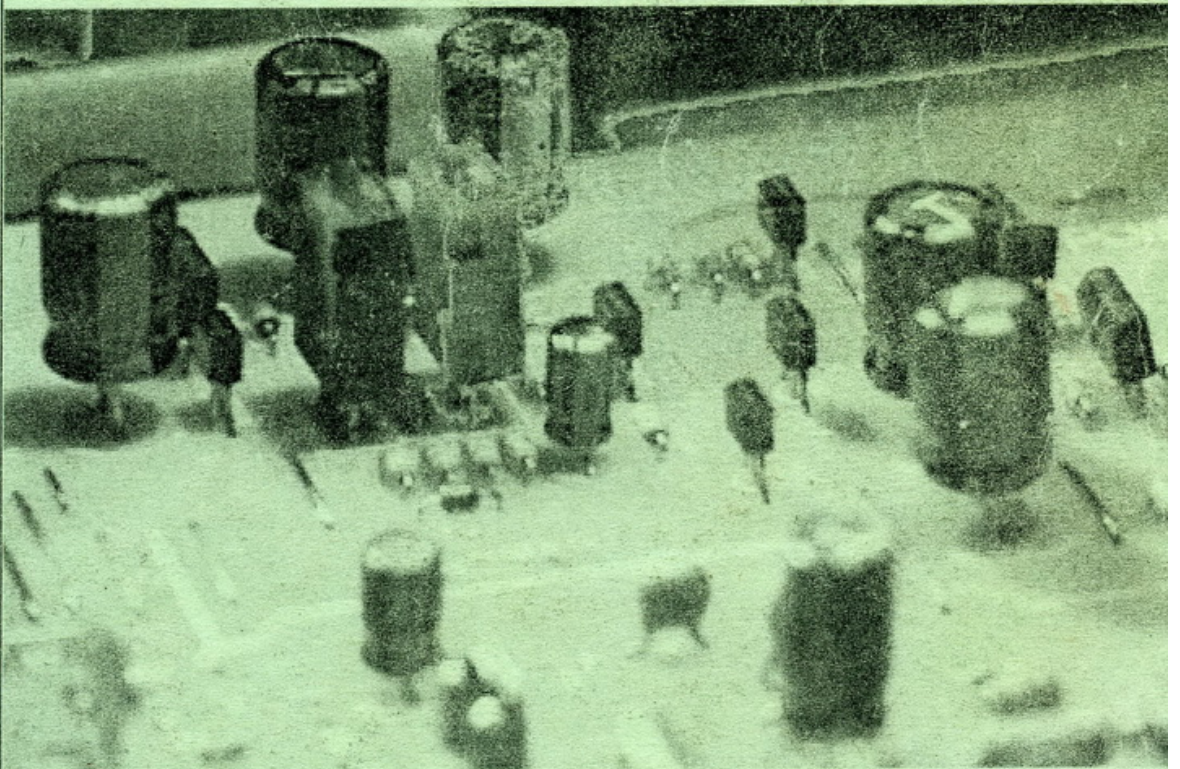


Учебно-методическое пособие

С.В. ЧЕРНЫХ

ЭЛЕКТРОНИКА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
НА ELECTRONICS WORKBENCH



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИКИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Кафедра телекоммуникационных систем

С. В. Черных

ЭЛЕКТРОНИКА
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
НА ELECTRONICS WORKBENCH

Учебно-методическое пособие
для студентов направления подготовки бакалавров
210400 Телекоммуникации
и специальности 210406 Сети связи и системы коммутации

Волгоград 2008



Рекомендовано к публикации учебно-методической комиссией
кафедры телекоммуникационных систем ВолГУ
факультета физики и телекоммуникаций
(протокол № 2 от 21.12 2007 г.)

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. каф. электротехники
Волгоградского государственного технического университета *В. П. Заярный*;
канд. физ.-мат. наук, доц. каф. математики
и компьютерного моделирования
Волгоградского государственного университета *Е. А. Михайлова*

Черных, С. В.

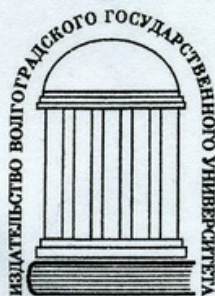
Ч-49 Электроника [Текст] : Лабораторный практикум на
Electronics Workbench : учеб.-метод. пособие для студ. на-
правления подготовки бакалавров 210400 Телекоммуника-
ции и спец. 210406 Сети связи и системы коммутации
/ С. В. Черных ; ГОУ ВПО «ВолГУ», Фак. физики и теле-
коммуникаций, Каф. телекоммуникац. систем. – Волго-
град : Изд-во ВолГУ, 2008. – 96 с.

ISBN 978-5-9669-0429-6

В пособии даны краткие сведения о программе Electronics Workbench, необходимые для выполнения лабораторного практикума. Приведено описание лабораторных работ. Даны подробные методические указания по их выполнению. Описанию каждой работы предшествует формулировка ее цели и краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения этой лабораторной работы. Приведены контрольные вопросы для проверки готовности студентов к выполнению каждой из лабораторных работ.

Для студентов направления подготовки бакалавров 210400 Телекоммуникации и специальности 210406 Сети связи и системы коммутации, а также для всех пользователей компьютеров, желающих получить знания по электронике.

ISBN 978-5-9669-0429-6



© С. В. Черных, 2008

© Оформление. Издательство
Волгоградского государственного
университета, 2008

Содержание

Предисловие	4
Часть I. Краткие сведения о программе Electronics Workbench	6
Введение.....	6
Интерфейс программы Electronics Workbench.....	7
Создание схемы.....	9
Контрольно-измерительные приборы.....	14
Анализ схем.....	20
Элементная база.....	24
Часть II. Лабораторный практикум	33
Лабораторная работа № 1. Полупроводниковые диоды на основе электронно-дырочного перехода	33
Лабораторная работа № 2. Стабилитрон	53
Лабораторная работа № 3. Биполярный транзистор	73
Список литературы	93

Предисловие

Моделирование на персональных компьютерах в настоящее время широко используется при разработке разнообразной электронной аппаратуры. Оно помогает обобщить огромный фактический материал, провести анализ сложных взаимосвязей между различными элементами радиоэлектронных устройств, использовать разнообразную элементную базу и т. п. В вузах программы машинного моделирования позволяют развивать у студентов умения и навыки исследовательской работы, интенсифицировать их самостоятельную работу, всячески совершенствовать учебный процесс. Наконец, при наличии персонального компьютера можно самостоятельно обучаться в домашних условиях.

Как показывает практика, максимальная эффективность обучения достигается совместным использованием натуральных экспериментов с реальными элементами электрических цепей, с реальными измерительными приборами и компьютерных технологий. А поэтому компьютеризированный практикум не заменяет, а дополняет натуральный лабораторный практикум, поскольку при использовании только схемотехнического моделирования на персональном компьютере у студентов зачастую теряется физическая реальность.

Настоящий лабораторный практикум имеет следующую структуру. В начале каждой лабораторной работы приводятся краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения данной лабораторной работы. Теоретические сведения сопровождаются подробными примерами выполнения различных измерений и расчетных заданий. Затем в лабораторной работе приводятся контрольные вопросы по пройденному материалу. Далее приводится программа лабораторной работы и сведения о содержании отчета по данной лабораторной работе. Затем даются задания. Все задания в практикуме являются многовариантными, что позволяет каждому студенту самостоятельно выполнять индивидуальное задание. В

каждом задании предусмотрено решение небольшой аналитической задачи, результаты решения которой сравниваются с машинными расчетами. Задания, содержащиеся в практикуме, выполняются с использованием программы моделирования Electronics Workbench.

По электронике написано много хороших книг и учебников. В списке литературы приведены лишь некоторые из них [1-4]. Настоящее пособие, в основном, следует выработанной в этих книгах методике изложения дисциплины «Электроника».

В вузах наиболее распространенной является программа Electronics Workbench (EWB). Эта программа отличается самым простым и легко осваиваемым пользовательским интерфейсом и широко используется в учебном процессе. По сравнению с традиционными методами проведения лабораторных работ, использование EWB позволяет значительно сократить время на подготовку и проведение таких работ при существенной экономии средств за счет многопрофильного использования персонального компьютера вместо дорогостоящего лабораторного оборудования. В настоящем пособии перед лабораторными работами приводятся краткие сведения об этой программе, которые необходимы для выполнения приводимого ниже лабораторного практикума. Для более подробного ознакомления с программой EWB рекомендуется обратиться к литературным источникам [4-6], приводимым в списке литературы и другим источникам по данному программному продукту.

Часть I. Краткие сведения о программе Electronics Workbench

Введение

В настоящее время в мире существует большое число разнообразных программ машинного моделирования. Это такие программы как Micro-Cap, CircuitMaker, Tanner T-Spice, PSpice, OrCad, System View, Electronics Workbench и другие. Каждая из перечисленных программ предназначена для решения определенного круга задач и имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее часто в учебных заведениях используется программа EWB (фирмы Interactive Image Technologies) как отличающаяся самым простым и легко осваиваемым пользовательским интерфейсом. Согласно данным фирмы в настоящее время насчитывается более 100 тысяч зарегистрированных пользователей программы. Для изучения дисциплины «Электроника» достаточно использовать демонстрационную версию программы, которую можно найти в сети Internet.

Заметим, что программы EWB 6.xx – EWB 8.x являются скорее профессиональными, чем учебными, и с этой точки зрения лишены многих достоинств версий 4.x и 5.xx, которые позволяют решать большинство задач лабораторного практикума по предметам электро- и радиотехнического профиля. Поэтому краткие сведения о программе EWB в настоящем пособии даются в соответствии с версией EWB 5.xx и в объеме, необходимом для выполнения приведенного ниже лабораторного практикума.

Существует достаточно большое количество книг, посвященных программе EWB. В списке литературы приводятся некоторые из них [4-6]. В этих книгах содержится большое количество примеров использования моделирующей программы EWB, описаны результаты моделирования большого числа схем с использованием разнообразных радиоэлементов. Тем, кто желает лучше познакомиться с программой EWB необходимо обратиться к перечисленным выше и другим аналогичным источникам литературы.

Интерфейс программы Electronics Workbench

Программа EWB 5.xx имитирует рабочее место исследователя – лабораторию радиоэлектроники, оборудованную измерительными приборами, работающими в реальном масштабе времени. Эта программа позволяет создавать, моделировать и исследовать как простые, так и сложные аналоговые и цифровые радиоэлектронные устройства. Для работы программы требуется операционная система Windows 95/98/Me/NT/2000/XP.

Главное окно программы показано на рис.1. Программа имеет

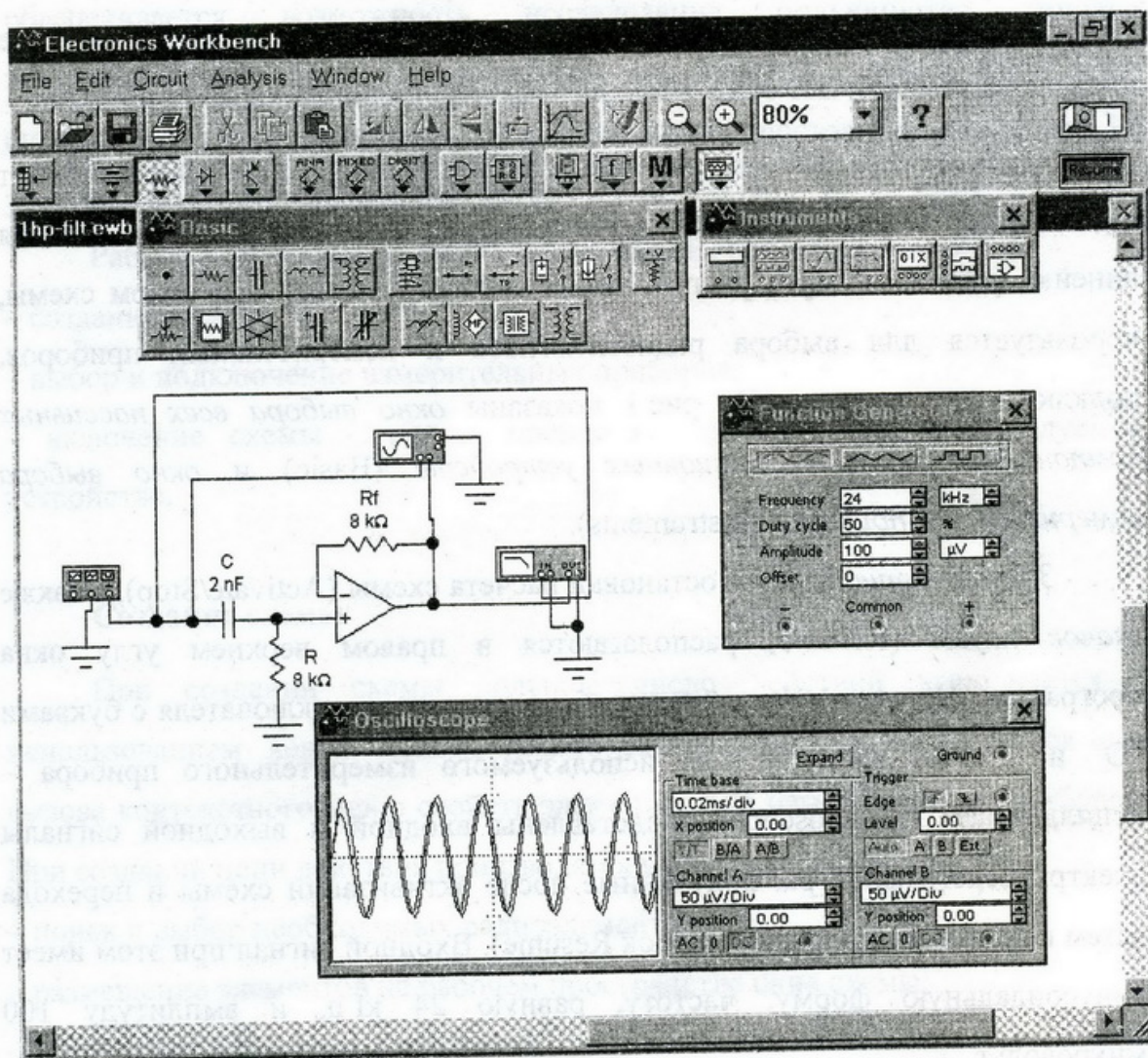


Рис.1. Окно программы EWB

стандартный оконный интерфейс пользователя. Окно меню команд расположено в верхней части главного окна программы. Можно начать

работу с программой с выбора пункта меню File и с загрузки из папки примеров (File\Open\Samples) одного из файлов, с описанием схемы типового радиоэлектронного устройства. Например, на рис.1 показана схема электрического фильтра (файл 1hp-filt.ewb).

Окно схемы занимает центральную основную область окна программы. В этом окне создают и редактируют электрические цепи, используя радиоэлементы и соединительные провода. В этом окне на рис.1 изображена схема электрического фильтра на операционном усилителе с подключенными к нему генератором, осциллографом и измерителем АЧХ и ФЧХ (здесь же приведены развернутые окна осциллографа и функционального генератора).

Окно значков (иконок) располагается выше окна схемы. Оно включает две линейки. Верхняя линейка значков дублирует команды меню. Нижняя линейка иконок, которая располагается непосредственно над окном схемы, используется для выбора радиоэлементов и измерительных приборов, подключаемых к цепи. На рис.1 показаны *окно выбора всех пассивных компонентов и коммутационных устройств (Basic)* и *окно выбора измерительных приборов (Instruments)*.

Значок активизации и остановки расчета схемы (Activate/Stop), а также *значок паузы (Resume)* располагаются в правом верхнем углу окна программы. Иконка Activate/Stop изображена в виде выключателя с буквами "O" и "I". На рис.1 в окне используемого измерительного прибора – осциллографа (Oscilloscope) представлены входной и выходной сигналы электрического фильтра, полученные после активизации схемы и перехода затем в режим паузы (нажат значок Resume). Входной сигнал при этом имеет синусоидальную форму, частоту, равную 24 кГц, и амплитуду 100 микровольт.

Необходимо заметить, что не рекомендуется держать схему во включенном (активизированном) состоянии длительное время. При этом в процессе интенсивной обработки данных и решения уравнений может

накопиться большая ошибка в вычислениях, что в свою очередь может вызвать аварийное завершение работы программы моделирования.

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

Работа с программой EWB состоит из трех основных этапов:

- создание схемы;
- выбор и подключение измерительных приборов;
- включение схемы – расчет процессов, протекающих в исследуемом устройстве.

Создание схемы

При создании схемы большое число действий выполняется с использованием левой кнопки мыши. Правая кнопка используется для вызова контекстного меню свойств элементов или измерительных приборов. При создании цепи действия производятся в следующем порядке:

- поиск и выбор необходимых радиоэлементов;
- размещение элементов на рабочем пространстве окна схемы;
- соединение элементов проводами;
- установка значений параметров элементов.

Поиск и выбор необходимых радиоэлементов производится с помощью мыши и нижней линейки значков. Для избежания ошибок при выборе радиоэлементов необходимо пользоваться контекстной помощью и кратким

описанием элемента. В состав схемы обязательно включается корпус (заземление). Без этого элемента правильный расчет схемы не гарантируется.

В программе EWB имеется большая элементная база данных. В базе данных содержатся часто используемые радиоэлементы: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, источники тока и напряжения и т.д. Пассивные элементы используются без учета паразитных параметров. Только для резисторов вводится температурная зависимость. Таким образом, пассивные элементы в программе EWB являются идеальными элементами. Программа EWB допускает также возможность использования переменных резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. Параметры этих элементов можно изменять, нажимая клавишу, соответствующую метке элемента. Изменение параметров возможно даже во время работы схемы. Правда, при этом точность вычислений не гарантируется и результаты нужно перепроверять, повторяя анализ цепи с фиксированным значением параметра элемента.

Размещение элементов в окне схемы производится с помощью мыши. Необходимый для создания схемы значок (символ) элемента выделяется, например, в окне Basic подведением к этому элементу курсора и последующим нажатием левой кнопки мыши. Затем этот элемент переносится из окна Basic на рабочее поле программы движением мыши при нажатой левой кнопке, после чего кнопка отпускается (для фиксации символа). Для вращения элемента используются иконки на верхней линейке значков или соответствующие пункты контекстного меню или меню Circuit. Все элементы в окне схем должны быть размещены без пересечений и наложений. Если необходимо переместить элемент на новое место, к нему подводится курсор, нажимается левая кнопка мыши и после выделения элемента красным цветом движением мыши при нажатой левой кнопке производится перемещение элемента в нужное место рабочего пространства окна схемы.

Соединение выводов всех элементов друг с другом осуществляется только с помощью проводов. Не допускается наложение выводов элементов друг на друга, поскольку соединение при этом не устанавливается. К выводу элемента можно подключить только один проводник. Для выполнения соединения курсор мыши подводится к выводу элемента, и после появления жирной черной точки нажимается левая кнопка и появляющийся при этом проводник протягивается к выводу другого элемента до появления на нем такой же жирной черной точки, после чего кнопка мыши отпускается, и соединение готово. При необходимости подключения к этим выводам других проводников в окне Basic выбирается точка (символ соединения) и переносится на ранее установленный проводник. Чтобы точка почернела (первоначально она имеет красный цвет), необходимо щелкнуть мышью по свободному месту рабочего поля. Если на точке виден след от пересекающего проводника, то электрического соединения нет и точку необходимо установить заново. К точке можно подключить только четыре проводника. Соединительные проводники можно, “захватывая” мышкой, переместить на новое место. Подведя к проводнику курсор мыши, щелкнув правой кнопкой, и выполнив команду Wire Properties..., а затем команду Set Node Color, можно установить новый цвет соединительного проводника. Таким же цветом будет нарисована кривая на экране измерительного прибора, при подключении прибора к схеме “окрашенным” проводом.

Установка значений параметров элемента производится наведением курсора на элемент, нажатием правой кнопки мыши и выбором соответствующего пункта контекстного меню. Изменить параметры элемента можно также двойным нажатием левой кнопки мыши или использованием подменю Component Properties меню Circuit. В появившейся диалоговой панели устанавливаются параметры элемента. Для катушек индуктивности, резисторов и конденсаторов используется закладка Value. Чтобы установить параметры сложных и активных элементов (диодов, транзисторов, длинных линий и т.д.), выбирается закладка Models и пункты меню Default и Ideal или

можно выбрать тип элемента из имеющейся библиотеки. Далее, нажатием кнопки Edit на диалоговой панели производится установка или изменение параметров элемента.

Уничтожение элементов и проводов производится наведением на них курсора и нажатием правой кнопки мыши с последующим выбором пункта меню Delete. Выделение группы элементов производится выполнением операции “вытягивание прямоугольника” при помощи мыши. Операция эта выполняется при нажатой левой клавиши мыши. После выделения группу элементов можно переместить на новое место, скопировать в буфер или уничтожить.

Увеличение или уменьшение изображения схемы осуществляется после выбора пунктов Zoom In или Zoom Out из меню Circuit или после использования соответствующих значков на верхней линейке иконок программы.

Для того чтобы установить дополнительные параметры отображения схемы, используется меню Circuit, пункт Schematic Options (рис.2). Этот

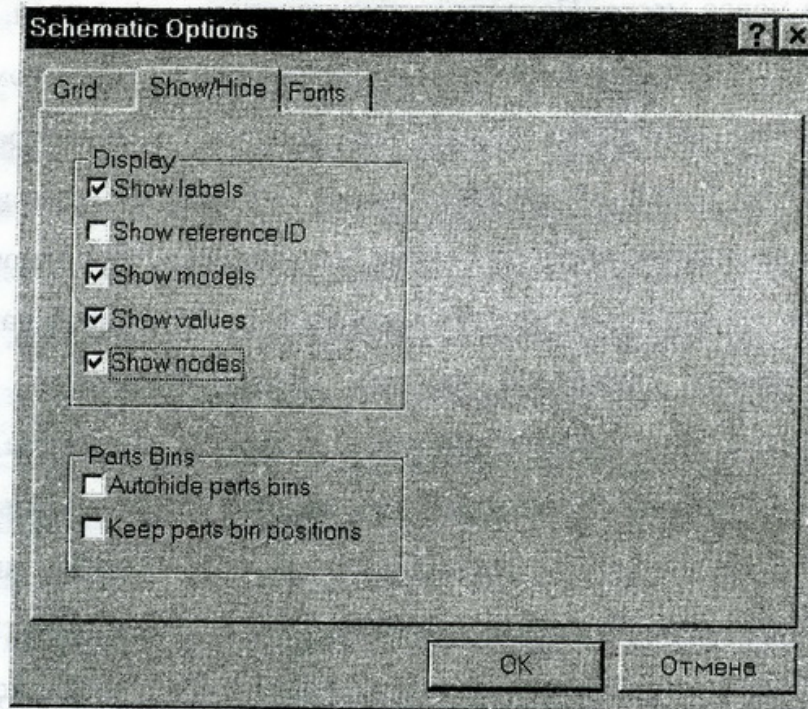


Рис.2. Установка дополнительных параметров отображения схемы

пункт меню часто используется для отображения номеров узлов схемы: выбирается закладка Show/Hide и отмечается пункт меню Show nodes (рис.2). Используя эту диалоговую панель можно также установить точечную сетку на изображении схемы, изменить шрифты, используемые в программе, показать на схеме метки радиоэлементов и т.д.

Программа EWB позволяет участки большой схемы преобразовать в подсхему. Подсхема обозначается как небольшой прямоугольник с выводами. Для создания подсхемы необходимо выделить участок схемы, используя мышь и операцию “вытягивания прямоугольника”, причем линии выделения должны пересекать те проводники, которые в дальнейшем станут выводами подсхемы. Далее нужно выбрать пункт Create Subcircuit меню Circuit. В результате появится диалоговое окно (рис.3), в строке Name

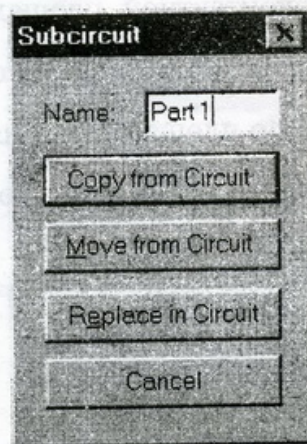


Рис.3. Создание подсхемы

которого вводится имя подсхемы, после чего возможны варианты:

Copy from Circuit – подсхема копируется с указанным названием в библиотеку раздела Favorites без внесения изменений в исходную схему;

Move from Circuit – выделенная часть вырезается из общей схемы и в виде подсхемы с присвоенным ей именем копируется в библиотеку Favorites;

Replace in Circuit – выделенная часть заменяется в исходной схеме подсхемой с присвоенным ей именем с одновременным копированием ее в библиотеку Favorites.

Значок раздела Favorites – крайний слева на нижней линейке иконок. В разделе Favorites программы EWB 5.xx размещаются подсхемы, если они имеются в данной схеме (в исходном состоянии раздел пуст), а также все библиотечные компоненты предыдущей версии EWB в случае импорта из этой версии схемных файлов. Заполнение раздела моделями компонентов или подсхем производится программой автоматически одновременно с загрузкой схемного файла и очищается после окончания работы с ним.

Для просмотра или редактирования подсхемы нужно дважды щелкнуть мышью по ее значку. Редактирование подсхемы производится в соответствии с общими правилами редактирования схем. При создании дополнительного вывода подсхемы необходимо из соответствующей точки подсхемы курсором мыши протянуть проводник к краю окна подсхемы до появления не закрашенной прямоугольной контактной площадки, после чего отпустить левую кнопку мыши. Для удаления вывода необходимо курсором мыши ухватиться за его прямоугольную площадку у края окна подсхемы и вывести ее за пределы окна. Использование подсхем позволяет получить компактную схему сложного устройства.

Контрольно-измерительные приборы

Значок контрольно-измерительных приборов – крайний справа на нижней линейке иконок (рис.4). В схему можно включить семь приборов. Это такие приборы как цифровой мультиметр, функциональный генератор, двухканальный осциллограф, измеритель амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик, генератор слов (кодový генератор), логический анализатор и логический преобразователь (перечисление ведется соответственно рис.4 слева направо). Общий порядок работы с приборами следующий: иконка прибора курсором переносится на рабочее поле и подключается проводниками к исследуемой схеме. Чтобы привести прибор в рабочее (развернутое) состояние, необходимо дважды щелкнуть курсором по его иконке. Для изучения электроники достаточно использовать три прибора:

мультиметр, функциональный генератор и осциллограф. Рассмотрим каждый прибор подробно.

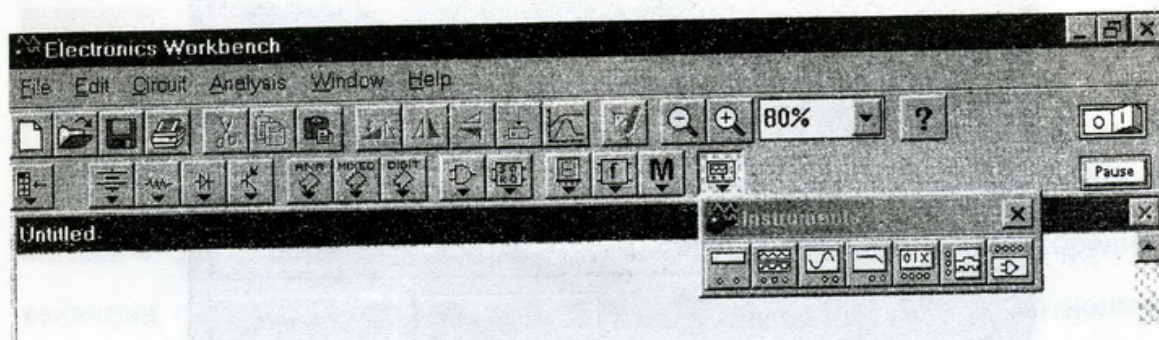


Рис.4. Панель контрольно-измерительных приборов

Мультиметр (*Multimeter*) предназначен для измерения постоянных и среднеквадратичных (действующих или эффективных) значений тока или напряжения, а также для измерения сопротивлений (рис.5). На лицевой

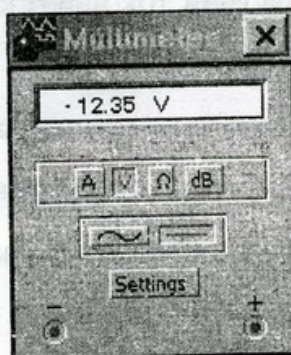
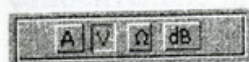

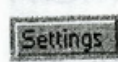


Рис.5. Лицевая панель мультиметра

панели (рис.5) расположен дисплей, где отображаются результаты измерений, клеммы подключения к схеме и кнопки управления:

 – режимы измерения тока, напряжения, сопротивления и затухания (или усиления);

 – режимы измерения переменного или постоянного тока;

 – режим установки параметров мультиметра. Если нажать на эту кнопку, то откроется диалоговое окно (рис.6), на котором обозначено:

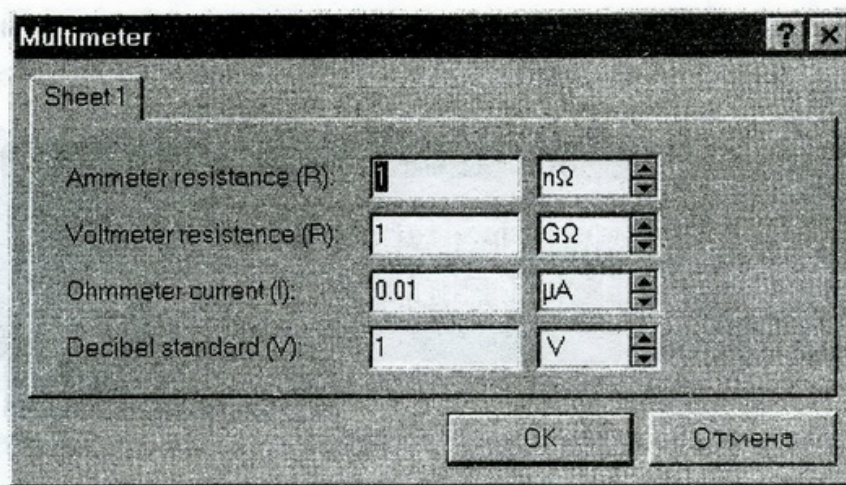


Рис.6. Установка режимов мультиметра

Ammeter resistance – сопротивление амперметра;

Voltmeter resistance – сопротивление вольтметра;

Ohmmeter current – ток омметра (или ток через контролируемый объект при измерении сопротивления этого объекта);

Decibel standard – установка эталонного напряжения V_1 при измерении ослабления или усиления в децибелах (по умолчанию $V_1=1$ В). При этом на дисплее мультиметра будет отображаться коэффициент α , который рассчитывается по формуле: $\alpha[\text{дБ}]=20 \cdot \lg(V_2/V_1)$, где V_2 – напряжение в контролируемой точке схемы.

Кроме мультиметра для измерений постоянных и синусоидальных токов и напряжений можно использовать *вольтметр* и *амперметр* (рис.7).

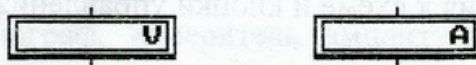
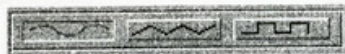


Рис.7. Изображения вольтметра и амперметра

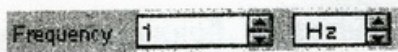
Эти приборы можно вызвать, нажав на значок индикаторов (Indicators) в нижней линейке иконок.

Функциональный генератор (Function Generator) предназначен для генерации синусоидального, треугольного и прямоугольного сигналов. На

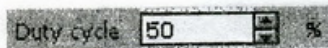
лицевой панели (рис.8) расположены клеммы для подключения к схеме и кнопки управления:



– форма выходного сигнала;



– частота выходного сигнала;



– коэффициент заполнения в % (для прямоугольных сигналов это отношение длительности сигнала к периоду повторения – величина обратная скважности, для треугольных сигналов – соотношение между длительностями переднего и заднего фронта);

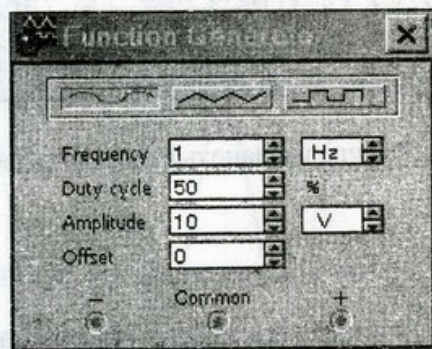
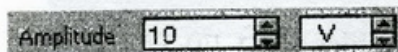
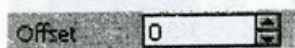


Рис.8. Лицевая панель функционального генератора




– амплитуда выходного сигнала;



– смещение (постоянная составляющая) выходного сигнала.

При заземлении клеммы Common (общий) на клеммах “-” и “+” получаются сигналы одинаковые по амплитуде, но сдвинутые по фазе относительно друг друга на 180 градусов.

Осциллограф (*Oscilloscope*) позволяет наблюдать форму двух сигналов (рис.9), поступающих на два входа осциллографа: каналы А и В (Channel A, Channel B). Каналы А и В имеют отдельную регулировку чувствительности (V/Div) и отдельную регулировку смещения по вертикали (Y position).

Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок . Режим AC используется для наблюдения только сигналов переменного тока. В

режиме 0 входной зажим замыкается на “землю”. Режим DC позволяет проводить осциллографические измерения сигналов как постоянного, так и переменного тока. С правой стороны от кнопки DC расположен входной зажим.

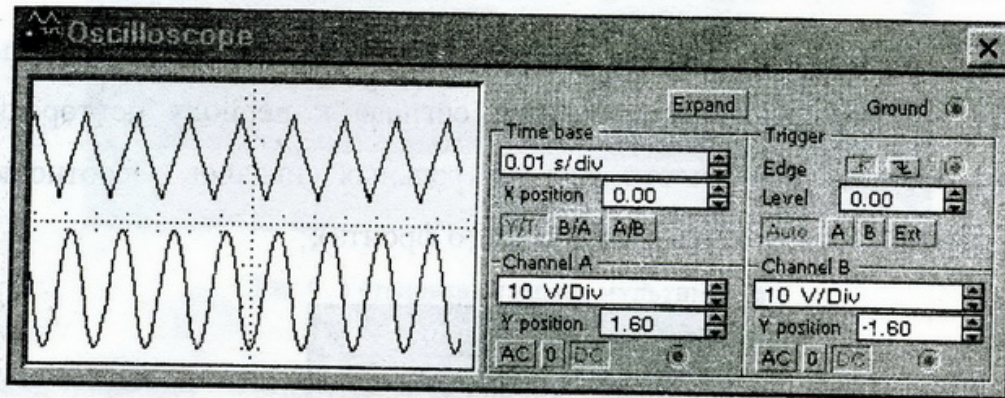


Рис.9. Лицевая панель осциллографа

Выбор режима развертки осуществляется кнопками **Y/T** **B/A** **A/B**. В режиме Y/T (обычный режим, включен по умолчанию) по вертикали откладывается напряжение сигнала, по горизонтали – время. В режиме B/A по вертикали откладывается напряжение сигнала канала B, по горизонтали откладывается напряжение сигнала канала A. В режиме A/B по вертикали откладывается напряжение сигнала канала A, по горизонтали – напряжение сигнала канала B.

В режиме развертки Y/T длительность развертки (s/div) устанавливается в окне Time base с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали, т.е. по оси X (X position).

В режиме развертки Y/T предусмотрен ждущий режим (Trigger) с запуском развертки (Edge) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала (выбор осуществляется нажатием кнопок **F** **R**) при регулируемом уровне (Level) запуска. В режиме Y/T предусмотрен также автоматический (Auto) запуск развертки (от канала A или B), запуск развертки от канала A, от канала B или от внешнего источника (Ext),

подключаемого к зажиму в блоке управления Trigger. Перечисленные режимы запуска развертки выбираются кнопками **Auto** **A** **B** **Ext**.

Заземлить осциллограф можно с помощью клеммы Ground, расположенной в правом верхнем углу прибора. Нажав кнопку Expand, получим увеличенный размер окна осциллографа (рис.10). В этом окне

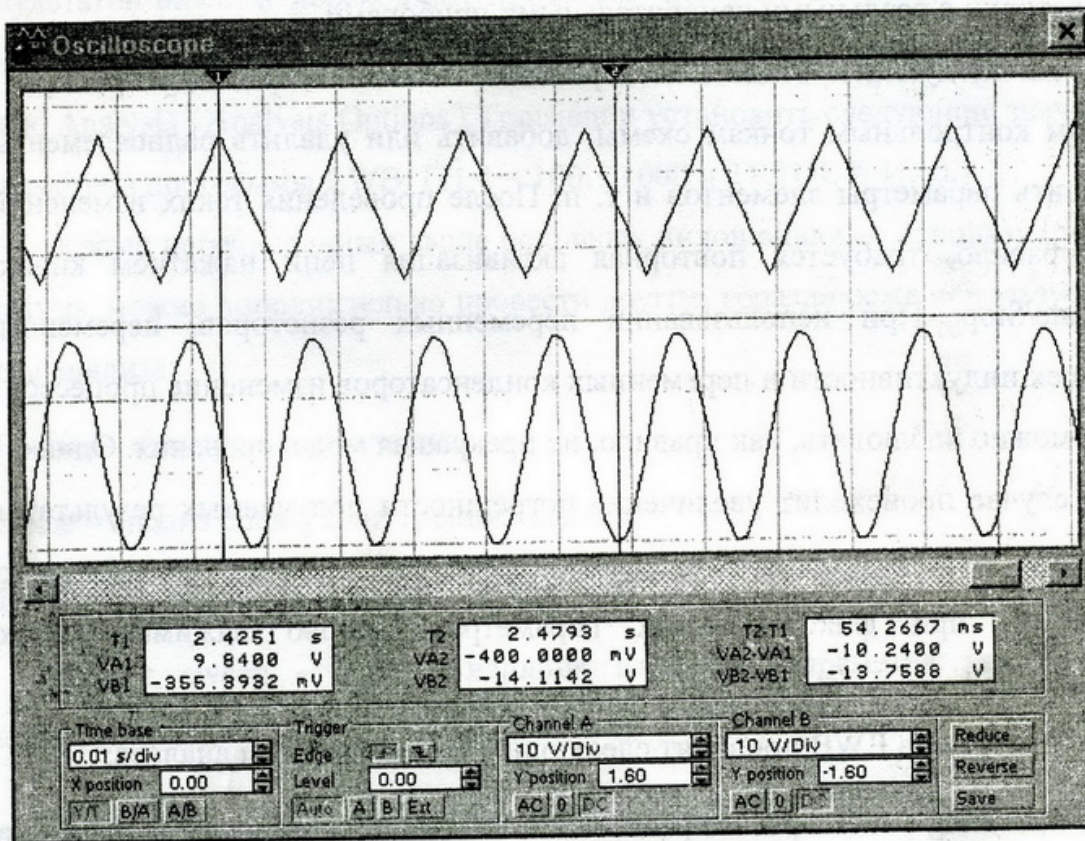


Рис.10. Лицевая панель осциллографа при нажатии на кнопку Expand

можно использовать полосу горизонтального прокручивания для наблюдения начала исследуемого процесса, и устанавливать две визирные линии (синего и красного цвета), которые можно перемещать с помощью курсора за треугольные ушки (они обозначены также цифрами 1 и 2). При этом в индикаторных окошках под экраном приводятся результаты измерения напряжения, временных интервалов и их приращений (между визирными линиями). Возврат к исходному состоянию осциллографа осуществляется нажатием кнопки Reduce. Изображение можно инвертировать нажатием кнопки Reverse и записать данные в файл нажатием кнопки Save.

Анализ схем

Составив схему и подключив к ней измерительные приборы, для начала анализа цепи достаточно нажать кнопку *Activate/Stop*. Рассчитанные значения напряжений, токов или сопротивлений показываются на экранах измерительных приборов. Подобный порядок действий имеет место в лаборатории с реальными измерительными приборами.

На следующем этапе моделирования можно подключить приборы к другим контрольным точкам схемы, добавить или удалить радиоэлементы, изменить параметры элементов и т. п. После проведения таких изменений, как правило, требуется повторная активизация цепи нажатием кнопки *Activate/Stop*. При использовании переменных резисторов, переменных катушек индуктивности и переменных конденсаторов изменение процессов в цепи можно наблюдать, как правило, не прекращая моделирования. Однако в этом случае происходит увеличение погрешности получаемых результатов. Поэтому, чтобы получить надежные результаты, расчет рекомендуется повторить при фиксированных параметрах, заново нажимая кнопку *Activate/Stop*.

Программа EWB проводит следующие основные виды анализа:

- *DC Operating Point* – расчет режима по постоянному току (когда включены мультиметр, амперметры и вольтметры для измерения постоянных токов и напряжений);
- *AC Frequency* – расчет частотных характеристик (когда включен измеритель АЧХ и ФЧХ, а также мультиметр, амперметры и вольтметры для измерения гармонических токов и напряжений);
- *Transient* – расчет переходных процессов (когда включен осциллограф).

В программе EWB существует также другой (характерный для большинства других программ моделирования) порядок анализа схемы – выбор режимов анализа с помощью меню *Analysis*. Режимы анализа цепи, приведенные выше, можно получить, выбирая соответствующие команды

меню Analysis. Настройка основных параметров в диалоговых окнах перечисленных выше видов анализа аналогична настройке параметров измерительных приборов.

В программе EWB по умолчанию установлен слишком большой шаг численного интегрирования. Чтобы повысить точность и корректность результатов анализа переходных процессов сложных цепях (узкополосные цепи, цепи с нелинейными элементами и др.), рекомендуется выбрать пункт меню Analysis \ Analysis Options \ Transient и установить следующие значения параметров программы EWB: ITL4 = 100...1000 и TRTOL = 1...0,1.

Кроме перечисленных выше основных видов анализа, используя меню Analysis, можно дополнительно провести другие, гораздо реже используемые виды анализа:

- Fourier – спектральный анализ;
- Noise – анализ спектра внутренних шумов;
- Distortion – расчет нелинейных искажений;
- Parameter sweep – анализ влияния вариаций параметра какого-либо элемента схемы;
- Temperature sweep – анализ влияния изменения температуры на характеристики устройства;
- Pole-Zero – расчет нулей и полюсов передаточной характеристики моделируемой цепи;
- Transfer Function – расчет передаточной функции;
- расчет чувствительности и разброса характеристик схемы при изменении параметров компонентов (Sensitivity, Worst Case и Monte Carlo).

Рассмотрим кратко некоторые из перечисленных дополнительных видов анализа. Для проведения анализа спектров сигналов необходимо выбрать пункт меню Analysis \ Fourier.... Диалоговое окно установки опций Фурье-анализа показано на рис.11. Как видно из рисунка, это окно содержит

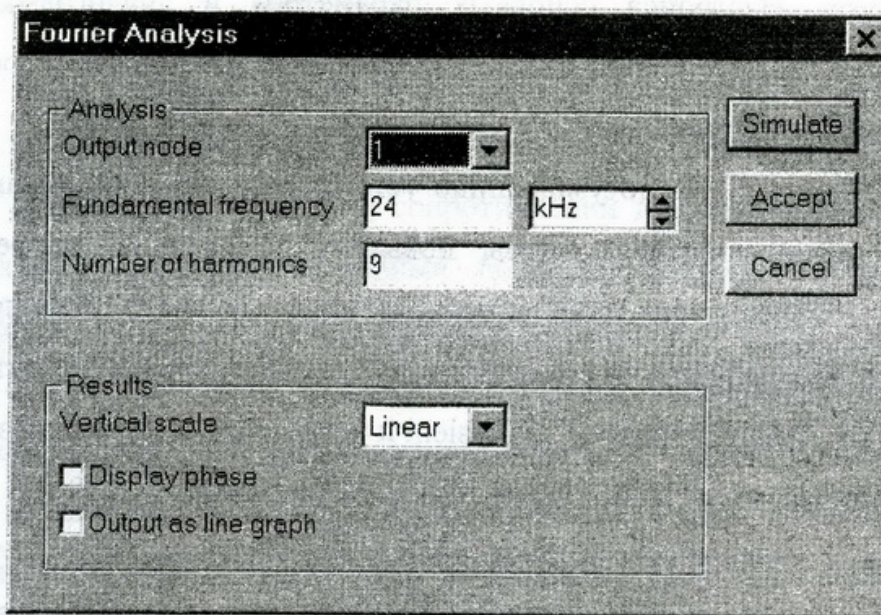


Рис.11. Диалоговое окно установки опций Фурье-анализа

два блока параметров: Analysis и Results. В окне Output node блока параметров Analysis устанавливается номер узла схемы, для которого проводится анализ. В окне Fundamental frequency устанавливается частота основной гармоники. В окне Number of harmonics устанавливается число рассчитываемых гармоник. В блоке Results в окне Vertical scale выбирается вид масштаба по вертикальной оси. Для отображения фазового спектра отмечается пункт Display phase (нужно навести курсор мыши на окошко слева от надписи Display phase и щелкнуть левой кнопкой мыши, при этом в окошке появится галочка). Для показа амплитудного спектра с помощью непрерывной линии точно также отмечается пункт Output as line graph.

Для расчета спектра анализируемого сигнала применяются формулы ряда Фурье и численное интегрирование, т.е. быстрое преобразование Фурье (БПФ) не используется. Поэтому параметр Number of harmonics можно задавать много больше 10 (т.е. рассчитывать большое число гармоник). При этом, однако, высшие гармоники в спектре сигнала будут рассчитаны с увеличенной погрешностью.

Анализ вольтамперных характеристик (ВАХ) нелинейных элементов можно проводить с использованием вариации параметров (пункт меню

Analysis \ Parameter Sweep). Например, варьируя ток через элемент и измеряя напряжение на нем, получим ВАХ нелинейного элемента.

Диалоговое окно, где содержатся параметры такого режима анализа показано на рис.12. Верхний блок параметров содержит внутреннее имя

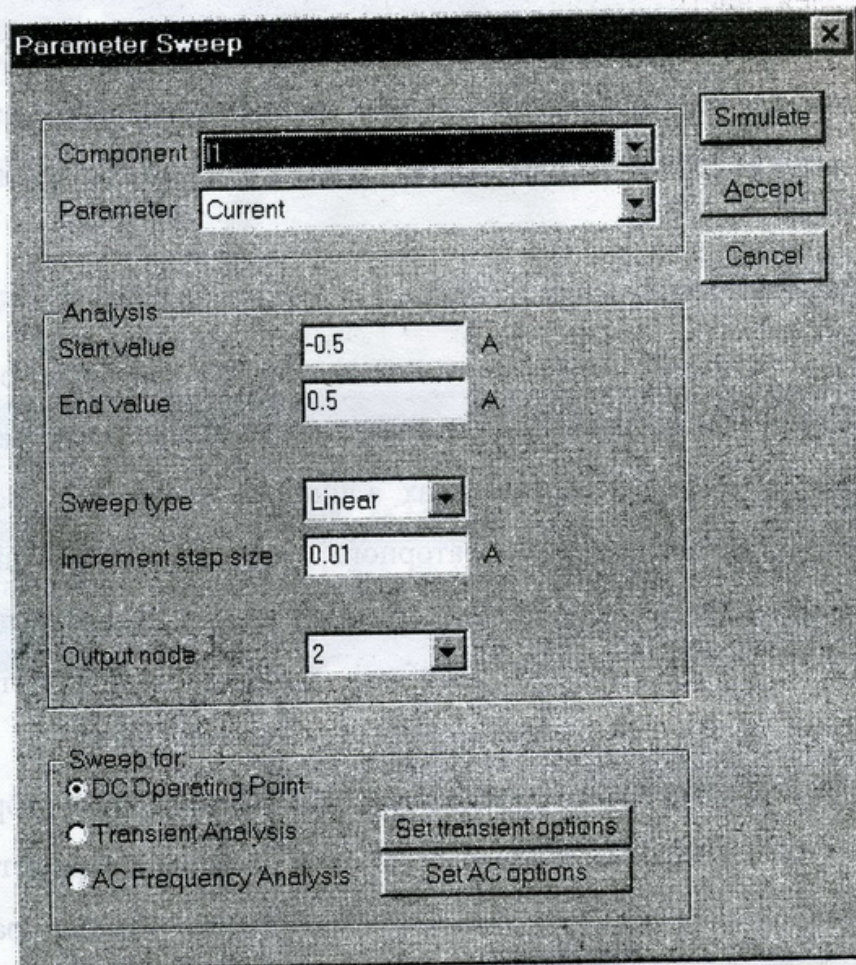


Рис.12. Окно установки параметров моделирования при анализе вариаций параметров элемента (идентификатор) и изменяемый параметр элемента. На рис.12 показано, что изменяется ток (Current) источника постоянного тока с именем I1. Для того чтобы в окне схем было показано внутреннее имя элемента, надо предварительно отметить в окне параметров схемы пункт Show reference ID. Далее на рис.12 указаны следующие параметры:

Start value, End value – параметры, задающие диапазон варьируемой величины (максимум / минимум);

Sweep type – тип масштаба варьируемой величины;

Increment step size – шаг изменения варьируемой величины;

Output node – выходная контрольная точка (или номер узла) схемы, напряжение в котором будет рассчитываться при вариации параметров.

В нижней части окна (в блоке Sweep for) перечислены режимы моделирования, для которых может быть проведен многовариантный анализ. В правом нижнем углу находятся кнопки для установки параметров этих режимов. В данном случае выбран анализ схемы в режиме постоянного тока.

Элементная база

В этом подразделе приводятся очень краткие сведения о моделях элементов радиоэлектронной аппаратуры, принятых в программе EWB. Сведения приводятся не о всех элементах, а лишь о тех, которые необходимы для выполнения настоящего лабораторного практикума. Для получения информации о других элементах радиоэлектронной аппаратуры (не рассмотренных в настоящем пособии) необходимо обратиться к дополнительной литературе о программе EWB.

Вся информация о параметрах какого-либо элемента (резистора, диода, транзистора и т.п.) находится в диалоговом окне установки параметров этого элемента. Для того чтобы открыть это окно, надо сначала разместить требуемый элемент в окне схемы.

Размещение элементов в окне схемы производится с помощью мыши. Необходимый значок (символ) элемента выделяется, например, в окне Diodes подведением к этому элементу курсора и последующим нажатием левой кнопки мыши. Затем этот элемент переносится из окна Diodes на рабочее поле программы движением мыши при нажатой левой кнопке (рис.13), после чего кнопка отпускается (для фиксирования символа).

Далее к размещенному в окне схемы элементу подводится курсор и производится двойной щелчок левой кнопкой мыши. В результате этих действий раскрывается меню Diode Properties, показанное на рис.14.

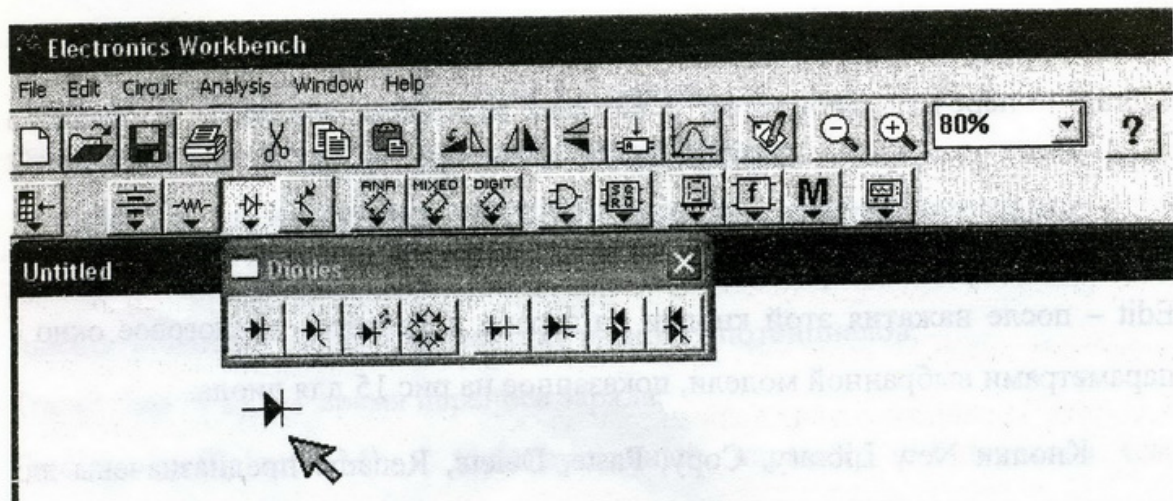


Рис.13. Перенос элемента из окна Diodes на рабочее поле программы

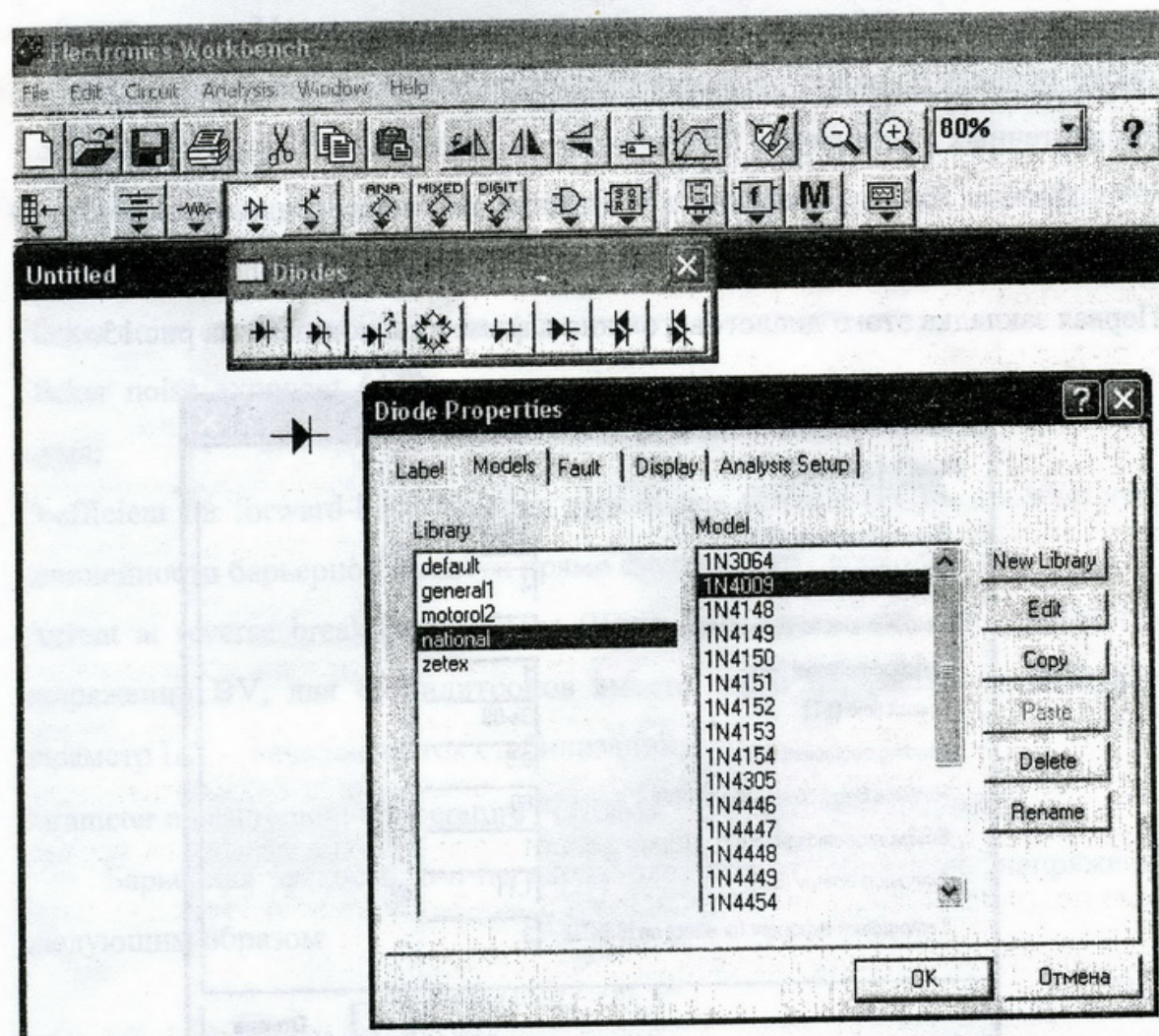


Рис.14. Меню выбора модели диода с возможностью редактирования ее параметров

В этом меню обозначено:

Library – перечень библиотек, в которых находятся элементы выбранного типа;

Model – перечень моделей элементов выбранной библиотеки;

Edit – после нажатия этой кнопки на экране появляется диалоговое окно с параметрами выбранной модели, показанное на рис.15 для диода.

Кнопки New Library, Copy, Paste, Delete, Rename предназначены для создания новых библиотек. В настоящем практикуме не предусмотрено создание новых библиотек в программе EWB, а поэтому использовать эти кнопки при выполнении практикума не рекомендуется. Не рекомендуется также проводить редактирование параметров, дабы не портить параметры библиотечных элементов.

Диоды. Диалоговое окно для задания параметров диодов в EWB 5.0 состоит из двух одинаковых по внешнему виду закладок (Sheet 1 и Sheet 2). Первая закладка этого диалогового окна параметров показана на рис.15.

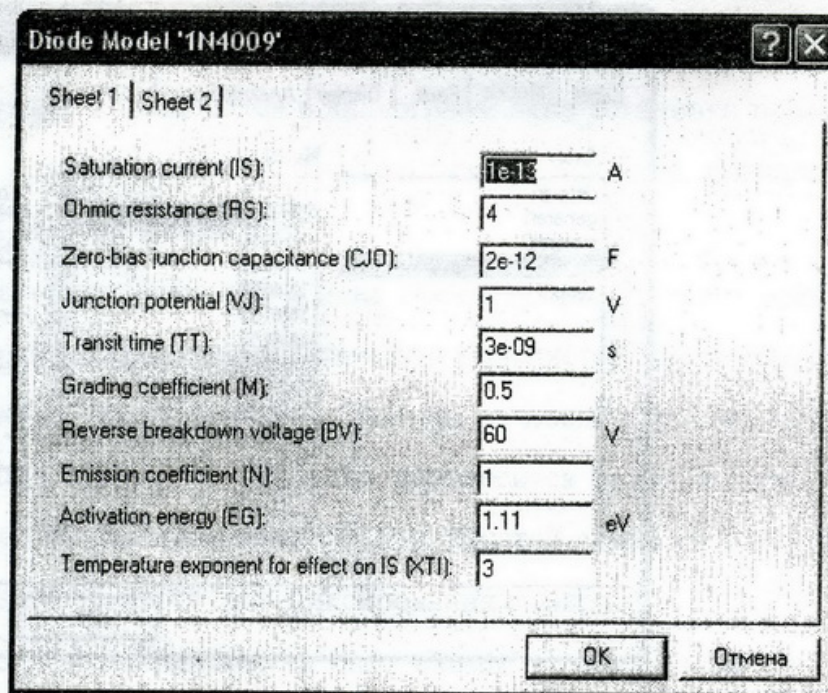


Рис.15. Диалоговое окно установки параметров диодов, Sheet 1

С помощью диалогового окна можно задать следующие параметры:

Saturation current (IS), А – обратный ток диода;

Ohmic resistance (RS), Ом – объемное сопротивление;

Zero-bias junction capacitance (CJO), Ф – барьерная емкость *p-n*-перехода при нулевом напряжении;

Junction potential (VJ), В – контактная разность потенциалов;

Transit time (TT), с – время переноса заряда;

Grading coefficient (M) – конструктивный параметр *p-n*-перехода (см. формулу (1));

Reverse breakdown voltage (BV), В – максимальное обратное напряжение, для стабилитронов параметр не нормируется;

Emission coefficient (N) – коэффициент инжекции;

Activation energy (EG), eВ – ширина запрещенной зоны;

Temperature exponent for effect on IS (XTI) – температурный коэффициент тока насыщения;

Flicker noise coefficient (KF) – коэффициент фликкер-шума;

Flicker noise exponent (AF) – показатель степени в формуле для фликкер-шума;

Coefficient for forward-bias depletion capacitance formula (FC) – коэффициент нелинейности барьерной емкости прямо смещенного перехода;

Current at reverse breakdown voltage (IBV), А – начальный ток пробоя при напряжении BV, для стабилитронов вместо этого параметра используется параметр IZT – начальный ток стабилизации;

Parameter measurement temperature (TNOM), °С – температура диода.

Барьерная емкость *p-n*-перехода зависит от обратного напряжения следующим образом

$$C_u = C_i / (1 + U_t / U_c)^M, \quad (1)$$

где C_u – емкость перехода при обратном напряжении U_c ,

C_i – емкость при нулевом напряжении,

U_i – температурный потенциал перехода (при комнатной температуре составляет 26 мВ),

$M=0,5$ – для резких (сплавных) и $0,333$ – для плавных (диффузионных) переходов.

Стабилитроны. В EWB 5.0 стабилитрон носит название Zener Diode. Диалоговое окно для задания параметров стабилитронов в EWB 5.0 так же как и у диодов состоит из двух одинаковых по внешнему виду закладок (Sheet 1 и Sheet 2). Первая закладка диалогового окна параметров стабилитрона показана на рис.16.

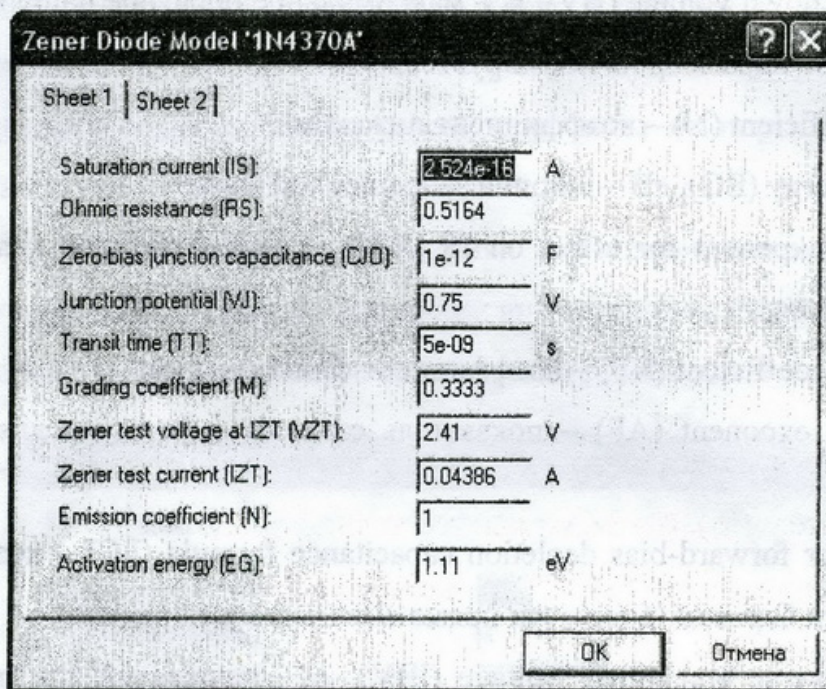


Рис.16. Диалоговое окно установки параметров стабилитронов, Sheet 1

Параметры, задаваемые с помощью диалогового окна, почти полностью совпадают с параметрами диодов (см. рис. 15 и рис. 16). Для стабилитронов в перечень параметров включаются:

Zener test current (IZT), A – номинальный ток стабилизации;

Zener test voltage at IZT (VZT), В – напряжение стабилизации при номинальном токе стабилизации.

Транзисторы. Диалоговое окно для задания параметров транзисторов в EWB 5.0 состоит из пяти окон-закладок (Sheet 1 – Sheet 5). Первое окно-закладка показано на рис.17.

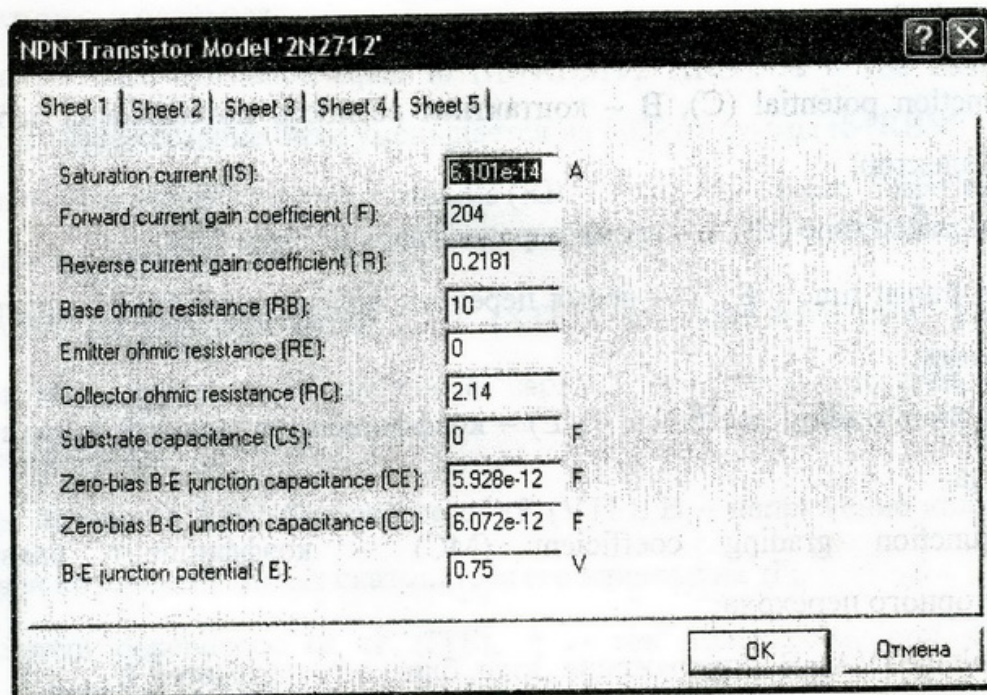


Рис.17. Диалоговое окно установки параметров транзисторов, Sheet 1

В состав параметров транзисторов включены следующие:

Saturation current (IS), A – обратный ток коллекторного перехода;

Forward current gain coefficient (F) – коэффициент β усиления тока в схеме с общим эмиттером;

Reverse current gain coefficient (R) – коэффициент усиления тока в схеме с общим эмиттером при инверсном включении транзистора (эмиттер и коллектор меняются местами);

Base ohmic resistance (RB) – объемное сопротивление базы;

Emitter ohmic resistance (RE) – объемное сопротивление эмиттера;

Collector ohmic resistance (RC) – объемное сопротивление коллектора;

Substrate capacitance (CS), Ф – емкость коллектор-подложка;

Zero-bias B-E junction capacitance (CE), Ф – емкость эмиттерного перехода при нулевом напряжении;

Zero-bias B-C junction capacitance (CC), Ф – емкость коллекторного перехода при нулевом напряжении;

B-E junction potential (E), В – контактная разность потенциалов перехода база-эмиттер;

B-C junction potential (C), В – контактная разность потенциалов перехода база-коллектор;

Forward transit time (τ_F), с – время переноса заряда через базу;

Reverse transit time (τ_R), с – время переноса заряда через базу в инверсном включении;

B-E junction grading coefficient (ME) – коэффициент плавности эмиттерного перехода;

B-C junction grading coefficient (MC) – коэффициент плавности коллекторного перехода;

Early voltage (VA), В – напряжение Эрли, близкое к параметру $U_{кэ\ max}$;

Base-emitter leakage saturation current (ISE), А – обратный ток эмиттерного перехода;

Forward beta high-current knee-point (IKF), А – ток начала спада усиления по току, близкое к параметру $I_{к\ max}$;

Base-emitter leakage emission coefficient (NE) – коэффициент неидеальности эмиттерного перехода;

Forward current emission coefficient (NF) – коэффициент неидеальности в нормальном режиме;

Reverse current emission coefficient (NR) – коэффициент неидеальности в инверсном режиме;

Reverse early voltage (VAR), В – напряжение Эрли в инверсном включении;

Reverse beta roll-of corner current (IKR), А – ток начала спада коэффициента усиления тока в инверсном режиме;

B-C leakage saturation current (ISC), A – обратный ток коллекторного перехода;

B-C leakage emission coefficient (NC) – коэффициент неидеальности коллекторного перехода;

Current for base resistance equal to $(r_b + R_{BM})/2$ (IRB), A – ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается на 50% от суммы $r_b + R_{BM}$;

Minimum base resistance at high currents (RBM) – минимальное сопротивление базы при больших токах;

Coefficient for bias dependence of τ_F (XTF) – коэффициент, определяющий зависимость времени τ_F переноса заряда через базу от напряжения коллектор-база;

Voltage describing VBC dependence of τ_F (VTF), В – напряжение коллектор-база, при котором начинает сказываться его влияние на τ_F ;

High-current dependence of τ_F (ITF), A – ток коллектора, при котором начинает сказываться его влияние на τ_F ;

Excess phase at frequency equal to $1/(\tau_F * 2\pi)$ Hz (PTF), град. – дополнительный фазовый сдвиг на граничной частоте транзистора $F_{ГР} = 1/(2\pi \tau_F)$;

Fraction of B-C depletion capacitance connected to internal base node (XCJC) – коэффициент расщепления емкости база-коллектор;

Substrate junction built-in potential (VJS), В – контактная разность потенциалов перехода коллектор-подложка;

Substrate junction exponential factor (MJS) – коэффициент плавности перехода коллектор-подложка;

Forward and reverse beta temperature exponent (XTB) – температурный коэффициент усиления тока в нормальном и инверсном режимах;

Energy gap for temperature effect on IS (EG), эВ – ширина запрещенной зоны;

Temperature exponent for effect on IS (XTI) – температурный коэффициент тока насыщения;

Flicker noise coefficient (KF) – коэффициент фликкер - шума;

Flicker noise exponent (AF) – показатель степени в формуле для фликкер – шума;

Coefficient for forward-bias depletion capacitance formula (FC) – коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенных переходов;

Parameter measurement temperature (TNOM), °C – температура транзистора.

Лабораторная работа № 1

Полупроводниковые диоды на основе электронно-дырочного перехода

Цель работы: изучить основные свойства и параметры полупроводниковых диодов; освоить методику исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Материалы, удельное сопротивление которых больше удельного сопротивления проводников, но меньше удельного сопротивления диэлектриков, относят к *полупроводникам*. Для сравнения, проводники имеют удельное сопротивление $10^{-6} - 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, изоляторы имеют удельное сопротивление $10^8 - 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а полупроводники имеют удельное сопротивление $10^{-5} - 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Обычно это кристаллический материал с неширокой (0,5-3 эВ) запрещенной зоной. В электронике в качестве полупроводников часто используют такие материалы как германий, кремний, селен, арсенид галлия и другие. Вследствие малой ширины запрещенной зоны полупроводника тепловые колебания атомов способны сообщить валентным электронам энергию, достаточную для перехода из заполненной валентной зоны в свободную зону проводимости. Каждый такой переход приводит к возникновению пары носителей заряда: свободного электрона в зоне проводимости и свободного энергетического состояния (дырки) в валентной зоне. Генерация пар свободных (способных перемещаться под действием приложенного напряжения) зарядов делает кристалл способным проводить электрический ток, а электропроводность такого кристалла называется собственной. Химически чистые или *i-полупроводники* имеют собственную электропроводность и небольшую проводимость. Заметим, что электропроводность — это способность проводить электрический ток посредством чего-либо, то есть величина качественная, а проводимость — величина количественная.

Полупроводник n-типа – полупроводник с преобладающей электронной электропроводностью, которая возникает при добавлении донорных примесей, например примеси пентавалентного фосфора к четырехвалентному германию. Атом примеси при этом ионизируется, добавляя электрон к электронам собственной электропроводности.

Полупроводник p-типа с преобладающей дырочной электропроводностью образуется при добавлении к химически чистому полупроводнику акцепторных примесей, например, при добавлении трехвалентного индия к четырехвалентному германию. Атом примеси ионизируется, принимая электрон от соседнего атома и добавляя тем самым дырку к дыркам собственной электропроводности. Электропроводность, возникающую за счет примесных атомов, называют примесной. Примесные полупроводники называются легированными.

При температуре 50 - 70° С почти все атомы примесей ионизируются и проводимость примесного полупроводника существенно возрастает. Несмотря на возникновение только одного типа электропроводности: или *n*-типа, или *p*-типа, примесные полупроводники являются электрически нейтральными, так как заряды ионов скомпенсированы зарядами *основных* носителей заряда – электронов в *n*-области и дырок в *p*-области полупроводника. Дырки в *n*-полупроводнике или электроны в *p*-полупроводнике называются *неосновными* носителями зарядов. Заметим, что ионы примесных атомов связаны кристаллической решеткой и не могут перемещаться под действием внешнего электрического поля.

Существуют полупроводники, состоящие из двух областей. Одна область имеет электронную электропроводность, а другая – дырочную электропроводность. Переход между двумя областями полупроводника с разными типами электропроводности называется *электронно-дырочным* или *p-n-переходом* (рис.1.1).

Сразу же после создания в полупроводнике *p*- и *n*-областей начинается диффузия (*диффузионный ток*) основных носителей заряда. Диффузия дырок

происходит из p -области в n -область, а диффузия электронов в обратном направлении. Встречаясь, дырки и электроны рекомбинируют, при этом вблизи граничной плоскости (где соприкасаются p -область и n -область) образуются два слоя: n -область приобретает нескомпенсированный положительный заряд (слой нескомпенсированных положительных ионов), а p -область приобретает нескомпенсированный отрицательный заряд (слой нескомпенсированных отрицательных ионов). Поскольку ионы примесных атомов связаны кристаллической решеткой, то перемещаться они не могут. Между двумя разноименно заряженными слоями возникает электрическое поле $E_{зан}$, направленное от n -области к p -области, и называемое *запирающим*. Напряженность этого поля препятствует диффузии дырок и электронов (диффузионному току). Чем больше нескомпенсированных ионов, тем выше напряженность электрического поля. При некотором значении напряженности диффузионный ток прекратится. Этому значению напряженности соответствует определенная *контактная разность потенциалов* ϕ_K и определенная ширина слоя L , в котором рекомбинировали подвижные носители зарядов.

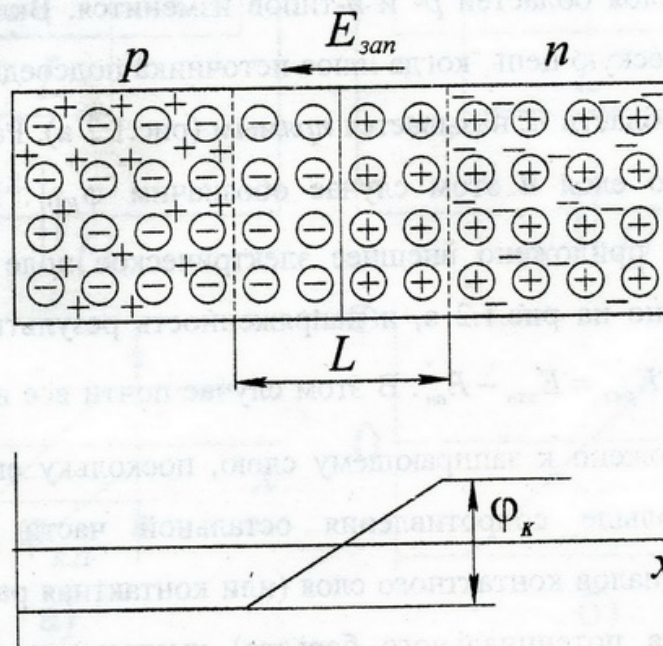


Рис.1.1. Электронно-дырочный переход и контактная разность потенциалов

Немного дополним общую картину. В p -области и n -области существуют еще и неосновные носители зарядов. Под действием напряженности

поля $E_{зан}$ неосновные носители начнут дрейфовать навстречу диффундирующим зарядам, возникает *дрейфовый ток*, направленный навстречу току диффузии. Величина дрейфового тока мала, так как мала концентрация неосновных носителей заряда. Динамическое равновесие наступит при равенстве диффузионного и дрейфового токов. При этом слой L сильно обеднен свободными носителями заряда, хотя и не лишен их полностью. С приближением к граничной плоскости обеднение слоя L носителями зарядов будет все более выраженным.

Ширина обедненного слоя связана с контактной разностью потенциалов, которая в свою очередь, зависит от выбора материалов и концентрации примесей. Чем выше контактная разность потенциалов, тем шире обедненный слой. У германия и кремния контактная разность потенциалов составляет десятые доли вольта ($\sim 0,3$ В и $\sim 0,6$ В соответственно), а ширина обедненного слоя – десятые и сотые доли микрометра.

Если к p - n -переходу подключить источник ЭДС, на клеммах которого будет напряжение U , то разность потенциалов на границах контактного (обедненного) слоя областей p - и n -типов изменится. Включение p - n -перехода в электрическую цепь, когда плюс источника подсоединяется к области p , а минус – к области n , называется *прямым* (рис.1.2 а). Разность потенциалов контактного слоя в этом случае обозначим $\varphi_{к.п}$. При этом к p - n -переходу будет приложено внешнее электрическое поле напряженностью $E_{вн}$, как показано на рис.1.2 а, и напряженность результирующего поля в переходе будет $E_{рез} = E_{зан} - E_{вн}$. В этом случае почти все внешнее напряжение будет приложено к запирающему слою, поскольку его сопротивление значительно больше сопротивления остальной части полупроводника. Разность потенциалов контактного слоя (или контактная разность потенциалов, или высота потенциального барьера) уменьшится и станет равной $\varphi_{к.п} = \varphi_{к} - U$, ширина его также уменьшится. Дрейфовый ток снизится, а диффузионный ток возрастет, в результате чего динамическое равновесие

нарушится и возникнет ток через p - n -переход. Этот ток называют *прямым током*, он совпадает с диффузионным.

Включение, при котором к области p подсоединен минус источника, а к области n – плюс, называется *обратным* (рис.1.2 б). Соответствующую разность потенциалов контактного слоя в этом случае обозначим $\varphi_{к.о}$. При этом $E_{рез} = E_{зан} + E_{вн}$. Разность потенциалов контактного слоя увеличится и станет равной $\varphi_{к.о} = \varphi_{к} + U$, ширина его также увеличится. Диффузионный ток уменьшится из-за противодействия электрического поля в запирающем слое. Дрейфовый ток увеличится благодаря увеличению разности потенциалов контактного слоя. Результирующий ток называют *обратным*, он совпадает с дрейфовым током.

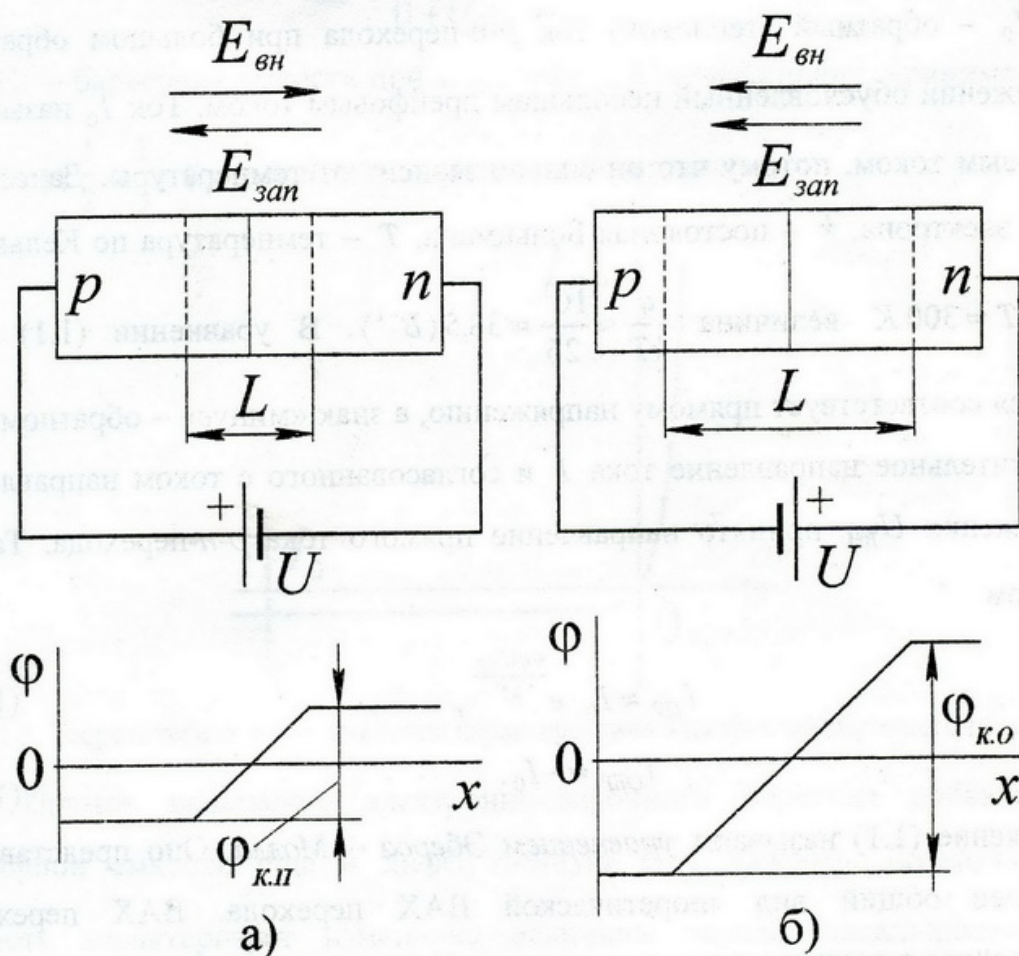


Рис.1.2. Прямое (а) и обратное (б) включения p - n -перехода

Напомним, что диффузионный ток создается основными носителями зарядов, а дрейфовый – неосновными. Так как концентрация основных

носителей заряда на несколько порядков выше концентрации неосновных носителей, прямой ток в сотни и тысячи раз превышает обратный. Таким образом, *p-n*-переход, включенный в прямом направлении, пропускает электрический ток, а включенный в обратном – не пропускает.

Напряжение, при котором через *p-n*-переход протекает *прямой* ток, называется *прямым (открывающим) напряжением*. Напряжение, при котором через *p-n*-переход протекает *обратный* ток, называется *обратным (затворающим или закрывающим) напряжением*. Теоретическая зависимость тока I через переход от подаваемого напряжения $U_{ВН}$ имеет вид

$$I = I_0 \left(e^{\frac{\pm q U_{ВН}}{kT}} - 1 \right), \quad (1.1)$$

где I_0 – обратный (тепловой) ток *p-n*-перехода при большом обратном напряжении обусловленный небольшим дрейфовым током. Ток I_0 называют тепловым током, потому что он сильно зависит от температуры. Далее q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – температура по Кельвину.

Для $T = 300 \text{ K}$ величина $\frac{q}{kT} \approx \frac{10^3}{26} \approx 38,5 \text{ (В}^{-1}\text{)}$. В уравнении (1.1) знак «плюс» соответствует прямому напряжению, а знак «минус» – обратному. За положительное направление тока I и согласованного с током направления напряжения $U_{ВН}$ принято направление прямого тока *p-n*-перехода. Таким образом

$$I_{ПР} \approx I_0 \cdot e^{\frac{+q U_{ПР}}{kT}}, \quad (1.2)$$

$$I_{ОБР} \approx -I_0. \quad (1.3)$$

Выражение (1.1) называют *уравнением Эберса – Молла*. Оно представляет наиболее общий вид теоретической ВАХ перехода. ВАХ перехода, построенная в соответствии с выражением (1.1), представлена на рис.1.3.

Поскольку в *p-n*-переходе и в областях, прилегающих к нему, присутствуют заряды (ионы, электроны и дырки), то это свидетельствует о

том, что переход обладает емкостью. Емкость $p-n$ -перехода состоит в свою очередь из двух емкостей – *барьерной емкости* и *диффузионной емкости*

$$C = C_{бар} + C_{диф}. \quad (1.4)$$

Барьерная емкость соответствует обратновключенному переходу, который можно рассматривать как обычный конденсатор, где пластинами служат границы обедненного слоя, а сам обедненный слой является несовершенным диэлектриком с увеличенными диэлектрическими потерями. При увеличении обратного напряжения ширина L обедненного перехода увеличивается, а барьерная емкость уменьшается. Зависимость барьерной емкости для малых переменных токов от обратного напряжения $U_{ОБР}$ описывается выражением

$$C_{бар} = \frac{C_0}{(1 + U_{ОБР}/\Phi_K)^\lambda}, \quad (1.5)$$

где C_0 – барьерная емкость при $U_{ОБР} = 0$; λ – коэффициент, принимающий значения $\frac{1}{2} \dots \frac{1}{3}$; Φ_K – контактная разность потенциалов.

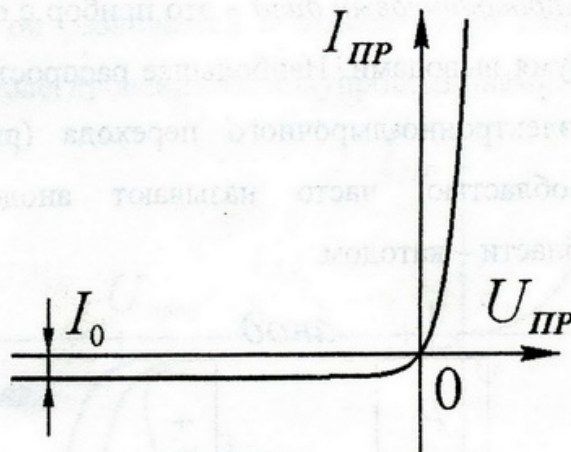


Рис.1.3. Теоретическая вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода

Прямое включение электронно-дырочного перехода добавляет к барьерной емкости еще и диффузионную $C_{диф}$ емкость. Диффузионная емкость характеризует изменение величины заряда, накапливаемого в обедненном слое за счет *инжекции*, при изменении прямого напряжения, так как последнее вызывает изменение неравновесной концентрации инжектированных носителей. *Инжекция носителей заряда* – это диффузионное введе-

ние при снижении высоты энергетического барьера носителей заряда через переход из областей, где они были основными, в области, где они становятся неосновными. Диффузионная емкость для малых переменных напряжений зависит от величины прямого тока $I_{пр}$ и времени жизни τ неравновесных носителей заряда:

$$C_{диф} = \frac{q}{kT} \tau \cdot I_{пр}. \quad (1.6)$$

Время жизни τ неравновесных носителей заряда зависит от материалов p - n -перехода. С ростом частоты диффузионная емкость уменьшается вследствие уменьшения накопления заряда в обедненном слое из-за инерционности передвижения носителей при быстром изменении напряжения.

По причине односторонней проводимости электронно-дырочный переход называют *выпрямляющим переходом*. Кроме электронно-дырочного перехода существуют и другие выпрямляющие переходы, например *переход Шотки*. На основе выпрямляющих переходов изготавливаются полупроводниковые диоды. *Полупроводниковый диод* – это прибор с одним выпрямляющим переходом и двумя выводами. Наибольшее распространение получили диоды на основе электронно-дырочного перехода (рис.1.4). Электрод, соединенный с p -областью, часто называют *анодом*, а электрод, подключенный к n -области – *катодом*.

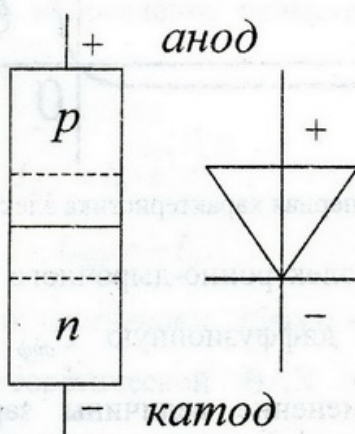


Рис.1.4. Условное обозначение полупроводникового диода и полярность прямого напряжения

Реальные вольт-амперные характеристики диода показаны на рис.1.5.

Эти кривые имеют следующие особенности. Во-первых, экспоненциальное увеличение прямого тока при увеличении прямого напряжения происходит только на начальном участке. Дальше ток через диод увеличивается по практически линейному закону. Это можно объяснить наличием объемных сопротивлений p - и n -областей полупроводника. Во-вторых, при большом обратном напряжении наблюдается резкий рост обратного тока через диод. Это явление называется *пробоем диода*. Различают *электрический* и *тепловой пробой*. Электрический пробой бывает *лавинным* и *туннельным*.

Если неосновные носители заряда (электроны и дырки) под действием электрического поля (созданным обратным напряжением) при движении через p - n -переход приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов полупроводника, то в переходе происходит лавинообразное увеличение носителей заряда, что приводит к резкому увеличению обратного тока при почти неизменном обратном напряжении (кривая 1 на рис.1.5). Такой вид электрического пробоя называют *лавинным пробоем*. Обычно он развивается в относительно широких p - n -переходах, образованных слаболегированными полупроводниками.

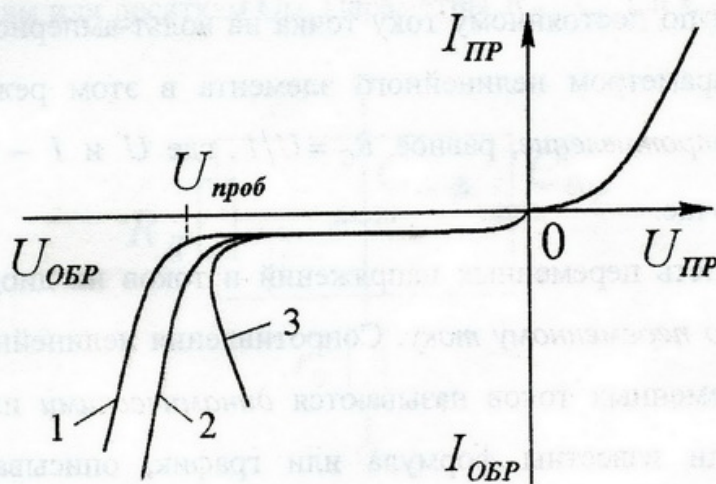


Рис.1.5. Реальные вольт-амперные характеристики диода

Туннельный пробой (кривая 2 на рис.1.5) возникает при большой напряженности электрического поля в тонком p - n -переходе между высоколегированными полупроводниками в результате туннельного перехода электронов.

Электрический пробой является обратимым. Обратимость заключается в том, что первоначальные свойства p - n -перехода полностью восстанавливаются, если отключить источник ЭДС от перехода. Благодаря этому оба вида электрического пробоя используются в качестве рабочих режимов в полупроводниковых диодах.

Если температура p - n -перехода возрастает в результате его нагрева обратным током и недостаточно теплоотвода, то усиливается процесс генерации пар носителей заряда. Это в свою очередь приводит к дальнейшему нагреву p - n -перехода и увеличению обратного тока, что может вызвать разрушение перехода. Такой процесс называют *тепловым пробоем*. Очевидно, что допустимое обратное напряжение на переходе зависит от условий теплоотвода. Для теплового пробоя характерен участок отрицательного сопротивления обратной ветви ВАХ p - n -перехода (кривая 3 на рис.1.5). Тепловой пробой необратим, поэтому этот режим не допускается при эксплуатации полупроводниковых приборов.

Совокупность постоянных напряжений и токов на диоде определяет *режим диода по постоянному току*. *Рабочей точкой* называется соответствующая режиму по постоянному току точка на вольт-амперной характеристике диода. Параметром нелинейного элемента в этом режиме является *статическое сопротивление*, равное $R_C = U/I$, где U и I – напряжение и ток в рабочей точке.

Совокупность переменных напряжений и токов на диоде определяет *режим диода по переменному току*. Сопротивления нелинейных элементов для малых переменных токов называются *динамическими* или *дифференциальными*. Если известны формула или график, описывающие вольт-амперную характеристику диода, то дифференциальное сопротивление вычисляют, определяя производную в рабочей точке:

$$R_D = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Графическое определение дифференциального сопротивления R_D диода в

рабочей точке В показано на рис.1.6.

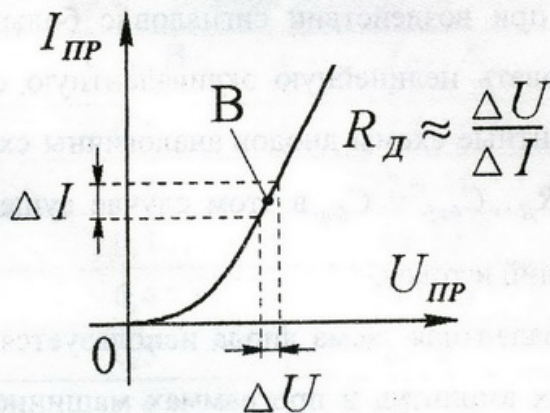


Рис.1.6. Графическое определение дифференциального сопротивления

Между переменными токами и напряжениями на диоде существует практически линейная зависимость только в том случае если амплитуды переменных напряжений меньше 0,1 вольта. Такие напряжения и токи называют малыми. При малых переменных токах и напряжениях используется линейная эквивалентная схема диода, показанная на рис.1.7. Здесь R_D – дифференциальное сопротивление диода, $C_{диф}$ и $C_{бар}$ – диффузионная и барьерная емкости, r_0 – объемное сопротивление p - и n - областей полупроводника, равное единицам или десяткам Ом. Параметры R_D , $C_{диф}$ и $C_{бар}$ существенно

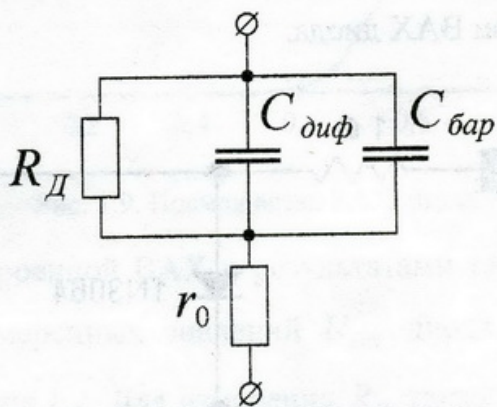


Рис.1.7. Линейная эквивалентная схема диода

зависят от величины и полярности постоянного напряжения, приложенного к диоду. Емкости диода на низких частотах можно не учитывать.

Между переменными токами и напряжениями на диоде существует нелинейная зависимость, если амплитуды напряжений больше 0,1 вольта. В

этом случае диоды считаются *нелинейными элементами*. Для расчета цепей, содержащих диоды, при воздействии сигналов с большими амплитудами необходимо использовать нелинейную эквивалентную схему. Простейшие нелинейные эквивалентные схемы диодов аналогичны схеме, показанной на рис.1.7. Параметры R_d , $C_{диф}$ и $C_{бар}$ в этом случае существенно зависят от переменных напряжений и токов.

Линейная эквивалентная схема диода используется при расчете цепей методом комплексных амплитуд в программах машинного моделирования. Нелинейные эквивалентные схемы диодов используются при анализе режимов, как по постоянному, так и по переменному токам при воздействии сигналов с большими амплитудами в программах машинного моделирования.

Пример 1.

Проведем исследования характеристик и параметров диода 1N3064, взятого из библиотеки National программы EWB. Для измерения прямой ветви вольт-амперной характеристики диода соберем схему, как показано на рис. 1.8. Изменяя величину тока источника тока I_1 , так чтобы при прямом токе напряжение на вольтметре V_1 изменялось от 0 до 1 вольта, проведем измерения прямой ветви ВАХ диода.

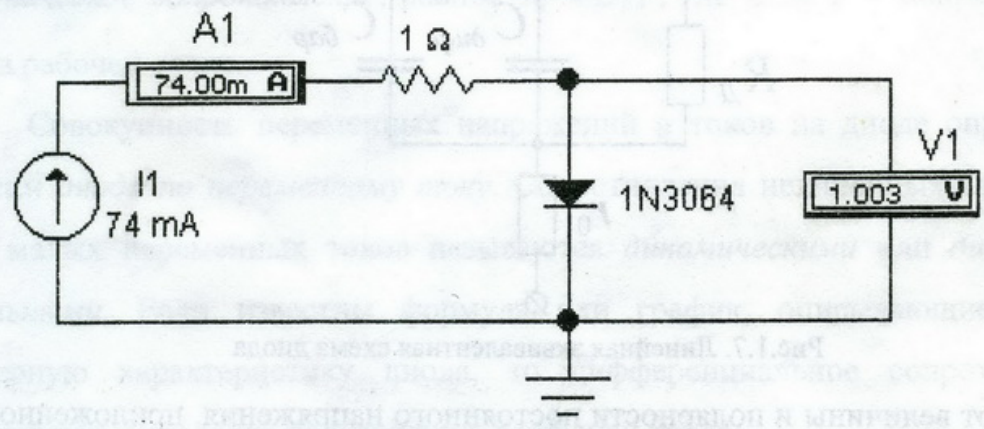


Рис. 1.8. Схема для измерения ВАХ диода

Результаты измерения сведем в таблицу 1.1. Прямая ветвь ВАХ диода, построенная по результатам измерений, изображена на рис. 1.9.

Таблица 1.1 – Результаты измерения прямой ветви ВАХ диода

$U_{пр}, В$	$I_{пр}, А$
0,1	$11,2 \cdot 10^{-9}$
0,2	$22,6 \cdot 10^{-9}$
0,3	$44 \cdot 10^{-9}$
0,4	$570 \cdot 10^{-9}$
0,5	$25 \cdot 10^{-6}$
0,6	$1,03 \cdot 10^{-3}$
0,7	$10,7 \cdot 10^{-3}$
0,8	$29,3 \cdot 10^{-3}$
0,9	$50,7 \cdot 10^{-3}$
1,0	$73,4 \cdot 10^{-3}$

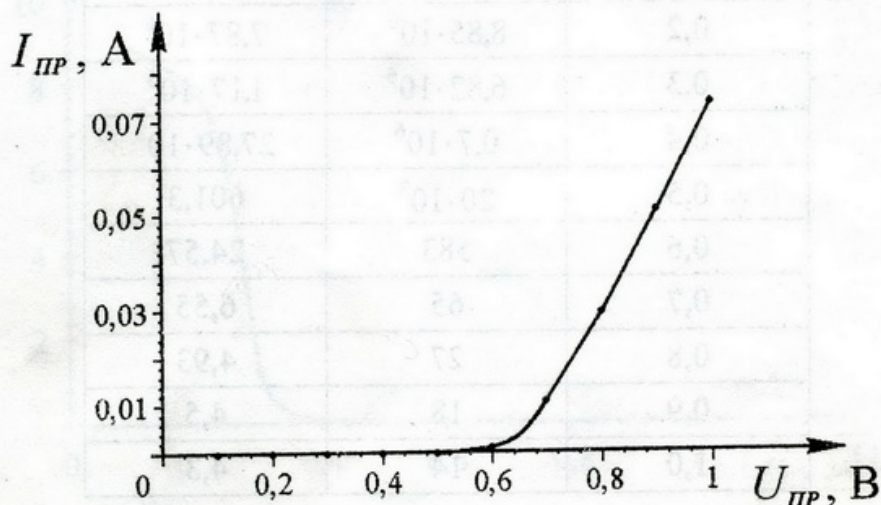


Рис. 1.9. Прямая ветвь ВАХ диода

Пользуясь построенной ВАХ и результатами таблицы 1.1, рассчитаем значения R_C для измеренных значений $U_{пр}$ диода. Результаты расчетов представлены в таблице 1.2. Для измерения R_D также воспользуемся схемой рис.1.8. Это можно сделать, например, следующим образом. Будем изменять величину тока источника тока I_1 , так чтобы при прямом токе напряжение на вольтметре V_1 приняло значение 0,05 В. Ток источника тока I_1 при этом равен $5,6 \cdot 10^{-9}$ А. Снова изменим величину тока источника тока I_1 , так чтобы

при прямом токе напряжение на вольтметре V1 приняло значение 0,15 В. Ток источника тока I1 при этом равен $16,9 \cdot 10^{-9}$ А. Тогда $\Delta U = 0,15 - 0,05 = 0,1$ В, а $\Delta I = (16,9 - 5,6) \cdot 10^{-9} = 11,3 \cdot 10^{-9}$ А. Отсюда легко найти значение R_D для величины U_{PP} равной 0,1 В

$$R_D = \Delta U / \Delta I = 8,85 \cdot 10^6 \text{ Ом.}$$

Подобным образом находим значения R_D для величин U_{PP} равных 0,2...1,0 вольта. Заметим, что ΔU не должна превышать 0,1 вольта, поскольку между

Таблица 1.2 – Статическое и дифференциальное сопротивление диода

$U_{PP}, \text{ В}$	$R_C, \text{ Ом}$	$R_D, \text{ Ом}$
0,1	$8,93 \cdot 10^6$	$8,85 \cdot 10^6$
0,2	$8,85 \cdot 10^6$	$7,87 \cdot 10^6$
0,3	$6,82 \cdot 10^6$	$1,17 \cdot 10^6$
0,4	$0,7 \cdot 10^6$	$27,89 \cdot 10^3$
0,5	$20 \cdot 10^3$	601,3
0,6	583	24,57
0,7	65	6,55
0,8	27	4,93
0,9	18	4,5
1,0	14	4,3

переменными токами и напряжениями на диоде существует нелинейная зависимость, если амплитуды напряжений больше 0,1 вольта. Результаты расчетов R_D приведены в таблице 1.2. Построим зависимости $R_C(U_{\text{дио́да}})$ и $R_D(U_{\text{дио́да}})$, где $U_{\text{дио́да}}$ – напряжение на диоде (рис. 1.10).

Оценим барьерную и диффузионную емкости. Для этого соберем схему, как показано на рис.1.11. Как видно из рис.1.11, при $U_{dc} = U_{PP} = 0,7$ В $R_C = 700/10,76 = 65$ Ом, а $R_D = 46,35/7,215 = 6,42$ Ом для малого переменного напряжения U_{ac} на диоде и частоты $f = 100$ Гц сигнала $e(t)$, что с хорошей точностью совпадает с результатами, полученными выше

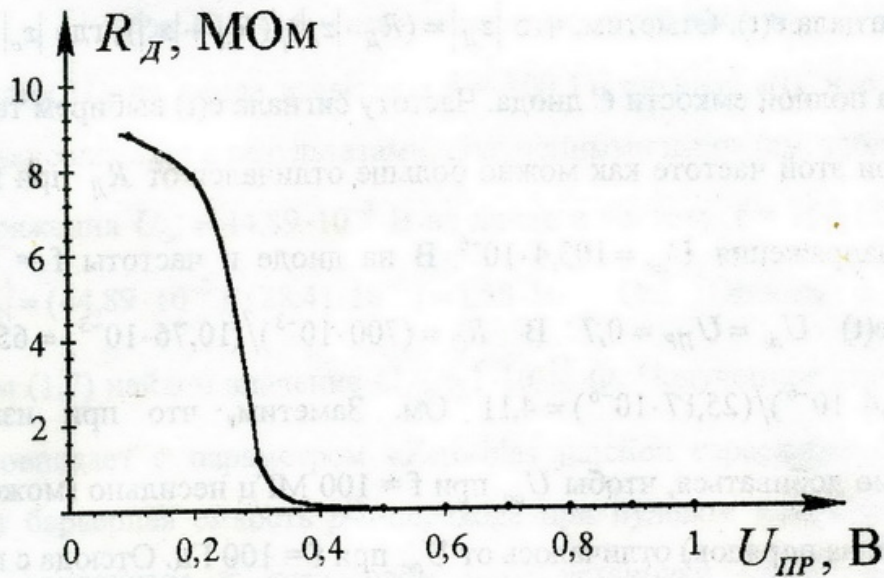
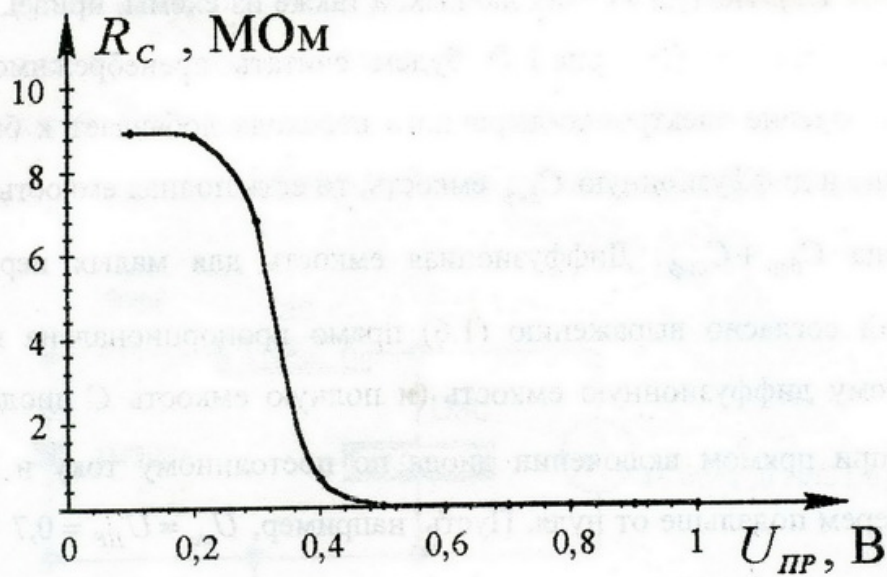


Рис. 1.10. Статическое и дифференциальное сопротивление диода

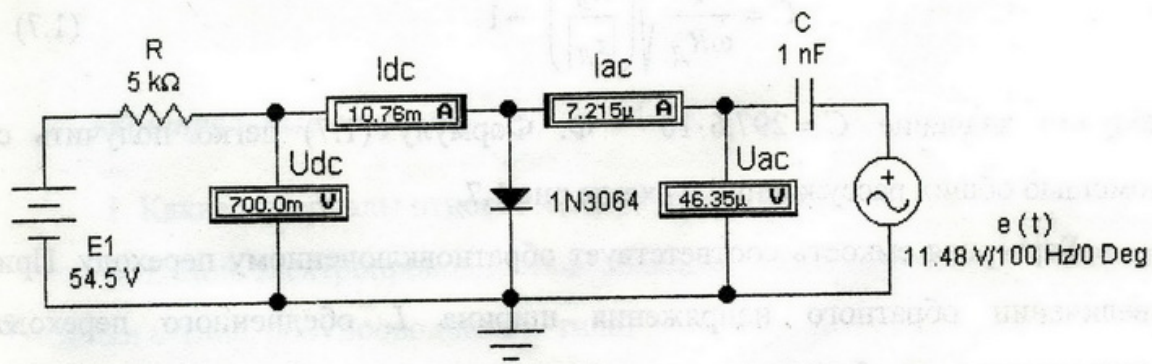


Рис.1.11. Схема для измерения барьерной и диффузионной емкостей

(см. таблицу 1.2). Исходя из этих данных, а также из схемы, приведенной на рис.1.7, величину r_0 (см. рис.1.7) будем считать пренебрежимо малой. Прямое включение электронно-дырочного перехода добавляет к барьерной емкости еще и диффузионную $C_{диф}$ емкость, то есть полная емкость C диода будет равна $C_{бар} + C_{диф}$. Диффузионная емкость для малых переменных напряжений согласно выражению (1.6) прямо пропорциональна величине $I_{ПР}$. Поэтому диффузионную емкость (и полную емкость C диода) будем измерять при прямом включении диода по постоянному току и рабочую точку выберем подальше от нуля. Пусть, например, $U_{dc} = U_{ПР} = 0,7$ В. Тогда с помощью схемы рис.1.11 измерим $|z_D|$ (см. рис.1.7) при какой-либо другой частоте сигнала $e(t)$. Отметим, что $|z_D| = (R_D \cdot |z_c|) / (R_D + |z_c|)$, где $|z_c|$ - модуль импеданса полной емкости C диода. Частоту сигнала $e(t)$ выберем такой, чтобы $|z_D|$ при этой частоте как можно больше отличался от R_D при $f=100$ Гц. Так для напряжения $U_{ac} = 103,4 \cdot 10^{-6}$ В на диоде и частоты $f = 100$ МГц сигнала $e(t)$ $U_{dc} = U_{ПР} = 0,7$ В $R_C = (700 \cdot 10^{-3}) / (10,76 \cdot 10^{-3}) = 65$ Ом, а $|z_D| = (103,4 \cdot 10^{-6}) / (25,17 \cdot 10^{-6}) = 4,11$ Ом. Заметим, что при измерениях необходимо добиваться, чтобы U_{ac} при $f = 100$ МГц несильно (может быть в разы, но не на порядок) отличалось от U_{ac} при $f = 100$ Гц. Отсюда с помощью формулы (1.7)

$$C = \frac{1}{\omega R_D} \sqrt{\left(\frac{R_D}{|z_D|}\right)^2 - 1} \quad (1.7)$$

получим значение $C = 297,6 \cdot 10^{-12}$ Ф. Формулу (1.7) легко получить с помощью общих рассуждений и схемы рис.1.7.

Барьерная емкость соответствует обратновключенному переходу. При увеличении обратного напряжения ширина L обедненного перехода увеличивается, а барьерная емкость уменьшается. Поэтому барьерную

емкость будем измерять, когда рабочая точка находится в нуле, поскольку, как следует из формулы (1.5), в этом случае барьерная емкость будет максимальной. Для этого будем использовать схему рис.1.12. Как видно из рис.1.12, $R_D = (45 \cdot 10^{-3}) / (0,005 \cdot 10^{-6}) = 9 \cdot 10^6$ Ом для малого переменного

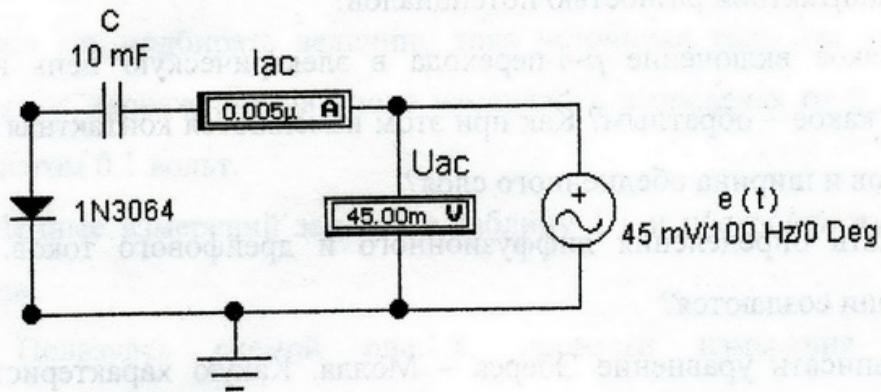


Рис.1.12. Схема для измерения барьерной емкости

напряжения U_{ac} на диоде и частоты $f = 100$ Гц сигнала $e(t)$, что с хорошей точностью совпадает с результатами, полученными выше (см. таблицу 1.2). А для напряжения $U_{ac} = 44,89 \cdot 10^{-3}$ В на диоде и частоты $f = 100$ МГц сигнала $e(t)$ $|z_D| = (44,89 \cdot 10^{-3}) / (28,41 \cdot 10^{-6}) = 1,58 \cdot 10^3$ Ом. Отсюда с помощью формулы (1.7) найдем значение $C_{бар} = 1 \cdot 10^{-12}$ Ф. Полученное значение $C_{бар}$, точно совпадает с параметром «Zero-bias junction capacitance (CJ0)» (что означает барьерная емкость $p-n$ -перехода при нулевом напряжении) диода 1N3064, указанным в диалоговом окне установки параметров диодов. Отсюда, зная значения $C_{бар} + C_{диф}$ и $C_{бар}$, получим $C_{диф} = 296,6 \cdot 10^{-12}$ Ф.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы относят к полупроводникам?
2. Какой электропроводностью обладают i -полупроводники, полупроводники n -типа, полупроводники p -типа?
3. Какие полупроводники называют примесными?

4. Дать определения основных и неосновных носителей зарядов в полупроводниках.

5. Что называют электронно-дырочным переходом?

6. Какое поле называют запирающим, как оно образуется? Что называют контактной разностью потенциалов?

7. Какое включение *p-n*-перехода в электрическую цепь называют прямым, а какое – обратным? Как при этом изменяются контактная разность потенциалов и ширина обедненного слоя?

8. Дать определения диффузионного и дрейфового токов. Какими зарядами они создаются?

9. Записать уравнение Эберса – Молла. Какую характеристику оно представляет?

10. Какая емкость соответствует прямому включению электронно-дырочного перехода, а какая – обратному включению?

11. Что называют инжекцией носителей заряда?

12. Что называют полупроводниковым диодом? Привести условное обозначение полупроводникового диода.

13. Какое явление называют пробоем диода? Перечислить виды пробоев. Привести реальные ВАХ диода.

14. Объяснить механизм лавинного пробоя диода.

15. Какие виды пробоя используются в качестве рабочих режимов в полупроводниковых диодах?

16. Привести определения режима диода по постоянному току и рабочей точки.

17. Привести определение режима диода по переменному току.

18. Дать определения статического и дифференциального сопротивлений диода.

19. Нарисовать линейную эквивалентную схему диода.

20. Вывести формулу (1.7), используя схему рис.1.7 и полагая $r_0 = 0$.

Программа лабораторной работы

1. Получить у преподавателя диод для проведения исследований.
2. Собрать в программной среде EWB схему рис.1.8 и провести измерения прямой ветви ВАХ полученного диода. При измерениях необходимо так подбирать величину тока источника тока (см. пример 1), чтобы прямое напряжение на диоде изменялось в пределах от 0 до одного вольта с шагом 0,1 вольт.
3. Данные измерений занести в таблицу 1.1 и построить измеренную ВАХ диода.
4. Пользуясь схемой рис.1.8, провести измерения значений дифференциального сопротивления R_D (см. пример 1).
5. Пользуясь данными пункта 2 программы лабораторной работы рассчитать значения статического сопротивления R_C .
6. Полученные значения R_D , R_C и $U_{пр}$ свести в таблицу 1.2 (см. пример 1), и построить графики зависимостей $R_C(U_{пр})$, $R_D(U_{пр})$.
7. Собрать схему рис.1.11 и, согласно приведенному выше примеру, провести оценку емкости $C = C_{бар} + C_{диф}$ диода для значения напряжения $U_{пр} = 0,7$ В.
8. Пользуясь схемой рис.1.11, провести измерения зависимости $C(U_{пр})$. Полученные данные оформить в виде таблицы 1.3 и построить график зависимости $C(U_{пр})$.
9. Собрать схему рис.1.12 и, согласно приведенному выше примеру, провести оценку емкости $C_{бар}$ диода для значения напряжения $U_{пр} = 0$ В.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему измерений прямой ветви ВАХ диода, таблицу результатов измерений (таблица 1.1), график измеренной прямой ветви ВАХ диода.

2. Таблицу результатов измерений и расчетов дифференциального и статического сопротивлений диода (таблица 1.2), графики зависимостей $R_C(U_{ПР}), R_D(U_{ПР})$.

3. Схему измерений и результаты оценки емкости $C = C_{бар} + C_{диф}$ диода для значения напряжения $U_{ПР} = 0,7$ В.

4. Таблицу результатов измерений (таблица 1.3) и график измеренной зависимости $C(U_{ПР})$.

5. Схему измерений и результаты оценки емкости $C_{бар}$ диода для значения напряжения $U_{ПР} = 0$ В.

Задачи для самостоятельного решения

Согласно программе лабораторной работы провести исследования следующих диодов. Диод выбирается из библиотеки National (группа 1) или из библиотеки General (группа 2), причем номер варианта совпадает с порядковым номером диода в списке.

Лабораторная работа № 2

Стабилитрон

Цель работы: изучить основные свойства и параметры полупроводниковых стабилитронов; освоить методику исследования вольт - амперных характеристик стабилитронов и методику расчета простейших схем стабилизаторов напряжения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Стабилитроном называется прибор, который предназначен для стабилизации напряжения на присоединенной параллельно ему нагрузке в случае изменения сопротивления этой нагрузки или величины напряжения питания. При этом используется участок пробоя на обратной ветви ВАХ стабилитрона, где значительному изменению тока соответствует очень малое изменение напряжения. Напряжение стабилизации зависит от толщины электронно-дырочного перехода, а толщина – от величины удельного сопротивления материала. Низкоомные материалы используются при изготовлении стабилитронов для стабилизации малых напряжений. При напряжениях ниже ~6 В в электронно-дырочных переходах часто наблюдается только туннельный вид пробоя. В промежутке от 6 до 8 В имеют место процессы как туннельного, так и лавинного механизмов пробоя, а в диапазоне 8...200 В – только лавинного.

Условные обозначения и ВАХ стабилитрона показаны на рис.2.1. Видно, что напряжение стабилизации несколько отличается от напряжения электрического пробоя, так как в реальном стабилитроне переход от области пробоя к рабочей точке происходит не резко, а с некоторым наклоном. Поэтому для конкретного определения напряжения стабилизации нужно задаться необходимой величиной рабочего тока. Определенному изменению тока относительно рабочей точки соответствует определенное изменение напряжения. Чем меньше величина изменения напряжения, тем выше качество стабилизации. Качество стабилизации определяется дифференциальным сопротивлением: $R_{д} = dU/dI \approx \Delta U/\Delta I$.

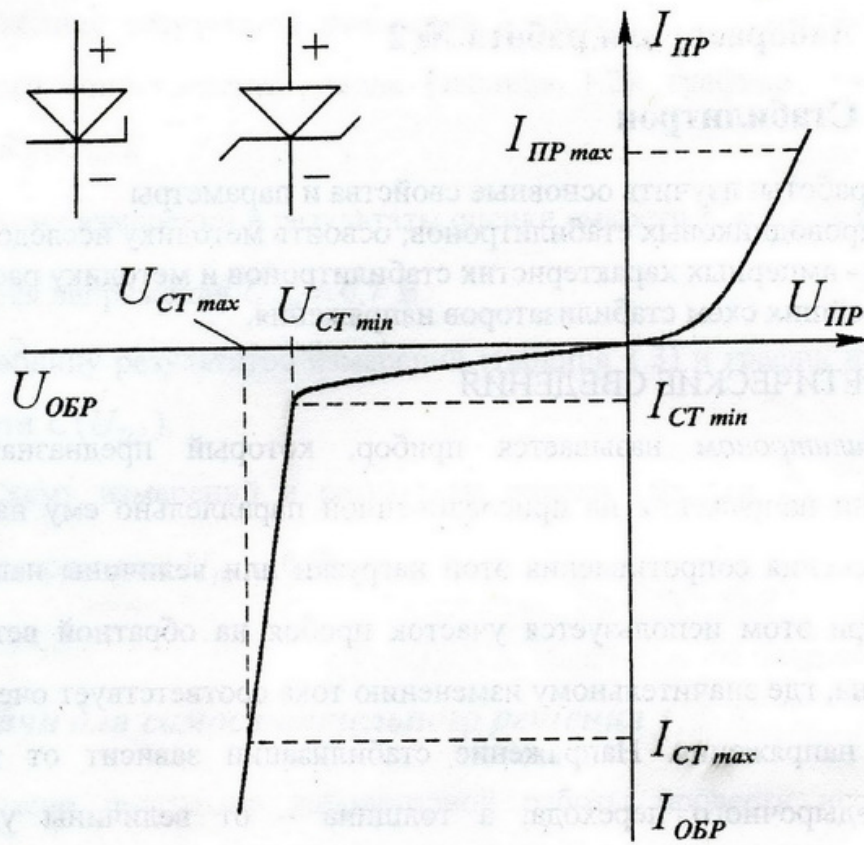


Рис.2.1. Условные обозначения стабилитрона (слева – по ГОСТ), полярность прямого напряжения и вольт-амперная характеристика стабилитрона

Основные параметры стабилитронов:

- минимальное и максимальное напряжения стабилизации $U_{ST\ min}$, $U_{ST\ max}$;
- минимальный и максимальный токи стабилизации $I_{ST\ min}$, $I_{ST\ max}$;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации

$$TKH = \frac{\Delta U_{ST}}{\Delta T} \frac{100}{U_{ST}}, \left[\frac{\%}{град} \right];$$

- дифференциальное сопротивление в рабочей точке $R_D \approx \Delta U / \Delta I$;
- статическое сопротивление в рабочей точке $R_C = U / I$, где U и I – напряжение и ток в рабочей точке;
- коэффициент качества $Q = R_D / R_C$.

Стабилитроны используются, например, в источниках питания радиоэлектронной аппаратуры, компьютеров для создания высокостабильных

напряжений питания транзисторов, микропроцессоров, микросхем на материнской плате, устройств внешней памяти и тому подобное. Устройство, поддерживающее с определенной точностью неизменным напряжение на нагрузке, называют *стабилизатором напряжения*. Изменение напряжения на нагрузке может быть вызвано различными причинами: колебаниями напряжения первичного источника питания (сети переменного напряжения, аккумулятора, гальванического элемента), изменением нагрузки, изменением температуры окружающей среды и др.

По принципу работы стабилизаторы подразделяют на параметрические и компенсационные. Параметрические стабилизаторы бывают однокаскадными, многокаскадными и мостовыми. Компенсационные стабилизаторы могут быть с непрерывным или импульсным регулированием; и те и другие могут быть последовательного или параллельного типа. В настоящей лабораторной работе будут рассмотрены только простейшие однокаскадные параметрические стабилизаторы.

Параметрические стабилизаторы осуществляют стабилизацию напряжения за счет изменения параметров полупроводниковых приборов: стабилитронов, стабилитронов, транзисторов и др. Изменяемым параметром полупроводниковых стабилизаторов напряжения является их сопротивление или проводимость.

Схема простейшего стабилизатора с использованием стабилитрона приведена на рис.2.2. Дополнительный резистор $R_{доп}$ является гасящим и одновременно задает рабочую точку. При изменении сопротивления нагрузки R_H или входного напряжения $U_{вх}$ падение напряжения на резисторе $R_{доп}$ происходит таким образом, что напряжение $U_H = U_{ст}$ на нагрузке R_H остается практически постоянным. Отметим, что рабочий режим стабилитрона обеспечивается подачей на стабилитрон не прямого, а обратного напряжения.

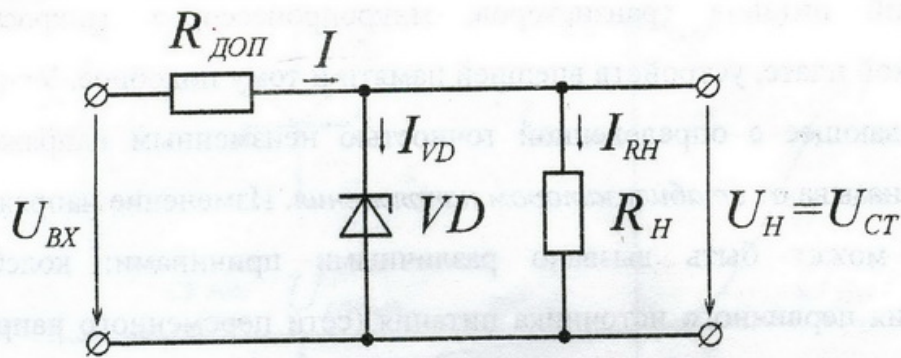


Рис.2.2. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Принцип работы параметрического стабилизатора удобно объяснить с помощью рис.2.3. На этом рисунке изображены обратная ветвь ВАХ полупроводникового стабилитрона и ВАХ дополнительного резистора $R_{доп}$ (прямая 1), позволяющие графически решить уравнение электрического состояния цепи параметрического стабилизатора напряжения:

$$U_{ВХ1} = U_{СТ1} + R_{доп} I_{СТ1} \text{ при } R_H = \infty.$$

Если напряжение $U_{ВХ1}$, подаваемое на вход параметрического стабилизатора, увеличится на величину $\Delta U_{ВХ}$, то ВАХ дополнительного резистора $R_{доп}$ переместится параллельно самой себе и займет положение прямой 2, что будет соответствовать току $I_{СТ2}$ и напряжению на стабилитроне $U_{СТ2}$. Из рис.2.3 видно, что напряжение $U_{СТ}$ практически не изменится. Напряжение на стабилитроне практически не изменится также при снижении входного напряжения стабилизатора и при изменениях тока через нагрузку. Для обеспечения нормальной работы параметрического стабилизатора необходимо соблюдать условия, при которых ток стабилитрона не будет выходить за пределы рабочего диапазона $I_{СТ \min} \div I_{СТ \max}$. Величину сопротивления резистора $R_{доп}$ выбирают так, чтобы его ВАХ (см. рис.2.3) пересекала ВАХ стабилитрона в точке В, соответствующей току

$$I_{СТ} = \frac{I_{СТ \min} + I_{СТ \max}}{2}. \quad (2.1)$$

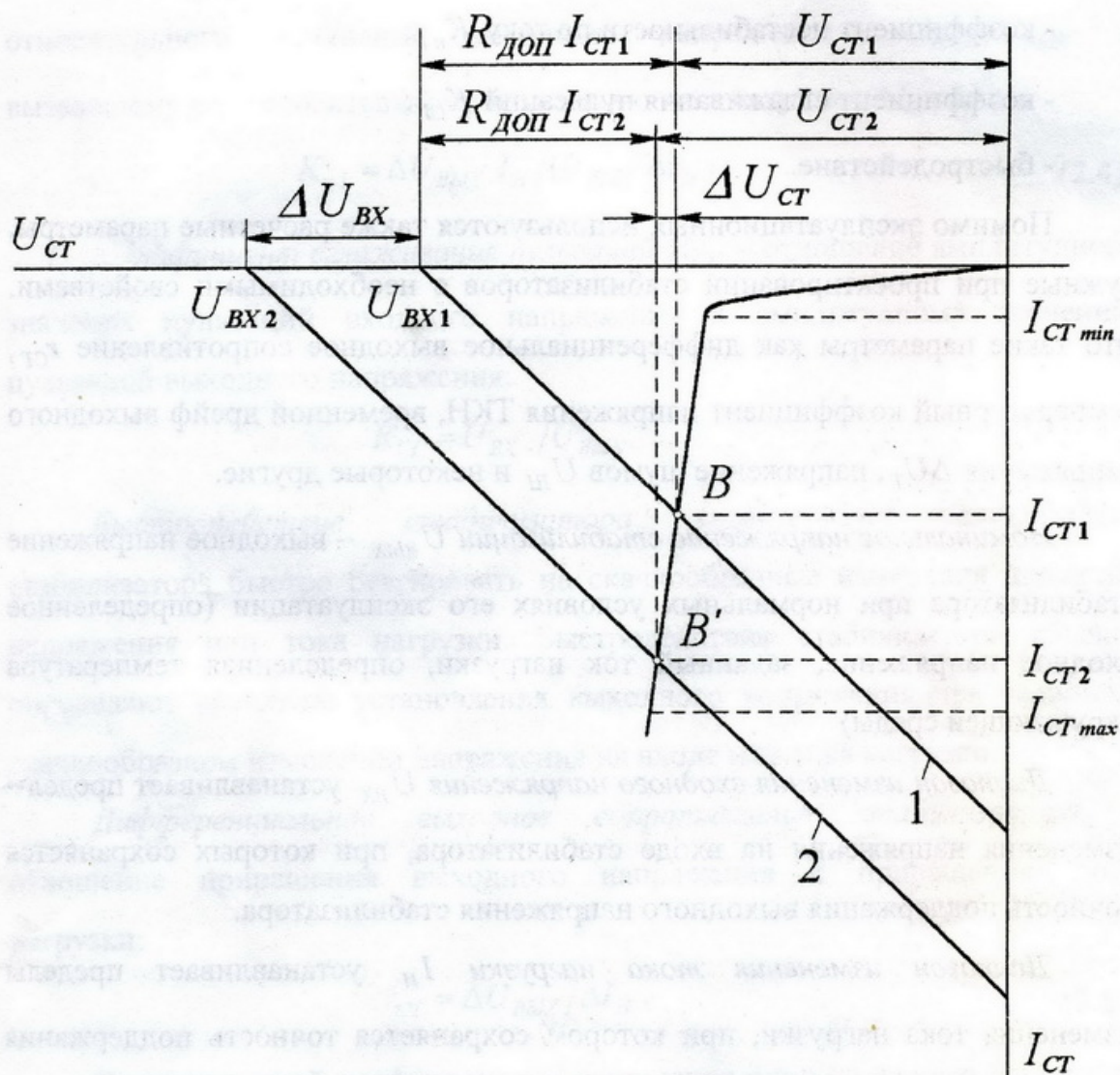


Рис.2.3. К объяснению принципа работы параметрического стабилизатора напряжения

Качество работы стабилизаторов напряжения характеризуется набором определенных параметров. Параметры стабилизаторов позволяют сравнивать их по качеству работы и выбирать те, которые соответствуют требованиям эксплуатации электронных устройств. К таким параметрам относят:

- номинальное выходное напряжение $U_{ВЫХ}$;
- диапазон изменения входного напряжения $U_{ВХ \min}$ и $U_{ВХ \max}$;
- диапазон изменения тока нагрузки $I_{Н \min}$ и $I_{Н \max}$;
- коэффициент полезного действия $\eta_{СТ}$;

- коэффициент неустойчивости по напряжению $K_{нU}$;
- коэффициент неустойчивости по току $K_{нI}$;
- коэффициент сглаживания пульсаций K_{CT} ;
- быстродействие.

Помимо эксплуатационных используются также расчетные параметры, нужные при проектировании стабилизаторов с необходимыми свойствами. Это такие параметры как дифференциальное выходное сопротивление r_{CT} , температурный коэффициент напряжения ТКН, временной дрейф выходного напряжения ΔU_T , напряжение шумов $U_{ш}$ и некоторые другие.

Номинальное напряжение стабилизации $U_{ВЫХ}$ – выходное напряжение стабилизатора при нормальных условиях его эксплуатации (определенное входное напряжение, заданный ток нагрузки, определенная температура окружающей среды)

Диапазон изменения входного напряжения $U_{ВХ}$ устанавливает пределы изменения напряжения на входе стабилизатора, при которых сохраняется точность поддержания выходного напряжения стабилизатора.

Диапазон изменения тока нагрузки I_H устанавливает пределы изменения тока нагрузки, при котором сохраняется точность поддержания выходного напряжения стабилизатора.

Коэффициент полезного действия стабилизатора η_{CT} – отношение мощности, отдаваемой в нагрузку P_H , к мощности $P_{ПОТ}$, потребляемой от первичного источника питания:

$$\eta_{CT} = P_H / P_{ПОТ}. \quad (2.2)$$

Коэффициент неустойчивости по напряжению $K_{нU}$ – отношение относительного изменения напряжения на выходе стабилизатора $\Delta U_{ВЫХ} / U_{ВЫХ}$ к вызвавшему его изменению входного напряжения $\Delta U_{ВХ}$:

$$K_{нU} = \Delta U_{ВЫХ} / (U_{ВЫХ} \Delta U_{ВХ}). \quad (2.3)$$

Коэффициент нестабильности по току K_{HI} – отношение относительного изменения выходного напряжения $\Delta U_{ВЫХ}/U_{ВЫХ}$ к вызвавшему его относительному изменению тока нагрузки $\Delta I_H/I_H$:

$$K_{HI} = \Delta U_{ВЫХ} I_H / (U_{ВЫХ} \Delta I_H). \quad (2.4)$$

Коэффициент сглаживания пульсаций K_{CG} – отношение амплитудного значения пульсаций входного напряжения к амплитудному значению пульсаций выходного напряжения:

$$K_{CG} = U_{ВХ\sim} / U_{ВЫХ\sim}. \quad (2.5)$$

Быстродействие стабилизатора характеризует способность стабилизатора быстро реагировать на скачкообразные изменения входного напряжения или тока нагрузки. Быстродействие стабилизатора обычно определяют временем установления выходного напряжения при заданном скачкообразном изменении напряжения на входе или тока нагрузки.

Дифференциальное выходное сопротивление стабилизатора – отношение приращения выходного напряжения к приращению тока нагрузки:

$$r_{CT} = \Delta U_{ВЫХ} / \Delta I_H. \quad (2.6)$$

Температурный коэффициент – отношение относительного изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению температуры окружающей среды:

$$TKH = 100 \Delta U_{ВЫХ} / (\Delta T U_{ВЫХ}), [\% / \text{град}].$$

Система параметров, приведенная выше, достаточно полно отражает функциональные свойства стабилизатора напряжения любого типа независимо от его схемы и конструкции.

В зависимости от точности поддержания выходного напряжения на нагрузке стабилизаторы бывают:

- прецизионные (изменение напряжения не более 0,005 %);
- точные (изменение напряжения от 0,01 до 0,005 %);

- средней точности (изменение напряжения от 0,1 до 0,01 %);
- низкой точности (изменение напряжения от 1 до 0,1 %).

Для получения наивысшей точности поддержания выходного напряжения в прецизионных стабилизаторах используются специальные устройства, которые исключают влияние изменения температуры окружающей среды (термостаты или криостаты).

По выходной мощности стабилизаторы обычно подразделяются следующим образом:

- маломощные (до 1 Вт);
- средней мощности (до 250 Вт);
- большой мощности (свыше 250 Вт).

Маломощные стабилизаторы используются в цифровой (например, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи) и измерительной технике. Стабилизаторы средней мощности используются для питания, например, малых ЭВМ и маломощных электронных устройств. Мощные стабилизаторы применяются для питания электронных микроскопов, лазерных установок, серверов и др.

Пример 2.

Проведем исследования некоторых из основных параметров стабилизатора 1N4370A, взятого из библиотеки Motor_1n программы EWB. А также рассчитаем рабочий режим параметрического стабилизатора напряжения рис.2.2, где будет использован указанный стабилизатор, и определим некоторые из основных параметров этого стабилизатора напряжения.

Чтобы выполнить поставленную задачу, вначале необходимо провести измерения вольт – амперной характеристики указанного стабилизатора. Затем определить рабочую точку параметрического стабилизатора напряжения. Далее найти статическое и дифференциальное сопротивления стабилизатора в рабочей точке, подсчитать коэффициент качества. И уж только потом можно определять основные параметры стабилизатора напряжения.

Для измерения вольт–амперной характеристики стабилитрона соберем схему как показано на рис. 2.4. Изменяя величину и направление тока источника тока I_1 , так чтобы при прямом токе напряжение на вольтметре V_1 изменялось от нуля до 1,2 вольта, а при обратном токе напряжение на вольтметре V_1 изменялось от нуля до *некоторого отрицательного значения*, проведем измерения ВАХ стабилитрона.

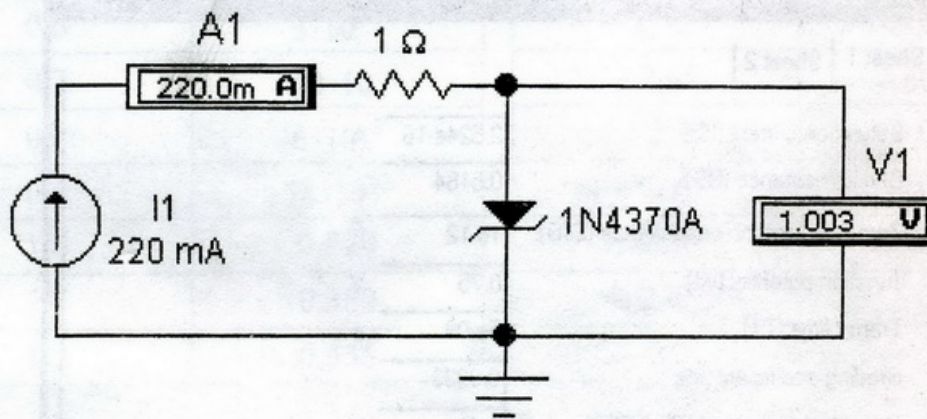


Рис. 2.4. Схема для измерения прямой ветви ВАХ стабилитрона

Поскольку в программе EWB 5.0 в параметрах моделей стабилитронов не предусмотрено значение $I_{CT\max}$ (т.е. стабилитроны не «горят» при превышении определенных значений I_{CT} в зависимости от типа стабилитрона), то под *некоторым отрицательным значением* напряжения, в данном случае, будем подразумевать величину отрицательного напряжения, падающего на стабилитроне, при протекании через него обратного тока равного значению $\sim 10 I_{CT\min}$. На рис.2.5 показано диалоговое окно с параметрами стабилитрона 1N4370A, взятого из библиотеки Motor_1n программы EWB. Здесь «Zener test voltage at IZT (VZT)» – минимальное напряжение стабилизации $U_{CT\min}$, а «Zener test current (IZT)» – минимальный ток стабилизации $I_{CT\min}$.

На рис.2.4 источник тока I_1 обеспечивает протекание прямого тока через стабилитрон. На рис.2.6 источник тока I_1 обеспечивает протекание обратного тока через стабилитрон.

Результаты измерения сведем в таблицу 2.1. ВАХ стабилитрона, построенная по результатам проведенных измерений, изображена на рис. 2.7. Для получения более точной ВАХ стабилитрона (особенно при нахождении параметра $U_{CT\ min}$) на некоторых участках этой ВАХ необходимо использовать более мелкий шаг изменения величины U .

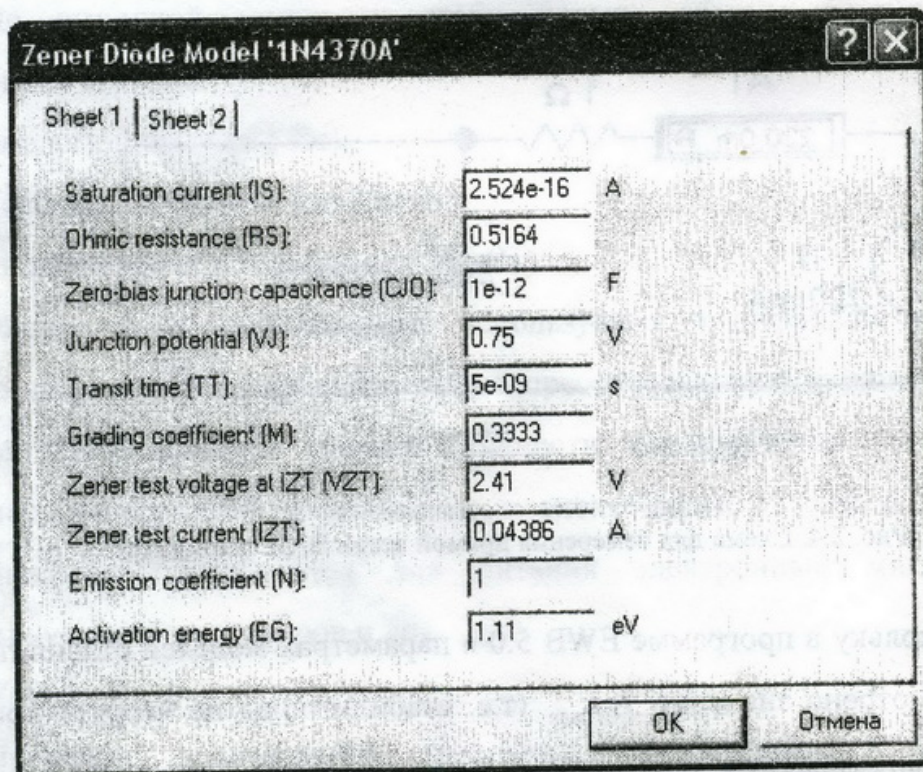


Рис. 2.5. Диалоговое окно параметров модели стабилитрона

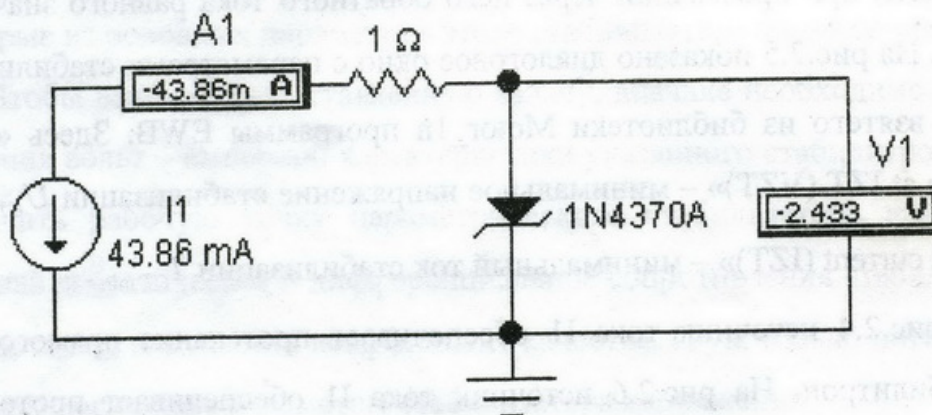


Рис. 2.6. Схема для измерения обратной ветви ВАХ стабилитрона

Таблица 2.1 - Результаты измерения ВАХ стабилитрона

$U_{ПР}, В$	$I_{ПР}, А$	$U_{ОБР}, В$	$I_{ОБР}, А$
0,1	$11,2 \cdot 10^{-9}$	-2,0	$-230 \cdot 10^{-9}$
0,2	$22,4 \cdot 10^{-9}$	-2,1	$-510 \cdot 10^{-9}$
0,3	$33,6 \cdot 10^{-9}$	-2,2	$-14 \cdot 10^{-6}$
0,4	$46,1 \cdot 10^{-9}$	-2,3	$-700 \cdot 10^{-6}$
0,5	$120 \cdot 10^{-9}$	-2,4	$-20 \cdot 10^{-3}$
0,6	$3 \cdot 10^{-6}$	-2,433	$-43,86 \cdot 10^{-3}$
0,7	$140 \cdot 10^{-6}$	-2,45	$-60 \cdot 10^{-3}$
0,8	$6 \cdot 10^{-3}$	-2,5	-0,123
0,9	$74 \cdot 10^{-3}$	-2,55	-0,196
1,0	0,220	-2,6	-0,276
1,1	0,380	-2,65	-0,360
1,2	0,555	-2,7	-0,445

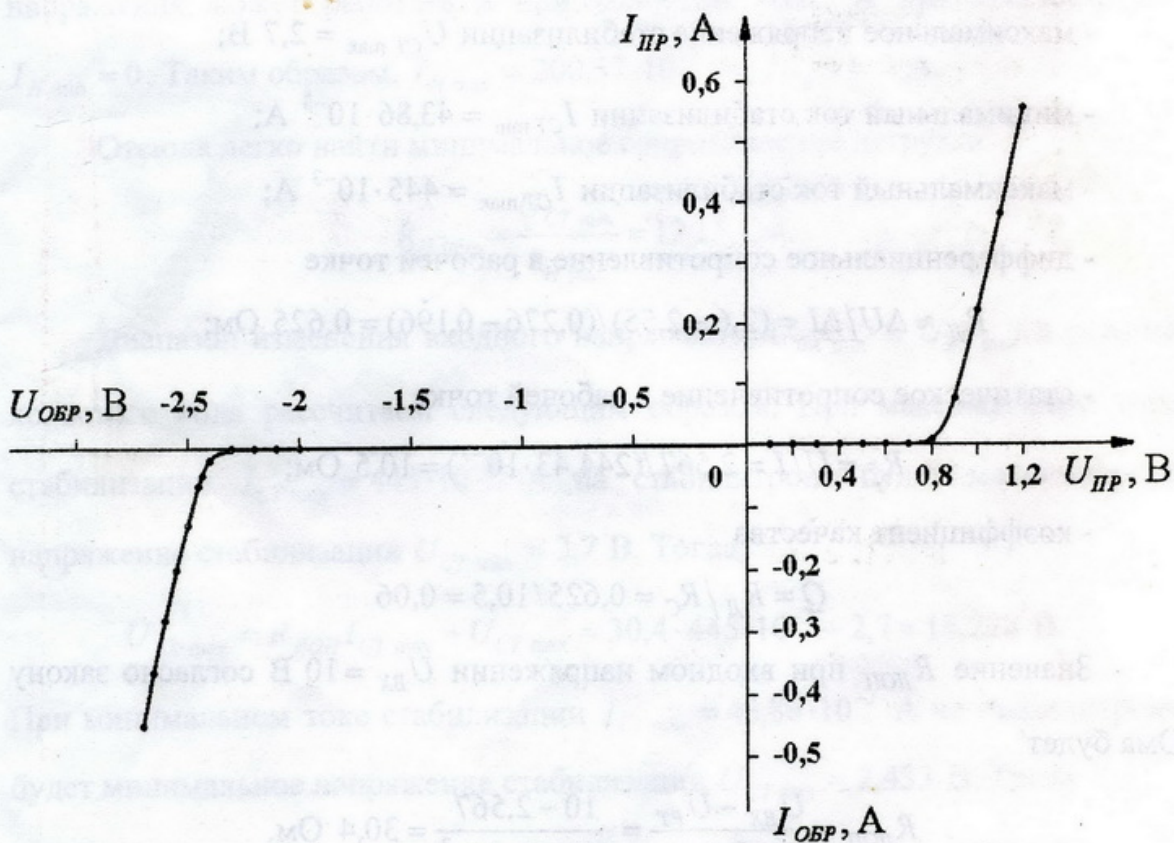


Рис. 2.7. Измеренная ВАХ стабилитрона 1N4370А

Как видно из рис.2.5 и результатов таблицы 2.1, при токе стабилизации $I_{CT} = 43,86 \cdot 10^{-3}$ А напряжение стабилизации, приведенное в диалоговом окне параметров модели стабилитрона, не совпадает точно с напряжением стабилизации, полученным путем измерений. Поэтому в дальнейших вычислениях будем использовать данные, полученные путем измерений.

Согласно данным таблицы 2.1 и формуле (2.1) параметры рабочей точки стабилизатора напряжения будут иметь следующие значения:

$$I_{PT} = \frac{I_{CT \min} + I_{CT \max}}{2} = \frac{(43,86 + 445) \cdot 10^{-3}}{2} = 244,43 \cdot 10^{-3} \text{ А,}$$

$$U_{PT} = \frac{U_{CT \min} + U_{CT \max}}{2} = \frac{2,433 + 2,7}{2} = 2,567 \text{ В.}$$

Исходя из данных таблицы 2.1 и рис.2.7, основные параметры стабилитрона 1N4370A будут иметь следующие значения:

- минимальное напряжение стабилизации $U_{CT \min} = 2,433 \text{ В;}$
- максимальное напряжение стабилизации $U_{CT \max} = 2,7 \text{ В;}$
- минимальный ток стабилизации $I_{CT \min} = 43,86 \cdot 10^{-3} \text{ А;}$
- максимальный ток стабилизации $I_{CT \max} = 445 \cdot 10^{-3} \text{ А;}$
- дифференциальное сопротивление в рабочей точке

$$R_d \approx \Delta U / \Delta I = (2,6 - 2,55) / (0,276 - 0,196) = 0,625 \text{ Ом;}$$

- статическое сопротивление в рабочей точке

$$R_C = U / I = 2,567 / (244,43 \cdot 10^{-3}) = 10,5 \text{ Ом;}$$

- коэффициент качества

$$Q = R_d / R_C = 0,625 / 10,5 = 0,06.$$

Значение $R_{доп}$ при входном напряжении $U_{ВХ} = 10 \text{ В}$ согласно закону

Ома будет

$$R_{доп} = \frac{U_{ВХ} - U_{PT}}{I_{PT}} = \frac{10 - 2,567}{244,43 \cdot 10^{-3}} = 30,4 \text{ Ом.}$$

Рассмотрим теперь некоторые из основных параметров стабилизатора напряжения рис.2.2, где используется стабилитрон 1N4370А. Согласно сказанному выше, номинальное выходное напряжение стабилизатора равно напряжению на стабилитроне в рабочей точке, т.е.

$$U_{ВЫХ} = U_{РТ} = 2,567 \text{ В.}$$

Диапазон изменения тока нагрузки $I_{H \min}$ и $I_{H \max}$ определим исходя из следующих соображений. Чтобы стабилизатор напряжения поддерживал напряжение на выходе с требуемой точностью необходимо всегда обеспечивать протекание через стабилитрон минимального тока стабилизации $I_{СТ \min}$. Следовательно, максимальный ток, который может протекать через нагрузку будет

$$I_{H \max} = I_{РТ} - I_{СТ \min} = (244,43 - 43,86) \cdot 10^{-3} = 200,57 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Как следует из электрической схемы рис.2.2, параметрический стабилизатор напряжения может работать и при холостом ходе. А это означает, что $I_{H \min} = 0$. Таким образом, $I_{H \max} = 200,57 \cdot 10^{-3} \text{ А}$, $I_{H \min} = 0 \text{ А}$.

Отсюда легко найти минимальное сопротивление нагрузки

$$R_{H \min} = \frac{U_{СТ \min}}{I_{H \max}} = 12,13 \text{ Ом.}$$

Диапазон изменения входного напряжения $U_{ВХ \min}$ и $U_{ВХ \max}$ в режиме холостого хода рассчитаем следующим образом. При максимальном токе стабилизации $I_{СТ \max} = 445 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ на стабилитроне будет максимальное напряжение стабилизации $U_{СТ \max} = 2,7 \text{ В}$. Тогда

$$U_{ВХ \max} = R_{ДОП} I_{СТ \max} + U_{СТ \max} = 30,4 \cdot 445 \cdot 10^{-3} + 2,7 = 16,228 \text{ В.}$$

При минимальном токе стабилизации $I_{СТ \min} = 43,86 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ на стабилитроне будет минимальное напряжение стабилизации $U_{СТ \min} = 2,433 \text{ В}$. Тогда

$$U_{ВХ \min} = R_{ДОП} I_{СТ \min} + U_{СТ \min} = 30,4 \cdot 43,86 \cdot 10^{-3} + 2,433 = 3,766 \text{ В.}$$

Как видно из рис.2.8, все рассчитанные значения совпадают с результатами моделирования в программной среде EWB.

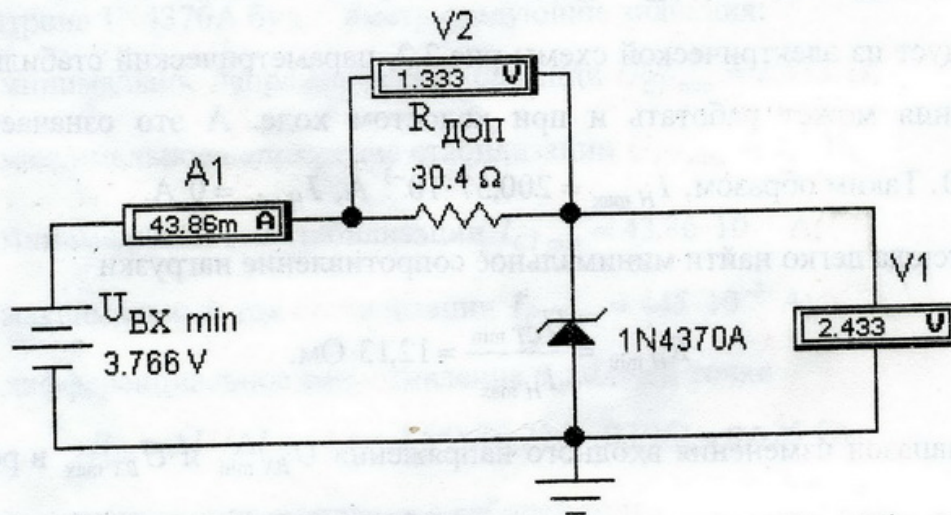
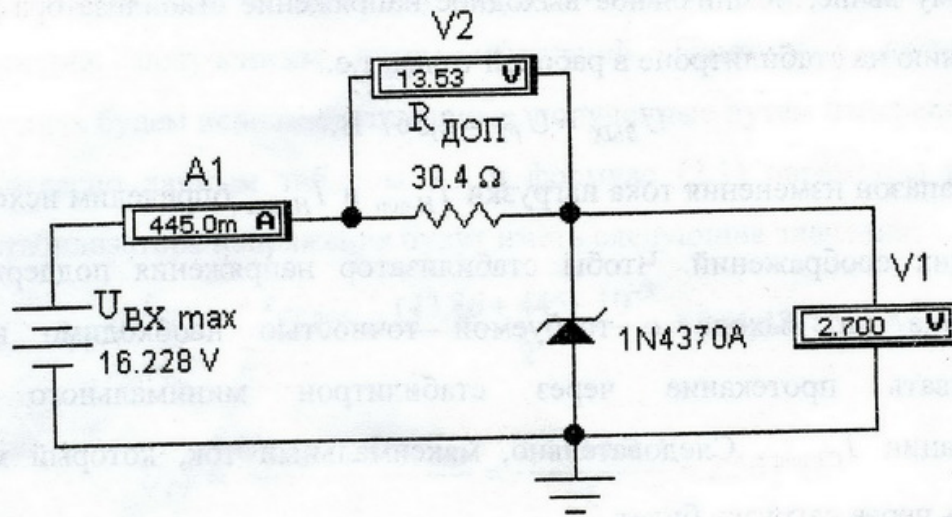


Рис. 2.8. К расчету диапазона изменения входного напряжения $U_{BX \min}$ и $U_{BX \max}$

Согласно формуле (2.2) КПД стабилизатора при минимальном сопротивлении нагрузки $R_{H \min}$ будет

$$\eta_{CT} = \frac{P_H}{P_{ПОГ}} = \frac{U_{CT \min} I_{H \max}}{U_{BX} I_{PT}} = 0,2,$$

где $U_{BX} = 10$ В. Как видим, КПД такого стабилизатора напряжения достаточно низок и составляет всего 20%.

Коэффициент неустойчивости по напряжению K_{nU} будем искать в режиме холостого хода стабилизатора напряжения согласно формуле (2.3)

$$K_{nU} = \Delta U_{ВЫХ} / (U_{ВЫХ} \Delta U_{ВХ}),$$

где $\Delta U_{ВЫХ} = U_{СТ \max} - U_{РТ} = 2,7 - 2,567 = 0,133$ В,

$$U_{ВЫХ} = U_{РТ} = 2,567$$
 В,

$$\Delta U_{ВХ} = U_{ВХ \max} - U_{ВХ} = 16,228 - 10 = 6,228$$
 В.

Таким образом $K_{nU} = 0,008$ 1/В или $K_{nU} = 0,8$ %/В.

Коэффициент неустойчивости по току K_{nI} будем искать для $R_H = R_{H \min} = 12,13$ Ом согласно формуле (2.4) и результатам измерений, показанных на рис.2.9.

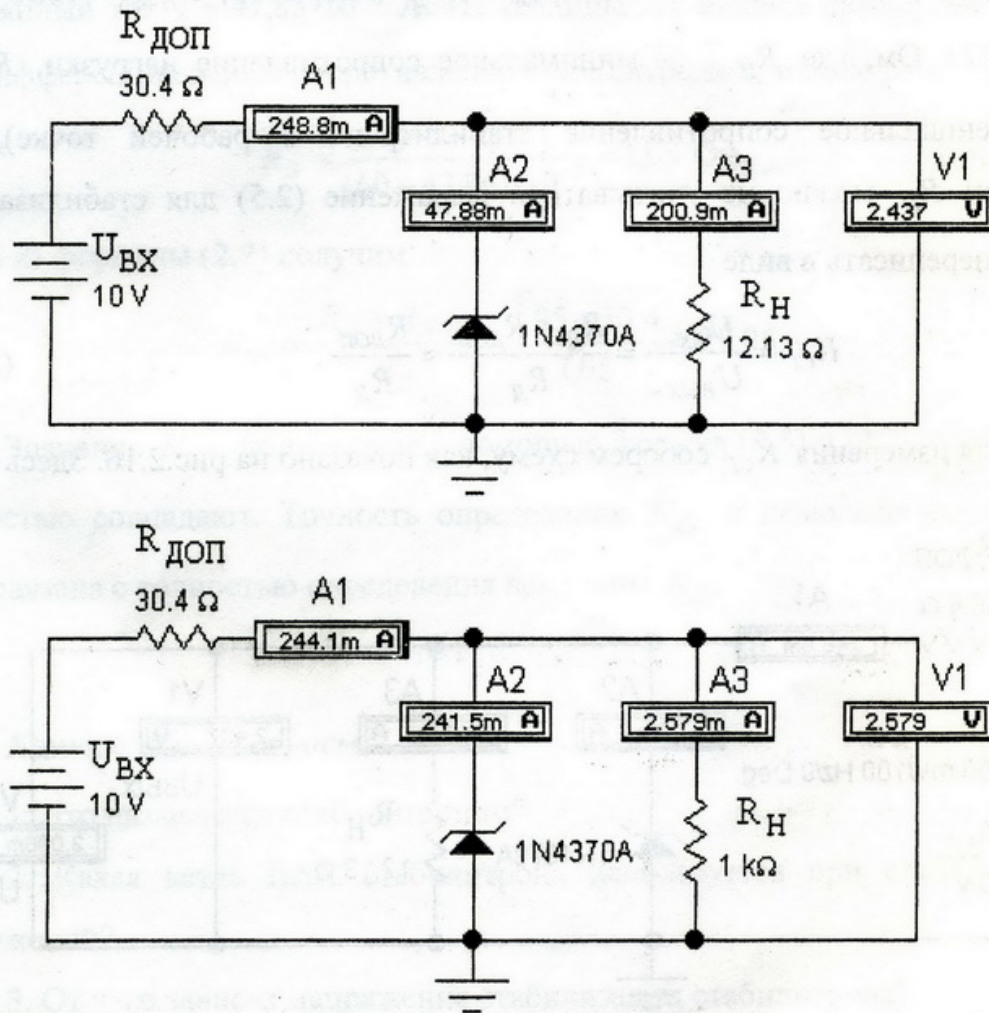


Рис. 2.9. К расчету коэффициента неустойчивости по току K_{nI}

Таким образом

$$K_{нI} = \Delta U_{ВЫХ} I_H / (U_{ВЫХ} \Delta I_H) = 0,065,$$

где $\Delta U_{ВЫХ} = 2,579 - 2,437 = 0,142$ В,

$$U_{ВЫХ} = 2,437$$
 В,

$$\Delta I_H = (200,9 - 2,579) \cdot 10^{-3} = 198,321 \cdot 10^{-3}$$
 А,

$$I_H = 200,9 \cdot 10^{-3}$$
 А.

Итак $K_{нI} = 0,065$ или $K_{нI} = 6,5\%$.

Коэффициент сглаживания пульсаций $K_{СГ}$ определим согласно формуле (2.5). Как видно из рис.2.2 параметрический стабилизатор напряжения представляет собой не что иное, как пассивный делитель напряжения. Поскольку обычно $R_{H \min} \gg R_D$ (например, $R_{H \min} = 12,13$ Ом, $R_D \approx 0,625$ Ом, где $R_{H \min}$ – минимальное сопротивление нагрузки, R_D – дифференциальное сопротивление стабилитрона в рабочей точке), то величину R_H можно не учитывать и выражение (2.5) для стабилизатора рис.2.2 переписать в виде

$$K_{СГ} = \frac{U_{ВХ\sim}}{U_{ВЫХ\sim}} = \frac{R_D + R_{ДОП}}{R_D} \approx \frac{R_{ДОП}}{R_D}. \quad (2.7)$$

Для измерения $K_{СГ}$ соберем схему, как показано на рис.2.10. Здесь А1,

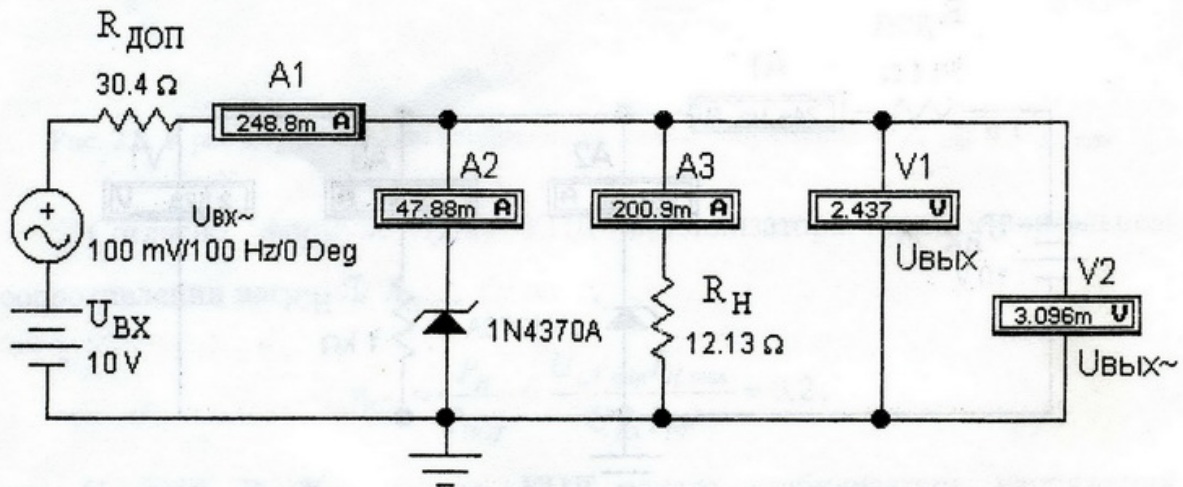


Рис. 2.10. К расчету коэффициента сглаживания пульсаций $K_{СГ}$

A2, A3 – амперметры, измеряющие постоянный ток; V1 – вольтметр, измеряющий постоянное напряжение; V2 – вольтметр, измеряющий действующее значение переменного напряжения. На этом же рисунке возле генератора переменного напряжения указано действующее значение переменного напряжения (100 мВ), которое выдает этот генератор.

Согласно рис.2.10 и формуле (2.5), коэффициент сглаживания пульсаций будет

$$K_{CG} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{3,096 \cdot 10^{-3}} = 32,3.$$

Чтобы определить K_{CG} с помощью формулы (2.7) необходимо вначале найти величину R_D . Как видно из рис.2.10, через стабилитрон протекает постоянный ток $I = 47,88 \cdot 10^{-3}$ А. Из таблицы 2.1 найдем примерное значение дифференциального сопротивления стабилитрона при этом токе

$$R_D = \frac{2,45 - 2,433}{(60 - 43,86) \cdot 10^{-3}} = 1,05 \text{ Ом.}$$

Тогда из формулы (2.7) получим

$$K_{CG} = \frac{R_D + R_{доп}}{R_D} = \frac{1,05 + 30,4}{1,05} = 29,95.$$

Значения K_{CG} , полученные с помощью формул (2.5) и (2.7), с хорошей точностью совпадают. Точность определения K_{CG} с помощью выражения (2.7) связана с точностью определения величины R_D .

Контрольные вопросы

1. Что называется стабилитроном?
2. Какая ветвь ВАХ стабилитрона используется при стабилизации напряжений?
3. От чего зависит напряжение стабилизации стабилитрона?
4. Нарисовать условные обозначения и ВАХ стабилитрона.
5. Перечислить основные параметры стабилитронов.

6. Что называют стабилизатором напряжения?
7. Нарисовать схему простейшего параметрического стабилизатора напряжения.
8. Объяснить принцип работы параметрического стабилизатора напряжения.
9. Перечислить параметры стабилизаторов напряжения.
10. Дать определение номинального напряжения стабилизации.
11. Дать определение диапазона изменения входного напряжения.
12. Дать определение диапазона изменения тока нагрузки.
13. Привести определение коэффициента полезного действия стабилизатора.
14. Привести определение коэффициента неустойчивости по напряжению.
15. Привести определение коэффициента неустойчивости по току.
16. Дать определение коэффициента сглаживания пульсаций.
17. Какие бывают стабилизаторы в зависимости от точности поддержания выходного напряжения на нагрузке?
18. Как подразделяются стабилизаторы по выходной мощности?
19. Как зависит коэффициент неустойчивости по току от величины сопротивления нагрузки?

Программа лабораторной работы

1. Получить у преподавателя стабилизатор для проведения исследований.
2. Собрать в программной среде EWB схемы рис.2.4, рис.2.6 и провести измерения ВАХ полученного стабилизатора. При измерениях необходимо так подбирать величину тока источника тока (см. пример 2), чтобы прямое напряжение на стабилизаторе изменялось в пределах от 0 до 1,2 вольта с шагом 0,1 вольт.

Обратный ток стабилитрона при измерениях обратной ветви ВАХ не должен превышать величины $\sim 10 I_{CT \min}$. Величину $I_{CT \min}$ найти в диалоговом окне параметров полученного стабилитрона (см. рис.2.5 примера 2).

Шаг изменения напряжения при измерении обратной ветви ВАХ выбирается произвольным, но не менее 12 точек. Для получения более точной ВАХ стабилитрона (особенно при нахождении параметра $U_{CT \min}$) на некоторых участках этой ВАХ необходимо использовать более мелкий шаг изменения величины U .

3. Данные измерений занести в таблицу 2.1 и построить измеренную ВАХ стабилитрона.

4. Исходя из данных таблицы 2.1 и графика построенной ВАХ стабилитрона, определить основные параметры полученного стабилитрона.

5. Согласно данным таблицы 2.1 и формуле (2.1) определить параметры рабочей точки стабилизатора напряжения.

6. Собрать в программной среде EWB схему стабилизатора напряжения рис.2.2, рассчитать рабочий режим и основные параметры этого стабилизатора напряжения (а именно $R_{Доп}$, $U_{ВЫХ}$, $I_{H \min}$ и $I_{H \max}$, $R_{H \min}$, $U_{ВХ \min}$ и $U_{ВХ \max}$, $\eta_{СТ}$, $K_{нU}$, $K_{нI}$, $K_{СТ}$) при этом $U_{ВХ} = 5U_{PT}$.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему измерений ВАХ стабилитрона, таблицу результатов измерений (таблица 2.1), график измеренной ВАХ стабилитрона.
2. Рассчитанные основные параметры стабилитрона.
3. Параметры рабочей точки стабилизатора напряжения.
4. Расчет рабочего режима и основных параметров стабилизатора напряжения рис.2.2 (а именно $R_{Доп}$, $U_{ВЫХ}$, $I_{H \min}$ и $I_{H \max}$, $R_{H \min}$, $U_{ВХ \min}$ и $U_{ВХ \max}$, $\eta_{СТ}$, $K_{нU}$, $K_{нI}$, $K_{СТ}$).

Задачи для самостоятельного решения

Согласно программе лабораторной работы провести исследования следующих стабилитронов. Стабилитрон выбирается из библиотеки Motor_1n (группа 1) или из библиотеки General (группа 2), причем номер варианта совпадает с порядковым номером стабилитрона в списке.

Далее согласно программе лабораторной работы провести расчет рабочего режима и основных параметров стабилизатора напряжения рис.2.2, где используются исследованные стабилитроны.

Лабораторная работа № 3

Биполярный транзистор

Цель работы: изучить основные свойства и параметры биполярных транзисторов; освоить методику исследования вольт - амперных характеристик транзисторов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый прибор с тремя областями полупроводников различной проводимости, разделенных двумя взаимодействующими $p-n$ переходами. Каждая область полупроводника имеет отдельный вывод (или контакт). Структура биполярного транзистора и его схемное обозначение приведены на рис.3.1. Здесь же обозначены выводы транзисторов: k – коллектор, b – база, $э$ – эмиттер.

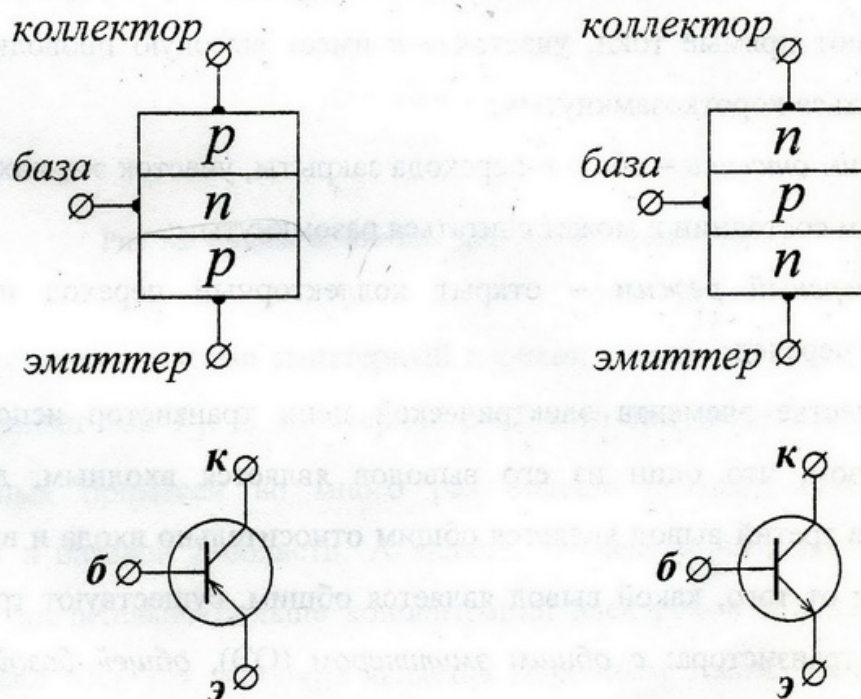


Рис.3.1. Структура биполярных транзисторов и их схемные обозначения, слева – транзистор $p-n-p$ типа, справа – $n-p-n$ типа

Центральная область транзистора называется *базой*, а две крайних области – *коллектором* и *эмиттером*. Переход, возникающий между коллектором и базой, называется *коллекторным переходом*, а переход,

возникающий между эмиттером и базой – эмиттерным. Хотя на рис.3.1 не видно никакой разницы между коллектором и эмиттером, конструктивно они отличаются друг от друга, и путать их ни в коем случае не следует. К тому же эмиттерная и коллекторная области отличаются еще и тем, что в эмиттерной области концентрация примесей много больше, чем в коллекторной области.

Возможны два варианта построения биполярных транзисторов. Оба варианта изображены на рис.3.1 и носят название транзистор *n-p-n* типа и транзистор *p-n-p* типа.

Существуют четыре режима работы биполярного транзистора:

- *активный режим* – открыт эмиттерный переход и закрыт коллекторный переход;

- *режим насыщения* – оба *p-n*-перехода транзистора открыты и через них протекают прямые токи, участок *э-к* имеет высокую проводимость и может считаться короткозамкнутым;

- *режим отсечки* – оба *p-n*-перехода закрыты, участок *э-к* находится в высокоомном состоянии и может считаться разомкнутым;

- *инверсный режим* – открыт коллекторный переход и закрыт эмиттерный переход.

В качестве элемента электрической цепи транзистор используется таким образом, что один из его выводов является входным, другой – выходным, а третий вывод является общим относительно входа и выхода. В зависимости от того, какой вывод является общим, существуют три схемы включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК). Эти схемы приведены на рис.3.2.

Для усиления сигналов в основном используется активный режим. В этом режиме работа транзистора основана на явлениях инжекции, диффузии и дрейфа, рекомбинации, экстракции. Рассмотрим это подробнее на примере транзистора *p-n-p*-типа (рис.3.3).

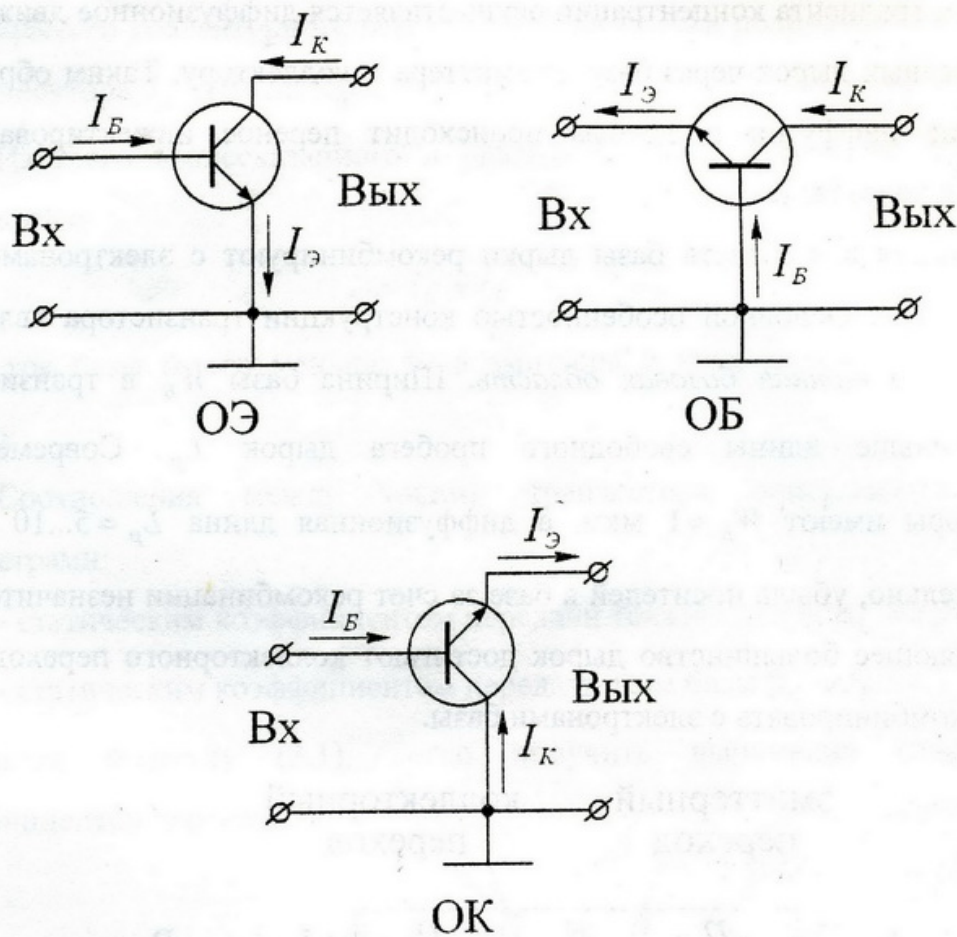


Рис.3.2. Схемы включения биполярных транзисторов

В активном режиме эмиттерный переход транзистора открыт и через него протекает ток $I_Э$. В эмиттерной p -области транзистора концентрация акцепторных примесей во много раз больше концентрации донорных примесей в базовой n -области. А значит, концентрация дырок в области эмиттера значительно больше концентрации электронов в области базы и практически весь ток эмиттера является дырочным током. Таким образом осуществляется инжекция основных носителей через эмиттерный переход.

В базе вблизи эмиттерного перехода появляются дырки, которые почти мгновенно рекомбинируют с электронами, втекающими в базу от источника $U_{ЭБ}$. Цепь тока эмиттер - база замыкается и обеспечивает протекание тока эмиттера. Увеличение вблизи эмиттерного перехода концентрации дырок создает градиент концентрации неравновесных носителей в базе. Под

действием градиента концентрации осуществляется диффузионное движение неравновесных дырок через базу от эмиттера к коллектору. Таким образом, вследствие диффузии и дрейфа происходит перенос инжектированных носителей через базу.

Попадая в n -область базы дырки рекомбинируют с электронами, но далеко не все. Основной особенностью конструкции транзистора является относительно *тонкая базовая область*. Ширина базы W_B в транзисторе много меньше длины свободного пробега дырок L_p . Современные транзисторы имеют $W_B \approx 1$ мкм, а диффузионная длина $L_p = 5 \dots 10$ мкм. Следовательно, убыль носителей в базе за счет рекомбинации незначительна и подавляющее большинство дырок достигают коллекторного перехода, не успев рекомбинировать с электронами базы.

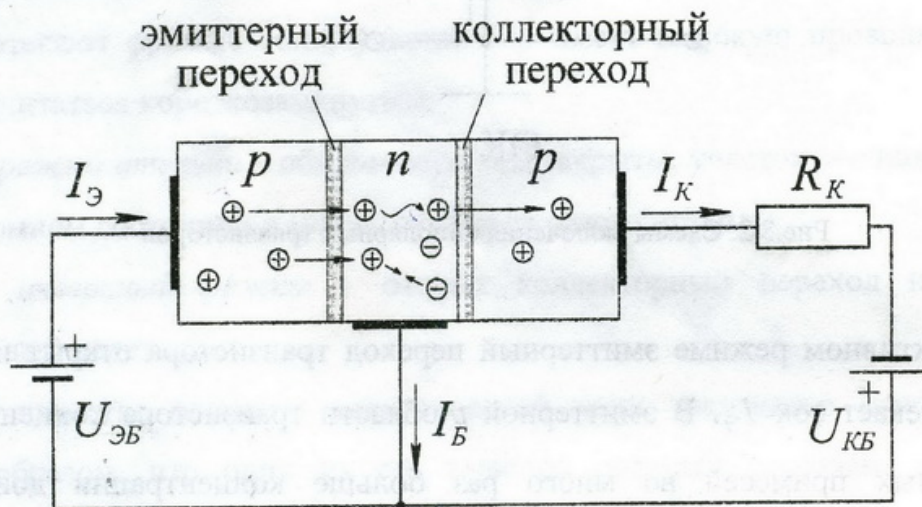


Рис.3.3. Активный режим биполярного транзистора

Дырки, которые были инжектированы эмиттером в базу и затем достигшие обратновключенного коллекторного перехода, попадают в его ускоряющее поле и перебрасываются (экстрагируются) в p -область коллектора. Далее дырки рекомбинируют с электронами, подтекающими к коллектору от источника питания $U_{КБ}$. Заметим, что этот дырочный ток через коллекторный переход во много раз превышает собственный обратный

ток закрытого коллекторного перехода и практически полностью определяет ток коллектора I_K транзистора.

Из всего вышесказанного и рис.3.3 получаем уравнение для токов транзистора

$$I_{\mathcal{E}} = I_K + I_B. \quad (3.1)$$

Здесь ток базы много меньше тока эмиттера и тока коллектора, поэтому $I_{\mathcal{E}} \approx I_K$.

Соотношения между токами транзистора описываются двумя параметрами:

- статическим коэффициентом передачи тока эмиттера $\alpha_C = I_K / I_{\mathcal{E}}$;

- статическим коэффициентом передачи тока базы $\beta_C = I_K / I_B$.

Используя формулу (3.1), легко получить выражение взаимосвязи коэффициентов передачи:

$$\beta_C = \frac{\alpha_C}{1 - \alpha_C}. \quad (3.2)$$

Величины этих коэффициентов зависят от конструкции транзистора. Для маломощных транзисторов обычно коэффициент $\beta_C = 20 \dots 350$, а коэффициент $\alpha_C = 0,95 \dots 0,995$.

К обратновключенному коллекторному переходу приложено напряжение, которое значительно больше напряжения прямовключенного эмиттерного перехода. Токи же в цепях эмиттера и коллектора являются практически равными. Это означает, что мощность в нагрузке R_K , которая создается переменной составляющей коллекторного тока, оказывается гораздо больше мощности, затрачиваемой на управление током в цепи эмиттера. Следовательно, *транзистор обладает усилительными свойствами*. Эти свойства, а также малые габариты, надежность, экономичность и долговечность обусловили широкое использование транзисторов в электронной технике.

Зависимости постоянных токов электродов транзистора друг от друга или от постоянных напряжений, приложенных к электродам, называют

статическими (или вольт-амперными) характеристиками. Часто используются три вида характеристик:

- входные характеристики;
- выходные характеристики;
- характеристики прямой передачи (характеристики управления).

На рис.3.4 для схемы с общей базой (ОБ) приведены входные (эмиттерные) характеристики (а), выходные (коллекторные) характеристики (б) и характеристики прямой передачи (в) транзистора.

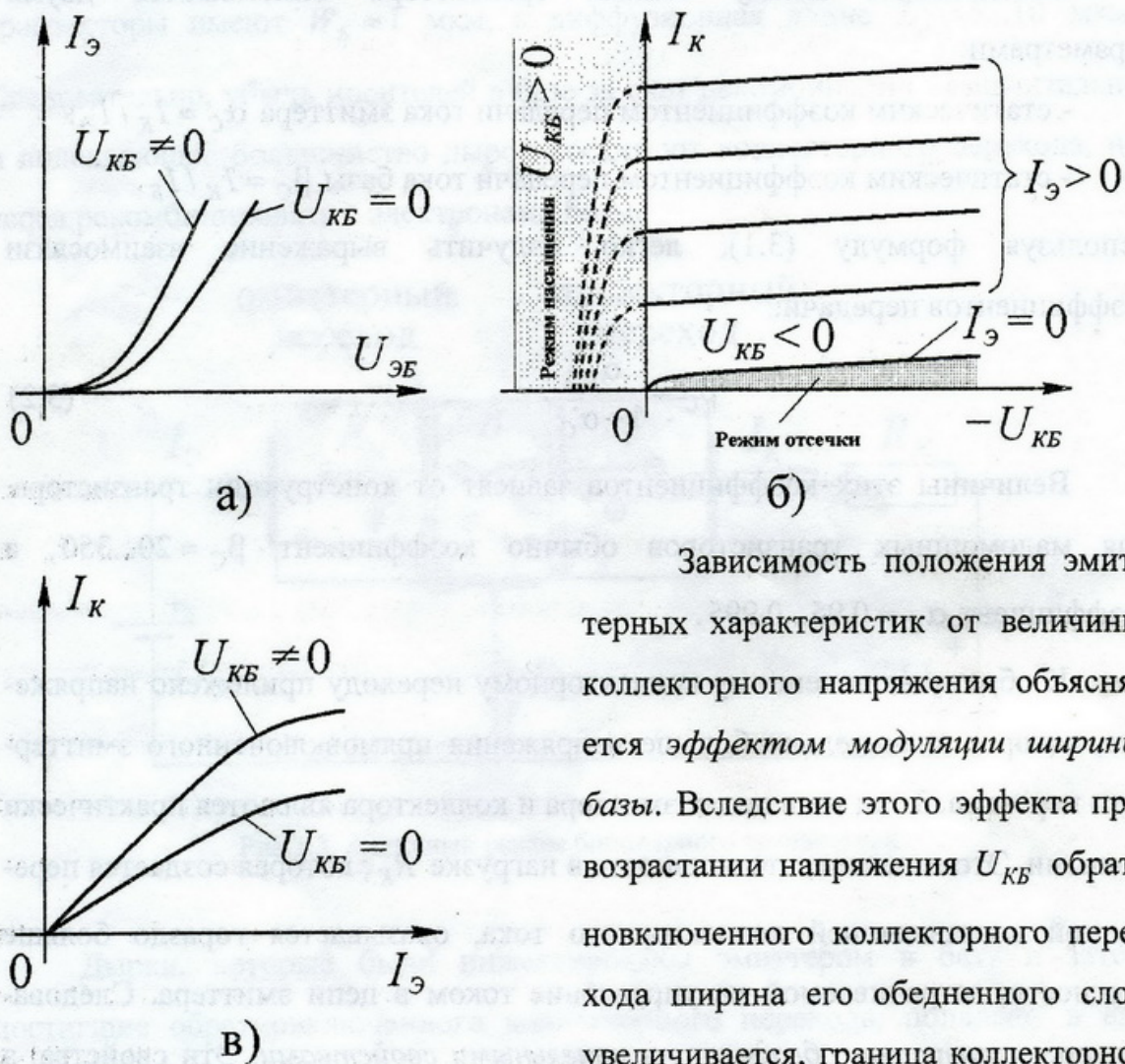


Рис.3.4 Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой: а – эмиттерные; б – коллекторные; в – характеристики прямой передачи

Зависимость положения эмиттерных характеристик от величины коллекторного напряжения объясняется *эффектом модуляции ширины базы*. Вследствие этого эффекта при возрастании напряжения $U_{кб}$ обратновключенного коллекторного перехода ширина его обедненного слоя увеличивается, граница коллекторного перехода смещается в сторону эмиттерного перехода и ширина базы W_B становится меньше. Возрастает

градиент концентрации неравновесных носителей в базе транзистора и увеличивается ток диффузии I_D (рис. 3.4, а).

Эффект модуляции ширины базы приводит также к увеличению тока коллектора I_K (рис.3.4, в). Как было сказано выше, вследствие этого эффекта при возрастании напряжения U_{KB} обратновключенного коллекторного перехода ширина базы W_B становится меньше. Это означает, что большее количество дырок (см. рис.3.3) пройдут через базу и достигнут коллекторного перехода, не успев рекомбинировать с электронами базы. А это обстоятельство, в свою очередь, вызовет увеличение тока коллектора I_K .

Наиболее часто используемыми являются характеристики в схеме с общим эмиттером (ОЭ). На рис.3.5 для схемы с ОЭ приведены входные (базовые) характеристики (а), выходные (коллекторные) характеристики (б) и характеристики прямой передачи (в) транзистора.

Зависимость базовых (входных) характеристик от коллекторного напряжения $U_{KЭ}$ (рис.3.5, а) для схемы с ОЭ, также как и зависимость положения эмиттерных (входных) характеристик от величины коллекторного напряжения U_{KB} (рис.3.4, а) для схемы с ОБ, объясняется *эффектом модуляции ширины базы*. В случае включения транзистора по схеме с общим эмиттером, более высокому напряжению $U_{KЭ}$ обратновключенного коллекторного перехода будет соответствовать меньшая ширина базы W_B , а значит, меньшая вероятность рекомбинации неравновесных носителей в базе. Это обстоятельство, в свою очередь, вызовет уменьшение тока базы I_B .

Область коллекторных характеристик, которая находится внутри заштрихованных границ рис.3.5, б, соответствует активному режиму. Активный режим ограничен предельно допустимыми параметрами электрических режимов:

- $I_{K\delta}$ – предельно допустимый ток коллектора,

- $U_{КЭд}$ – предельно допустимое напряжение между коллектором и эмиттером,

- $P_{Кд}$ – предельно допустимая мощность, рассеиваемая коллекторным переходом.

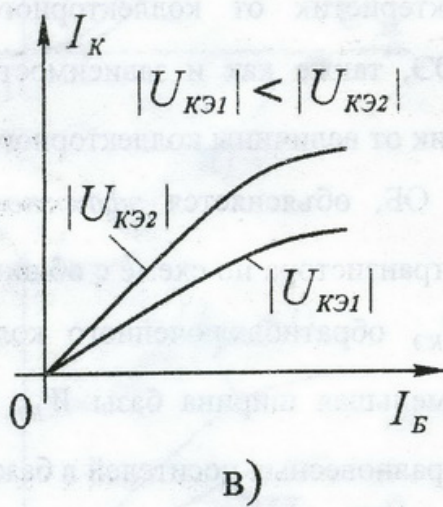
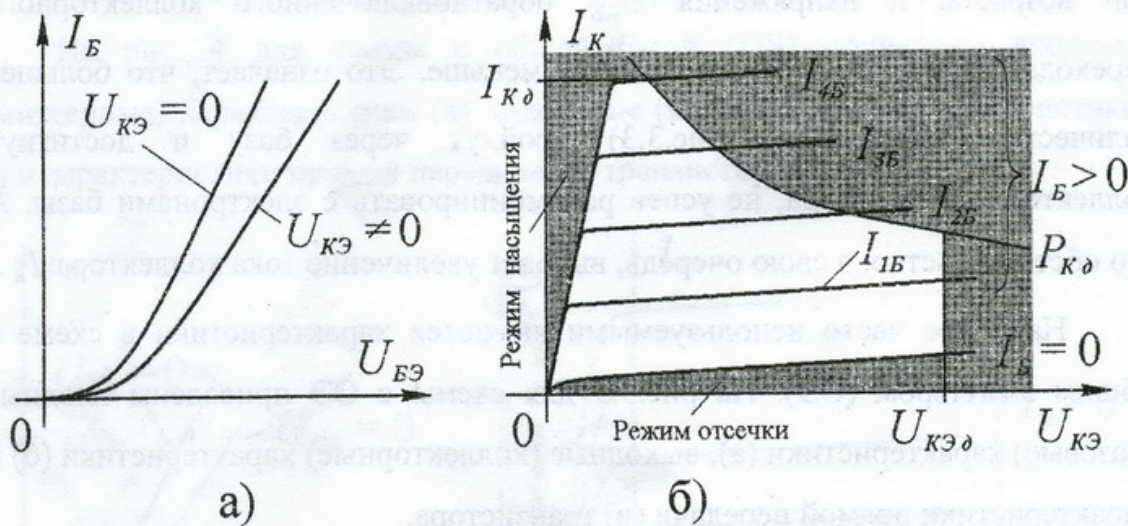


Рис.3.5 Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ: а – базовые; б – коллекторные; в – характеристики прямой передачи

Границей между активным режимом и режимом насыщения является крутовосходящий участок коллекторных характеристик. Объяснить это можно следующим образом. При активном режиме работы биполярного транзистора открыт эмиттерный переход и закрыт коллекторный переход, то есть напряжение на коллекторном переходе

$$U_{КП} = U_{БЭ} - U_{КЭ} < 0,$$

и коллекторный переход является обратновключенным.

При $U_{КЭ} < U_{БЭ}$ напряжение на коллекторном переходе

$$U_{КП} = U_{БЭ} - U_{КЭ} > 0,$$

эмиттерный и коллекторный переходы оказываются прямовключенными, что соответствует режиму насыщения.

Режим отсечки на рис.3.5, б – область, находящаяся под коллекторной характеристикой при $I_B = 0$, где ток коллектора определяется неуправляемой частью коллекторного тока.

Эффект модуляции ширины базы оказывает влияние и на характеристики прямой передачи (рис.3.5, в). Чем больше модуль коллекторного напряжения, тем меньше ширина базы. Вследствие этого вероятность рекомбинации неравновесных носителей тоже уменьшается. А поскольку эта вероятность рекомбинации неравновесных носителей в базе прямо пропорциональна току базы, то, следовательно, ток базы тоже становится меньше. Ток базы будет оставаться неизменным при увеличении напряжения на базе.

Статические характеристики нужны для расчета транзисторного каскада в рабочем режиме, поскольку они позволяют определить основные параметры транзистора. Наиболее часто используются характеристики в схеме с ОЭ, так как в них указываются значения токов базы. Для схемы с ОБ ток базы не измеряется, определить же его, используя токи эмиттера и коллектора, с достаточной точностью невозможно, поскольку токи эмиттера и коллектора мало отличаются.

Пример 3.

Проведем исследования статических характеристик и некоторых основных параметров биполярного *n-p-n* транзистора 2N2712, взятого из библиотеки National 2 программы EWB.

Для измерения входной характеристики транзистора соберем схему с ОЭ как показано на рис. 3.6. Изменяя величину тока источника тока I_b , так чтобы напряжение на вольтметре $V1$ изменялось от нуля до 0,85 вольта (при этом напряжение на коллекторе $U_{кэ} = const$), проведем измерения входной характеристики транзистора. Напряжение на коллекторе задается с помощью

источника постоянного напряжения $U_{кэ}$. Входные характеристики снимем при значениях $U_{кэ} = 0$ В и при $U_{кэ} = 16$ В.

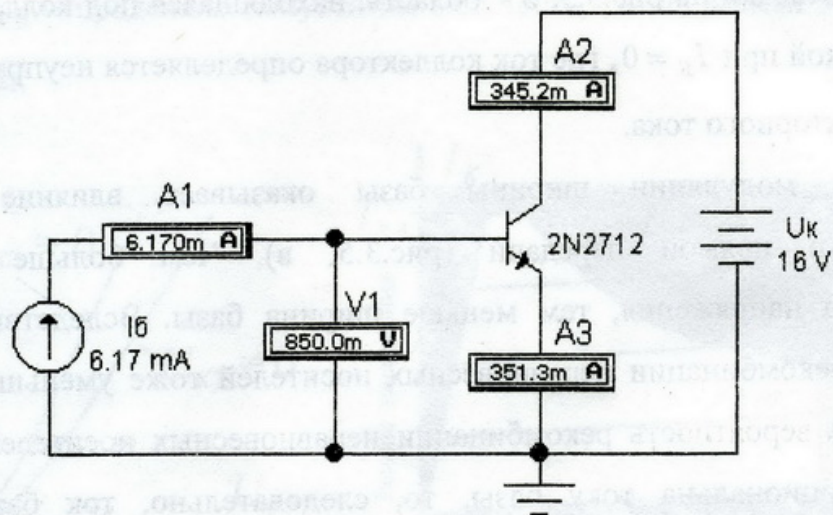


Рис. 3.6. Схема для измерения статических характеристик биполярного транзистора

Результаты измерения сведем в таблицу 3.1. Входные характеристики транзистора, построенные по результатам проведенных измерений, изображены на рис. 3.7.

Таблица 3.1 - Результаты измерения входных характеристик транзистора

I_B, A	$U_{кэ} = 0$ В $U_{БЭ}, В$	$U_{кэ} = 16$ В $U_{БЭ}, В$
$0,34 \cdot 10^{-6}$	0,358	0,50
$1,45 \cdot 10^{-6}$	0,398	0,55
$7,50 \cdot 10^{-6}$	0,442	0,60
$41 \cdot 10^{-6}$	0,486	0,650
$225 \cdot 10^{-6}$	0,533	0,70
$1,03 \cdot 10^{-3}$	0,582	0,75
$3,06 \cdot 10^{-3}$	0,635	0,80
$6,17 \cdot 10^{-3}$	0,689	0,85

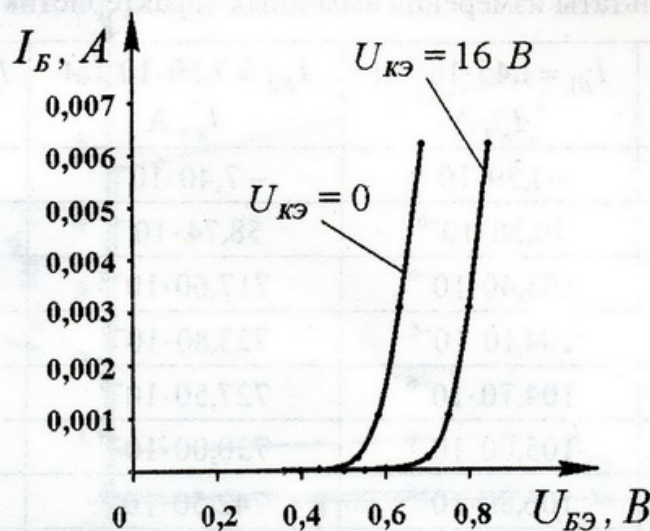


Рис. 3.7. Измеренные входные характеристики транзистора 2N2712

Для измерения выходных характеристик транзистора также будем использовать схему рис. 3.6. С помощью источника тока I_b установим какое-либо значение тока базы I_B , затем изменяя напряжение на коллекторе $U_{КЭ}$, будем записывать показания амперметра А2 (показывающего величину тока коллектора I_K). Напряжение на коллекторе $U_{КЭ}$ задается с помощью источника постоянного напряжения U_K . Выходные характеристики снимем при следующих значениях тока базы: $I_{B0} = 0$, $I_{B1} = 1,45 \cdot 10^{-6} A$, $I_{B2} = 7,50 \cdot 10^{-6} A$, $I_{B3} = 41,0 \cdot 10^{-6} A$.

Результаты измерения сведем в таблицу 3.2. Выходные характеристики транзистора, построенные по результатам проведенных измерений, изображены на рис. 3.8 и рис. 3.9.

Как следует из диалогового окна установки параметров биполярного транзистора 2N2712, обратный ток коллекторного перехода (Saturation current [Is]) данного транзистора весьма мал и составляет $6,101 \cdot 10^{-14} A$. Поэтому при стандартных настройках EWB и при токе базы $I_{B0} = 0$, показания амперметра А2 (ток коллектора I_K) в схеме рис.3.6 также будут нулевыми (см. Таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Результаты измерения выходных характеристик транзистора

$U_{КЭ}, В$	$I_{Б0}=0$ $I_{К}, А$	$I_{Б1} = 1,45 \cdot 10^{-6} А$ $I_{К}, А$	$I_{Б2} = 7,50 \cdot 10^{-6} А$ $I_{К}, А$	$I_{Б3} = 41,0 \cdot 10^{-6} А$ $I_{К}, А$
0	0	$-1,39 \cdot 10^{-6}$	$-7,40 \cdot 10^{-6}$	$-40,73 \cdot 10^{-6}$
0,1	0	$10,56 \cdot 10^{-6}$	$58,74 \cdot 10^{-6}$	$323,90 \cdot 10^{-6}$
0,3	0	$103,40 \cdot 10^{-6}$	$717,60 \cdot 10^{-6}$	$4,66 \cdot 10^{-3}$
0,5	0	$104,10 \cdot 10^{-6}$	$723,80 \cdot 10^{-6}$	$4,71 \cdot 10^{-3}$
0,8	0	$104,70 \cdot 10^{-6}$	$727,50 \cdot 10^{-6}$	$4,74 \cdot 10^{-3}$
1,0	0	$105,00 \cdot 10^{-6}$	$730,00 \cdot 10^{-6}$	$4,75 \cdot 10^{-3}$
2,0	0	$106,80 \cdot 10^{-6}$	$742,50 \cdot 10^{-6}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$
4,0	0	$110,10 \cdot 10^{-6}$	$767,80 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$
6,0	0	$113,70 \cdot 10^{-6}$	$792,30 \cdot 10^{-6}$	$5,16 \cdot 10^{-3}$
8,0	0	$117,20 \cdot 10^{-6}$	$818,00 \cdot 10^{-6}$	$5,33 \cdot 10^{-3}$
10,0	0	$120,80 \cdot 10^{-6}$	$843,80 \cdot 10^{-6}$	$5,49 \cdot 10^{-3}$
12,0	0	$124,30 \cdot 10^{-6}$	$868,60 \cdot 10^{-6}$	$5,66 \cdot 10^{-3}$
14,0	0	$127,90 \cdot 10^{-6}$	$893,50 \cdot 10^{-6}$	$5,82 \cdot 10^{-3}$
16,0	0	$131,40 \cdot 10^{-6}$	$918,40 \cdot 10^{-6}$	$5,99 \cdot 10^{-3}$

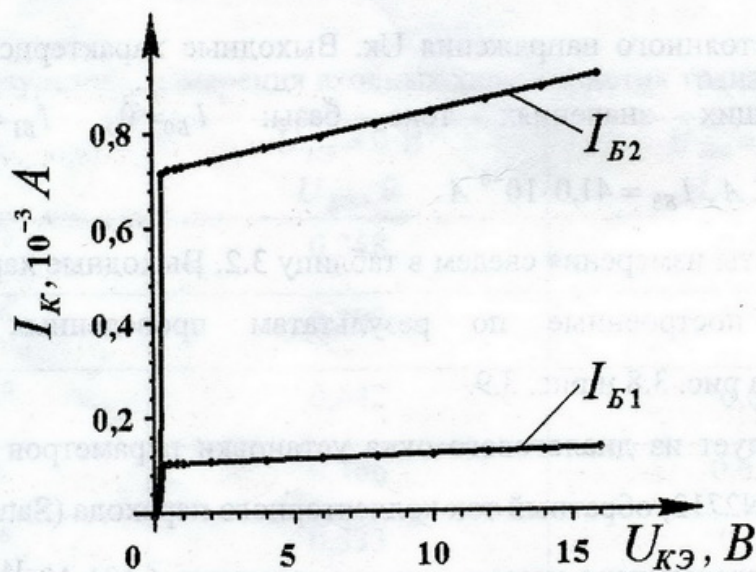


Рис. 3.8. Измеренные выходные характеристики транзистора 2N2712 для $I_{Б1}$, $I_{Б2}$

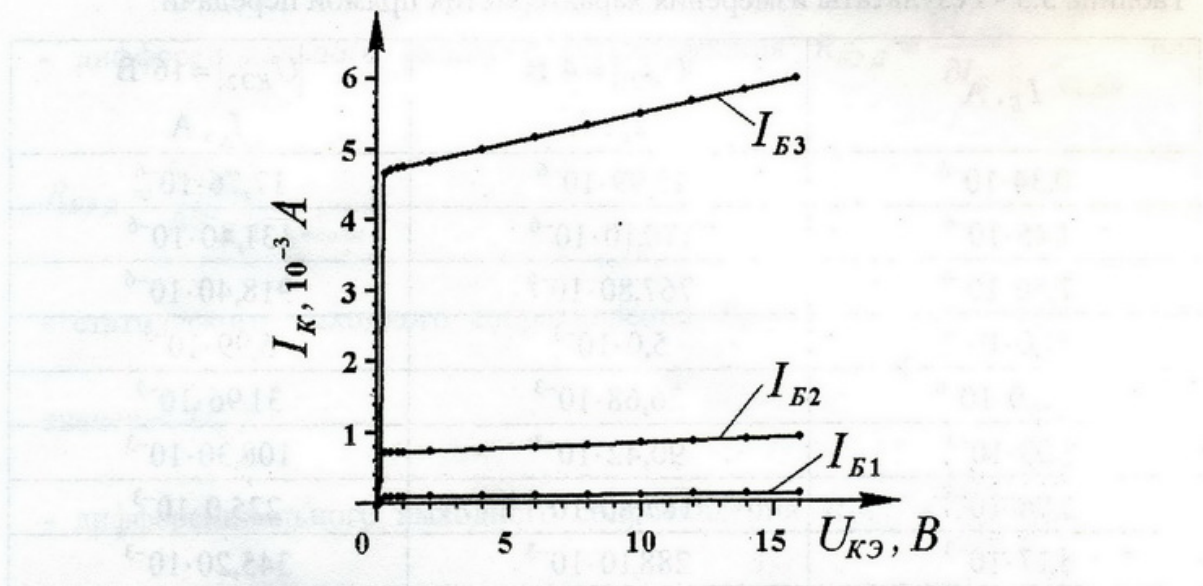


Рис. 3.9. Измеренные выходные характеристики транзистора 2N2712 для I_{B1} , I_{B2} , I_{B3}

Из сравнения рис.3.8 и рис.3.9 видно, что угол наклона между выходной характеристикой и осью величин $U_{КЭ}$ с увеличением тока базы I_B также увеличивается. Легко сообразить, что дифференциальное сопротивление участка эмиттер–коллектор с увеличением тока базы I_B будет уменьшаться.

Измерение характеристик прямой передачи транзистора также будем проводить с использованием схемы рис. 3.6. С помощью источника постоянного напряжения U_K установим какое-либо значение напряжения на коллекторе $U_{КЭ}$. Далее с помощью источника тока I_B будем устанавливать определенные значения тока базы I_B и записывать соответствующие этим значениям показания амперметра A_2 (показывающего величину тока коллектора I_K). Характеристики прямой передачи снимем при следующих значениях напряжения на коллекторе: $|U_{КЭ1}| = 4$ В, $|U_{КЭ2}| = 16$ В.

Результаты измерения сведем в таблицу 3.3. Характеристики прямой передачи, построенные по результатам проведенных измерений, приведены на рис. 3.10.

Таблица 3.3 - Результаты измерения характеристик прямой передачи

I_B, A	$ U_{КЭ1} = 4 В$ I_K, A	$ U_{КЭ2} = 16 В$ I_K, A
$0,34 \cdot 10^{-6}$	$15,99 \cdot 10^{-6}$	$17,76 \cdot 10^{-6}$
$1,45 \cdot 10^{-6}$	$110,10 \cdot 10^{-6}$	$131,40 \cdot 10^{-6}$
$7,50 \cdot 10^{-6}$	$767,80 \cdot 10^{-6}$	$918,40 \cdot 10^{-6}$
$41,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,99 \cdot 10^{-3}$
$225,0 \cdot 10^{-6}$	$26,68 \cdot 10^{-3}$	$31,96 \cdot 10^{-3}$
$1,03 \cdot 10^{-3}$	$90,42 \cdot 10^{-3}$	$108,30 \cdot 10^{-3}$
$3,06 \cdot 10^{-3}$	$187,80 \cdot 10^{-3}$	$225,0 \cdot 10^{-3}$
$6,17 \cdot 10^{-3}$	$288,10 \cdot 10^{-3}$	$345,20 \cdot 10^{-3}$

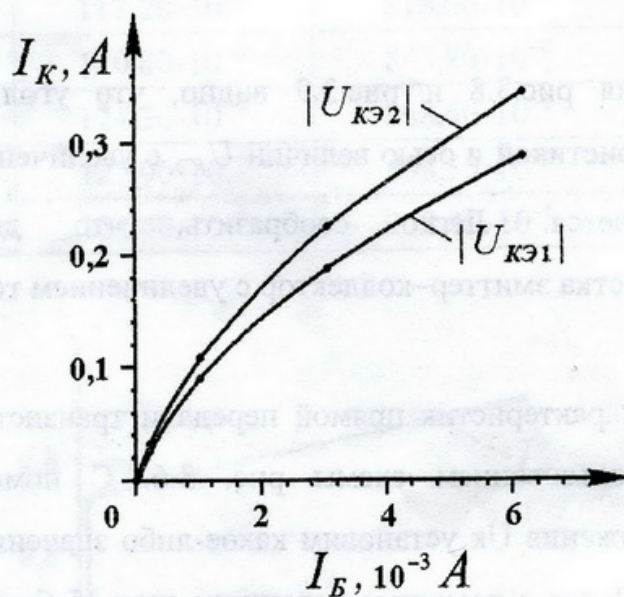


Рис. 3.10. Измеренные характеристики прямой передачи транзистора 2N2712

Исходя из полученных данных, для схемы с ОЭ проведем оценку некоторых параметров биполярного *n-p-n* транзистора 2N2712. А именно:

- статического входного сопротивления $R_{БЭС} = \frac{U_{БЭ}}{I_B}$ для определенного значения $U_{КЭ}$;

- дифференциального входного сопротивления $R_{БЭД} = \left. \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial I_B} \right|_{U_{КЭ} = const}$ или

$$R_{БЭД} \approx \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ} = const};$$

- статического выходного сопротивления $R_{КЭС} = \frac{U_{КЭ}}{I_K}$ для определенного значения $U_{БЭ}$;

- дифференциального выходного сопротивления $R_{КЭД} = \left. \frac{\partial U_{КЭ}}{\partial I_K} \right|_{U_{БЭ} = const}$ или

$$R_{КЭД} \approx \left. \frac{\Delta U_{КЭ}}{\Delta I_K} \right|_{U_{БЭ} = const};$$

- статического коэффициента передачи тока базы $\beta_C = I_K / I_B$;

- дифференциального коэффициента передачи тока базы $\beta_D = \left. \frac{\partial I_K}{\partial I_B} \right|_{U_{КЭ} = const}$

$$\text{или } \beta_D \approx \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ} = const}.$$

Статическое входное сопротивление подсчитаем для значения $U_{КЭ} = 16$ В и $I_B = 41 \cdot 10^{-6}$ А. Согласно данным Таблицы 3.1

$$R_{БЭС} = \frac{0,65}{41 \cdot 10^{-6}} = 15,85 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Дифференциальное входное сопротивление подсчитаем для тех же значений $U_{КЭ}$ и I_B , что и для статического входного сопротивления. Согласно данным Таблицы 3.1

$$R_{БЭД} \approx \frac{0,65 - 0,6}{(41 - 7,5) \cdot 10^{-6}} = 1,49 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Статическое выходное сопротивление подсчитаем для значения $U_{КЭ} = 8$ В и $U_{БЭ} = 0,65$ В. Согласно данным Таблицы 3.1 напряжению

$U_{БЭ} = 0,65$ В соответствует ток $I_B = 41 \cdot 10^{-6}$ А, тогда в соответствии с данными Таблицы 3.2

$$R_{КЭС} = \frac{8}{5,33 \cdot 10^{-3}} = 1,50 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Дифференциальное выходное сопротивление подсчитаем для тех же значений $U_{КЭ}$ и I_B , что и для статического выходного сопротивления. Согласно данным Таблицы 3.2

$$R_{КЭД} \approx \frac{8-6}{(5,33-5,16) \cdot 10^{-3}} = 11,76 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Величину $R_{КЭД}$ можно рассчитать и другим способом. С высокой точностью сопротивление $R_{КЭД}$ обратно пропорционально I_K , т.е.

$$R_{КЭД} = \frac{U_Y}{I_K}. \quad (3.3)$$

Коэффициент пропорциональности U_Y называется напряжением Эрли. Это напряжение (Early voltage [VA]) можно найти в диалоговом окне установки параметров транзистора 2N2712, которое приведено на рис.3.11.

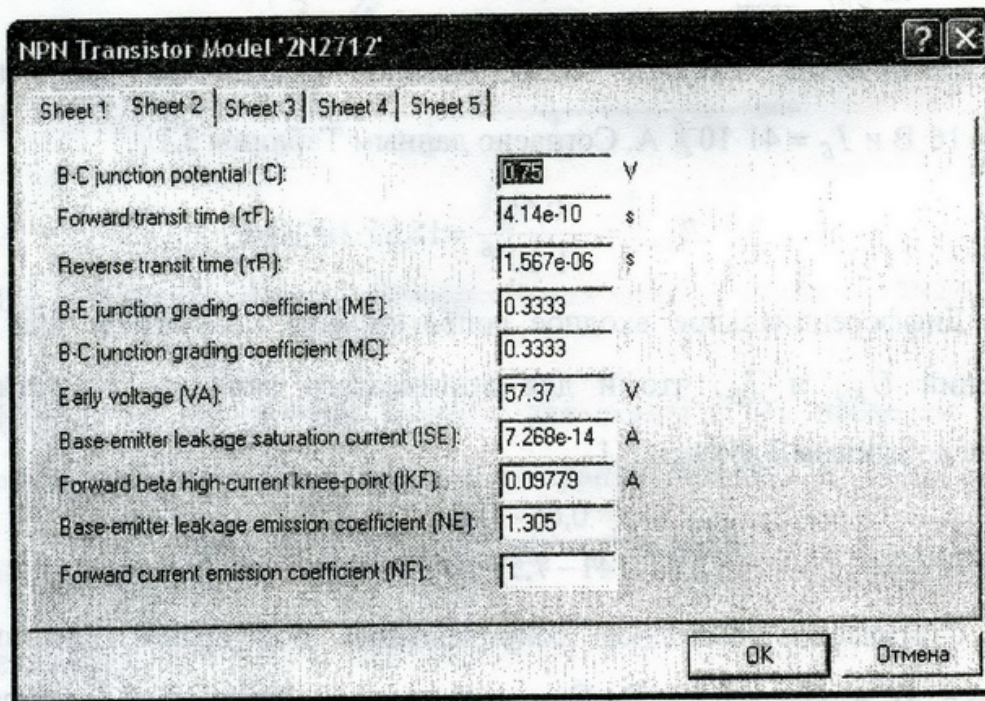


Рис. 3.11. Диалоговое окно установки параметров транзистора 2N2712

Как видно из рис.3.11, $U_Y = 57,37$ В. С помощью формулы (3.3) рассчитаем дифференциальное выходное сопротивление

$$R_{кЭД} = \frac{57,37}{5,33 \cdot 10^{-3}} = 10,76 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Сравнив величины $R_{кЭД}$, полученные двумя различными способами, можно сказать о неплохом совпадении результатов.

Статический коэффициент передачи тока базы β_C рассчитаем для величин $I_B = 41 \cdot 10^{-6}$ А и $|U_{кЭ2}| = 16$ В. Согласно данным Таблицы 3.3

$$\beta_C = \frac{5,99 \cdot 10^{-3}}{41,0 \cdot 10^{-6}} = 146.$$

Дифференциальный коэффициент передачи тока базы β_D рассчитаем для тех же величин I_B и $|U_{кЭ2}|$, что и статический коэффициент передачи β_C . Согласно данным Таблицы 3.3

$$\beta_D = \frac{(5,990 - 0,918) \cdot 10^{-3}}{(41,0 - 7,5) \cdot 10^{-6}} = 151.$$

Контрольные вопросы

1. Что называется биполярным транзистором?
2. Сколько $p-n$ переходов имеет биполярный транзистор?
3. Чем отличаются эмиттерная и коллекторная области биполярного транзистора?
4. Сколько существует режимов работы биполярного транзистора? Перечислить и охарактеризовать их.
5. Сколько существует схем включения транзистора? Перечислить и нарисовать их.
6. Какой режим работы транзистора используется для усиления сигналов?

7. Дать подробное описание активного режима работы транзистора. На каких явлениях основана работа транзистора в активном режиме? В чем заключается физический смысл этих явлений?

8. В чем заключается основная особенность конструкции транзистора? Как соотносятся ширина базы транзистора и длина свободного пробега носителей заряда?

9. Записать уравнение для токов транзистора.

10. Что называется статическим коэффициентом передачи тока эмиттера?

11. Привести определение статического коэффициента передачи тока базы.

12. Записать выражение взаимосвязи коэффициентов передачи.

13. В чем заключаются усилительные свойства транзистора?

14. Дать общее определение статических характеристик транзистора.

15. Привести входные характеристики, выходные характеристики и характеристики прямой передачи транзистора для схемы с общей базой.

16. Привести входные характеристики, выходные характеристики и характеристики прямой передачи транзистора для схемы с общим эмиттером.

17. В чем заключается эффект модуляции ширины базы?

18. Как проявляется эффект модуляции ширины базы на эмиттерных характеристиках?

19. Как проявляется эффект модуляции ширины базы на характеристиках прямой передачи для схемы с ОБ?

20. Как проявляется эффект модуляции ширины базы на базовых характеристиках?

21. Как проявляется эффект модуляции ширины базы на характеристиках прямой передачи для схемы с ОЭ?

22. Какую величину называют напряжением Эрли?

Программа лабораторной работы

1. Получить у преподавателя транзистор для проведения исследований.
2. Собрать в программной среде EWB схему рис.3.6 и провести измерения статических характеристик (базовых, коллекторных и характеристик прямой передачи) полученного транзистора.

При измерениях базовых характеристик необходимо так подбирать величину тока источника тока I_b (см. пример 3), чтобы напряжение на вольтметре $V1$ изменялось от нуля до 0,8 вольта (при этом напряжение на коллекторе $U_{кэ} = const$). Провести измерения базовых характеристик для двух значений величин $U_{кэ}$ (для $U_{кэ1} = 0$ и для $U_{кэ2}$ – произвольная величина в диапазоне от нуля до 20 В).

При измерениях коллекторных характеристик напряжение на коллекторе $U_{кэ}$ изменять в диапазоне от нуля до 16 В (см. пример 3). Измерения коллекторных характеристик провести для трех значений тока I_b . Величины тока I_b выбирать из точек базовых характеристик.

При измерении характеристик прямой передачи величины тока I_b также выбирать из точек базовых характеристик. Значения напряжения на коллекторе $|U_{кэ}|$ выбирать в диапазоне от нуля до 20 В.

Любая измеренная характеристика должна содержать не менее 10 –12 точек измерений.

3. Данные измерений занести в соответствующие таблицы (см. пример 3) и построить измеренные статические характеристики полученного транзистора.

4. Исходя из данных соответствующих таблиц и графиков построенных статических характеристик, определить следующие параметры полученного транзистора: $R_{бэс}$, $R_{бэд}$, $R_{кэс}$, $R_{кэд}$, β_c , β_d (см. пример 3).

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему измерений статических характеристик транзистора.
2. Таблицу результатов измерений базовых характеристик транзистора.
3. График измеренных базовых характеристик транзистора.
4. Таблицу результатов измерений коллекторных характеристик транзистора.
5. График измеренных коллекторных характеристик транзистора.
6. Таблицу результатов измерений характеристик прямой передачи транзистора.
7. График измеренных характеристик прямой передачи транзистора.
8. Расчет следующих параметров полученного транзистора: $R_{БЭС}$, $R_{БЭД}$, $R_{КЭС}$, $R_{КЭД}$, β_C , β_D .

Задачи для самостоятельного решения

Согласно программе лабораторной работы провести исследования следующих транзисторов. Транзистор выбирается из библиотеки Nation12 (группа 1) или из библиотеки Zetex (группа 2), причем номер варианта совпадает с порядковым номером транзистора в списке.

Список литературы

1. Основы промышленной электроники: Учебник для вузов / В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, А.Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков; Под ред. В.Г. Герасимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1978. – 336 с.
2. Валенко В.С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств / Под ред. А.А. Ровдо. – М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2001. – 368 с.
3. Прянишников В.А. Электроника: полный курс лекций. – 4-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 416 с.
4. Кучумов А.И. Электроника и схемотехника: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гелиос АРВ, 2004, 336 с.
5. Панфилов Д.И. и др. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. – М.: Додека-XXI, 2002.
6. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. Издание 5-е. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004, 800 с.

Учебное издание

Черных Сергей Викторович

**ЭЛЕКТРОНИКА
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
НА ELECTRONICS WORKBENCH**

*Учебно-методическое пособие
для студентов направления подготовки бакалавров
210400 Телекоммуникации
и специальности 210406 Сети связи и системы коммутации*

Печатается в авторской редакции с готового оригинал-макета.

Подписано в печать 11.02 2008 г. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 5,6.
Уч.-изд. л. 6,0. Тираж 75 экз. Заказ . «С» 18.

Издательство Волгоградского государственного университета.
400062, г. Волгоград, просп. Университетский, 100.