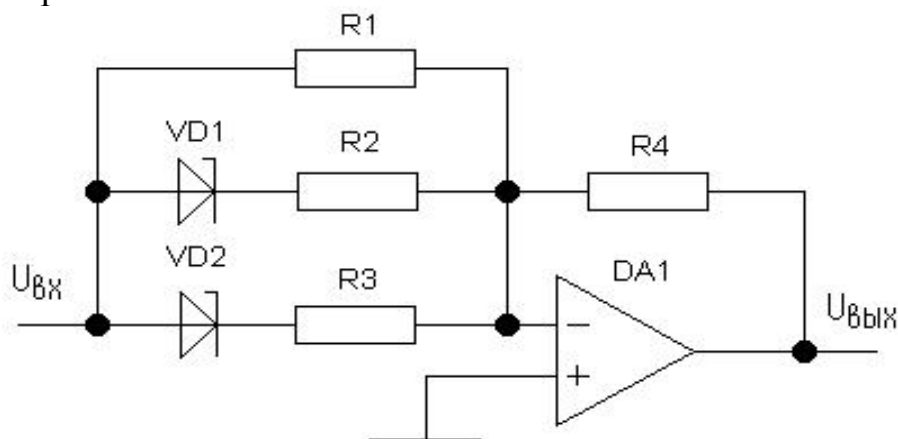


Рис. 2.32. Усилитель с возрастающим коэффициентом усиления

Для реализации усилителя с убывающим коэффициентом усиления нелинейная цепь из стабилитронов формируется в цепи обратной связи ОУ аналогично конфигурации, показанной на рис. 2.32. Пробой стабилитронов в этом случае осуществляется выходным напряжением усилителя, чем обеспечивается формирование параллельной архитектуры резисторов в цепи обратной связи, уменьшение сопротивления $R_{\text{ос}}$ и соответствующее уменьшение коэффициента передачи в функции входного сигнала. Теоретические значения коэффициента передачи на отдельных участках определяются количеством параллельно соединенных резисторов в цепи обратной связи и резистором на входе усилителя.

2.6.3. Порядок выполнения работы

Используя программу моделирования электронных устройств Electronics Workbench, соберите схему в соответствии с конфигурацией, приведенной на рис.2.33. Операционный усилитель выберите из библиотеки по указанию преподавателя (из предыдущей лабораторной работы). Величины сопротивлений устанавливаются в соответствии с указанными на схеме. Стабилитроны, установленные в схему, должны быть разными. Ток стабилизации стабилитронов необходимо установить равным 10мА. Напряжения стабилизации выбрать из таблицы в соответствии с вариантом.

Таблица 2.4

Варианты для выбора значений напряжений стабилизации

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{ст. VD1}, В$	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
$U_{ст. VD2}, В$	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
№	9	10	11	12	13	14	15	16
$U_{ст. VD1}, В$	2	2	2	2	2	2	2	2
$U_{ст. VD2}, В$	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
№	17	18	19	20	21	22	23	24
$U_{ст. VD1}, В$	3	3	3	3	3	3	3	3
$U_{ст. VD2}, В$	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
№	25	26	27	28	29	30	31	32
$U_{ст. VD1}, В$	4	4	4	4	4	4	4	4
$U_{ст. VD2}, В$	6	7	8	6.5	7.5	5	5.5	8.5

1. Усилитель с возрастающим коэффициентом передачи

Считая стабилитроны и операционный усилитель идеальными, рассчитайте теоретическую характеристику зависимости выходного напряжения от входного и теоретические коэффициенты передачи для разных участков.

Проведите параметрический анализ в схеме, изменяя входное напряжение от -10 до $+10$ В. Шаг изменения напряжения подберите экспериментально. Полученную зависимость подготовьте для документирования. Определите в окне графопостроителя коэффициенты передачи усилителя для разных участков характеристики. Сравните их значения с рассчитанными ранее.

Теоретическую характеристику изобразите в одних осях координат с экспериментальной. Сделайте выводы.

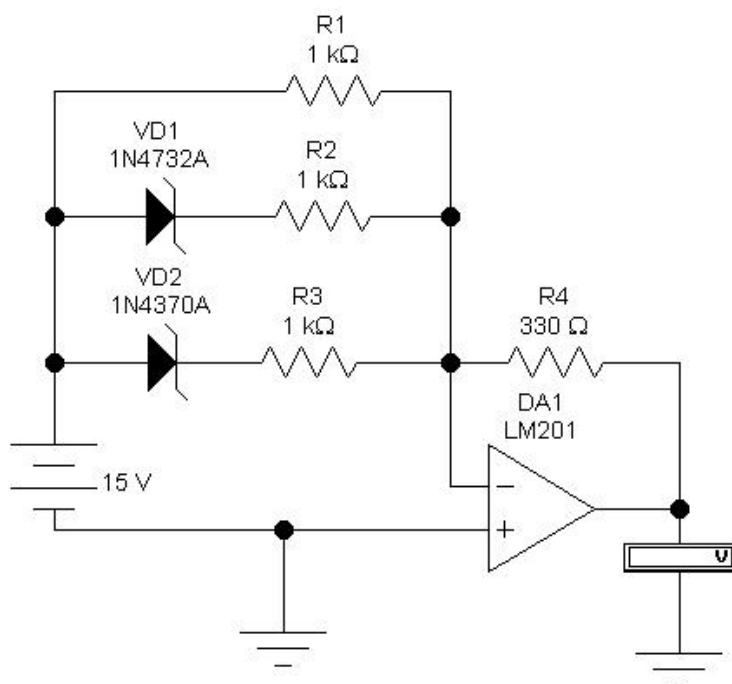


Рис. 2.33. Схема для исследования усилителя с возрастающим коэффициентом передачи

2. Усилитель с убывающим коэффициентом передачи

Трансформируйте предыдущую схему в соответствии с рис.2.34. Стабилитроны и операционный усилитель не меняйте. Следует иметь в виду, что в схеме усилителя с убывающим коэффициентом передачи пробой стабилитронов осуществляется выходным напряжением. Пробой обоих стабилитронов произойдет только в том случае, если $U_{\text{вых}}$ превысит $U_{\text{ст. max}}$. Следовательно, необходимо так выбрать диапазон изменения входного напряжения, чтобы вышеназванное условие выполнялось.

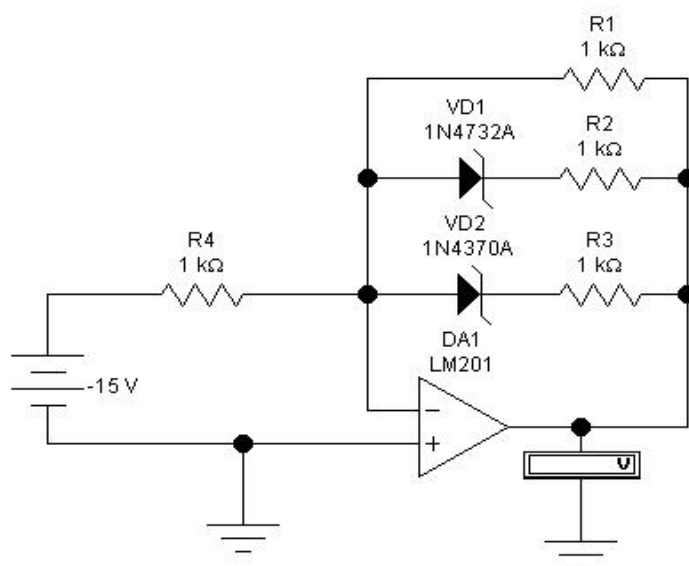


Рис. 2.34. Схема для исследования усилителя с убывающим коэффициентом передачи

Считая стабилитроны и операционный усилитель идеальными, рассчитайте теоретическую характеристику зависимости выходного напряжения от входного и теоретические коэффициенты передачи для разных участков.

Проведите параметрический анализ в схеме, подобрав интервал и шаг изменения входного напряжения экспериментально. Полученную зависимость подготовьте для документирования. Определите в окне графопостроителя коэффициенты передачи усилителя для разных участков характеристики. Сравните их значения с рассчитанными ранее.

Теоретическую характеристику изобразите в одних осях координат с экспериментальной. Сделайте выводы.

3. Ограничитель напряжения

Трансформируйте предыдущую схему в соответствии с рис.2.35 Стабилитроны и операционный усилитель не меняйте.

Считая стабилитроны и операционный усилитель идеальными, рассчитайте теоретическую характеристику зависимости выходного напряжения от входного.

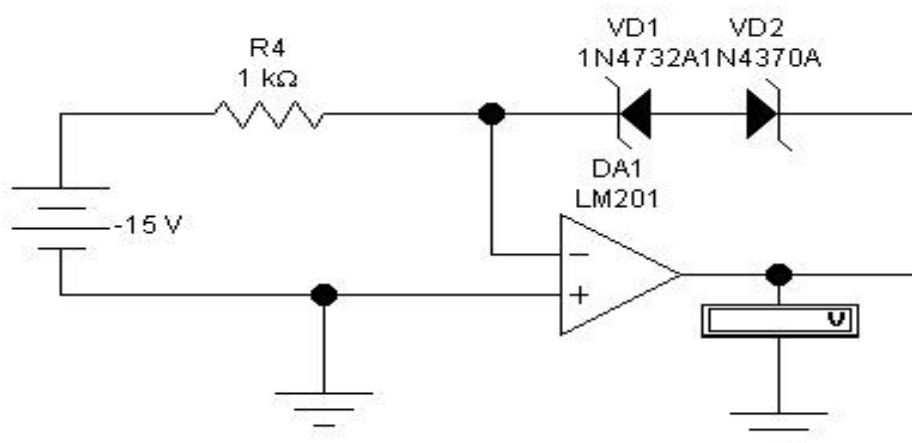


Рис. 2.35. Ограничитель напряжения

Проведите параметрический анализ в схеме, подобрав интервал и шаг изменения входного напряжения экспериментально. Полученную зависимость подготовьте для документирования.

В том случае, если постоянно детектируется ошибка расчетов, включите в цепь обратной связи операционного усилителя резистор параллельно стабилитронам. Сопротивление резистора задайте равным 10кОм.

Теоретическую характеристику изобразите в одних осях координат с экспериментальной. Сделайте выводы.

2.6.4. Содержание отчета

Титульный лист. Схемы усилителей для каждого опыта. Графики. Расчетные формулы и значения рассчитанных величин. Выводы по каждому пункту исследований.

2.6.5. Контрольные вопросы

1. Каким образом можно получить симметричные характеристики для нелинейных преобразователей?
2. Каким образом можно получить характеристики, приближающиеся к монотонным?
3. Каким образом можно реализовать схему усилителя с ограничением?
4. Какие другие элементы могут использоваться в схемах нелинейных преобразователей?

2.7. Исследование генератора синусоидальных колебаний

2.7.1. Цель работы

Изучение принципа действия генератора синусоидальных колебаний на операционном усилителе. Расчет параметров и настройка генератора.

2.7.2. Краткие теоретические сведения

Генератором электрических колебаний называется устройство, преобразующее энергию постоянного тока в энергию переменного тока требуемой формы. В зависимости от формы выходного напряжения генераторы разделяют на генераторы гармонических колебаний и генераторы негармонических колебаний (импульсные генераторы).

Вне зависимости от формы выходного сигнала генераторы могут работать в двух режимах: режим автоколебаний и режим запуска внешними импульсами. Первый из них называется автогенератором или мультивибратором. Генерация колебаний в нем начинается сразу после подключения питания. Для генератора второго типа, называемого одновибратором или ждущим мультивибратором, необходим внешний запускающий импульс, который преобразуется схемой в форму, определяемую ее собственными характеристиками.

Мультивибраторы чаще всего используются в качестве задающих генераторов, а одновибраторы – для преобразования формы импульсов к требуемому виду [1].

В общем случае генератор колебаний представляет собой усилительно-преобразовательное устройство с положительной частотно-зависимой обратной связью. При этом должны выполняться следующие условия:

$$\varphi_y(\omega) + \varphi_{oc}(\omega) = 2\pi k,$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ - целое число; φ_y – фазовый сдвиг сигнала в усилителе; φ_{oc} – фазовый сдвиг сигнала в цепи обратной связи.

$$K_y(\omega)K_{oc}(\omega) = 1,$$

где K_y – коэффициент передачи усилителя; K_{oc} – коэффициент передачи канала обратной связи.

Первое из условий известно как условие баланса фаз, а второе – как условие баланса амплитуд.

Если названные условия выполняются только для одной единственной частоты, то на выходе схемы присутствует гармонический сигнал. Если баланс фаз и амплитуд выполняется для большего количества частот, то выходное напряжение носит негармонический характер. Для бесконечного диапазона $0 \leq \omega \leq \infty$: выходной сигнал превращается в прямоугольный.

2.7.3. Порядок выполнения работы

Используя программу моделирования электронных устройств Electronics Workbench, соберите схему в соответствии с конфигурацией, приведенной на рис.2.36. Операционный усилитель выберите из библиотеки по указанию преподавателя (такой же, как в предыдущей работе).

Изображенная на рис. 2.36 схема содержит в канале положительной обратной связи RC-цепь в виде моста Вина.

Передачная характеристика моста Вина описывается следующим выражением

$$W(j\omega) = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})},$$

где $R = R3 = R4$; $C = C1 = C2$.

Частота автоколебаний $\omega = 1/RC$ обеспечивается в схеме при коэффициенте усиления равном 3. Требуемый коэффициент усиления по цепи отрицательной обратной связи для неинвертирующего усилителя задается резисторами $R1$ и $R2$. Два встречно-параллельных диода в схеме используются в качестве нелинейных сопротивлений для стабилизации автоколебаний.

Величины сопротивлений резисторов R3 и R4 установите равными 1кОм. Емкости конденсаторов рассчитайте в соответствии с вариантом задания выходной частоты генератора.

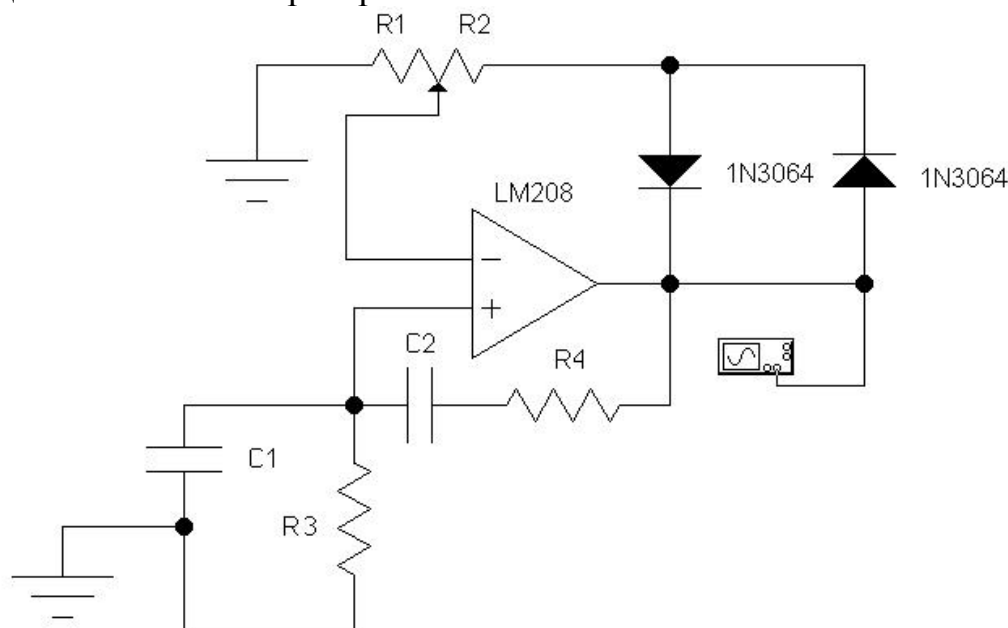


Рис. 2.36. Генератор синусоидальных колебаний

Сопротивление переменного резистора (R1+R2) задайте равным 10 кОм.

Изменяя соотношение сопротивлений $R2/R1 \leq 2$, добейтесь устойчивых автоколебаний синусоидальной формы максимальной возможной амплитуды. Оцените величину сопротивления диодов (коэффициент усиления при синусоидальном сигнале равен 3), исходя из известного процентного соотношения сопротивлений R1 и R2. Измерьте с помощью осциллографа или графопостроителя период синусоидальных колебаний, вычислите полученную частоту и сравните с заданной.

Проследите процесс самовозбуждения генератора с помощью осциллографа (режим Auto на панели управления). Подготовьте осциллограмму для документирования

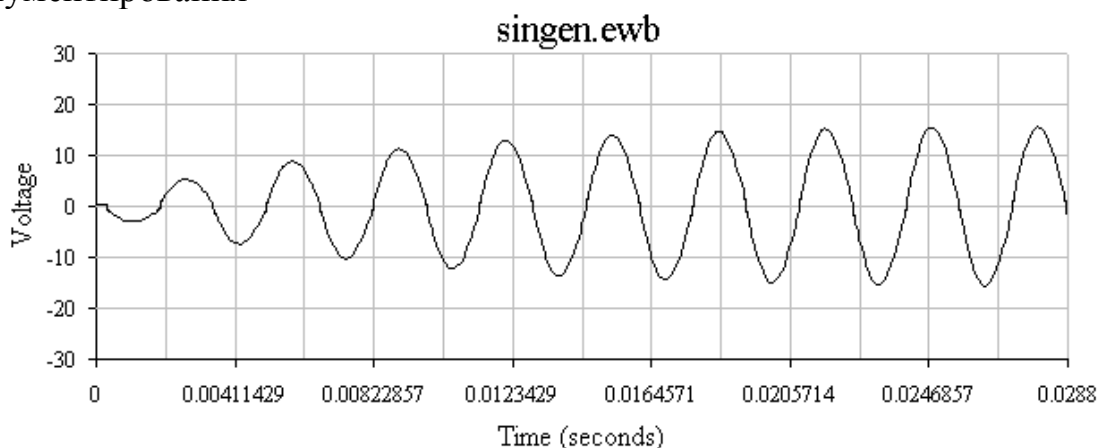


Рис. 2.37. Процесс самовозбуждения генератора

Изменяя коэффициент усиления в сторону увеличения и уменьшения, проанализируйте поведение схемы относительно частоты, формы и амплитуды выходного сигнала. Зафиксируйте результаты с помощью осциллографа или графопостроителя. Подготовьте их для документирования

Отключите один из диодов в схеме. Оцените и зафиксируйте результат с помощью осциллографа или графопостроителя. Подготовьте его для документирования.

2.7.4. Содержание отчета

Титульный лист. Схема генератора. Расчетные формулы и значения рассчитанных величин. Осциллограммы напряжений на выходе генератора при $K_y = 3$, $K_y < 3$ и при $K_y > 3$, а также осциллограмму самовозбуждения и осциллограмму работы генератора без одного диода. Экспериментально полученные значения частот и амплитуд выходных сигналов для всех экспериментов. Выводы по каждому пункту исследований.

2.7.5. Контрольные вопросы

1. Какую функцию в схеме генератора выполняют диоды?
2. Возможна ли замена диодов в схеме на стабилитроны или светодиоды?

2.8. Исследование прецизионного выпрямителя

2.8.1. Цель работы

Знакомство со схемотехникой прецизионных выпрямителей, их настройка, построение и анализ характеристик.

2.8.2. Краткие теоретические сведения

Применение выпрямителей на основе полупроводниковых диодов в измерительной технике и датчиках ограничивается тем, что для напряжений меньших прямого падения напряжения на диоде будет фиксироваться нулевое значение измеряемой величины. Иными словами, абсолютная погрешность измерения примерно равна прямому падению напряжения на диоде.

Уменьшение абсолютной погрешности достигается при использовании прецизионных выпрямителей, реализуемых на основе схем с операционными усилителями. Варианты таких выпрямителей, принципы действия и методика расчета приведены в [5].

На рис 2.38 приведена схема двухполупериодного прецизионного выпрямителя, в состав которого включены инвертирующий и неинвертирующий усилители на основе ОУ.

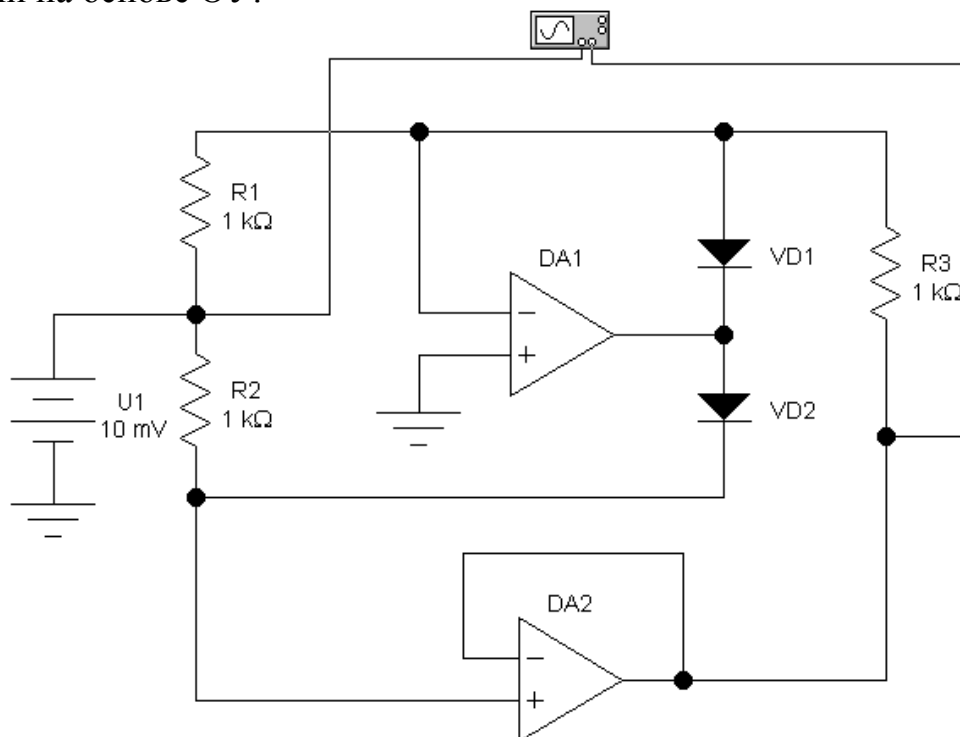


Рис. 2.38. Двухполупериодный прецизионный выпрямитель

Положительные входные напряжения через резистор R2 поступают на вход повторителя напряжения, выполненного на ОУ DA2. Диод VD2 при этом закрыт, следовательно, выходное напряжение ОУ DA1 не влияет на состояние ОУ DA1, то есть $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$.

При отрицательных входных напряжениях диод DA2 открывается, а вход повторителя на ОУ DA2 подключается к выходу ОУ DA1. Через резистор R3 замыкается отрицательная обратная связь, и выходное напряжение схемы определяется как $U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ}} \cdot R3/R1$. При равенстве сопротивлений R3 и R1 $U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ}}$. Общее выражение для напряжения на выходе рассматриваемой схемы $U_{\text{ВЫХ}} = |U_{\text{ВХ}}|$.

2.8.3. Порядок выполнения работы

Используя программу моделирования электронных устройств Electronics Workbench, соберите схему в соответствии с конфигурацией, приведенной на рис.2.38. Операционный усилитель выберите из библиотеки по указанию преподавателя (такой же, как в предыдущей работе).

Установите значения сопротивлений в соответствии с указанными на схеме.

Установите в схему источник переменного напряжения и получите осциллограммы входных и выходных напряжений выпрямителя для разных диапазонов входных напряжений, то есть исследуйте схему при больших и малых входных напряжениях. Рекомендуемые диапазоны входных напряжений 1 - 5В, 1 - 5мВ.

Возможный вариант осциллограмм без вертикального смещения лучей осциллографа при малых напряжениях показан на рис. 2.39. Осциллограммы экспериментов для больших и малых значений входного напряжения подготовьте для документирования.

Установите в схему источник постоянного напряжения и проведите параметрический анализ в схеме с целью получения зависимостей выходного напряжения от входного.

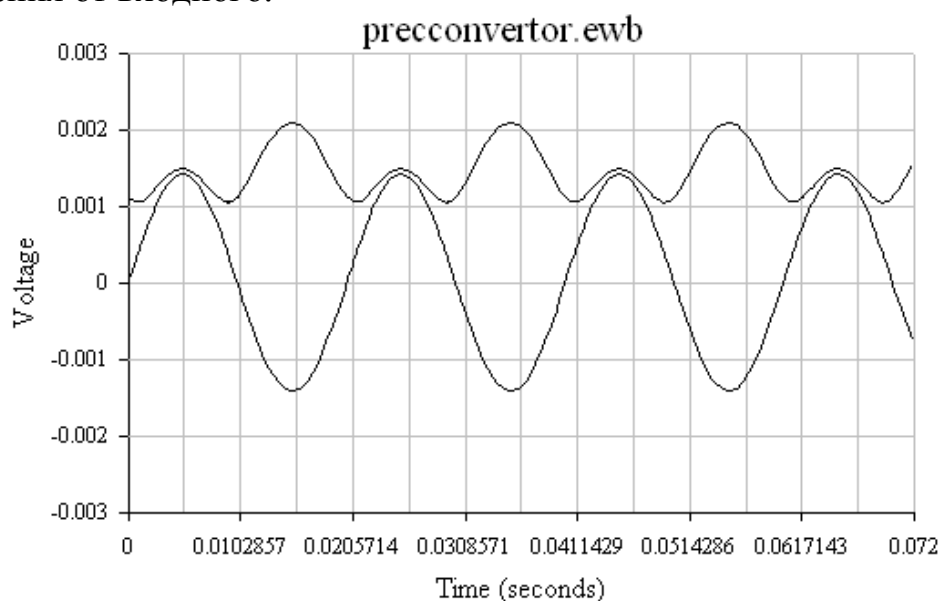


Рис. 2.39. Осциллограммы входного и выходного напряжений выпрямителя при малых значениях входного напряжения

Аналогично предыдущему опыту получите характеристики при больших и малых значениях входного напряжения из рекомендованных ранее диапазонов изменения $U_{вх}$.

Оцените и измерьте в окне графопостроителя для малых значений входного напряжения абсолютные значения нелинейности и несимметричности характеристики преобразования. Возможный вариант характеристики преобразования в малом показан на рис. 2.40.

2.8.4. Содержание отчета

Титульный лист. Схема прецизионного выпрямителя. Осциллограммы напряжений и характеристики для больших и малых значений входного напряжения. Полученные экспериментально значения нелинейности и несимметричности характеристик. Выводы по каждому пункту исследований.

2.8.5. Контрольные вопросы

1. Почему выпрямители на основе диодов не позволяют выпрямлять напряжения в диапазоне единиц и десятков милливольт?
2. Чем вызваны нелинейность и несимметричность характеристик преобразования прецизионного выпрямителя при малых значениях входных сигналов?

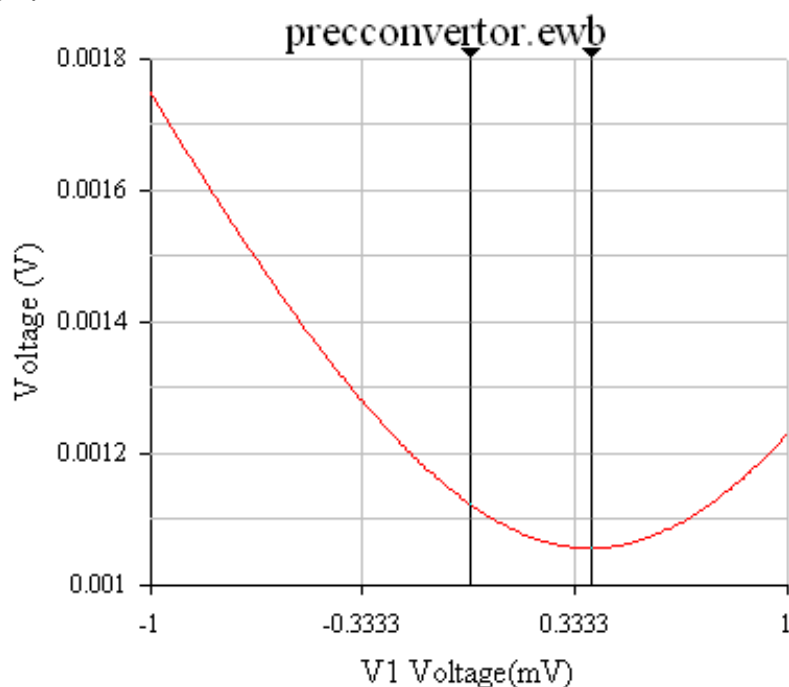


Рис. 2.40. Характеристика преобразования для малых значений входного напряжения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучумов, А.И. Электроника и схемотехника: учебное пособие / А.И.Кучумов – М.: Гелиос АРВ, 2002. – 304 с.: ил.
2. Шустов, М.А. Практическая схемотехника. Источники питания и стабилизаторы/ М.А.Шустов – М.: Альтекс-А, 2002. – 190 с.: ил.
3. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): учеб. для вузов / Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров; под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 768 с.: ил.
4. Лачин, В.И. Электроника: учебное пособие. / В.И.Лачин, Н.С.Савёлов – Ростов н/Д: Феникс, 2001. – 448 с.: ил.
5. Марченко, А. Л. Основы электроники: учебное пособие по общепрофессиональной дисциплине "Электротехника и электроника" / А. Л. Марченко. - Москва: ДМК Пресс, 2013. - 292 с.: ил.

Содержание

Введение	3
1. Краткая информация о программе моделирования «Electronics Workbench»	3
1.1. Интерфейс пользователя программы Electronics Workbench.....	4
1.2. Ввод данных для моделирования	6
1.3. Использование измерительных приборов.....	9
1.4. Анализ моделей электронных схем.....	16
2. Задания к лабораторным работам	20
2.1. Исследование полупроводниковых диодов	20
2.2. Исследование полупроводниковых выпрямителей	25
2.3. Исследование параметрического стабилизатора напряжения	31
2.4. Исследование транзисторных ключей	34
2.5. Исследование схем на операционных усилителях	39
2.6. Исследование нелинейных преобразователей	47
2.7. Исследование генератора синусоидальных колебаний.....	52
2.8. Исследование прецизионного выпрямителя.....	55
Библиографический список.....	59

Подписано в печать . Усл. печ. л. . Тираж экз.
Печать офсетная. Бумага офисная. Заказ № _____

Отпечатано: РИО ВоГТУ, г. Вологда, ул. С. Орлова, 6