

Министерство образования Российской Федерации
Владимирский государственный университет
Кафедра информатики и вычислительной техники

ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания к лабораторным работам

Составитель
С.Г. МОСИН

Владимир 2002

УДК 681.3 (621.382 : 076.5)

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент
кафедры радиотехники и радиосистем
Владимирского государственного университета
А.С. Меркутов

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Электроника и микроэлектроника: Метод. указания к лабораторным работам / Владим. гос. ун-т; Сост. С.Г. Мосин. Владимир, 2002. 36 с.

Содержат методические разработки и материалы к проведению лабораторных занятий по дисциплине «Электроника». Лабораторные работы рассчитаны на исследование принципов функционирования полупроводниковых приборов (диодов и транзисторов), а также особенностей построения на их основе практических аналоговых и цифровых схем.

Предназначены для студентов специальности 220100 - вычислительные машины, комплексы, системы и сети.

Табл. 2. Ил. 14. Библиогр.: 13 назв.

УДК 681.3 (621.382 : 076.5)

ВВЕДЕНИЕ

Развитие вычислительной техники и средств математического моделирования позволяет изменить традиционные подходы к изучению, анализу и синтезу электронных устройств. Современные системы автоматизированного проектирования обладают обширными библиотеками компонентов и позволяют исследовать физические, схемотехнические и топологические особенности функционирования как самих электронных приборов, так и электронных схем на их основе.

Предлагаемый цикл лабораторных работ охватывает различные теоретические разделы курса «Электроника» и предназначен для изучения экспериментальных схем и практического подтверждения теоретических положений. Выполнение лабораторных работ осуществляется с использованием пакета схемотехнического моделирования *PSpice* 6.0 и обучающей системы «*Introduction to Microelectronics*» (*ITM*).

Пакет *PSpice* позволяет моделировать работу исследуемых схем в различных режимах: по постоянному току, в частотной и временной областях. Графический интерпретатор *Probe* обеспечивает просмотр и обработку результатов моделирования.

Система *ITM* разработана Этьеном Сигардом в университете г. Тулуза и используется более чем в 300 университетах мира при изучении основ микроэлектроники и топологического проектирования. *ITM* включает три программных модуля, которые применяются для исследования особенностей функционирования электронных приборов на топологическом уровне, изучения способов проектирования масок для изготовления микросхем и ознакомления с процессами производства микросхем по разным технологиям.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДОВ

1. Цель работы. Исследовать принципы построения и влияние топологических параметров на выходные характеристики полупроводниковых диодов с использованием системы *ITM*, а также вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов, представленных математической моделью пакета схемотехнического моделирования *PSpice*. Изучить влияние температуры окружающей среды на свойства ВАХ.

2. Основные определения и понятия

Полупроводниковым диодом (ПД) называют полупроводниковый прибор с одним электрическим *p-n*-переходом и двумя выводами - анодом и катодом.

Большинство ПД выполняют на основе несимметричных *p-n*-переходов. Низкоомную область диодов, имеющую более высокую концентрацию примесей, называют эмиттером, а высокоомную, с меньшей концентрацией, - базой.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) ПД – это зависимость тока через *p-n*-переход от величины и полярности приложенного напряжения. Аналитически ВАХ представляется выражением:

$$I = I_0 [\exp(U/\phi_T) - 1],$$

где I – ток, протекающий через *p-n*-переход, I_0 – обратный ток насыщения *p-n*-перехода; U – напряжение на *p-n*-переходе; $\phi_T = kT/q$ – тепловой потенциал; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – заряд электрона.

Свойства *p-n*-перехода существенно зависят от температуры окружающей среды. При повышении температуры усиливается генерация пар электрон-дырка, увеличиваются концентрация неосновных носителей и собственная проводимость полупроводника. С ростом температуры происходит увеличение как прямого, так и обратного токов *p-n*-перехода. Кроме того, на ВАХ диода влияют и топологические параметры ПД.

Эквивалентная схема модели диода, используемая в системе *PSpice* (рис. 1.1), состоит из идеального диода, изображенного в виде нелинейного зависимого источника тока $I(U)$, емкости *p-n*-перехода C и объемного сопро-

тивления RS . Список основных параметров математической модели диода приведен в таблице.

Имя параметра	Параметр	Единица измерения
IS	Ток насыщения при температуре 27°C	А
RS	Объемное сопротивление	Ом
N	Коэффициент неидеальности	-
VJ	Контактная разность потенциалов	В
CJO	Барьерная емкость при нулевом смещении	Ф
BV	Напряжение обратного пробоя (положительная величина)	В
IBV	Начальный ток пробоя (положительная величина)	А

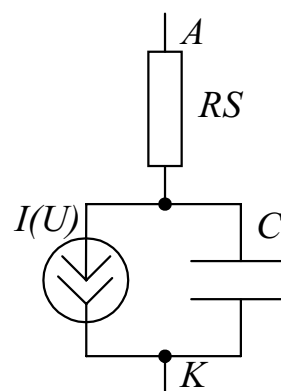


Рис. 1.1. Нелинейная модель ПД

ВАХ диода при положительном напряжении U на переходе аппроксимируется следующей зависимостью:

$$I_{\text{пр}} = IS \left[\exp(U / (N \phi_T)) - 1 \right],$$

где $I_{\text{пр}}$ – ток диода при положительном напряжении на переходе, IS – ток насыщения при температуре 27°C , N – коэффициент неидеальности.

Ток диода при отрицательном напряжении на переходе $I_{\text{обр}}$ определяется выражением, характеризующим явление пробоя:

$$I_{\text{обр}} = IBV \exp \left[- (BV + U) / \phi_T \right],$$

где IBV – начальный ток пробоя, BV – напряжение обратного пробоя.

Емкость перехода C описывается выражением

$$C = C_{\text{диф}} + C_{\text{бар}},$$

где $C_{\text{диф}} = TT \cdot G$ – диффузионная емкость перехода, TT – время переноса заряда, G – дифференциальная проводимость перехода для текущих значений тока и напряжения; $C_{\text{бар}}$ – барьерная емкость перехода, равная:

$$C_{\text{бар}} = \begin{cases} CJO(1 - U/VJ)^{-M}, & \text{при } V \leq FC \cdot VJ, \\ CJO(1 - FC)^{-(1+M)} [1 - FC(1 + M) + M \cdot U/VJ], & \text{при } V > FC \cdot VJ, \end{cases}$$

где CJO – барьерная емкость при нулевом смещении; VJ – контактная разность потенциалов; FC – коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода; M – коэффициент, учитывающий плавность p - n -перехода.

Диффузионная емкость отражает влияние перераспределения подвижных носителей. Барьерная емкость моделирует приращение пространственного заряда при изменении напряжения на p - n -переходе. Следует помнить, что диффузионная емкость является доминирующей при прямом смещении, а барьерная – при обратном.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Исследование топологии диодов

Для исследования влияния топологических параметров полупроводниковых диодов на их выходные характеристики необходимо:

- 1) запустить программу *prof.exe*;
- 2) из предложенных элементов выбрать диод (*Diode N*);
- 3) изучить особенности расположения областей p - и n -типов на подложке рассматриваемого прибора (окна *<Process Simulation>* и *<View Window>* рис. 1.2);
- 4) исследовать влияние параметров - ширина (*Width*) и длина (*Length*) полупроводникового диода на его характеристики. Выбор параметров *Width* и *Length* для изменения их значений осуществляется в пункте меню *<Options>*;
- 5) полученные результаты представить в виде графиков зависимости исследуемых характеристик от изменяемых параметров;
- 6) провести анализ полученных результатов.

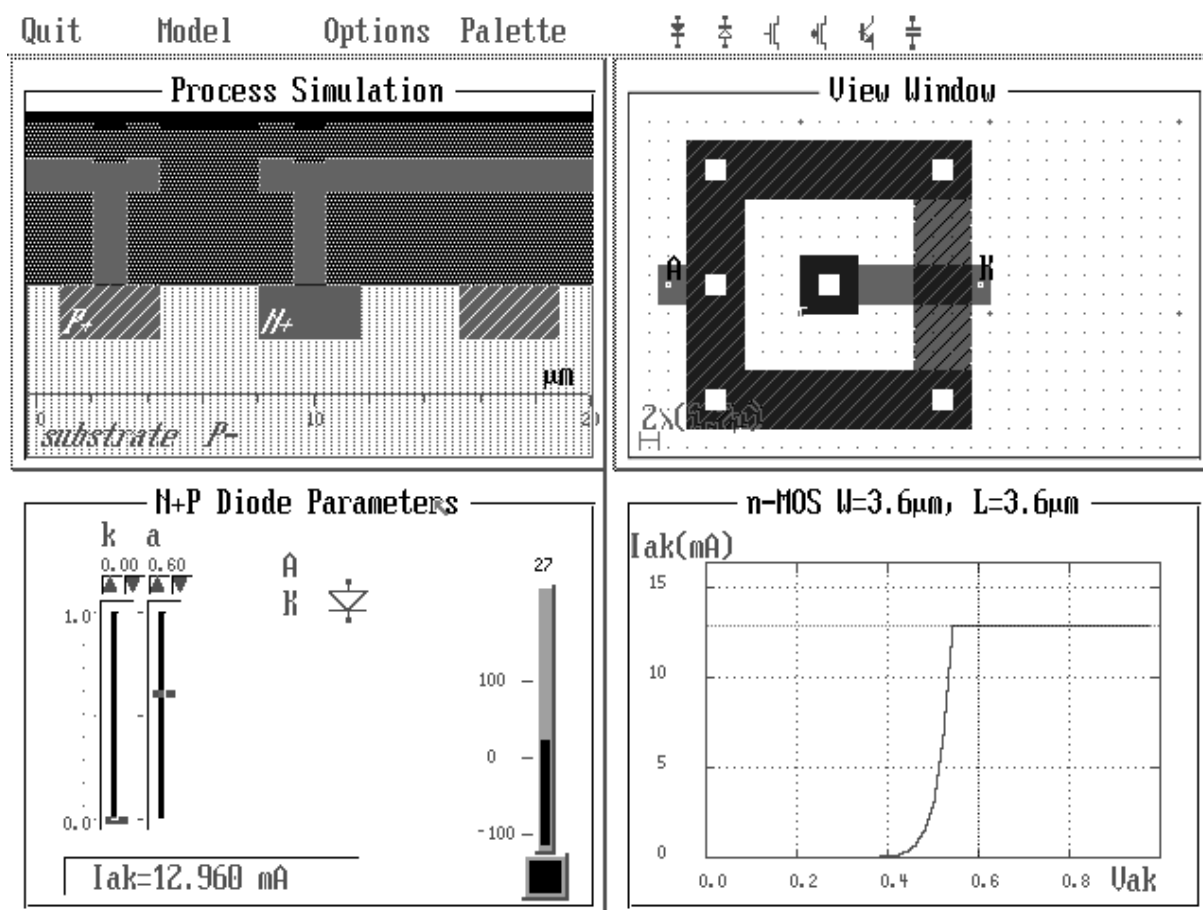


Рис. 1.2. Рабочее окно системы ITM

3.2. Исследование вольт-амперных характеристик диодов

Для проведения исследования вольт-амперных характеристик диодов, представленных математической моделью пакета схемотехнического моделирования *PSpice* необходимо:

- 1) изучить входной язык системы автоматизированного проектирования *PSpice*;
- 2) ознакомиться с параметрами схемы замещения полупроводникового диода системы *PSpice*;
- 3) получить индивидуальное задание (параметры модели исследуемого диода);
- 4) изучить и описать принципиальную схему (рис. 1.3), предназначенную для снятия вольт-амперных характеристик полупроводникового диода, на входном языке системы *PSpice* в виде текстового файла с расширением *<.cir>*;

5) запустить программу *pspice.exe* с параметром <имя файла.cir>, где <имя файла.cir> содержит описание и задание на моделирование исследуемой схемы;

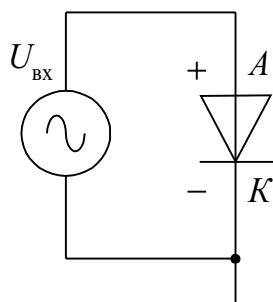


Рис. 1.3. Схема включения диода для получения его ВАХ в пакете PSpice

6) осуществить отладку описания;

7) в результате моделирования схемы необходимо:

- а) получить ВАХ $I = f(U)$ диода при комнатной температуре (27 °C), а также при температурах: -30, +40 и 60 °C;
- б) исследовать зависимость ВАХ диода от величины тока насыщения прибора (I_S);
- в) получить зависимость величины сопротивления диода при его прямом и обратном включении при постоянном напряжении от температуры ($R_d = f(t \text{ } ^\circ\text{C})$, при $U_{AK} = \text{const}$);

8) выполнить анализ всех результатов, полученных в ходе проведения экспериментов;

9) сравнить результаты исследований предложенного диода с его характеристиками из справочной литературы;

10) оформить отчет.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Титульный лист.
- Цель работы и задание.
- Графики, полученные в ходе исследования топологических параметров полупроводниковых диодов, и их объяснение.
- Принципиальную схему.
- Входной файл с описанием схемы и заданиями на ее моделирование в системе *PSpice*.
- Табличные значения результатов моделирования.
- Графики зависимостей.
- Технические характеристики диода из справочной литературы.
- Анализ полученных результатов и выводы по работе.

5. Варианты индивидуальных заданий

- 5.1. **.model KD202D D**(*IS*=4.012E-9 *N*=1.56 *RS*=4.7E-2 *CJO*=82p
+ *TT*=3.19E-7 *M*=0.28 *VJ*=0.73 *FC*=0.5 *BV*=600 *IBV*=1E-10
+ *EG*=1.11 *XTI*=3);
- 5.2. **.model KD204A D**(*IS*=4.110E-9 *N*=1.52 *RS*=7.5E-2 *CJO*=31.5p
+ *TT*=1.16E-7 *M*=0.35 *VJ*=0.68 *FC*=0.5 *BV*=400 *IBV*=1E-10
+ *EG*=1.11 *XTI*=3);
- 5.3. **.model KD213A D**(*IS*=2.790E-9 *N*=1.21 *RS*=0.027 *CJO*=275.1p
+ *TT*=2.24E-8 *M*=0.21 *VJ*=0.72 *FC*=0.5 *BV*=200 *IBV*=1E-10
+ *EG*=1.11 *XTI*=3);
- 5.4. **.model 2D219A D**(*IS*=5.760E-8 *N*=1.12 *RS*=3E-3 *CJO*=63.1p
+ *TT*=1.23E-9 *M*=0.33 *VJ*=0.54 *FC*=0.5 *BV*=15 *IBV*=1E-11
+ *EG*=1.11 *XTI*=3);
- 5.5. **.model KD521A D**(*IS*=1.15E-13 *N*=1.0 *RS*=3.21 *CJO*=2.25p
+ *TT*=3.12E-9 *M*=0.26 *VJ*=0.68 *FC*=0.5 *BV*=75 *IBV*=1E-11
+ *EG*=1.11 *XTI*=3).

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните принципы функционирования полупроводникового диода.
2. Назовите основные характеристики и параметры полупроводниковых диодов.
3. Как зависит величина тока при прямом и обратном включении *p-n*-перехода от температуры и почему?
4. Как зависит величина сопротивления диода при его прямом и обратном включении от температуры окружающей среды?
5. Перечислите разновидности полупроводниковых диодов.
6. Какие параметры полупроводниковых диодов приводятся в справочной литературе?
7. Назовите особенности работы с системой *ITM*.
8. Перечислите виды анализа системы *PSpice*, расскажите о подготовке заданий на моделирование.
9. Назовите особенности описания элементов в системе *PSpice*.
10. Объясните назначение моделей и параметров компонентов.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ

1. Цель работы. Исследовать принципы построения и функционирования полевых транзисторов, а также влияние топологических параметров на выходные характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором (МДП-транзисторов). Исследовать статические характеристики биполярных транзисторов, представленных математической моделью. Изучить влияние температуры окружающей среды на свойства ВАХ транзисторов.

2. Основные определения и понятия

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, в котором управление током осуществляется электрическим полем, вызывающим изменение сопротивления полупроводникового слоя, проводящего ток. Электрод, от которого начинают движение основные носители заряда в канале, называют *истоком*, а электрод, к которому движутся основные носители заряда, – *стоком*, металлический электрод, создающий эффект поля, – *затвором*. В полевых транзисторах с изолированным каналом (*МДП-транзистор*) затвор и канал изолированы пленкой диэлектрика, а *каналом* является тонкий слой на поверхности подложки с противоположным типом проводимости.

Если напряжение на затворе отсутствует, то сопротивление между истоком и стоком, определяемое двумя встречно включенными *p-n*-переходами в местах контакта подложки и областей стока и истока противоположного типа проводимости, очень велико. При подаче на затвор отрицательного (положительного) по отношению к истоку напряжения в полупроводнике возникает электрическое поле, которое вытягивает из *n*-подложки дырки (из *p*-подложки – электроны), увеличивая их концентрацию в тонком приповерхностном слое, и изменяет тип его проводимости на противоположный. Данный тонкий слой образует проводящий канал, соединяющий области истока и стока. Канал может иметь проводимость как *p*-типа (образуется дырками), так и *n*-типа (образуется электронами). Изменяя напряжение на затворе, можно управлять током стока транзистора.

В выходных характеристиках МДП-транзистора можно выделить две рабочие области: линейную и область насыщения. В линейной области транзистор может быть использован как омическое управляемое сопротивление. Режим насыщения характеризуется тем, что с увеличением напряжения между истоком и стоком $U_{си}$ ток стока I_c меняется незначительно. Это происходит потому, что при большом напряжении $U_{си}$ наблюдается

неравномерное распределение напряженности электрического поля вдоль канала, причем оно увеличивается по мере приближения к стоку. В результате канал вблизи стока становится настолько узким, что наступает динамическое равновесие, когда увеличение напряжения $U_{си}$ вызывает уменьшение ширины канала и повышение его сопротивления, что приводит к незначительному изменению I_c при дальнейшем росте $U_{си}$.

Биполярный транзистор (БТ) – это полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами, имеющий три вывода. БТ представляет собой систему p - n - p - или n - p - n -типа, полученную в одном монокристалле полупроводника. Внутренняя область транзистора, разделяющая p - n -переходы, называется *базой*, внешний слой, предназначенный для инжектирования носителей в базу, – *эмиттером*. Другой внешний слой, вытягивающий носители из базы, называется *коллектором*, примыкающий к эмиттеру p - n -переход – *эмиттерным (ЭП)*, а примыкающий к коллектору – *коллекторным (КП)*.

Каждый переход БТ можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают четыре режима работы БТ: *нормальный* – на эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный – обратное; *инверсный* – к коллекторному переходу подведено прямое напряжение, а к эмиттерному – обратное; *насыщения* – оба перехода находятся под прямым напряжением; *отсечки* – к обоим переходам подведены обратные напряжения.

При использовании БТ один из электродов оказывается общим для входной и выходной цепей. Все напряжения в схеме измеряются относительно данного электрода. Различают три схемы включения БТ: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК). В каждой схеме включения транзистор характеризуется семействами входных и выходных ВАХ, показывающими соответственно зависимость входного тока от входного напряжения (при постоянном значении выходного напряжения транзистора) и выходного тока от выходного напряжения (при постоянном входном токе транзистора).

При определении переменных составляющих токов и напряжений и при условии, что БТ работает в активном режиме, его часто представляют в виде линейного четырехполюсника, на входе которого действует напряжение U_1 и протекает ток I_1 , а на выходе – напряжение U_2 и ток I_2 . В этом случае транзистор удобно описывать дифференциальными h -параметрами. Система уравнений, показывающая связь напряжений и токов с h -параметрами, имеет вид:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix}.$$

В качестве нелинейной модели БТ наибольшее распространение получили различные модификации модели Эберса-Молла. Эквивалентная схема модели Эберса-Молла с одним источником тока, управляемым током, приведена на рис. 2.1. Данная модель транзистора описывается более чем двадцатью параметрами, список некоторых из них приведен в таблице.

Статический режим работы БТ описывается с помощью модифицированных уравнений Эберса-Молла:

$$I_b = I_{be1}/BF + I_{be2} + I_{bc1}/BR + I_{bc2};$$

$$I_c = I_{be1}/Q_b - I_{bc1}/Q_b - I_{bc1}/BR - I_{bc2};$$

$$I_{be1} = IS \left[\exp(V_{be}/(NF \cdot \phi_T)) - 1 \right];$$

$$I_{be2} = ISE \left[\exp(V_{be}/(NE \cdot \phi_T)) - 1 \right];$$

$$I_{bc1} = IS \left[\exp(V_{bc}/(NR \cdot \phi_T)) - 1 \right];$$

$$I_{bc2} = ISC \left[\exp(V_{bc}/(NC \cdot \phi_T)) - 1 \right].$$

Данный вариант модели лежит в основе более сложных моделей, широко используемых в пакетах схемотехнического моделирования (*PSpice*, *Micro-Cap* и др.).

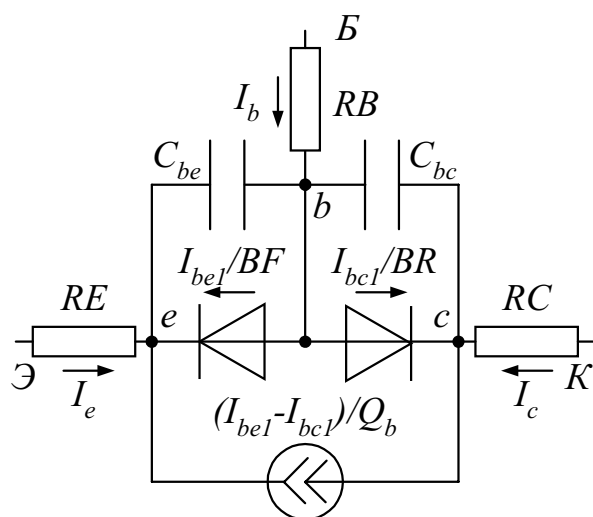


Рис. 2.1. Модифицированная модель Эберса-Молла

Имя параметра	Параметр	Единица измерения
<i>IS</i>	Ток насыщения при температуре 27 0С	А
<i>BF</i>	Максимальный коэффициент усиления тока в нормальном режиме в схеме с ОЭ	-
<i>BR</i>	Максимальный коэффициент усиления тока в инверсном режиме в схеме с ОЭ	-
<i>NF</i>	Коэффициент неидеальности в нормальном режиме	-
<i>NR</i>	Коэффициент неидеальности в инверсном режиме	-
<i>ISE</i>	Обратный ток ЭП	А
<i>ISC</i>	Обратный ток КП	А

3. Порядок выполнения работы

3.1. Исследование полевых транзисторов

Для изучения принципов построения полевых транзисторов и исследования влияния топологических параметров ПТ на их выходные характеристики необходимо:

- 1) запустить программу *prof.exe*;
- 2) из предложенных элементов выбрать МДП-транзистор с каналом *n*-типа или *p*-типа (*N Channel MOS* или *P Channel MOS* соответственно);
- 3) изучить особенности расположения областей *p*- и *n*-типов на подложке рассматриваемого прибора (окна *<Process Simulation>* и *<View Window>*);
- 4) исследовать влияние напряжения затвора (*Gate*) на изменение характеристик канала и величину тока $I_{\text{си}}$ (I_{ds}). Для МДП-транзистора с каналом *p*-типа установить значения напряжений: стока (*Drain*) равным нулю ($V_d = 0.0$ В), а истока (*Source*) и затвора – пяти вольтам ($V_g = 5.0$ В, $V_s = 5.0$ В), затем постепенно уменьшать величину напряжения V_g и фиксировать изменения канала и тока I_{ds} . Для МДП-транзистора с каналом *n*-типа начальные значения напряжений на истоке, затворе и стоке необходимо принять равными 0 В, 0 В и 5 В соответственно;
- 5) исследовать, как влияет изменение напряжения между стоком и истоком при постоянном напряжении затвора на величину тока I_{ds} ;
- 6) изучить, как величина максимально допустимого напряжения источника питания влияет на электрические характеристики МДП-транзистора (*<Options: Vdd power supply>*);
- 7) исследовать влияние параметров ширина (*<Options: MOS Width>*) и длина (*<Options: MOS Length>*) МДП-транзистора на его характеристики;
- 8) полученные результаты представить в виде графиков зависимости исследуемых характеристик от изменяемых параметров;
- 9) провести анализ полученных результатов.

3.2. Исследование биполярных транзисторов

Для исследования статических характеристик биполярных транзисторов, представленных математической моделью пакета схемотехнического моделирования *PSpice* необходимо:

- 1) получить индивидуальное задание (модель исследуемого биполярного транзистора);

2) ознакомиться с принципиальными схемами, предназначенными для получения входных (рис. 2.2) и выходных (рис. 2.3) характеристик полупроводникового диода, описать их на входном языке системы *PSpice*;

3) загрузить файл *pspice.exe* с параметром <имя файла.cir>, где <имя файла.cir> содержит описание и задание на моделирование исследуемой схемы;

4) отладить описание и выполнить моделирование;

5) в результате моделирования схемы необходимо:

а) получить семейство входных характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, ($I_{\bar{б}} = f(U_{\bar{бэ}})$), при

$U_{кэ} \in [5 \text{ В} \dots 10 \text{ В}]$ и выходных характеристик ($I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$), при $I_{\bar{б}} \in [0 \dots 600 \text{ мкА}]$;

б) произвести расчет по полученным характеристикам транзистора, включенного по схеме с ОЭ, дифференциальных параметров $h_{11э}$, $h_{12э}$, $h_{21э}$, $h_{22э}$ для номинального режима ($U_{кэ} = 6 \text{ В}$, $U_{\bar{бэ}} = 0.8 \text{ В}$);

в) исследовать влияние температуры на поведение входных и выходных характеристик биполярного транзистора;

г) изучить влияние параметра BF математической модели биполярного транзистора на ВАХ данного прибора;

6) выполнить анализ всех результатов, полученных в ходе проведения экспериментов;

7) сравнить результаты исследований биполярного транзистора, предложенного в индивидуальном задании, с его характеристиками из справочной литературы;

8) оформить отчет.

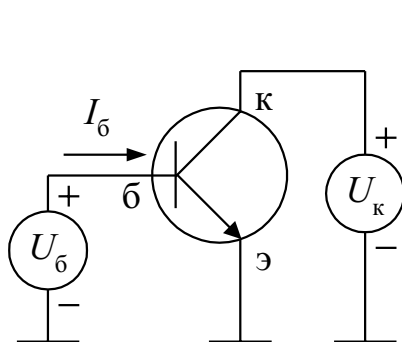


Рис. 2.2. Схема подключения БТ к источникам питания для получения его входных характеристик

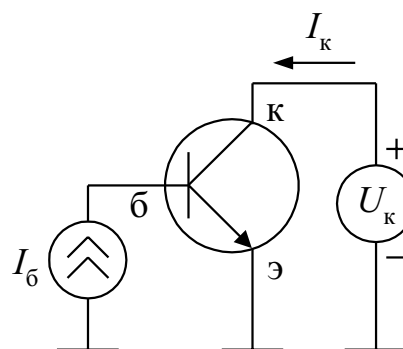


Рис. 2.3. Схема подключения БТ к источникам питания для получения его выходных характеристик

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Титульный лист.
- Цель работы и задание.
- Графики, полученные в ходе исследования полевого транзистора с изолированным затвором на топологическом уровне, и их объяснение.
- Входные файлы с описаниями принципиальных схем установок для получения статических характеристик биполярного транзистора и заданиями на моделирование в системе *PSpice*.
- Табличные значения результатов моделирования.
- Семейства графиков входных и выходных характеристик, а также их зависимости от температуры и величины коэффициента усиления BF .
- Последовательность расчета и результаты получения h -параметров.
- Технические характеристики биполярного транзистора из справочной литературы.
- Анализ полученных результатов.
- Выводы по работе.

5. Варианты индивидуальных заданий

- 5.1. **.model** 2T316B NPN($IS=3.49f$ $Xti=3$ $Eg=1.11$ $Vaf=102$ $Bf=74.97$
+ $Ne=1.483$ $Ise=44.72f$ $Ikf=0.1322$ $Xtb=1.5$ $Var=55$ $Br=0.2866$
+ $Nc=2$ $Isc=447f$ $Ikr=0.254$ $Rb=66.7$ $Rc=7.33$ $Cjc=3.934p$
+ $Vjc=0.65$ $Mjc=0.33$ $Fc=0.5$ $Cje=1.16p$ $Vje=0.69$ $Mje=0.33$
+ $Tr=65.92n$ $Tf=94.42p$ $Itf=0.15$ $Vtf=15$ $Xtf=2$);
- 5.2. **.model** 2T316D NPN($IS=2.753f$ $Xti=3$ $Eg=1.11$ $Vaf=96$ $Bf=136.5$
+ $Ne=2.496$ $Ise=12.8p$ $Ikf=97.23m$ $Xtb=1.5$ $Var=55$ $Br=0.6577$
+ $Nc=2$ $Isc=15.5p$ $Ikr=0.12$ $Rb=70.6$ $Rc=8.35$ $Cjc=4.089p$
+ $Vjc=0.65$ $Mjc=0.33$ $Fc=0.5$ $Cje=1.16p$ $Vje=0.69$ $Mje=0.33$
+ $Tr=27.84n$ $Tf=78.97p$ $Itf=0.151$ $Vtf=25$ $Xtf=2$);
- 5.3. **.model** KT3102B NPN($IS=3.628f$ $Xti=3$ $Eg=1.11$ $Vaf=72$ $Bf=303.3$
+ $Ne=13.47$ $Ise=43.35n$ $Ikf=96.35$ $Xtb=1.5$ $Var=30$ $Br=3.201$
+ $Nc=2$ $Isc=5.5p$ $Ikr=0.1$ $Rb=37$ $Rc=1.12$ $Cjc=11.02p$ $Vjc=0.65$
+ $Mjc=0.33$ $Fc=0.5$ $Cje=13.31p$ $Vje=0.69$ $Mje=0.33$ $Tr=41.67n$
+ $Tf=493.4p$ $Itf=0.12$ $Vtf=50$ $Xtf=2$).

Контрольные вопросы и задания

1. Расскажите об устройстве полевого транзистора с изолированным затвором.
2. На чем основано управление током в МДП-транзисторе?
3. Какой электрический режим полевого транзистора называется режимом насыщения?
4. Чем объясняется слабый рост тока МДП-транзистора в режиме насыщения при увеличении напряжения сток-исток?
5. Объясните принцип действия транзистора $n-p-n$ -типа.
6. Назовите основные характеристики биполярного транзистора.
7. Как осуществляется расчет дифференциальных h -параметров, для чего они используются?
8. Как зависит величина коллекторного тока транзистора от температуры окружающей среды?
9. Какие параметры биполярного транзистора приводятся в его справочных данных?
10. Как биполярный транзистор описывается в системе *PSpice*?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

1. Цель работы. Ознакомиться с принципом работы резисторного усилительного каскада и исследовать влияние параметров элементов принципиальной схемы на его основные параметры и характеристики.

2. Основные определения и понятия

Усилителем электрических колебаний называется устройство, которое позволяет при наличии на входе колебаний с некоторым уровнем мощности получить на выходной нагрузке колебания той же формы, но с большим уровнем мощности. Усиление происходит за счет того, что схема усилителя содержит источник энергии, обычно называемый источником питания, и активный усилительный элемент, например транзистор, с помощью которого энергия источника питания преобразуется в энергию полезных колебаний. Входное колебание является управляющим, так как под его воздействием на выходе усилительного элемента возникают более мощные колебания, передаваемые в нагрузку.

В данной лабораторной работе исследуется типичная схема усилительного каскада на транзисторе с ОЭ (см. рисунок). Входное усиливаемое переменное напряжение $U_{\text{вх}}$ подводится ко входу усилителя через разделительный конденсатор C_1 . Конденсатор C_1 препятствует передаче постоянной составляющей напряжения входного сигнала на вход усилителя, которая может вызвать нарушение режима работы по постоянному току транзистора Q_1 . Усиленное переменное напряжение, выделяемое на коллекторе транзистора Q_1 , подводится к внешней нагрузке с сопротивлением $R_{\text{н}}$ через разделительный конденсатор C_2 . Этот конденсатор служит для разделения выходной коллекторной цепи от внешней нагрузки по постоянной составляющей коллекторного тока. Значения постоянных составляющих токов и напряжений в цепях транзистора зависят от режима его работы (начального положения рабочей точки).

Рабочей точкой (РТ) транзистора называют точку пересечения нагрузочной прямой с одной из статических ВАХ. Режим работы транзистора определяется начальным положением РТ и характеризуется совокупностью постоянных составляющих токов и напряжений во входной и выходной цепях. При работе транзистора в режиме усиления *класса А* РТ должна находиться в средней части нагрузочной прямой. Предельные изменения входного тока базы должны быть такими, чтобы РТ не выходила за пределы активной области выходной ВАХ транзистора.

Начальное положение РТ обеспечивается делителем напряжения, состоящим из резисторов R_1 и R_2 . При обеспечении режима работы транзистора необходимо осуществить температурную стабилизацию положения РТ (уменьшить влияние температуры на начальное положение РТ). С этой целью в эмиттерную цепь введен резистор R_3 , на котором создается напряже-

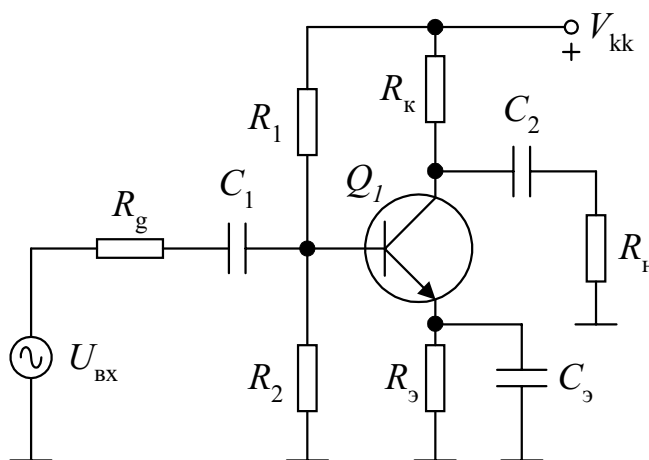


Схема резисторного усилительного каскада

ние отрицательной обратной связи (ООС) по постоянному току. Для устранения ООС по переменному току при наличии входного переменного сигнала резистор R_3 шунтируют конденсатором C_3 , сопротивление которого на частоте усиливаемого сигнала должно быть незначительным.

Работу усилителей принято оценивать рядом показателей и характеристик, основными из которых являются: коэффициент усиления, амплитудная, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики.

Коэффициентом усиления называется отношение выходной величины, характеризующей уровень сигнала, к входной. В качестве таких величин могут употребляться напряжение, ток или мощность.

Амплитудная характеристика выражает зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного. Данная характеристика снимается при подаче на вход усилителя гармонического колебания с частотой, лежащей в полосе пропускания усилителя.

Под *амплитудно-частотной характеристикой* усилителя понимается зависимость модуля коэффициента усиления от частоты сигнала.

Фазо-частотной характеристикой усилителя называется зависимость фазового сдвига выходного гармонического колебания относительно входного при изменении частоты.

3. Порядок выполнения работы

Для исследования принципов работы резисторного усилительного каскада необходимо:

1) описать принципиальную схему резисторного усилительного каскада (см. рисунок) на входном языке системы *PSpice* в соответствии с полученным заданием;

2) рассчитать постоянные напряжения и токи транзистора (параметры рабочей точки). Определить режим работы транзистора;

3) построить амплитудную характеристику усилительного каскада $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ при частоте входного сигнала $f = F_{\text{ср}}$. Входное напряжение изменяется в диапазоне от 0 до $U_{\text{вх max}}$;

4) получить амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики усилителя при номинальных параметрах компонентов и при замене $R_{\text{н}}$ на $R_{\text{н1}}$. Построить соответствующие графики;

5) исследовать зависимость коэффициента усиления от величины сопротивления нагрузки $K = f(R_{\text{н}})$. При постоянных значениях амплитуды и

частоты входного напряжения $U_{\text{вх max}}$ и $F_{\text{ср}}$, варьируя величину сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$, вычислить выходное напряжение, рассчитать коэффициент передачи по напряжению $K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ и построить график зависимости $K = f(R_{\text{н}})$;

6) исследовать влияние величины емкости C_3 на коэффициент усиления резисторного каскада. При различных значениях емкости (C_3) из диапазона от $0.1C_3$ до $10C_3$ рассчитать амплитудно-частотные характеристики усилителя и построить семейство графиков для различных значений емкости C_3 ;

7) исследовать роль емкостей C_1 и C_2 в разделении режимов отдельных каскадов по постоянным составляющим тока и напряжения. Построить временные диаграммы для напряжения в узлах подключения разделительных емкостей;

8) исследовать, как изменение температуры влияет на падение напряжения на резисторе R_3 и величину тока базы транзистора Q_1 ;

9) полученные результаты представить в виде графиков зависимости исследуемых характеристик от изменяемых параметров;

10) провести анализ полученных результатов;

11) оформить отчет.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Титульный лист.
- Цель работы и задание.
- Входной файл с описанием принципиальной схемы резисторного усилительного каскада и заданиями на ее моделирование в системе *PSpice*.
- Табличные значения результатов моделирования.
- Графики амплитудной, амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик усилительного каскада.
- Графики зависимостей коэффициента усиления от величины сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ и значения емкости эмиттерного повторителя C_3 .
- Временные диаграммы, поясняющие влияние разделительных емкостей на работу усилительного каскада.
- Анализ полученных результатов.
- Выводы по работе.

5. Варианты индивидуальных заданий

- 5.1. $R_g = 10 \text{ кОм}$; $R_1 = 82 \text{ кОм}$; $R_2 = 10 \text{ кОм}$; $R_k = 7.5 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$;
 $R_H = 10 \text{ кОм}$; $C_1 = 0.72 \text{ мкФ}$; $C_2 = 0.25 \text{ мкФ}$; $C_3 = 30 \text{ мкФ}$;
 $R_{H1} = 50 \text{ кОм}$; $Q_1 - \text{Q2T316B}$; $V_{кк} = 15 \text{ В}$; $F_{cp} = 4.5 \text{ кГц}$;
 $U_{вх max} = 10 \text{ мВ}$;
- 5.2. $R_g = 10 \text{ кОм}$; $R_1 = 50 \text{ кОм}$; $R_2 = 4 \text{ кОм}$; $R_k = 10 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$;
 $R_H = 10 \text{ кОм}$; $C_1 = 1 \text{ мкФ}$; $C_2 = 0.5 \text{ мкФ}$; $C_3 = 10 \text{ мкФ}$; $R_{H1} = 75 \text{ кОм}$;
 $Q_1 - \text{Q2T316D}$; $V_{кк} = 20 \text{ В}$; $F_{cp} = 10 \text{ кГц}$; $U_{вх max} = 25 \text{ мВ}$;
- 5.3. $R_g = 10 \text{ кОм}$; $R_1 = 110 \text{ кОм}$; $R_2 = 10 \text{ кОм}$; $R_k = 10 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$;
 $R_H = 10 \text{ кОм}$; $C_1 = 1 \text{ мкФ}$; $C_2 = 0.5 \text{ мкФ}$; $C_3 = 10 \text{ мкФ}$; $R_{H1} = 50 \text{ кОм}$;
 $Q_1 - \text{KT3102B}$; $V_{кк} = 15 \text{ В}$; $F_{cp} = 5 \text{ кГц}$; $U_{вх max} = 15 \text{ мВ}$;
- 5.4. $R_g = 10 \text{ кОм}$; $R_1 = 100 \text{ кОм}$; $R_2 = 15 \text{ кОм}$; $R_k = 5.5 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$;
 $R_H = 10 \text{ кОм}$; $C_1 = 1 \text{ мкФ}$; $C_2 = 0.5 \text{ мкФ}$; $C_3 = 10 \text{ мкФ}$; $R_{H1} = 100 \text{ кОм}$;
 $Q_1 - \text{Q2T316B}$; $V_{кк} = 20 \text{ В}$; $F_{cp} = 5 \text{ кГц}$; $U_{вх max} = 15 \text{ мВ}$;
- 5.5. $R_g = 5.5 \text{ кОм}$; $R_1 = 85 \text{ кОм}$; $R_2 = 12 \text{ кОм}$; $R_k = 5.5 \text{ кОм}$; $R_3 = 1.2 \text{ кОм}$;
 $R_H = 10 \text{ кОм}$; $C_1 = 10 \text{ мкФ}$; $C_2 = 1 \text{ мкФ}$; $C_3 = 10 \text{ мкФ}$; $R_{H1} = 80 \text{ кОм}$;
 $Q_1 - \text{Q2T316D}$; $V_{кк} = 15 \text{ В}$; $F_{cp} = 10 \text{ кГц}$; $U_{вх max} = 20 \text{ мВ}$.

Контрольные вопросы и задания

1. Расскажите о назначении усилителей и их классификации.
2. Каковы основные параметры и характеристики усилительных каскадов?
3. Расскажите об устройстве резисторного усилительного каскада.
4. Каковы условия функционирования усилительного каскада в линейном режиме?
5. Каково назначение емкостных элементов C_1 и C_2 в схеме каскада, их влияние на амплитудно-частотную характеристику?
6. Объясните назначение сопротивления R_3 и емкости C_3 в схеме резисторного усилительного каскада.
7. Как влияет на ход частотной и фазовой характеристик величина C_3 ?
8. Как влияет на значение коэффициента усиления резисторного усилительного каскада величина C_3 ?

9. Объясните, как влияет сопротивление нагрузки R_n на величину коэффициента усиления усилительного каскада и почему.

10. Расскажите об особенностях моделирования устройств во временной области с использованием системы *PSpice*.

11. Как описываются источники входных сигналов и задания на моделирование в системе *PSpice*?

12. Каковы особенности моделирования устройств в частотной области в системе *PSpice*?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ

1. Цель работы. Изучить принципы построения и функционирования автоколебательных и ждущих мультивибраторов с коллекторно-базовыми связями, исследовать влияние параметров компонентов на основные характеристики мультивибраторов.

2. Основные определения и понятия

Мультивибратором называется релаксационный генератор импульсов почти прямоугольной формы, выполненный в виде усилительного устройства с цепью положительной обратной связи.

Мультивибратор может работать в одном из трех режимов: автоколебаний, ждущем и синхронизации частоты.

В *режиме автоколебаний* у генератора нет состояния устойчивого равновесия, имеются два состояния квазиравновесия. Генератор переходит из одного состояния квазиравновесия в другое без внешних воздействий, формируя импульсы, параметры которых зависят от параметров устройства.

В *ждущем режиме* генератор имеет состояния устойчивого равновесия и квазиравновесия. Переход из первого состояния во второе происходит под воздействием внешнего запускающего импульса, а обратный переход совершается самопроизвольно по истечении времени, определяемого параметрами устройства.

В *режиме синхронизации* частота повторения импульсов определяется частотой внешнего синхронизирующего напряжения. Частота повторения генерируемых импульсов равна или кратна частоте синхронизирующего напряжения.

Простейшая схема *автоколебательного мультивибратора*, выполненного на дискретных элементах, представлена на рис. 4.1. Она состоит из двух усилителей-инверторов на транзисторах Q_1 и Q_2 , соединенных между собой коллекторно-базовыми положительными обратными связями через конденсаторы C_1 и C_2 . Если симметричные элементы схемы имеют одинаковые номиналы и параметры, то мультивибратор называют симметричным.

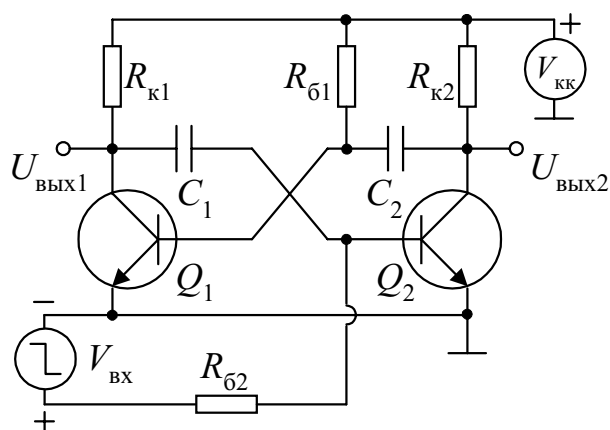


Рис. 4.1. Принципиальная схема автоколебательного мультивибратора

Анализ работы схемы начнем после ее очередного опрокидывания, когда транзистор Q_1 находится в режиме насыщения. Транзистор Q_2 при этом находится в режиме отсечки, поскольку напряжение на его базе определяется отрицательным потенциалом, возникшим на правой обкладке конденсатора C_1 после опрокидывания схемы. Далее конденсатор C_1 начинает перезаряжаться от источника питания

через транзистор $R_{б2}$ и насыщенный транзистор Q_1 . Напряжение на его правой обкладке, т.е. на базе транзистора Q_2 , растет. Когда оно достигает напряжения отпирания транзистора Q_2 , в схеме происходит лавинообразное опрокидывание. Длительность импульса напряжения $t_{и}$ на коллекторе транзистора Q_2 определяется скоростью перезаряда конденсатора C_1 и вычисляется по формуле

$$t_{и} = 0.7 R_{б2} C_1.$$

Длительность фронта импульса $t_{ф}$, связанная с процессом формирования напряжения на коллекторе транзистора Q_1 , перешедшего в режим отсечки, определяется зарядом конденсатора C_1 от источника питания через резистор $R_{к1}$ и эмиттерный переход насыщенного транзистора Q_2 и вычисляется по формуле:

$$t_{ф} = 2.3 R_{к1} C_1.$$

Возникающее после опрокидывания большое отрицательное напряжение на базе транзистора Q_1 удерживает схему во втором временно устой-

чивом состоянии, при котором транзистор Q_1 находится в режиме отсечки, а транзистор Q_2 – в режиме насыщения. Ввиду симметрии схемы процессы во время второго полупериода колебаний протекают аналогично процессам первого полупериода, только теперь времязадающей является цепочка $R_{61}C_2$.

Типовая схема *ждущего мультивибратора* приведена на рис. 4.2. В данной схеме для перевода одного квазистойчивого состояния равновесия в устойчивое одна из связей между

схемами коммутации по переменному току заменяется на связь по постоянному току. Устойчивым является состояние, при котором транзистор Q_1 находится в насыщенном состоянии. При этом конденсатор C_2 заряжен практически до напряжения питания, а конденсатор C_1 разряжен. Транзистор Q_2 заперт, что обеспечивается подачей на его эмиттерный переход

отрицательного напряжения смещения $U_{см}$. Это состояние может сохраняться сколь угодно долго.

Запуск ждущего мультивибратора осуществляется подачей на эмиттерный переход транзистора Q_2 импульса положительной полярности. Параметры этого импульса (амплитуда и длительность) выбираются из условия кратковременного приоткрывания транзистора Q_2 . В результате транзистор Q_1 запирается, а транзистор Q_2 переходит в режим насыщения. Новое состояние схемы является квазистойчивым, так как оно поддерживается лишь до тех пор, пока на базе транзистора Q_1 присутствует запирающее напряжение, т.е. пока не разрядится конденсатор C_2 . В ждущем мультивибраторе конденсатор C_2 выполняет роль времязадающего конденсатора, определяющего длительность выходного импульса всего устройства:

$$t_{и} = 0.7 R_{61} C_2.$$

Скорость изменения напряжения на коллекторе транзистора Q_1 определяется процессом заряда конденсатора C_1 :

$$t_{ф} = 2.3 R_{62} R_{к1} C_1 / (R_{62} + R_{к1}).$$

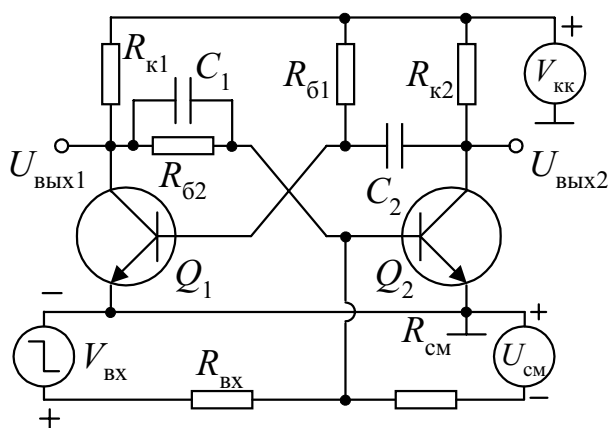


Рис. 4.2. Принципиальная схема ждущего мультивибратора

В момент времени, когда напряжение на базе транзистора Q_1 несколько превышает нулевое значение, развивается лавинообразный процесс обратного опрокидывания, в результате которого транзистор Q_2 переходит в режим отсечки, а транзистор Q_1 – в режим насыщения. Схема вновь возвращается в постоянно устойчивое состояние.

3. Порядок выполнения работы

Для изучения схем мультивибраторов и исследования влияния параметров компонентов на их основные характеристики необходимо:

1) ознакомиться со схемой автоколебательного мультивибратора с коллекторно-базовыми связями (см. рис. 4.1), изучить протекающие в нем процессы;

2) описать схему автоколебательного мультивибратора с параметрами компонентов из индивидуального задания (а) на входном языке системы *PSpice*;

3) промоделировать работу полученного устройства, получить временные диаграммы протекающих в нем процессов ($U_{\text{вых1}} = f(t)$; $U_{\text{бэ1}} = f(t)$; $U_{\text{вых2}} = f(t)$; $U_{\text{бэ2}} = f(t)$);

4) исследовать, как изменения параметров компонентов $R_{к1}$, $R_{к2}$, $R_{б1}$, $R_{б2}$, C_1 и C_2 влияют на временные характеристики мультивибратора как при сохранении симметрии схемы, так и при ее нарушении. Построить графики зависимости длительности импульсов в обоих выходных узлах от параметров времязадающих RC -цепей $t_{и1} = f(R_{б2}, C_1)$; $t_{и2} = f(R_{б1}, C_2)$;

5) ознакомиться со схемой ждущего мультивибратора (см. рис. 4.2), изучить принцип его функционирования;

6) в соответствии с предложенными в индивидуальном задании (б) значениями временных характеристик ждущего мультивибратора ($t_{и}$ и $t_{ф}$) рассчитать параметры компонентов времязадающих RC -цепей ($R_{к1}$, $R_{к2}$, $R_{б1}$, $R_{б2}$, C_1 и C_2), используя для этого следующие соотношения:

- для длительности импульса: $t_{и} \approx 0.7 R_{б1} C_2$,

- для длительности фронта импульса: $t_{ф} \approx 2.3 R_{б2} R_{к1} C_1 / (R_{б2} + R_{к1})$;

7) описать схему ждущего мультивибратора на входном языке системы *PSpice* с параметрами компонентов, полученными при расчете;

8) провести моделирование устройства, определить соответствие полученных временных характеристик ждущего мультивибратора с заданными значениями $t_{и}$ и $t_{ф}$;

- 9) исследовать влияние емкостного элемента C_1 на поведение выходного напряжения $U_{\text{вых1}}$, построить семейство графиков $U_{\text{вых1}} = f(t, C_1)$;
 10) оформить отчет.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Титульный лист.
- Цель работы и задание.
- Входные файлы с описаниями принципиальных схем автоколебательного и ждущего мультивибраторов и заданиями на их моделирование в системе *PSpice*.
- Выходные файлы с результатами моделирования обоих устройств.
- Временные диаграммы процессов в автоколебательном и ждущем мультивибраторах.
- Графики зависимостей характеристик мультивибраторов от значений параметров RC -компонентов.
- Описать методику расчета параметров RC -компонентов ждущего мультивибратора по известным значениям временных характеристик устройства.
- Анализ полученных результатов.
- Выводы по работе.

5. Варианты индивидуальных заданий

- 5.1. а) $R_{к1} = R_{к2} = 1 \text{ кОм}$; $R_{б1} = R_{б2} = 30 \text{ кОм}$; $C_1 = C_2 = 150 \text{ пФ}$;
 $Q_1 = Q_2 - 2\text{T}316\text{D}$; $V_{кк} = 15 \text{ В}$;
 б) $t_{и} = 35 \text{ мкс}$; $t_{ф} = 10 \text{ мкс}$; $U_{см} = -1 \text{ В}$; $R_{см} = 100 \text{ кОм}$; $R_{вх} = 10 \text{ кОм}$;
 $Q_1 = Q_2 - 2\text{T}316\text{D}$; $V_{кк} = 12 \text{ В}$;
- 5.2. а) $R_{к1} = R_{к2} = 1.5 \text{ кОм}$; $R_{б1} = R_{б2} = 27 \text{ кОм}$; $C_1 = C_2 = 100 \text{ пФ}$;
 $Q_1 = Q_2 - 2\text{T}316\text{B}$; $V_{кк} = 12 \text{ В}$;
 б) $t_{и} = 15 \text{ мкс}$; $t_{ф} = 1 \text{ мкс}$; $U_{см} = -1 \text{ В}$; $R_{см} = 100 \text{ кОм}$; $R_{вх} = 10 \text{ кОм}$;
 $Q_1 = Q_2 - 2\text{T}316\text{B}$; $V_{кк} = 15 \text{ В}$;
- 5.3. а) $R_{к1} = R_{к2} = 1.2 \text{ кОм}$; $R_{б1} = R_{б2} = 25 \text{ кОм}$; $C_1 = C_2 = 300 \text{ пФ}$;
 $Q_1 = Q_2 - \text{KT}3102\text{B}$; $V_{кк} = 10 \text{ В}$;
 б) $t_{и} = 20 \text{ мкс}$; $t_{ф} = 5 \text{ мкс}$; $U_{см} = -1 \text{ В}$; $R_{см} = 100 \text{ кОм}$; $R_{вх} = 10 \text{ кОм}$;
 $Q_1 = Q_2 - \text{KT}3102\text{B}$; $V_{кк} = 12 \text{ В}$;

Контрольные вопросы и задания

1. Какое устройство называется мультивибратором?
2. Какую роль в схемах мультивибраторов выполняют конденсаторы?
3. Показать цепь заряда и разряда времязадающей емкости в симметричном мультивибраторе.
4. Какие существуют принципиальные отличия между схемами автоколебательных и ждущих мультивибраторов?
5. Какими процессами определяется длительность фронта выходных импульсов различных мультивибраторов?
6. Чем определяется длительность генерируемых импульсов?
7. Назовите основные виды импульсных сигналов и их основные характеристики.
8. Каковы особенности описания источников импульсных сигналов на входном языке системы *PSpice*?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ПИТАНИЯ

1. Цель работы. Изучить схемы выпрямления, стабилизации и ограничения напряжения. Исследовать особенности их функционирования и влияние параметров элементов рассматриваемых схем на их основные характеристики и параметры.

2. Краткая информация об источниках вторичного питания

2.1. Однофазный однополупериодный выпрямитель и мостовая схема выпрямления

Выпрямители – это преобразователи напряжения переменного тока в напряжение, содержащее постоянную составляющую. Основными параметрами выпрямителей являются:

- среднее значение выходного напряжения $U_{\text{ср}}$

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{вых}} dt .$$

- коэффициент пульсации выходного напряжения ε

$$\varepsilon = \frac{U_m}{U_{\text{ср}}},$$

где U_m – амплитуда основной гармоники выходного напряжения.

Однофазный однополупериодный выпрямитель (рис. 5.1) является простейшим устройством преобразования переменного напряжения в постоянное (пульсирующее) напряжение. В данном устройстве ток через нагрузку протекает лишь в течение полупериода входного напряжения.

Однофазный двухполупериодный выпрямитель (однофазный мостовой выпрямитель) (рис. 5.2) построен на схеме диодного моста, что позволяет выпрямителю использовать оба полупериода входного напряжения.

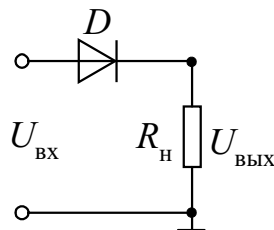


Рис. 5.1. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя

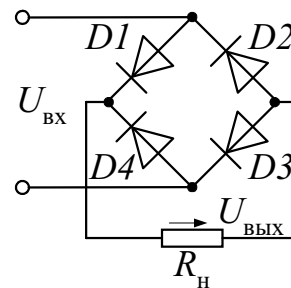


Рис. 5.2. Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя

2.2. Сглаживающий емкостной фильтр

Напряжение, получаемое с выхода схемы выпрямления, имеет существенные пульсации. Поэтому необходимы дополнительные устройства, которые бы обеспечивали получение заданной стабильности выходного напряжения источника вторичного питания. В качестве такого устройства, позволяющего выполнить стабилизацию мгновенного значения выходного напряжения, широко используются *сглаживающие фильтры*, коэффициент передачи которых для переменной составляющей напряжения существенно меньше, чем для его постоянной составляющей. Важнейшим параметром сглаживающего фильтра, показывающим во сколько раз фильтр уменьшает пульсации напряжения, является *коэффициент сглаживания*, который определяется следующим выражением:

$$S = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2},$$

где ε_1 и ε_2 – коэффициенты пульсаций на входе и выходе фильтра соответственно.

2.3. Амплитудные ограничители напряжения

Амплитудным ограничителем называется нелинейный четырехполюсник, напряжение на выходе которого $U_{\text{вых}}(t)$ остается на постоянном уровне $U_{\text{огр}}$, когда входное напряжение $U_{\text{вх}}(t)$ либо превышает некоторое пороговое значение $U_{\text{пор}}$ (ограничение сверху), либо ниже порогового значения (ограничение снизу), либо выходит за пределы и верхнего, и нижнего уровней (двустороннее ограничение). Если же входное напряжение $U_{\text{вх}}(t)$ ниже пороговых уровней, то напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ повторяет его форму.

Ограничители применяются для формирования напряжения трапецеидальной формы из синусоидального напряжения, для укорочения длительности фронта и спада импульса, для селекции импульсов по амплитуде, в цепях защиты от перегрузок, устройствах управления и контроля и т.д.

В зависимости от вида применяемых нелинейных элементов ограничители делятся на пассивные (диодные ограничители) и активные (усилители-ограничители).

Диодные ограничители представляют собой схемы, состоящие из диодных ключей и источников смещения, величина напряжения которых определяет пороговые напряжения ограничителя. В зависимости от способа включения диода по отношению к выходному напряжению различают диодные ограничители с *последовательным* и *параллельным включением диодов*. Комбинации полярности и места включения диодов и источников смещения позволяют получить ограничители с самыми разнообразными выходными характеристиками. Ограничители с последовательным включением диода могут выполнять ограничение снизу, сверху и двустороннее.

3. Порядок выполнения работы

Для выполнения исследований схем источников вторичного питания необходимо:

1) ознакомиться со схемой однофазного однополупериодного выпрямителя напряжения (см. рис. 5.1). Описать схему выпрямителя на входном языке системы *PSpice*, используя параметры компонентов из индивидуального задания α ;

2) промоделировать работу схемы выпрямителя при входном синусоидальном сигнале с амплитудой U_m и частотой $f_{\text{осц}}$ из индивидуального задания α ;

3) исследовать влияние сопротивления нагрузки R_H на поведение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$. При входном синусоидальном сигнале, изменяя значение сопротивления R_H , получить семейство графиков $U_{\text{вых}} = f(R_H)$;

4) параллельно нагрузке подключить емкость C_ϕ . Исследовать влияние емкостного сглаживающего фильтра на поведение выходного напряжения однофазного однополупериодного выпрямителя. Варьируя значение емкости C_ϕ , при номинальном значении сопротивления нагрузки получить семейство графиков $U_{\text{вых}} = f(C_\phi)$, при $R_H = \text{const}$;

5) исследовать, как изменение параметра сопротивления нагрузки R_H влияет на функционирование сглаживающего фильтра. При номинальном значении емкости C_ϕ , изменяя величину сопротивления R_H , получить семейство графиков $U_{\text{вых}} = f(R_H)$, при $C_\phi = \text{const}$;

6) рассчитать коэффициент сглаживания емкостного сглаживающего фильтра S , для номинальных значений параметров компонентов;

7) ознакомиться с мостовой схемой выпрямления (см. рис. 5.2). Описать схему данного выпрямителя на входном языке системы *PSpice*, используя те же параметры компонентов из индивидуального задания, что и для схемы однофазного однополупериодного выпрямителя;

8) повторить пункты 2 - 6 для мостовой схемы выпрямления;

9) ознакомиться со схемой последовательного амплитудного ограничителя (рис. 5.3). Описать предложенную схему ограничителя на входном языке системы *PSpice*, используя параметры компонентов из индивидуального задания б;

10) промоделировать работу ограничителя при входном синусоидальном сигнале с параметрами U_m и f из индивидуального задания б. Построить соответствующие временные диаграммы функционирования последовательного ограничителя напряжения;

11) изменяя величину и полярность источника напряжения E_0 , исследовать его влияние на поведение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$. Построить семейство графиков $U_{\text{вых}} = f(E_0)$;

12) построить зависимости $U_{\text{вых}} = f(R_1)$, при $R_2 = \text{const}$ и $U_{\text{вых}} = f(R_2)$, при $R_1 = \text{const}$;

13) провести качественный анализ полученных результатов.

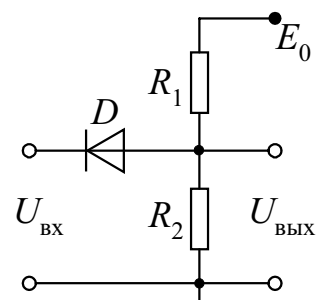


Рис. 5.3. Схема диодного последовательного амплитудного ограничителя

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Титульный лист.
- Цель работы и задание.
- Входные файлы с описаниями принципиальных схем исследуемых устройств и заданиями на их моделирование в системе *PSpice*.
- Выходные файлы с результатами моделирования схем выпрямителей при их работе на резистивную и емкостную нагрузки, схемы последовательного ограничителя.
- Временные диаграммы, поясняющие процессы функционирования предлагаемых для исследования схем.
- Графики полученных зависимостей выходного напряжения схем выпрямления от величины сопротивления нагрузки.
- Графики зависимости выходного сигнала от изменения параметров компонентов емкостного фильтра.
- Результаты расчета коэффициента сглаживания емкостного сглаживающего фильтра для схем однопериодного и двухпериодного выпрямителей.
- Графики полученных зависимостей напряжения на выходе последовательного ограничителя от значений сопротивлений R_1 и R_2 и величины источника E_0 .
- Анализ полученных результатов.
- Выводы по работе.

5. Варианты индивидуальных заданий

- 5.1. а) $D - \text{KD202D}$; $R_n = 20 \text{ кОм}$; $C_\phi = 25 \text{ нФ}$; $U_m = 20 \text{ В}$; $f = 5 \text{ кГц}$;
б) $D - \text{KD202D}$; $R_1 = 10 \text{ кОм}$; $R_2 = 10 \text{ кОм}$; $E_0 = 20 \text{ В}$; $U_m = 50 \text{ В}$;
 $f = 1.5 \text{ кГц}$;
- 5.2. а) $D - \text{KD204A}$; $R_n = 30 \text{ кОм}$; $C_\phi = 20 \text{ нФ}$; $U_m = 25 \text{ В}$; $f = 1 \text{ кГц}$;
б) $D - \text{KD204A}$; $R_1 = 10 \text{ кОм}$; $R_2 = 15 \text{ кОм}$; $E_0 = 20 \text{ В}$; $U_m = 20 \text{ В}$;
 $f = 5 \text{ кГц}$;
- 5.3. а) $D - \text{KD213A}$; $R_n = 25 \text{ кОм}$; $C_\phi = 10 \text{ нФ}$; $U_m = 30 \text{ В}$; $f = 2.5 \text{ кГц}$;
б) $D - \text{KD213A}$; $R_1 = 15 \text{ кОм}$; $R_2 = 10 \text{ кОм}$; $E_0 = 60 \text{ В}$; $U_m = 50 \text{ В}$;
 $f = 2.5 \text{ кГц}$;

5.4. а) $D - 2D219A$; $R_n = 10 \text{ кОм}$; $C_\phi = 1.25 \text{ мкФ}$; $U_m = 5 \text{ В}$; $f = 0.3 \text{ кГц}$;
б) $D - 2D219A$; $R_1 = 10 \text{ кОм}$; $R_2 = 10 \text{ кОм}$; $E_0 = 10 \text{ В}$; $U_m = 7.5 \text{ В}$;
 $f = 2 \text{ кГц}$;

5.5. а) $D - KD521A$; $R_n = 15 \text{ кОм}$; $C_\phi = 25 \text{ нФ}$; $U_m = 25 \text{ В}$; $f = 3 \text{ кГц}$;
б) $D - KD521A$; $R_1 = 5 \text{ кОм}$; $R_2 = 20 \text{ кОм}$; $E_0 = 80 \text{ В}$; $U_m = 100 \text{ В}$;
 $f = 0.5 \text{ кГц}$.

Контрольные вопросы и задания

1. Каково назначение источников вторичного питания?
2. Какими электрическими параметрами характеризуются источники вторичного питания?
3. Перечислите типы выпрямителей и объясните принцип их работы.
4. Какие свойства диодов используются при построении схем выпрямителей?
5. Как различаются формы выходного напряжения однополупериодной и двухполупериодной схем выпрямления напряжения?
6. Каково назначение устройств стабилизации напряжения питания?
7. Поясните принцип работы сглаживающих фильтров.
8. Как влияют значения сопротивления нагрузки (R_n) и емкости (C_ϕ) на сглаживание выходного напряжения?
9. Каково назначение схем амплитудных ограничителей напряжения?
10. Объясните принцип функционирования диодного последовательного амплитудного ограничителя напряжения.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Цель работы. Изучить принципы построения и функционирования базовых логических элементов в интегральном исполнении в системе ИТМ.

2. Особенности проектирования интегральных микросхем

Технологический процесс создания интегральных микросхем можно рассматривать как изготовление из некоторых исходных материалов законченного геометрического объекта, обладающего заданными электрическими характеристиками. При разработке интегральных микросхем (ИМС) требу-

ется разносторонняя оценка свойств ряда исходных материалов. В первую очередь это относится к свойствам полупроводников. В процессе изготовления ИМС различные свойства применяемых материалов сочетают так, чтобы можно было избирательно формировать p - n -переходы и проводящие каналы, выполняющие функции элементов схемы и обеспечивающие надежную изоляцию, а также соответствующие полупроводниковые и металлические слои, выполняющие роль контактных площадок, проводников и пассивных элементов.

Наиболее важный этап проектирования ИМС состоит в преобразовании ее электрической схемы в топологическую. На этой стадии определяют взаимное расположение элементов и соединения между ними. При разработке топологии необходимо стремиться к обеспечению максимальной плотности упаковки элементов при минимальном количестве пересечений межэлементных соединений и минимальном паразитном взаимодействии между отдельными элементами.

Разработку топологии ИМС можно подразделить на несколько этапов, основными из которых являются: получение и детальный анализ исходных данных, расчет конфигураций и геометрических размеров активных и пассивных элементов, разработка эскизов топологии, разработка предварительных вариантов топологии, выбор окончательного варианта топологии и его оптимизация. При проектировании топологии следует учитывать, что этот этап реализации ИМС носит индивидуальный характер и в значительной степени определяется сложностью разрабатываемого изделия. Для любой принципиальной электрической схемы можно разработать множество приемлемых вариантов, удовлетворяющих электрическим, технологическим и конструктивным требованиям. Однако во всех случаях нужно выбирать оптимальный вариант топологии, принимая во внимание, что главный принцип построения топологии ИМС заключается в получении максимальной плотности упаковки элементов, обеспечивающей наиболее рациональное использование площади кристалла при выполнении всех требований и учете ограничений.

3. Порядок выполнения работы

Для изучения принципов построения и функционирования базовых логических элементов в интегральном исполнении необходимо:

- 1) запустить программу *msk.exe*;
- 2) загрузить файл с описанием логического элемента из индивидуального задания, используя пункт меню *<File>* (*<File: Read: file_name>*);

3) построить таблицу истинности для вашего логического элемента $Out = f(In_1, In_2)$;

4) выбрать параметры входных импульсных сигналов In_1 и In_2 таким образом, чтобы они обеспечили все возможные входные комбинации логического элемента;

5) задать полученные параметры сигналов In_1 и In_2 в системе ITM. Для этого с помощью мыши выберите иконку  из панели моделирования (рис. 6.1), после чего укажите на соответствующую входную площадку логического элемента в рабочей области. В появившемся окне *Clock Parameters* для каждого параметра (t_0 , t_1 , t_r и t_f) введите необходимое значение (рис. 6.2). Выполните эту операцию и для второго входного сигнала;

6) промоделировать работу логического элемента. Выберите для этого пункт основного меню *<Simulate>*. В результате появится окно с временными диаграммами, содержащие входные (In_1 и In_2) и выходной (Out) сигналы;

7) исследовать влияние температуры на поведение графиков в режимах U/t и $I&U$;

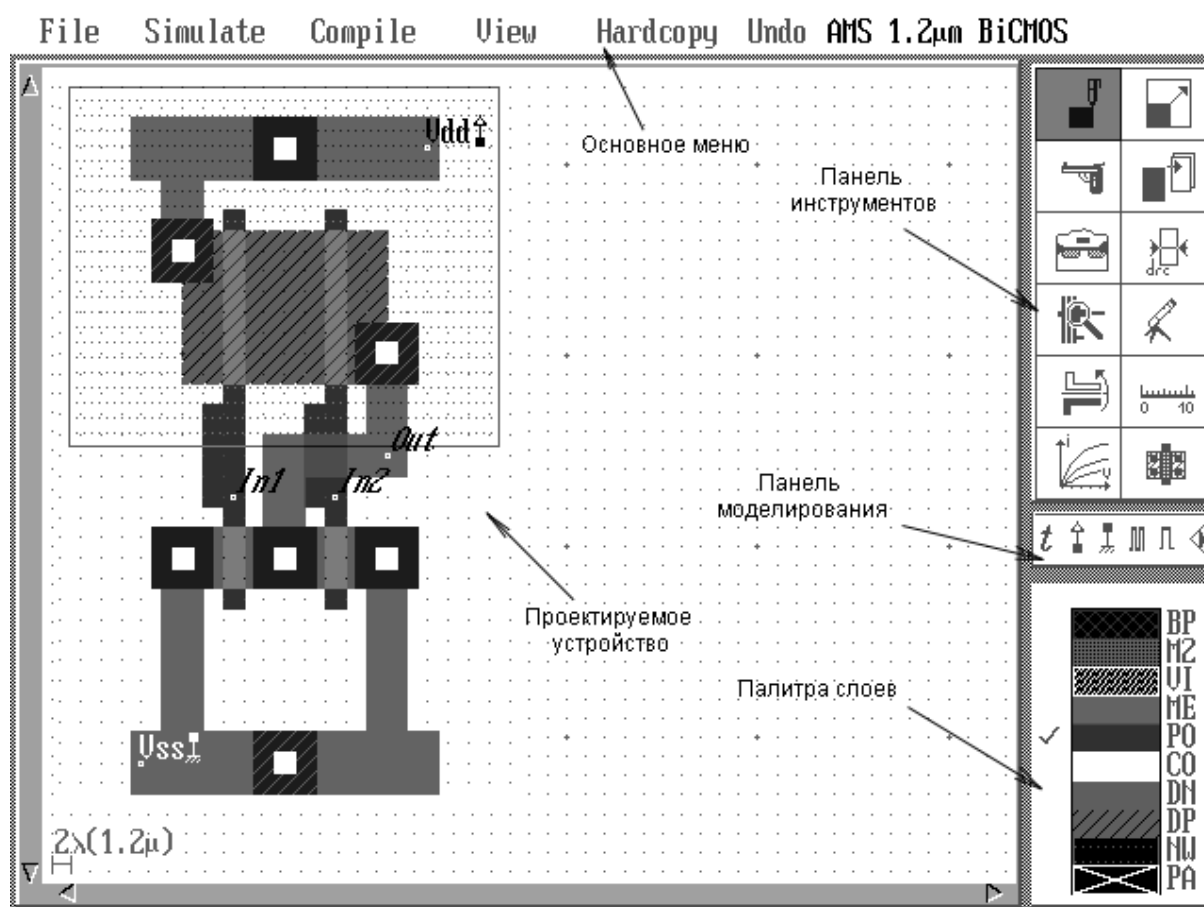


Рис. 6.1. Рабочее окно программы *msk.exe*

8) изучить возможности построения элементов, реализующих произвольные логические функции над входными сигналами. Система *ITM* позволяет проектировать логические элементы не только вручную, но и автоматически, в базе стандартных ячеек. Рассмотрим вторую возможность системы *ITM* на примере функции ЗИЛИ-НЕ. Для этого необходимо:

- выбрать пункт меню *<Compile>*;
- в строке *<Equation>*, используя клавиатуру, ввести выражение:

$$Out = /(In_1 + In_2 + In_3);$$

Компилятор системы *ITM* по заданному выражению способен реализовывать любые функции, представленные в базе логических функций «И», «ИЛИ» и «НЕ». В описываемом выражении первый параметр является именем выходного сигнала. После знака равенства (“=”) задается логическая функция над входными сигналами. Символ “/” реализует операцию «НЕ» и может быть описан только непосредственно перед знаком равенства. При описании выражения логической функции «И» соответствует символ “.”, а функции «ИЛИ» - символ “+”.

- нажмите *Ok*;

9) задать параметры входных сигналов (In_1 , In_2 и In_3);

10) поместить имена входных и выходного сигналов в список просмотра, чтобы временные диаграммы данных сигналов отображались в окне результатов моделирования. Используя мышь, выберите иконку  из панели моделирования и затем укажите на входные и выходной контакты. Наименования сигналов при этом изменят свое начертание на курсив;

11) выполнить моделирование спроектированного логического элемента;

12) построить таблицу истинности для функции ЗИЛИ-НЕ и сравнить ее с результатами моделирования, полученными для соответствующего логического элемента;

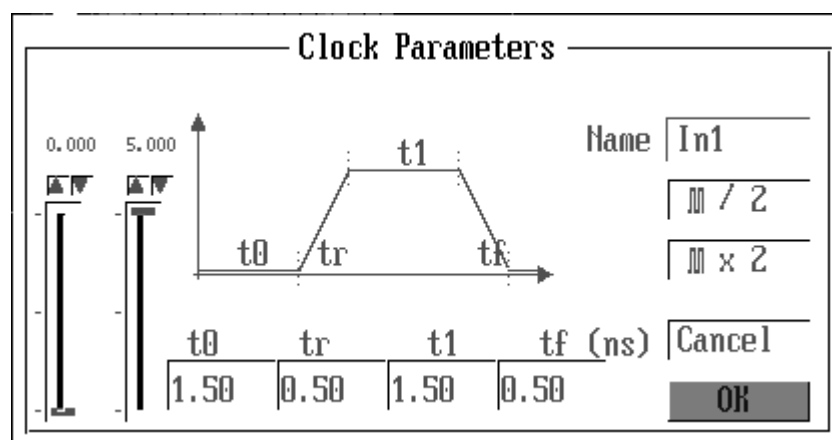


Рис. 6.2. Окно формирования входных сигналов

- 13) сохранить спроектированный элемент (<File: Write to...>);
- 14) загрузить программу *3d.exe* с параметром <file_name.msk>. Данный модуль системы *ITM* позволяет получить трехмерное представление микросхемы, описанной в файле <file_name.msk>, и изучить процессы ее изготовления;
- 15) рассмотреть по шагам все этапы создания ИМС (команда <Next Step>);
- 16) промоделировать работу микросхемы (команда <Simulate>). Используя клавиши “+” и “-”, можно регулировать скорость изменения времени в процессе моделирования.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Титульный лист.
- Цель работы и задание.
- Таблицы истинности для логического элемента из индивидуального задания и элемента ЗИЛИ-НЕ.
- Временные диаграммы моделирования логических элементов.
- Анализ полученных результатов.
- Описание маршрута проектирования логических элементов в базе стандартных ячеек в системе *ITM*.
- Описание процесса изготовления ИМС.

5. Варианты индивидуальных заданий

- 5.1. *file_name* – “*XOR.msk*”
- 5.2. *file_name* – “*OR.msk*”
- 5.3. *file_name* – “*AND.msk*”
- 5.4. *file_name* – “*NOR.msk*”
- 5.5. *file_name* – “*NAND.msk*”

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите пункты основного меню программы *msk.exe* и связанные с ними функции.
2. Как задаются входные импульсные сигналы в системе *ITM*?

3. Расскажите о реализации логических элементов в базисе стандартных ячеек.

4. Перечислите требования компилятора системы ИТМ к описанию логической функции для автоматического проектирования устройств?

5. В чем заключается процесс изготовления ИМС?

6. Назовите основные команды программы *3d.exe*.

Список рекомендуемой литературы

1. Автоматизация схемотехнического проектирования / Под ред. В.Н. Ильина. – М.: Радио и связь, 1987. – 368 с.

2. Бакалов В.П. и др. Основы теории электрических цепей и электроники. – М.: Радио и связь, 1989. – 528 с.

3. Батушев В.А. Электронные приборы. – М.: Высш. шк., 1980. – 383 с.

4. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. 1991. – 622 с.

5. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника: Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 416 с.

6. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства. 2-е изд. доп. и перераб. – М.: Связь, 1977. – 360 с.

7. Основы промышленной электроники / Под ред. В.Г. Шерасимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.

8. Разевиг В.Д. Применение программ *P-CAD* и *PSpice* для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. – М.: Радио и связь, 1992. Вып. 2. – 64 с.

9. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справ. / Под ред. Н.Н. Горюнова. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 742 с.

10. Полупроводниковые приборы: транзисторы: Справ. / Под ред. Н.Н. Горюнова. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 902 с.

11. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Сов. радио, 1980. – 424 с.

12. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3 т.: Пер. с англ. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Мир, 1993. Т. 1. – 413 с.

13. Etienne Sicard. Introduction to Microelectronics version 5.1. – France: INSA Toulouse, 1996. – 119 p.

Оглавление

<i>Введение</i>	<i>3</i>
<i>Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДОВ</i>	<i>4</i>
<i>Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ</i>	<i>10</i>
<i>Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА</i>	<i>16</i>
<i>Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ</i>	<i>21</i>
<i>Лабораторная работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ПИТАНИЯ</i>	<i>26</i>
<i>Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ</i>	<i>31</i>
<i>Список рекомендуемой литературы</i>	<i>36</i>

ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания к лабораторным работам

Составитель МОСИН Сергей Геннадьевич

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор А.В. Костров

Редактор Р.С. Кузина

ЛР №020275 Подписано в печать 15.02.02

Формат 60х84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.

Печать офсетная Усл. печ. л. 2.0 Уч.-изд. л. 2.2. Тираж 50 экз.

Заказ

Владимирский государственный университет.

Подразделение оперативной полиграфии

Владимирского государственного университета.

Адрес университета и подразделения оперативной полиграфии:

600000, Владимир, ул. Горького, 87.

E-mail: rio-m2@vpti.vladimir.su