

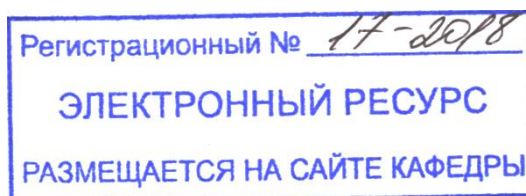
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(Самарский университет)

## ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ РЭС

Часть 2. Автоматизированное  
схемотехническое и конструкторское  
проектирование радиоэлектронных  
устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Составитель Бочкарев В.А.



САМАРА 2018

УДК 621.37:004.94:004.42

Составитель: В.А. Бочкарев

Рецензент: к.т.н., доц. И.В. Лофицкий

**Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС:** метод. указания к лабораторным работам, часть 2/ сост. В.А. Бочкарев. - Самара: Самарский ун-т; 2018. - 45 с.: ил.

Данные методические указания представляют собой описание цикла лабораторных работ по автоматизированному схемотехническому и конструкторскому проектированию конкретного радиоэлектронного устройства - предварительного усилителя мощности - в интегрированной среде OrCAD. В процессе выполнения лабораторных работ студенты получают представление о сквозном проектировании радиоэлектронной аппаратуры - от разработки и анализа принципиальной схемы до проектирования печатных плат.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и по направлениям 11.03.01 «Радиотехника», 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» при изучении курса *“Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС”*

© «Самарский университет, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
Назначение и состав системы OrCAD.....	5
Менеджер проекта.....	5
Папки Менеджера проекта.....	6
Режимы менеджера проекта.....	7
Типы проектов OrCAD Capture.....	7
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3</b> .....	8
<b>А. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАБОТЫ В РЕДАКТОРЕ ORCAD CAPTURE.</b> .....	8
3.1. Текстовое описание схем и заданий на моделирование.....	8
3.2. Формирование заданий на моделирование в графическом редакторе OrCAD Capture. .....	10
<b>Б. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.</b> .....	12
3.3. Оптимизация режима схемы по постоянному току.....	13
3.4. Определение номинальной и максимально допустимой амплитуд входного сигнала.....	16
Содержание отчета.....	19
Контрольные вопросы.....	19
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4</b> .....	20
<b>А. ФУНКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ PSPICE ДЛЯ РАСЧЕТА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЕЙ И НАЗНАЧЕНИЯ ДОПУСКОВ.</b> .....	20
<b>Б. РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЕЙ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО.</b> .....	21
4.1. Расчет функций чувствительности в режиме по постоянному току.....	21
4.2. Статистический анализ схемы методом Монте-Карло.....	22
Содержание отчета.....	23
Контрольные вопросы.....	24
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5</b> .....	25
5.1. Задание на лабораторную работу.....	25
5.2. Определение емкости разделительного конденсатора.....	25
5.3. Построение АЧХ усилителя и анализ внутреннего шума.....	26
5.4. Расчет мощностей, выделяемых на резисторах схемы. Определение номинальной и максимальной выходных мощностей.....	28
5.5. Создание автоматизированного отчета (спецификации) по проекту.....	28

Содержание отчета .....	30
Контрольные вопросы.....	30
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6.....</b>	<b>31</b>
<b>А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В СИСТЕМЕ OrCAD.....</b>	<b>31</b>
6.1. Типовые задачи, решаемые при проектировании ПП.....	31
6.2. Особенности конструкций печатных плат.....	32
6.3. Размещение компонентов на ПП.....	34
6.4. Автоматическая трассировка соединений.....	34
<b>Б. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....</b>	<b>36</b>
6.5. Подготовительные операции.....	36
6.6. Начало работы в редакторе ПП Layout Plus.....	36
Содержание отчета .....	41
Контрольные вопросы.....	41
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>41</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ .....</b>	<b>42</b>
1. Некоторые команды редактора Layout.....	42
2. Макросы, используемые в лабораторных работах .....	44
3. Функции измерений (measurements), используемые в лабораторных работах .....	44
4. Стандартные ряды значений сопротивлений, емкостей и индуктивностей.....	46

# ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы №№3-6 по курсу "Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС" предназначены для обучения студентов основным этапам проектирования РЭА с применением персональных компьютеров на базе современных систем схемотехнического и конструкторского проектирования.

Цикл состоит из 4 работ. В 3-й, 4-й и 5-й работах изучается автоматизированное схемотехническое проектирование конкретного радиоэлектронного устройства (расчет и оптимизация статического режима, определение допусков на элементы схемы, анализ переходных процессов и частотных характеристик и т.п.). В 6-й работе применяется автоматизированное проектирование печатной платы разрабатываемого устройства.

Все работы выполняются в интегрированной среде OrCAD версии Lite.

Таким образом, в процессе выполнения лабораторных работ студенты получают начальное представление о сквозном проектировании РЭА - от разработки и анализа принципиальной схемы до проектирования печатных плат.

## Назначение и состав системы OrCAD.

Данная система предназначена для сквозного проектирования аналоговых и цифровых электронных схем. В неё входят следующие основные модули:

**Capture** - графический редактор принципиальных схем, который одновременно является управляющей оболочкой для запуска основных модулей системы на всех стадиях проектирования;

**PSpice AD** - моделирование и анализ смешанных аналого-цифровых устройств; графический постпроцессор для отображения, обработки и документирования результатов моделирования;

**Stimulus Editor** - редактор входных сигналов (аналоговых и цифровых);

**Model Editor** - создание математических моделей диодов, биполярных, полевых, МОП и арсенид - галлиевых транзисторов, операционных усилителей, компараторов напряжения, регуляторов напряжения и магнитных сердечников по справочным данным;

**Transformer Designer** – проектирование трансформаторов с магнитными сердечниками различных конфигураций;

**PSpice AA (Advanced Analysis)** - расширенный анализ электронных схем:

*Sensitivity Tool* - расчет функций чувствительности (оценка степени отклонения некоторой характеристики схемы от её номинального значения при изменении параметров схемы)

*Optimizer Tool* - параметрическая оптимизация при наличии нелинейных ограничений

*Parametric Plotter* - параметрический многовариантный анализ;

*Monte Carlo Tool* - статистический многовариантный анализ по методу Монте-Карло

*Smoke Analysis Tool* – выявление компонентов схемы, параметры режимов работы которых близки или превышают предельно-допустимые значения;

**Layout, Gerber Tool, IntelliCAD** - подсистемы проектирования печатных плат, технологического и конструкторского проектирования. Возможно также подключение систем других производителей: Altium, Specstra и тп.

В состав системы также входят библиотеки математических моделей компонентов (\*.lib), библиотеки символов элементов принципиальных схем (\*.olb), а также библиотеки типовых корпусов компонентов (\*.lib) и т.п. Библиотеки системы OrCAD содержат несколько десятков тысяч электронных компонентов, производимых ведущими фирмами мира.

## Менеджер проекта.

Менеджер проекта используется, чтобы собрать воедино и организовать определенным образом все ресурсы, которые необходимы для выполнения проекта. Эти ресурсы включают схемные папки, страницы схемы, библиотеки компонентов, отдельные

компоненты, VHDL-файлы, и выходные отчеты типа спецификаций материалов и списков соединений. Фактически проект содержит не сами ресурсы (различные файлы и приложения, которые используются в проекте), а ссылки на них. Это всегда надо иметь в виду при перемещении и удалении любых файлов, упоминаемых в менеджере проекта.

Файл проекта хранится в Вашем рабочем каталоге и имеет расширение .orj. Это - файл ASCII и может просматриваться в любом текстовом редакторе.

### Папки Менеджера проекта.

Менеджер проекта отображает структуру ресурсов проекта, группируя их в соответствующие папки (Рис. 3-а).

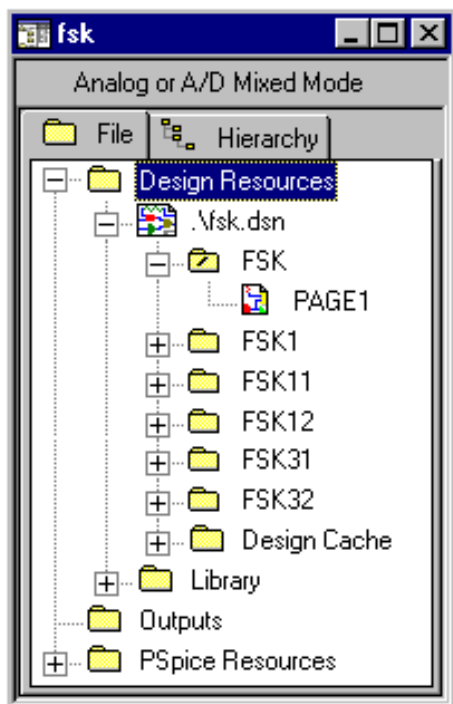


Рис. 3-а. Окно менеджера проекта

- *Папка Design Resources* - основная папка ресурсов проекта, включающая все остальные папки.
- *Папка проекта с расширением имени .DSN*, содержащая схемные папки (блоки, модули) проекта со страницами схем. В качестве примера на Рис. 3-а показана папка проекта FSK.DSN, содержащая схемные папки FSK, FSK1,...,FSK32, каждая из которых, в свою очередь, состоит из одно- или многостраничной схемы. Так, папка FSK включает одностраничную схему с именем PAGE1. Любые схемные папки или страницы схем, которые Вы создаете, автоматически добавляются к папке проекта. Страница схемы может также содержать рамки, угловые штампы (titleblocks), текст и графику.
- *Папка Design Cache*, которая отображает все типы электронных компонентов, используемых на страницах схем проекта.
- *Библиотечная папка Library* отображает состав библиотек, которые Вы подключили к проекту при создании нового проекта или в процессе работы

над ним.

- *Выходная папка Outputs* отображает файлы, используемые при взаимодействии с другими модулями OrCAD (списки соединений для PSpice, Layout и т.п.), а также файлы отчетов, создаваемых на том или ином этапе проектирования.

В процессе работы над проектом можно включать в папки проекта другие файлы, приложения или любую другую информацию, используя команду **Edit/Project**.

### Примечания.

1. Каждый проект содержит *только одну* папку проекта \*.DSN, но может иметь разнообразные библиотеки. Проект может состоять из любого числа схемных папок или VHDL моделей, но при этом он имеет одну единственную *корневую папку (модуль)*. Корневая схемная папка находится на самом верхнем иерархическом уровне проекта. На Рис. 3-а корневой папкой является FSK. В ее иконке - прямой слэш. Остальные схемные папки в *связном (иерархическом)* проекте должны быть упомянуты в корневом модуле. Если схемные папки проекта не связаны друг с другом, то любая из них может стать корневой (щелчок правой кнопки мыши на этой папке и выбор во всплывающем контекстном меню команды **Make Root**).

2. Каждый проект, который Вы открываете, имеет собственное окно менеджера проекта. Можно перемещать, копировать папки или файлы между проектами (если соответствующие страницы схем закрыты), перемещая их из одного окна менеджера проекта в другое (так же, как и в проводнике Windows). **При копировании нужно нажать и удерживать клавишу Ctrl.**

3. Команды меню редактора Capture действуют на любых схемных папках или страницах схемах, которые Вы выделили внутри активного окна менеджера проекта. Например, команды **Edit/Find**, **Edit/Browse** или **Edit/Print** обращаются только к выбранной схемной папке или

странице, или проекту в целом (если выделена папка проекта \*.DSN).

4. Для удаления любой выделенной папки или страницы схемы выполняется команда **Design/Delete**.

5. В окне менеджера проекта (как, впрочем, и во всех модулях системы OrCAD) можно использовать контекстные (всплывающие) меню, которые появляются при нажатии правой кнопки мыши. Используя команды из этих меню, можно открывать файл или схемную папку, редактировать и просматривать атрибуты выделенных объектов и многое другое.

### Режимы менеджера проекта.

Менеджер проекта обеспечивает два способа отображения ресурсов проекта.

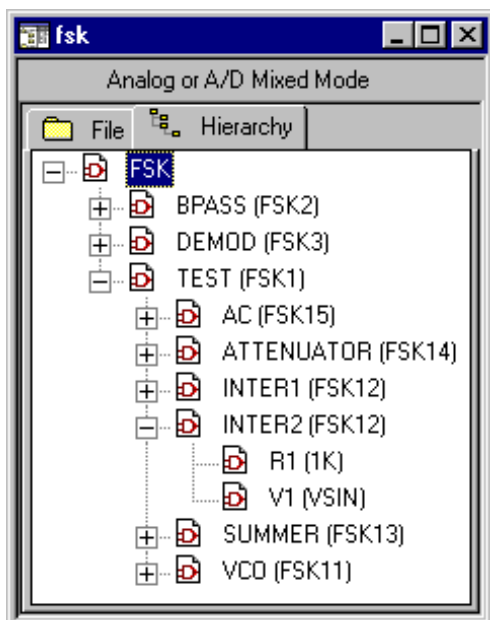


Рис. 3-б. Отображение иерархии проекта.

Если выбрана закладка **File** (Рис. 3-а), менеджер проекта показывает все папки проекта, в том числе схемные папки и страницы схемы. Они отображаются в древовидной структуре. При этом связи корневой папки с остальными папками скрыты.

Если выбрана закладка **Hierarchy** (Иерархия), менеджер проекта показывает иерархическую связь между схемными папками проекта и страницами схем.

Так, из Рис. 3-б следует, что схема верхнего уровня FSK состоит из иерархических блоков (модулей) BPASS, DEMOD и TEST, которые находятся в соответствующих схемных папках (блок DEMOD, например, расположен в схемной папке FSK3).

В свою очередь, блок TEST содержит иерархические блоки AC из папки FSK15, ..., VCO из схемной папки FSK11. Схема же INTER2 состоит из генератора

синусоидального напряжения V1 и сопротивления R1.

Щелчок левой кнопки мыши на любом элементе в окне режима **Hierarchy** открывает схему, в которой находится данный элемент, и выделяет его.

### Типы проектов OrCAD Capture.

При создании нового проекта (команда **File/New/Project**) открывается диалоговое окно New Project. В текстовом блоке Name вводится имя проекта (без кириллицы), на строке Location - имя каталога (путь), в котором находится Ваша рабочая папка. Далее выбирается тип проекта:

- *Analog or Mixed A/D* - мастер создания проекта смешанного аналого-цифрового типа - выбирают этот тип проекта, если предполагается использовать для моделирования OrCAD PSpice.
- *PC Board Wizard* - разработка печатных плат (ПП). Возможно также подключение PSpice для разработки смешанных аналого-цифровых устройств, а для чисто цифровых устройств - модуль OrCAD Express.
- *Programmable Logic Wizard* - разработка устройств на программируемой логике с моделированием в программах OrCAD NC VHDL, Max Plus II и т.п.
- *Schematic* (только схемы) - создание и документирование принципиальных схем без проведения моделирования.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ ПО ЗАДАННОМУ КРИТЕРИЮ

**Цель работы:** Проектирование электронной схемы в режиме постоянного тока с применением редактора схем OrCAD Capture и модуля аналого-цифрового моделирования PSpice AD: оптимизация параметров схемы для обеспечения заданного статического режима; определение максимальной и номинальной амплитуд входного и выходного сигналов при синусоидальном входном воздействии.

### А. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАБОТЫ В РЕДАКТОРЕ ORCAD CAPTURE.

Любая схема и задание на моделирование могут быть описаны либо на входном языке PSpice в текстовом формате, либо путем непосредственного ввода схемы в графическом редакторе OrCAD Capture. В обоих случаях формируется файл с расширением имени .cir, который является входным для модуля анализа и обработки результатов расчетов PSpice AD. *Имя файла задания, а также все имена файлов проекта не должны содержать кириллицу.*

#### 3.1. Текстовое описание схем и заданий на моделирование.

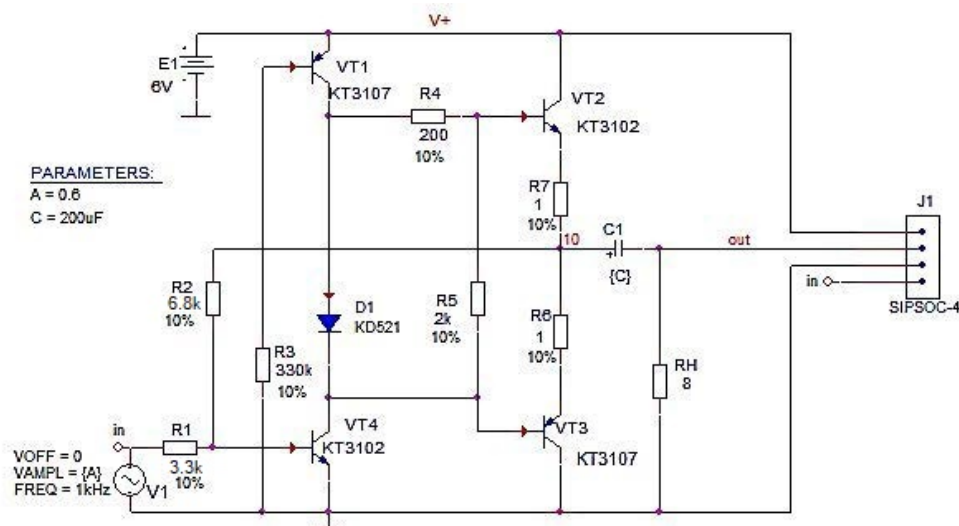


Рис. 3.1. Схема усилителя мощности.

Создание текстового файла с описанием схемы и заданий на моделирование применяется при автономном запуске модуля PSpice AD из программной группы OrCAD по команде **File/New/Text File**.

Типовая структура задания на входном языке программы PSpice имеет следующий вид:

- заголовок задания;
- параметры и режимы работы PSpice;
- описание элементов схемы;
- директивы управления заданием;
- комментарии.

**Заголовок задания** - Первая строка текста программы, не являющаяся комментарием, представляющая собой любой текст латинскими буквами или пустую строку.

**Параметры и режимы работы** задаются по директиве *.options*, после которой следуют опции. Подробнее с этой частью задания можно ознакомиться в [1].



**Комментарии.** Строки комментариев должны начинаться с символа \* в первой позиции (в них допускается кириллица). Текст в конце любой строки после точки с запятой тоже воспринимается как комментарий.

**Описание элементов схемы.** Перед составлением этого раздела необходимо присвоить имена всем цепям схемы. После этого последовательно описываются элементы схемы (начало описания каждого элемента - с новой строки). Тип элемента определяется первым символом (префиксом) его имени. Так, **R** -префикс имени резистора, **Q** -биполярного транзистора, **D** -диода, **V** -независимого источника э.д.с. и т.д.

В качестве примера на Рис. 3.1 представлена схема проектируемого усилителя мощности, а на Рис. 3.2 - описание этой схемы на входном языке PSpice.

На схеме именами **V+**, **10**, **out**, **in** помечены цепи, на которые в дальнейшем будем ссылаться при проектировании усилителя. Остальным цепям автоматически присвоены имена типа **N00091**, **N00095** ....

**Директивы управления заданием.** Все директивы в PSpice начинаются с точки. Например, **.dc** - многовариантный расчет схемы по постоянному току; **.ac** - расчет схемы в частотной области; **.tran** - расчет переходных процессов и т.п. Директивы **.dc**, **.ac**, **.tran**

```

AMPLIFIER           ; Заголовок задания
.options reltol= 0.0001 ; Относительная погрешность вычислений
.param A=0.6 C=200uF   ; Задаются глобальные параметры: A - амплитуда входного
; синусоидального сигнала с частотой 1кГц, C-емкость разделительного конденсатора C1
* Описание схемы усилителя
R_R4 N00057 N00081 R_R4 200
.model R_R4 RES R=1 DEV=10% ; Назначение десятипроцентного допуска
* на сопротивление с помощью директивы .model
Q_VT4 N00095 N00091 0 KT3102 ; Транзисторы описываются моделями KT3102
Q_VT3 0 N00095 N06990 KT3107 ; и KT3107. Порядок подключения узлов: К-Б-Э
R_R2 N00091 10 R_R2 6.8k
.model R_R2 RES R=1 DEV=10%
R_RH 0 OUT 8 ; Сопротивление нагрузки
R_R1 IN N00091 R_R1 3.3k
.model R_R1 RES R=1 DEV=10%
V_V1 IN 0 AC 1 SIN 0 {A} 1k 0 0 0 ; Источник входного синусоидального напряжения
D_VD1 N00057 N00095 KD521 ; Диод описан с помощью модели KD521,
* порядок подключения узлов: А-К
R_R7 10 N09228 R_R7 1
.model R_R7 RES R=1 DEV=10%
Q_VT1 N00057 N43963 V+ KT3107
C_C1 10 OUT 200uF ; Разделительный конденсатор 200мкФ
Q_VT2 V+ N00081 N09228 KT3102
R_R6 N06990 10 R_R6 1
.model R_R6 RES R=1 DEV=10%
R_R5 N00095 N00081 R_R5 2k
.model R_R5 RES R=1 DEV=10%
R_R3 N43963 0 R_R3 330k
.model R_R3 RES R=1 DEV=10%
V_E1 V+ 0 6V ; Источник напряжения питания 6 вольт
* J1 ; Разъем J1- фиктивный компонент PSpice,
; чтобы не появлялись предупреждения типа Warnings!
*Директивы управления заданием
.Lib "nom.lib" ; Подключить системные библиотеки компонентов
.Tran 10u 5ms 0 ; Рассчитать переходный процесс на интервале от 0 до 5мс
.Four 1kHz 10 V(out) ;Разложить в ряд Фурье напряжение в узле out схемы
; с удержанием 10-ти гармоник частоты входного сигнала
.Step lin param A 50m 1 50m ; Варьировать параметр А от 50мВ до 1В, шаг 50мВ
.Probe ; Передать в графический постпроцессор все результаты расчета
.End ; Конец задания

```

Рис. 3.2. Программа расчета реакции усилителя на гармоническое входное воздействие называются основными и определяют вид анализа. Вместе с ними используются вспомогательные директивы, которых в языке PSpice гораздо больше.

В тексте на Рис. 3.2 основная директива *.tran* и вспомогательные директивы *.four* и *.step*

### 3.2. Формирование заданий на моделирование в графическом редакторе OrCAD Capture.

Задание на моделирование для модуля PSpice, которое создается в Capture, имеет более структурированный характер. Так, директивы управления заданием помещаются непосредственно во входном файле \*.cir, а предложения описания схемы - в текстовом файле с расширением имени \*.net. Кроме того, создается текстовый файл псевдонимов (aliases) с расширением имени \*.als. Оба эти файла включаются в файл задания директивами *.Inc* (сокращение от include -включить).

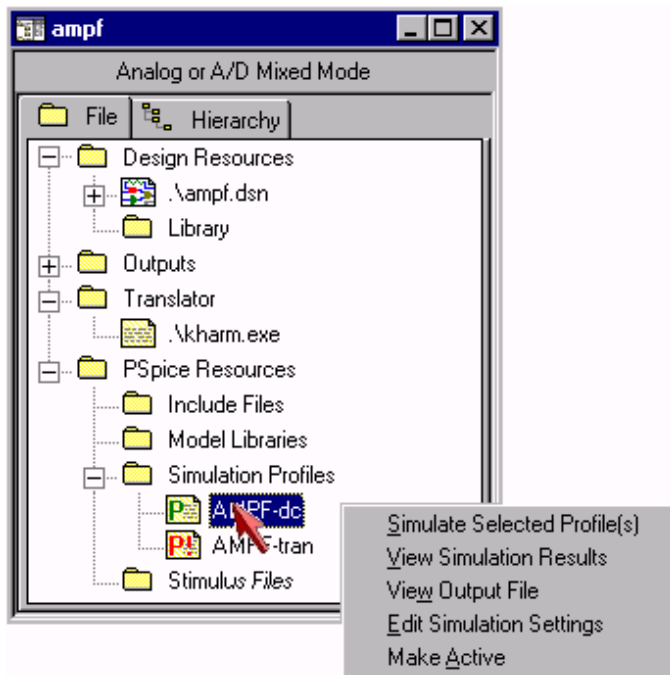


Рис. 3.3. Профили моделирования.

В отличие от текстового описания заданий при автономной работе в модуле PSpice, когда можно применять в одном задании все основные и соответствующие вспомогательные директивы (все виды анализа), в редакторе Capture можно использовать в одном задании только одну основную директиву, например *.tran*, и несколько связанных с ней вспомогательных директив (*.step*, *.four*, *.mc* и т.п.). Это ограничение, как показала практика, имеет больше достоинств, чем недостатков, так как создает определенную гибкость при анализе результатов расчетов в графическом постпроцессоре. Дело в том, что для одной и той же схемы можно создать любое число

так называемых **профилей (Profiles) моделирования** (файлов с расширением имени *.sim*). Каждый профиль имеет свое имя и задает одну основную директиву и группу вспомогательных директив. Таким образом, пользователь может по своему выбору использовать для расчетов любой из созданных им профилей или формировать очередь заданий для модуля PSpice, составленную из этих профилей. Для этого достаточно открыть контекстное меню (Рис. 3.3) щелчком правой кнопки мыши и выбрать соответствующую команду:

- Simulate Selected Profile(s) - выполнить расчет задания с выделенным профилем (выделенными профилями). Аналог команды **PSpice/Simulate Selected Profile(s)**.
- View Simulation Results - открыть графический постпроцессор для просмотра результатов моделирования с выделенным профилем;
- View Output File - открыть выходной текстовый файл с расширением имени *.out*;
- Edit Simulation Settings - редактировать установки данного профиля;
- Make Active - сделать выделенный профиль активным (текущим).

В таблице 3.1 приведены фрагменты файла задания *tran.cir* и его структура для схемы на Рис. 3.1.



## Б. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.


1. Узнайте у преподавателя имя рабочего каталога, в котором Вы будете выполнять все четыре лабораторные работы. Ознакомьтесь с исходными данными (Таблица 3.2).

Исходные данные для лабораторной работы

Таблица 3.2

Коэффициент гармоник		Параметры рабочей точки выходного каскада усилителя
Кгном	Кгмакс	V(10)
< 1%	≤10%	2,7±0,015В

2. Откройте редактор OrCAD Capture. Запустите мастер создания нового проекта (**File/New/Project**). Введите имя (Name) проекта, выберите тип проекта (Analog or Mixed A/D), укажите путь в Ваш рабочий каталог (Location) и нажмите **ОК**. В открывшемся окне Create PSpice Project выберите пустой (blank) проект.

3. Активируйте менеджер проекта (кнопка  **Project Manager**). Раскройте папку проекта с расширением имени .dsn и переименуйте схемную папку Schematic1 → Amplif. *Заодно подключите к проекту файл с методическими указаниями.* Для этого щелкните правой кнопкой мыши на папке PSpice Resources и выполните команду **Add File**. Найдите файл и после его выбора на запрос о типе файла отметьте **Unknown**.

4. Активируйте пустую страницу схемы (Page1). Командой **Place/Part** или нажатием соответствующей кнопки на панели у правого края экрана откройте окно Place Part и добавьте (Add) библиотеки *rus.olb* из папки `..\tools\capture\library\PSpice\Ruslib\` и библиотеки *analog.olb*, *source.olb*, *special.olb* из папки `..\tools\capture\library\PSpice\`.

5. Введите схему (Рис. 3.1) в редакторе Capture, не обращая пока внимания на позиционные обозначения элементов. Соппротивления (**R**) и электролитический конденсатор (**C\_elect**) находятся в библиотеке *analog.olb*, транзисторы и диоды - в библиотеке *rus.olb*, независимые источники э.д.с. **VSIN** и **VDC** - в библиотеке *source.olb*. Символы "земля" подключаются командой **Place/Ground** и выбором элемента **0** из библиотеки *source.olb*

В качестве штыревого разъёма **J1** используйте элемент SIPSOC-4 из библиотеки *mechanical.olb* (`..\tools\capture\library\`). Поскольку разъем не имеет PSpice-модели, во избежание появления предупреждающих сообщений, следует задать шаблону **PSpiceTemplate** значение \*@REFDES. Для этого выделяем на схеме разъем и какой-либо резистор, входим в редактор свойств (**Edit Properties...**), находим свойство **PSpiceTemplate** у компонента **J1** и присваиваем ему указанное значение. Заодно, не выходя из Property Editor, находим свойство **PCB Footprint** (тип корпуса разъема **J1** на печатной плате) и присваиваем ему значение SIP/TM/L.400/4. Выходим из Property Editor/

6. Проведите соединения (**Place/Wire**).

7. Проследите, чтобы имена цепей *in*, *out*, *V+*, **10** (остальные цепи можно не именовать), и имена всех компонентов и источников э.д.с. *VI*, *E1* на Вашей схеме соответствовали обозначениям Рис. 3.1. Имена цепям присваиваются командой **Place/Net Alias**. Изменение имен компонентов и их величин - двойным щелчком левой кнопки мыши на соответствующей надписи.

8. Установите 10%-ные допуски на сопротивления R1 – R7. Для назначения допусков:

- Выделите сопротивления схемы R1-R7 и войдите в редактор свойств Property Editor.
- Выделите все ячейки столбца (или строки) **Tolerance**, щелкнув по его заголовку, поместите указатель мыши в выделенную область и из контекстного меню (правая кнопка мыши) выполните сначала команду **Display/Value Only/OK**, затем команду **Edit**.

- В окошке Dialog/Tolerance введите число **10%** (проценты вводить обязательно!) и **ОК**. Закройте Property Editor. В дальнейшем допуски можно будет изменять прямо на принципиальной схеме.

9. Выделите и удалите угловой штамп (TitleBlock), чтобы не мешал при использовании режима **View/Zoom/All**: масштабировать схему так, чтобы она полностью размещалась на экране при максимально возможном увеличении.

10. Поместите на схему символ **PARAM** из библиотеки *special.olb*, выделите его и из контекстного меню (правая кнопка мыши, пункт Edit Properties) войдите в редактор свойств Property Editor. Командой **New** (новое свойство) введите имя глобального параметра **A** - амплитуды входного сигнала. В соответствующей ячейке таблицы введите число **0.6**. Нажмите кнопку **Display** (отображать), активируйте опцию **Name and Value** (отображать на схеме имя свойства и его значение) и **OK**. Повторите эти действия для параметра **C=200uF**. Закройте редактор свойств.

### 3.3. Оптимизация режима схемы по постоянному току.

При оптимизации систем обычно указываются параметры, которые нужно подобрать для достижения заданной цели. В нашем случае цель - обеспечение требуемого режима по постоянному току ( $V(10)=2.7В$ ). В качестве варьируемых параметров обычно используются сопротивления  $R1-R7$ . Модуль *PSpice AA Optimizer* проводит оптимизацию при использовании основных директив *.ac*, *.dc*, *.tran*, задаваемых соответствующими профилями моделирования.

Суть оптимизации статического режима нашей схемы с математической точки зрения состоит в поиске точки минимума целевой функции

$$F(R1, \dots, R7) = [V_{10}(R1, \dots, R7) - 2.7]^2,$$

где  $V_{10}(R1, \dots, R7) - 2.7$  - парциальное измерение (measurements).

Очевидно, минимум функции **F** определяется таким сочетанием параметров  $R1^*, \dots, R7^*$ , для которого  $V_{10}(R1^*, \dots, R7^*) = 2.7В$ . Это оптимальное сочетание варьируемых параметров и отыскивает программа *PSpice AA Optimizer*. Критерий окончания итерационного процесса оптимизации определяется заданной точностью достижения цели (**Min**, **Max**). Например, если  $|V(10) - 2.7| \leq 15мВ$ , то **Min=-15mV**, **Max=15mV**. Если это условие выполняется, процесс оптимизации останавливается и оптимальные значения  $R1^*, \dots, R7^*$  можно передать в принципиальную схему. Но в *Lite-версии OrCAD* доступно только одно парциальное измерение (наш случай), и только два варьируемых параметра. Таким образом, необходимо выбрать два сопротивления, изменение которых оказывает наиболее сильное влияние на  $V(10)$  - напряжение в 10 узле.

В *PSpice* для этой цели предусмотрен расчет так называемых функций чувствительности (директива *.sens*). В нашем случае потребуется определить все частные производные - функции чувствительности:  $\partial V(10)/\partial R_i$  ( $i=1, \dots, 7$ ); и выбрать два резистора с наибольшими по модулю функциями чувствительности. Итак,

- создаем новый профиль моделирования с именем **sens**;
- **Analysis Type**: Bias Point;
- ставим галочку в строке **Perform Sensitivity Analysis (.SENS)** и указываем **V(10)** в качестве выходной переменной (**Output Variable(s)**);
- **OK** и **Run PSpice**.
- После окончания расчета из меню модуля *PSpice* откройте командой **View/Output File** выходной файл *sens.out* для просмотра и найдите в нем таблицу функций чувствительности с заголовком DC SENSITIVITIES OF OUTPUT V(10), фрагмент которой приведен на **Рис.3.4**.

Используя столбец нормализованных чувствительностей (NORMALIZED SENSITIVITY) выберите два сопротивления, наиболее сильно влияющих на напряжение  $V(10)$ . Например, как следует из **Рис. 3.4**, это  $R1$  и  $R2$ . Таким образом, сопротивления  $R1$  и  $R2$  - кандидаты на возможное ужесточение допусков, если это окажется необходимым в

дальнейшем, и номиналы которых требуется подобрать в процессе оптимизации, чтобы напряжение  $V(10) \in [2.685, 2.715]$ .

DC SENSITIVITIES OF OUTPUT V(10)			
ELEMENT NAME	ELEMENT VALUE	ELEMENT SENSITIVITY (VOLTS/UNIT)	NORMALIZED SENSITIVITY (VOLTS/PERCENT)
R_R4	2.000E+02	-1.097E-06	-2.194E-06
R_R2	7.500E+03	2.664E-04	1.998E-02
R_R1	2.700E+03	-7.190E-04	-1.941E-02
R_R7	1.000E+00	-1.155E-06	-1.155E-08
R_R6	1.000E+00	5.472E-21	5.472E-23
R_R5	2.000E+03	1.132E-07	2.264E-06
R_R3	3.300E+05	-4.804E-07	-1.585E-03

Рис.3.4. Фрагмент таблицы функций чувствительности.

Итак, для решения задачи настройки статического режима усилителя выполните следующие операции:

1. Настройте профиль моделирования (команда **PSpice/New Simulation Profile**) схемы по постоянному току (Analysis Type: DC Sweep) как показано на Рис. 3.5. Имя (Name) профиля **dc**. Так как в статическом режиме входной сигнал должен отсутствовать, то необходимо положить  $V1=0$ . Это реализуется путем задания цикла (или прогона - sweep) вычислений по переменной V1, которая в данном случае принимает одно единственное значение, равное нулю (*Sweep type: List* означает, что значения переменной последовательно выбираются из списка Value List).

Данный профиль порождает в файле задания для PSpice директиву  
**.dc V1 List 0**

(вариация напряжения независимого источника э.д.с. V1 по заданному списку значений).

2. Запустите расчет командой меню **PSpice/Run**. После завершения расчета можно посмотреть, насколько отличается напряжение V(10) от 2,7 В (*должно быть примерно 2,2 В. Если не так – ищите ошибки в схеме!*) и закрыть программу PSpice.

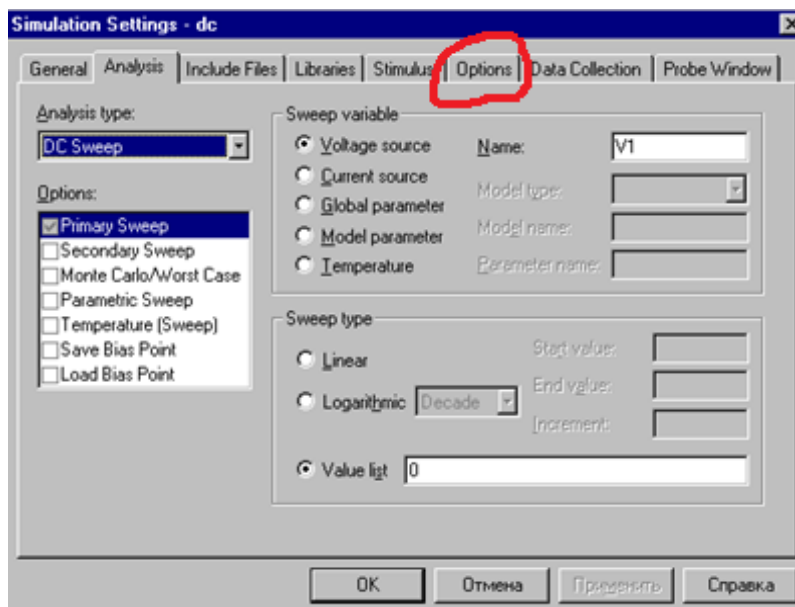


Рис. 3.5. Создание профиля моделирования **dc**.



3. В меню PSpice редактора Capture выберите **Advanced Analysis/Optimizer**, а затем (уже в меню оптимизатора) - команду **Analysis/Optimizer/Create New Measurement**. Введите **V(10)-2.7** и ОК. В таблице *Specification [Next Run]* задайте допустимые диапазоны для парциальных измерений (**Min=-15mV, Max=15mV**) и имя **dc.sim** профиля моделирования (**Profile**). Справа вверху в таблице *Parameters [Next Run]* кликните в строке *Click here to import a parameter from the design property map...* Выберите первое из найденных при расчете чувствительностей сопротивление и **ОК**, затем повторите для второго сопротивления.

4. Задайте метод оптимизации **Modified LSQ** (модифицированный метод наименьших квадратов - МНК) и запустите расчет. В процессе оптимизации график ошибки устремляется к нулевой линии, а в таблицах отображаются текущие (Current) значения парциальной функции и оптимизируемых резисторов. После успешного окончания процесса запишите (запомните) оптимальные значения резисторов (колонка *Current* таблицы *Parameters [Next Run]*).

5. Подберите ближайшие значения из 1%-го стандартного ряда сопротивлений для найденных оптимальных величин (см. Приложение, п.4) и запомните их

Тест схемы усилителя. Чтобы оценить работу усилителя с ненастроенными параметрами, подадим на его вход синусоидальный сигнал с различными амплитудами  $A$ . Для этого необходимо создать новый профиль моделирования анализа переходных процессов. Итак, последовательность Ваших действий:

❖ Создайте новый профиль (**PSpice/New Simulation Profile**) с именем **tran** для моделирования во временной (Time Domain) области по директиве *.tran*:

- На закладке Analysis (см. Рис. 3.5) в окошке Analysis Type выберите режим **Time Domain (Transient)**. Введите величину интервала анализа **Run to time: 5ms**, начальный момент передачи данных расчета в графический постпроцессор **Start saving data after: 0 seconds**.

- На закладке Options (см. Рис.3.5) уменьшите относительную погрешность вычислений (RELTOL) до 0.0001.

- В окошке Options закладки Analysis активируйте (поставьте галочку) опцию Parametric Sweep (цикл вычислений по параметру). Затем, подключив опцию Global parameter, введите имя глобального параметра Parameter Name:  $A$ . Укажите линейную шкалу изменения величины  $A$  (Sweep type: Linear).

- Задайте изменение величины амплитуды  $A$  входного напряжения от 50mV (Start Value) до 1V (End Value) с шагом 50mV (Increment).

Данный профиль порождает в файле задания (.cir) для PSpice основную директиву *.tran* и вспомогательную *.step* (вариация параметров в любом режиме):

*.Tran 0 5ms 0*

*.Step Lin Param A 50m 1 50m*

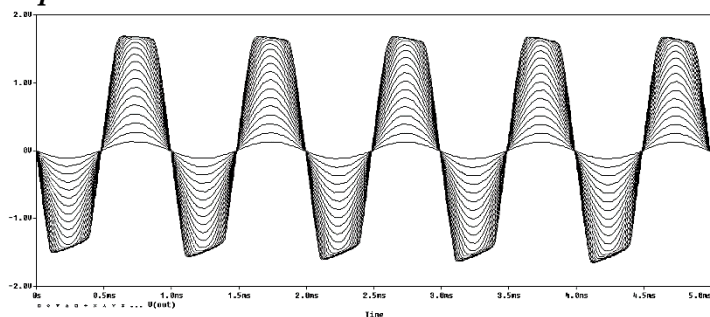


Рис. 3.6. Выходные сигналы при вариации амплитуды входного сигнала усилителя.

- Запустите задание на моделирование.

После выполнения расчета автоматически загрузится графический постпроцессор PSpice и появится окно Available Sections, в котором можно выбирать результаты расчетов схемы при любых значениях входной амплитуды  $A$ .

- Нажмите **All** (выбрать все варианты), затем **OK**. На экран выведите графики выходного напряжения  $V(out)$  командой **Trace/Add Trace**. Посмотрите временные диаграммы и закройте PSpice.

6. На принципиальной схеме усилителя замените величины сопротивлений на новые (см. п.5) и вновь запустите расчет. Выведите графики  $V(out)$  (Рис. 3.6) и сохраните их в заготовке отчета (**Window/Copy to Clipboard**).

7. Замените допуски с 10% на 1% у двух оптимизированных резисторов.

### 3.4. Определение номинальной и максимально допустимой амплитуд входного сигнала.

Для того, чтобы нелинейные искажения в выходном сигнале не были слишком велики, подбирают такую величину амплитуды входного сигнала, при которой коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник) в выходном сигнале не превышает наперед заданной величины (Таблица 3.2). При этом номинальной амплитудой входного сигнала  $A_{вхном}$  считается то значение амплитуды, для которой  $K_G$  не превышает допустимого уровня  $K_{Гном}$  (обычно меньше 1%). В номинальном (синусоидальном) режиме должно обеспечиваться наилучшее качество усиления. В то же время для получения большей мощности выходного сигнала увеличивают амплитуду входного сигнала до приемлемого уровня, определяемого максимально допустимым уровнем нелинейных искажений  $K_{Гмакс}$ . И тогда говорят о максимальной допустимой амплитуде входного напряжения  $A_{вхмакс}$  как об амплитуде, при которой коэффициент гармоник не превышает приемлемого уровня  $K_{Гмакс}$  (порядка 10% или меньше).

В лабораторной работе спектральному анализу Фурье подвергается последний период указанного сигнала (для исключения влияния переходного режима), вычисляется 10 коэффициентов ряда Фурье и рассчитывается коэффициент гармоник по следующей формуле

$$K_G = \frac{\sqrt{A_2^2 + \dots + A_{10}^2}}{A_1} \cdot 100\%$$

В этой формуле  $A_1, A_2, \dots, A_{10}$  - амплитуды спектральных составляющих (гармоник) выходного сигнала усилителя,

$$A_k^2 = \left( \frac{2}{T_s} \int_{T_a-T_s}^{T_a} U_{out}(t) \cdot \sin k\omega_s t \cdot dt \right)^2 + \left( \frac{2}{T_s} \int_{T_a-T_s}^{T_a} U_{out}(t) \cdot \cos k\omega_s t \cdot dt \right)^2, k = 1, 2, \dots, 10$$

$T_a$  – время анализа в директиве *tran*,  $T_s$  – период входной синусоиды.

Таким образом, нам необходимо построить график зависимости коэффициента гармоник выходного сигнала  $V(out)$  в функции от величины амплитуды входного сигнала, и по этому графику найти амплитуды  $A_{вхном}$  и  $A_{вхмакс}$ , соответствующие заданным величинам  $K_{Гном}$  и  $K_{Гмакс}$ . Для этого воспользуемся макросом **Kharm(V(out))** в качестве аргумента функции измерений **YatLastX(Kharm(V(out)))**.

На вход усилителя подается синусоидальное напряжение с частотой **FREQ=1кГц**, начальным уровнем **VOFF=0** и амплитудой **VAMPL={A}** (см. Рис. 3.1). Фигурные скобки означают, что величина **VAMPL** будет определяться значениями глобального параметра **A**, изменяемого в соответствии с установками профиля моделирования.

Проверьте, соответствуют ли величины сопротивлений их оптимальным значениям. Затем:

1. Создайте новый профиль моделирования **kharm**, унаследованный (*Inherit From*) от профиля **tran**. Внесите следующие изменения (Рис. 3.7):



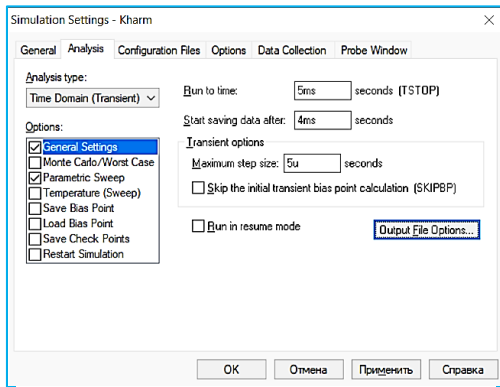


Рис. 3.7. Создание профиля моделирования **kharm**.


- **Start saving data after: 4ms** (сохранение результатов расчета, начиная с 4-ой миллисекунды),
- **Maximum Step Size: 5us** (максимальный шаг интегрирования дифференциальных уравнений 5 микросекунд).

2. Запустите задание на моделирование.

3. После завершения расчетов нажмите **All** (выбрать все варианты), затем **OK** и включите режим Performance Analysis (**Plot/ Performance Analysis**). Добавьте второе и третье окна построения (**Plot/ Add Plot**).

4. В верхнем окне построения командой **Trace/Add Trace** откройте окно Add Traces. В строке Trace Expression введите выражение **-YatLastX(AVG(W(RH))/AVG(W(E1))\*100** (минус перед выражением обязательный!). Нажмите **OK**. На экран будет выведен график зависимости КПД усилителя (в процентах) от амплитуды **A** входного синусоидального сигнала (Рис. 3.7).

5. В среднем окне построения командой **Trace/Add Trace** откройте окно Add Traces, справа в списке функций измерений (**Measurements**) щелкните по имени **LastAmpl** (функция измерений для определения амплитуды колебаний в конце интервала анализа); найдите в левом окне выходную переменную **V(out)**, подведите к ней указатель мыши и щелкните левой кнопкой. В строке Trace Expression появится выражение **LastAmpl(V(out))**. Нажмите **OK**. На экран будет выведена зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного (Рис. 3.8).

6. Переключитесь на нижнее окно и выведите на экран график зависимости коэффициента гармоник (в процентах) от амплитуды входного сигнала **A**, используя функцию измерений **YatLastX(Kharm(V(out)))**. Включите режим курсора командой **Trace/Cursor/Display** или кнопкой Toggle Cursor .

7. С помощью курсора определите номинальную амплитуду **Авхном** (порядка 300мВ), при которой **Kharm%** имеет минимальное значение (**Trace/Cursor/Min**) и не превышает **Кгном** из таблицы 3.2. Не меняя положения курсора, нажмите кнопку **Mark Label**. Переключитесь на средний, затем верхний графики (не меняя положение курсора) и зафиксируйте соответствующие точки. Затем переключитесь опять на нижний график и установите курсор (**Trace/Cursor/Search Commands... sfl(10)**) в точку с ординатой 10% (**Кгмакс**). Кнопкой **Mark Label** отметьте максимально допустимую амплитуду **Авхмакс**. Зафиксируйте соответствующие точки в среднем и верхнем окнах построения. Отключите курсор кнопкой **Toggle Cursor**. Отредактируйте все метки на графике в соответствии с рисунком 3.8.

Таким образом, из Рис. 3.8 следует, что **Авхном=0.3В**, **Авыхном=0.77В**, **Авхмакс=0.825В**, **Авыхмакс=1.638**, **Кгном=0,391%**, **Кгмакс=10%**, **КПДном=18,6%**, **КПДмакс=44,6%**.

8. Покажите графики преподавателю и сохраните их (**Window/Copy to Clipboard**) в файле заготовки отчета.

9. Заполните таблицу 3.3.

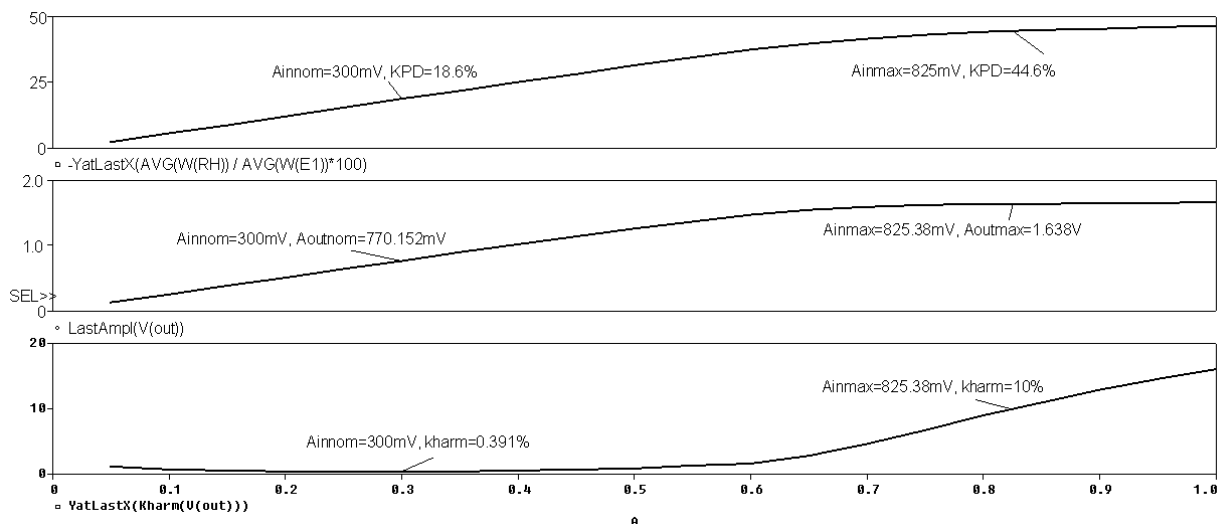


Рис. 3.8. Определение номинальных и максимальных выходных и входных амплитуд.

Таблица результатов расчета

Таблица 3.3

Результаты расчета									
Кгном,%	Кгмакс,%	R	R	Авхном, В	Авхмакс, В	Авыхном, В	Авыхмакс, В	КПДном,%	КПДмакс,%

В таблице использованы следующие обозначения:

Кгном, Кгмакс - номинальное и максимальное значения коэффициентов гармоник выходного напряжения в процентах, соответственно;

R, R – имена резисторов и их значения, которые изменились после оптимизации;

Авхном - номинальное входное напряжение, найденное по номинальному коэффициенту гармоник;

Авхмакс - максимально допустимое напряжение на входе, найденное по максимальному коэффициенту гармоник;

Авыхном, Авыхмакс - выходные напряжения, соответствующие номинальному и максимальному входным напряжениям.

КПДном, КПДмакс – КПД усилителя в номинальном и максимальном режимах.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема анализируемого устройства.
3. Таблица результатов расчета (Таблица 3.3).
4. Графики рисунков 3.6, 3.8.
5. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Общие сведения о пакете программ OrCAD (назначение пакета в целом и его отдельных модулей).
2. Режимы менеджера проекта.
3. Компоненты схемного редактора OrCAD Capture. Иерархические блоки.
4. Изобразите блок-схему проекта FSK (рисунки 3-а, 3-б).
5. Структура входного языка PSpice.
6. Структура входного файла для PSpice, формируемого редактором OrCAD Capture.
7. Расшифровать тексты файлов в таблице 3.1.
8. Графический ввод схем в редакторе Capture, библиотеки символов и математических моделей.
9. Режимы анализа электронных схем, задаваемые в профиле моделирования, и соответствующие директивы входного языка PSpice. Директивы DC, AC, TRAN и их структура.
10. Профили моделирования, используемые в лабораторной работе, соответствующие им директивы входного языка PSpice, структура директив.
11. Процедура оптимизации (подбора) параметров схемы для заданного режима по постоянному току.
12. Методы оптимизации, применяемые в программе PSpice Advanced Analysis, и их суть.
13. Графический постпроцессор PSpice и его возможности.
14. Алгоритм вычисления коэффициента гармоник средствами PSpice.
15. Определение максимальной и номинальной входных амплитуд.
16. Функции измерений (Measurements), используемые в данной работе и их алгоритмы.
17. Макросы (Macros), используемые в данной работе и их определения.
18. Описать последовательность выполнения лабораторной работы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### НАЗНАЧЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМЫ ПО ЗАДАНЫМ УСЛОВИЯМ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Цель работы: Исследование нелинейной электронной схемы в динамическом режиме: расчет функций чувствительности, назначение допусков на элементы схемы в соответствии с заданным критерием работоспособности – допустимым уровнем нелинейных искажений.

#### А. ФУНКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ PSpICE ДЛЯ РАСЧЕТА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЕЙ И НАЗНАЧЕНИЯ ДОПУСКОВ.

При проектировании электронных схем обычно задаются границы изменения основных характеристик (коэффициент передачи, положение рабочей точки и т.п.) при изменении параметров компонентов схемы. Эти параметры меняются за счет разброса в пределах допусков, изменения температуры и других условий эксплуатации. Так, в предыдущей работе было найдено значение максимальной допустимой амплитуды входного сигнала  $A_{вх\max}$ . При этом коэффициент нелинейных искажений  $K_{г\max} \leq 10\%$ . Очевидно, что если значения сопротивлений отличаются от номинальных в пределах своих допусков, то изменяются параметры рабочей точки и, как следствие, значение коэффициента гармоник  $K_{г\max}$  может значительно превысить 10%.

Для оценки степени отклонения некоторой характеристики схемы  $T(x_1, x_2, \dots, x_n)$  от её номинального значения  $T_0(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$  за счет изменения (разброса) параметров схемы  $x_1, x_2, \dots, x_n$  вводятся *функции чувствительности* или просто *чувствительности*

$$S_{xi}^T = \partial T(x_1, x_2, \dots, x_n) / \partial x_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.1)$$

Чем больше величина  $|S_{xi}^T|$ , тем чувствительней характеристика  $T$  к отклонению параметра  $x_i$  относительно его номинального значения  $x_{i0}$ , тем, следовательно, более жесткий допуск должен быть назначен на величину разброса  $\Delta x_i$  значений параметра  $x_i$ . Отклонение  $\Delta T = T(x_1, x_2, \dots, x_n) - T_0(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$  выражается через функции чувствительности (4.1) следующим образом

$$\Delta T = T - T_0 = S_{x1}^T \Delta x_1 + S_{x2}^T \Delta x_2 + \dots + S_{xn}^T \Delta x_n \quad (4.2)$$

Если поставить задачу определения допусков  $\Delta x_i$  по заданному допустимому отклонению  $\Delta T_{\text{доп}}$  характеристики схемы  $T$  относительно номинального значения  $T_0$ , то вычисления с использованием формулы (4.2) становятся слишком сложными. Даже если функции чувствительности  $S_{xi}^T, i=1, 2, \dots, n$ , известны. Дело в том, что, во-первых, количество параметров схемы  $x_i$  (резисторов, транзисторов, и т.п.) может быть очень большим, а, во-вторых, трудно найти удовлетворительное решение уравнения (4.2) относительно неизвестных  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$  среди бесконечного множества решений.

Для решения этой задачи можно воспользоваться возможностями программы PSpice в режимах расчета чувствительностей, наихудшего случая и статистического анализа по методу Монте - Карло. При расчете наихудшего случая всем параметрам схемы автоматически присваиваются значения на границах их интервалов изменения и производится расчет схемы. По результатам расчета определяются  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  - максимальное и минимальное значения характеристики схемы  $T$ .

Получаемые с помощью этого метода оценки разброса выходной характеристики сильно завышены, т.к. вероятность сочетания значений параметров схемы, близких к самым неблагоприятным (на границах диапазонов допусков), в реальных схемах

пренебрежимо мала. Метод наихудшего случая рекомендуется только для предварительной грубой оценки разброса характеристик схемы.

От недостатков режима наихудшего случая свободен метод статистических испытаний (метод Монте - Карло). Он производится при статистическом разбросе параметров, на которые в схеме заданы допуски. Случайные значения параметра  $x_i$  рассчитываются по формуле:

$$x_i = x_{i0} \cdot (1 + \xi \cdot \delta x_i), \quad (4.3)$$

где  $x_{i0}$  - номинальное значение параметра на принципиальной схеме;

$\delta x_i$  - относительный разброс параметра  $x_i$ ;

$\xi$  - центрированная случайная величина, принимающая значения на интервале (-1,1) с законом распределения, указанным в профиле моделирования (директиве *.options*).

Таким образом, процедура расчета допусков на параметры схемы  $x_1, x_2, \dots, x_n$  имеет итеративный (повторяющийся) характер:

- 1) вычисление функции чувствительности в номинальном режиме;
- 2) тем элементам схемы, которые имеют большие по абсолютной величине значения чувствительностей, назначаются более жесткие допуски (например, 5%), а остальными - менее жесткие (10%, 20%);
- 3) проводятся многократные статистические испытания по методу Монте - Карло;
- 4) если во всех испытаниях интересующая нас характеристика  $T$  не превышает заданного значения  $T_{зад}$ , то процесс расчета допусков заканчивается. Если нет, то повторяется весь цикл, начиная с пункта 2.

## Б. РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЕЙ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО.

### Исходные данные для лабораторной работы

Таблица 4.1

Выходная характеристика $T$	Максимальное допустимое значение $T_{зад}$
$K_{ГНОМ}$	1%
$K_{ГМАКС}$	10%

Здесь  $K_{ГНОМ}$  – коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник) при входном синусоидальном воздействии с амплитудой  $A_{вхном}$ ;

$K_{ГМАКС}$  – коэффициент гармоник при входном синусоидальном воздействии с амплитудой  $A_{вхмакс}$ .

### 4.1. Расчет функций чувствительности в режиме по постоянному току.

В режиме постоянного тока функции чувствительности  $\partial V(10)/\partial R_i$  ( $i=1, \dots, 7$ ) напряжения  $V(10)$  к малым изменениям величин сопротивлений схемы были рассчитаны в предыдущей работе (Рис. 4.1). Мы выяснили, что наиболее сильное

DC SENSITIVITIES OF OUTPUT V(10)			
ELEMENT NAME	ELEMENT VALUE	ELEMENT SENSITIVITY (VOLTS/UNIT)	NORMALIZED SENSITIVITY (VOLTS/PERCENT)
R_R4	2.000E+02	-1.097E-06	-2.194E-06
R_R2	7.500E+03	2.664E-04	1.998E-02
R_R1	2.700E+03	-7.190E-04	-1.941E-02
R_R7	1.000E+00	-1.155E-06	-1.155E-08
R_R6	1.000E+00	5.472E-21	5.472E-23
R_R5	2.000E+03	1.132E-07	2.264E-06
R_R3	3.300E+05	-4.804E-07	-1.585E-03

Рис. 4.1. Функции чувствительности для измеряемой величины  $V(10)$ .

влияние на  $V(10)$  оказывают резисторы R1, R2 и в меньшей степени R3. Разброс

параметров остальных резисторов практически не влияет на результат. Причем уже были назначены 1%-ные допуски на R1 и R2. Остается выяснить, следует ли ужесточать допуск на резистор R3.

#### 4.2. Статистический анализ схемы методом Монте-Карло.

В режиме статистических испытаний (Монте-Карло) проводится так называемый многовариантный анализ (многократное повторение расчета схемы по директивам *.ac*, *.dc* или *.tran*). При этом в каждом испытании (варианте) всем сопротивлениям в нашем случае присваиваются *случайные значения* из диапазонов возможных значений, определяемых величинами допусков на эти сопротивления. Например, если допуск на сопротивление R3 составляет 10%, а номинальное значение сопротивления равно 330кОм, то возможные значения будут лежать в интервале от 297кОм до 363кОм.

Закон распределения вероятностей случайной величины (сопротивления) определяется установками профиля моделирования (Рис. 4.2). Можно задать нормальный закон (Gaussian), равномерный (Uniform) или любой другой (Distributions).

После завершения многовариантного статистического анализа в графическом постпроцессоре выводится гистограмма (Рис. 4.3) выходной характеристики схемы – коэффициента нелинейных искажений *kharm*, по которой и определяется правильность назначения допусков на сопротивления.

Для проведения статистических испытаний придерживайтесь следующей процедуры:

1. Создайте новый профиль моделирования командой **PSpice/New Simulation Profile**. В строке *Name* (имя профиля) введите **mc**, а в окне *Inherit From* (унаследован от профиля) выберите созданный ранее профиль **kharm**. Пометьте опцию **Monte Carlo/Worst Case** и сделайте все установки, как на Рис. 4.2:

- Гистограмма для выходной (Output variable) переменной V(out);
- Число испытаний (Number of runs): 50;
- Использовать нормальный закон распределения (Use distribution: Gaussian);
- Начальное число для инициализации датчиков случайных чисел (Random number seed) - произвольное из указанного диапазона, возьмите 1177;
- Сохранять результаты расчетов всех испытаний (Save data from: All runs).

2. На схеме присвойте параметру *A* в блоке PARAMETERS значение, равное Авхном, полученное в 3-ей лабораторной работе.

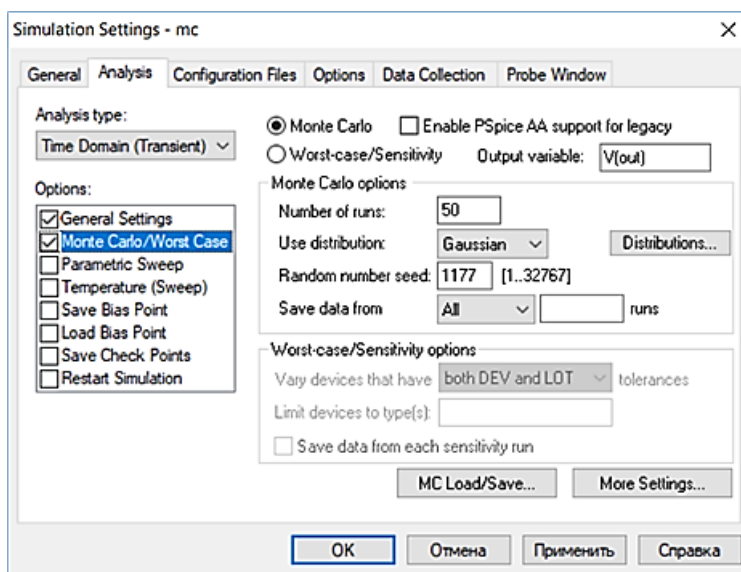


Рис. 4.2. Задание параметров статистического анализа.

3. Запустите задание на моделирование. После завершения расчетов нажмите **All** (выбрать все варианты), затем **OK** и включите режим Performance Analysis (**Plot/Performance Analysis**).

4. По команде **Trace/Add Trace** введите **YatLastX(Kharm(V(out)))** (см. п.4. в л/р №3). На экране появится гистограмма (Рис. 4.3).

5. По величине maximum на гистограмме определите, укладывается ли разброс выходной характеристики Кг в заданные в таблице 4.1 границы ( $\leq 1\%$ ). Если нет, то задайте более жесткие допуски (5%) на резистор R3 и повторите пункты 3 - 5 еще раз.

6. Присвойте параметру *A* значение, равное Авхмакс и проделайте пункты 3-5 заново. Величина maximum на гистограмме не должна выходить за предел в 10%. В противном случае задайте более жесткие допуски (1%) на на резистор R3 и повторите пункты 3-5.

7. Если и это не помогло, то скорректируйте величину Авхмакс путем ее уменьшения на 10 мВ. Присвойте это значение параметру *A* и повторяйте расчет (п.п. 3-5, 7).

8. Сохраните гистограмму (Рис. 4.3) в заготовке отчета (**Window/Copy to Clipboard**).

9. Отключите отображение величин допусков на принципиальной схеме: выделите все компоненты (**Edit/Select All**), войдите в редактор Property Editor (**Edit/Properties**). В нижней части окна Property Editor выбираем закладку компонентов (Parts) и задаем режим фильтрации свойств **Filter by: <Current properties>**. Выделите столбец (строку) **Tolerance** и выполните команду **Display/Do Not Display**. Закройте редактор свойств Property Editor.

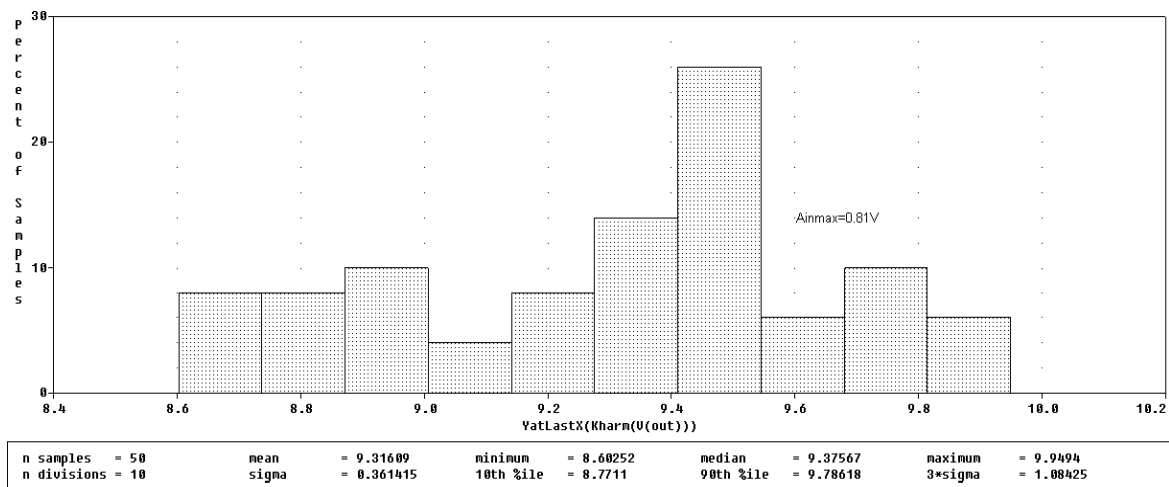


Рис. 4.3. Гистограмма распределения коэффициента гармоник.

### Содержание отчета

1. Исходные данные и результаты расчета - перечень всех сопротивлений и допусков на них. Скорректированное значение Авхмакс.
2. Страница распечатки гистограммы распределения коэффициента гармоник при максимальной амплитуде входной синусоиды.
3. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Методы оценки работоспособности электронных схем. Функции чувствительности. Алгоритм расчета по методу наихудшего случая.
2. Использование функций чувствительности для назначения допусков на элементы схемы.
3. Реализация расчета функций чувствительности в программе PSpice AA.
4. Реализация расчета функций чувствительности в программе Pspice.
5. Реализация метода Монте-Карло в программе PSpice.
6. В чем суть метода Монте-Карло применительно к назначению допусков на элементы схем?
7. Что такое гистограмма и как она строится по результатам многократных испытаний.
8. По распечатке гистограммы дать комментарии результатов анализа и смысла приведенных обозначений.
9. Как будет выглядеть интегральный закон распределения коэффициента гармоник?
10. Последовательность выполнения лабораторной работы.



# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Цель работы: Исследование схемы усилителя в динамическом режиме с помощью программы OrCAD PSpice:

- оптимизация параметров схемы усилителя по заданной АЧХ,
- вычисление отношения сигнал/шум на выходе усилителя;
- расчет допустимых мощностей, выделяемых на резисторах схемы, а также максимальной и номинальной выходных мощностей;
- создание автоматизированного отчета (спецификации) по проекту.

### 5.1. Задание на лабораторную работу.

1. Выбрать нижнюю границу полосы пропускания усилителя  $F_1$  в соответствии с Вашим номером варианта (таблица 5.1).

Исходные данные

Таблица 5.1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$F_1$ , Гц	18	22	27	33	40	47	55	68

2. Определить величину емкости конденсатора  $C_1$  по заданной нижней границе полосы пропускания  $F_1$ .

3. Определить полосу пропускания устройства по уровню  $-3\text{дБ}$  от максимального значения АЧХ. Найти коэффициент усиления и отношение сигнал/шум в полосе пропускания усилителя.

4. Рассчитать максимальную и номинальную выходные мощности, определить максимальные мощности, рассеиваемые на резисторах  $R_1-R_7$ , и выбрать допустимые мощности для каждого резистора в соответствии со стандартным рядом (0.125Вт, 0.25Вт, 0.5Вт,...).

5. Создать автоматизированный отчет по проекту (спецификацию компонентов схемы).

### 5.2. Определение емкости разделительного конденсатора.

1. Создайте новый профиль моделирования:

- Name: **ac**;
- Analysis type: **AC Sweep/Noise** (анализ в частотной области с расчетом шумов);
- AC Sweep Type: **Logarithmic/Decade** (логарифмический масштаб по оси частот, разбивка на декады);
- Start Frequency: 1m (начальная частота  $10^{-3}$ Гц);
- End Frequency: 10meg (конечная частота –  $10^7$ Гц);
- Points/Decade: **50** (50 точек на декаду, всего 500 точек);
- Noise Analysis: **Enabled**, Output Voltage: **V(OUT)**, I/V Source: **V1** (провести расчет спектральной плотности шума, выходное напряжение  $V(\text{OUT})$ , входной источник напряжения  $V_1$ ).

Затем, не выходя из режима создания профиля, отметьте галочкой опцию **Parametric Sweep** и задайте вариацию параметра  $C$  - емкости конденсатора  $C_1$  - в логарифмическом масштабе от 100мкФ до 1100мкФ (20 точек на декаду):

- Sweep Variable: **Global parameter**; Parameter name: **C**; Sweep type: **Logarithmic/Decade**; Start value: **100u**, End value: **1100u**, Points/Decade: **20**.
- **OK.**

2. Убедитесь, что свойству АС источника э.д.с. V1 присвоено значение 1: двойным кликом на источнике V1 войдите в редактор Property Editor и введите значение 1 для свойства АС.

3. Запустите задание на моделирование.

4. В графическом постпроцессоре Probe выберите все реализации результатов моделирования (All).

5. На экран выведите графики выходного напряжения V(out) (Trace/Add Trace).

6. Включите режим Performance Analysis (Trace/ Performance Analysis).

7. По команде Trace/Add Trace выведите на экран график функции измерения Cutoff\_Highpass\_3dB(V(out)), которая вычисляет значение частоты, соответствующее пересечению АЧХ усилителя с уровнем минус 3дБ относительно максимума в зоне нарастания АЧХ.

8. В режиме курсора (Trace/Cursor/Display) определите точное значение емкости

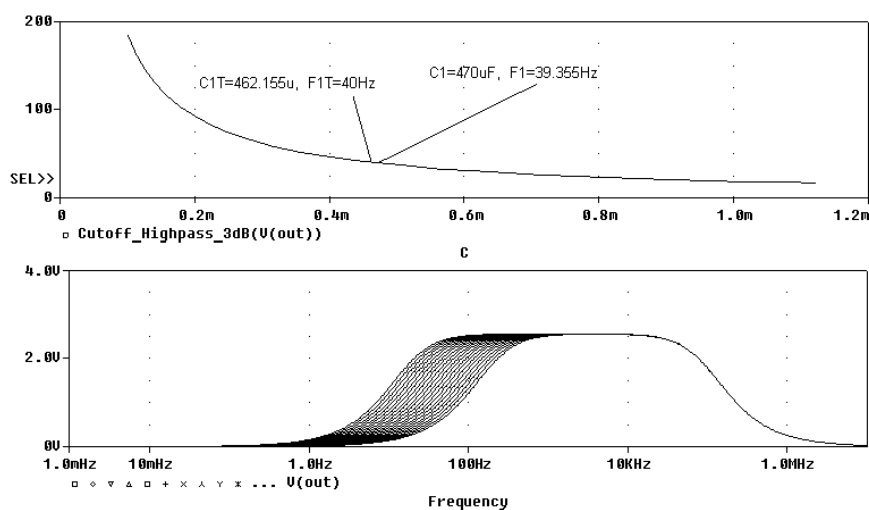


Рис. 5.1. Графики зависимостей F1(C1) и V(out) от частоты при вариации емкости конденсатора C1

конденсатора C1T, обеспечивающее заданную в таблице 5.1 нижнюю границу F1 полосы пропускания. Например, чтобы найти точное значение C1T, при котором F1= F1T=40Гц, необходимо ввести команду поиска **sflc(40)** в окошке **Trace/Cursor/Search Commands**. Нанесите метку на график (кнопка **Mark Label**) и отредактируйте её (Рис. 5.1).

9. Подберите ближайшее из стандартного ряда емкостей для найденного точного значения емкости C1 (см. Приложение, п.4) и в режиме курсора введите команду поиска **sfxv(<F1>)**, где вместо <F1> надо вставить найденное стандартное значение емкости. Нанесите метку на график и отредактируйте её, как на Рис. 5.1. Сохраните содержимое экрана в заготовке отчета.

10. Занесите найденное стандартное значение C1, а также фактическое значение частоты F1 в таблицу 5.3 заготовки отчета.

11. В схеме усилителя замените величину {C} емкости конденсатора C1 на найденное стандартное значение.

12. Откройте текущий профиль моделирования **ac** и на закладке Analysis отключите опцию **Parametric Sweep**.

### 5.3. Построение АЧХ усилителя и анализ внутреннего шума.

Данные расчеты выполняются в следующем порядке:

1. Запустите программу анализа PSpice с текущим профилем моделирования **ac**. После окончания расчета выведите график АЧХ - выходного напряжения V(out).

2. В постпроцессоре PSpice для определения нижней и верхней границ полосы пропускания усилителя по его АЧХ (на уровне затухания 3дБ) необходимо командой **Trace/Evaluate Measurements** выбрать функцию измерений **Bandwidth\_Bandpass\_3dB(1)** и щелкнуть по имени переменной **V(OUT)**. Данная функция измерений вычисляет разность частот, находящихся на пересечении АЧХ с заданным уровнем 3дБ и отмечает эти пересечения точками P1 и P2 на графике (если командой **Tools/Options** включена опция **Display Evaluation**). Для выходного напряжения V(OUT) функция измерений примет вид **Bandwidth\_Bandpass\_3dB(V(OUT))**. В режиме курсора определите верхнюю границу полосы пропускания F2, а также Kус - коэффициент усиления в децибелах в полосе пропускания (на плоской части АЧХ). Отредактируйте метки P1 и P2 на графике: вместо P1 – сохраненное в таблице 5.3 значение F1, а вместо P2 – найденное значение F2 (см. Рис. 5.2).

3. Для определения отношения сигнал/шум на выходе усилителя следует применить функцию измерений (Measurement) **SNR**, обращение к которой в нашем случае:

$$SNR(V(out), RNR(V(ONoise), 0.8)), \quad (5.1)$$

где  $V(out)$ ,  $V(ONoise)$  – выходное напряжение и спектральная плотность напряжения шума на выходе усилителя, соответственно;

RNR – функция (см. макросы), вычисляет отношение дисперсии шума к квадрату амплитуды A полезного сигнала в полосе частот от 0 до текущего значения частоты  $f$ ;

$A = A_{выхном}$  (Таблица 3.3). Например, если  $A_{выхном} = 0,8В$ , то обращение к функции измерений SNR выглядит, как в формуле (5.1).

#### Расчет отношения сигнал/шум:

- Командой **Trace/Evaluate Measurements** ввести функцию измерений SNR с аргументами из (5.1) и **ОК**. Вверху появится новая координатная сетка с вычисленным значением SNR в децибелах. Запомните или скопируйте его.
- Удалите лишние координатные сетки (**Plot/Delete Plot**).
- Введите текст (**Plot/Label/Text**): SNR= <Значение SNR в dB> и поместите его на экран.

4. Сохраните в заготовке отчета график АЧХ усилителя со всеми нанесенными метками (см. Рис. 5.2).

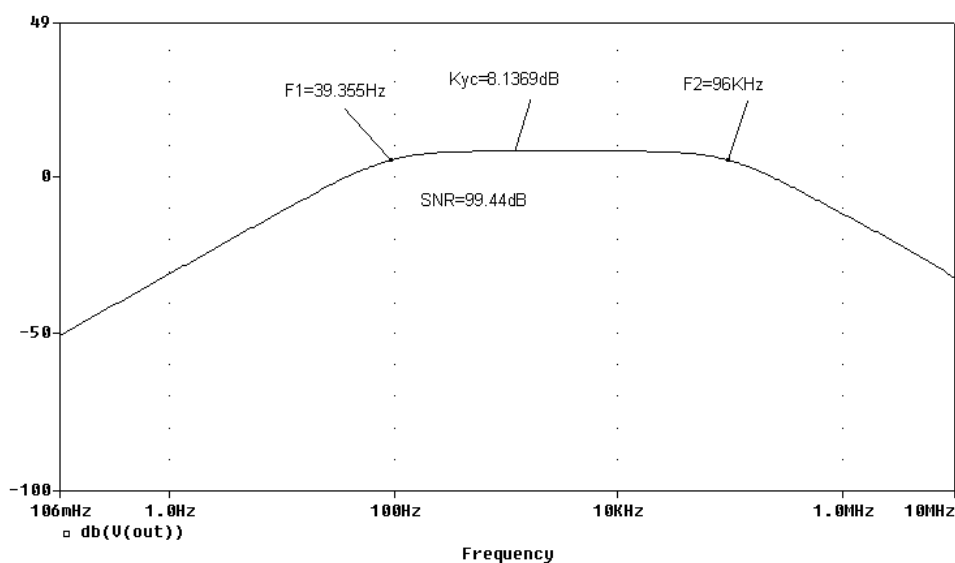


Рис. 5.2. Результаты расчета АЧХ.

#### 5.4. Расчет мощностей, выделяемых на резисторах схемы. Определение номинальной и максимальной выходных мощностей.

Расчет процессов, протекающих во времени, проводится по директиве *.tran* для номинальной и максимальной амплитуд входного сигнала. Для этого на вход усилителя подключен синусоидальный источник V1 с амплитудой  $VAMPL=\{A\}$  и частотой  $FREQ=1\text{kHz}$ .

1. В менеджере проекта выделите профиль моделирования **tran**, созданный в 3-ей лабораторной работе.

- В контекстном меню (правая кнопка мыши) выберите пункт **Edit Simulation Settings** (редактировать установки выделенного профиля моделирования). В окне Options закладки Analysis профиля **tran** выделите опцию **Parametric Sweep** и измените характер вариации амплитуды Sweep type: **Value list** - вариация параметра *A* по заданному списку значений. В окошке Value list введите через пробел или запятую величины  $\langle A_{вхном} \rangle$ ,  $\langle A_{вхтаx} \rangle$  - численные значения номинальной и максимальной (скорректированной) амплитуд входного сигнала, найденные в 3-ей и 4-ой лабораторных работах. Нажмите **OK**.

- В контекстном меню выделенного профиля **tran** выберите **Simulate Selected Profile(s)** - запуск PSpice для расчета схемы с данным профилем моделирования.

2. После окончания расчета подключите все (**All**) результаты анализа. Для обеих реализаций *A<sub>вхном</sub>* и *A<sub>вхтаx</sub>* рассчитайте, соответственно, максимальную и номинальную выходные пиковые мощности:

- В строке Trace Expression окна Add Traces (команда **Trace/Add Trace**) введите выражение **W(RH)** и **OK**;

- Включите режим курсора и определите максимальные значения номинальной и максимальной выходных мощностей. Результаты занесите в [таблицу 5.3](#).

3. Загрузите снова файл результатов расчета tran.dat (**File/Open**), в окне Available Sections выберите секцию, соответствующую максимальной входной амплитуде, и нажмите **OK**.

6. Для данной секции  $A=A_{вхтаx}$  выведите графики эффективных мощностей **AVG(W(Rk))**, выделяемых на резисторах ( $k=1,2,\dots,7$ ). Для ускорения выполнения этого задания можно воспользоваться заранее подготовленным командным файлом *power.cmd*, запускаемым из меню **File/Run Commands** (при условии, что имена резисторов соответствуют схеме на Рис. 3.1). Определение численных значений эффективных мощностей следует проводить в режиме курсора (**Trace/Cursor/Display**) в конце интервала анализа. Приведите величины допустимых мощностей рассеяния для резисторов в соответствие со стандартным рядом (0.125Вт, 0.25Вт, 0.5Вт,...).

#### 5.5. Создание автоматизированного отчета (спецификации) по проекту.

Для создания подобного отчета необходимо определить, что будет включено в его состав. Так, если надо автоматизировать создание отчета в виде таблицы 5.2, то можно воспользоваться соответствующей информацией, заключенной в свойствах компонентов разработанной принципиальной схемы.

Процедура создания отчета в форме таблицы 5.2:

1. Если на схеме в правом нижнем углу отсутствует угловой штамп (Title Block), то помещаем его (**Place /Title Block/TitleBlock0N**).

2. Командой **Edit/Select All** выделяем все объекты схемы и переходим в редактор свойств по команде **Edit/Properties**. В нижней части окна Property Editor выбираем закладку компонентов (Parts) и задаем режим фильтрации свойств **Filter by: <Current properties>**.

## Спецификация компонентов усилителя мощности

Таблица 5.2

№№	Обозначение	Величина	Допуск	Кол-во	Тип корпуса	Допустимая мощность, Вт	Допустимое напряжение, В
1	C1	470u	10%	1	CPAX/.575x.150/.031		6.3
2	R1	2.7k	1%	1	AX/RC05	0.125	
3	R2	7.5k	1%	1	AX/RC05	0.125	
4	R3	330k	1%	1	AX/RC05	0.125	
5	R4	200	10%	1	AX/RC05	0.125	
6	R5	2k	10%	1	AX/RC05	0.125	
7	R6 R7	1	10%	2	AX/RC05	0.125	
8	RH	8		1			
9	VD1	KD521		1	DAX/.300X.050/.028		
10	VT1 VT3	KT3107		2	TO18		
11	VT2 VT4	KT3102		2	TO18		
12	J1	SIPSOC-4		1	SIP/TM/L.400/4		

3. Находим свойство **Power**, выделяем в этой строке (столбце) резисторы R1-R7, из контекстного меню (правая кнопка мыши) выбираем Edit и вводим величину мощности рассеяния 0.125 для резисторов R1-R7. Соответствующая ячейка для RH и C1 должна быть

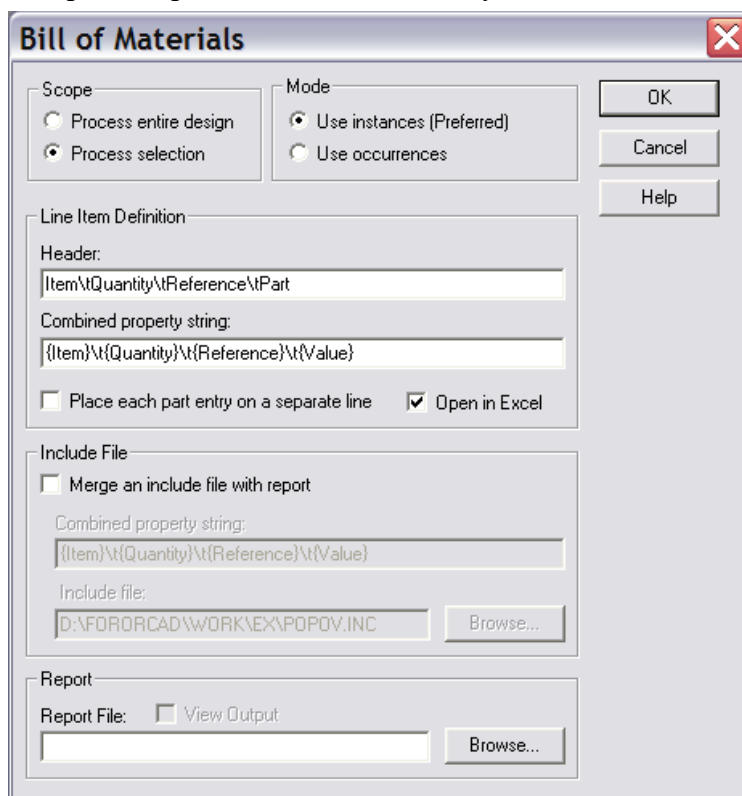


Рис. 5.3. Создание отчета-спецификации

очищена (то же самое нужно сделать и в свойстве **PCB Footprint** для этого сопротивления).

**4. Проверяем и изменяем, если есть ошибки, типы корпусов компонентов. Выделяем свойство PCB Footprint и сравниваем содержимое с таблицей 5.2 (столбец Тип корпуса).**

5. Прокручивая электронную таблицу, находим свойство **Voltage**, заменяем CMAX (максимальное допустимое напряжение для конденсатора C1) на величину 6.3 (шесть и три десятых вольта), а соответствующие ячейки для всех сопротивлений (RVMAX) очищаем. Выходим из редактора свойств.

6. Переключаемся в менеджер проекта и выделяем схемную папку щелчком левой кнопки мыши. Выполняем команду **Tools/Bill of Materials**. Открывается окно, которое

показано на Рис. 5.3. В поле **Report File** автоматически выставляется путь к файлу отчета. Здесь ничего не меняем. Отмечаем опции **Process selection**, **Use instances** и **Open in Excel**.

7. Очищаем поле **Header**, затем копируем и вставляем строку заголовков столбцов таблицы:

№№\tОбозначение\tВеличина\tДопуск\tКол-во\tТип корпуса\tДопустимая мощность, Вт\tДопустимое напряжение, В

8. Очищаем поле **Combined property string**, копируем и вставляем строку соответствующих свойств компонентов:

{Item}\t{Reference}\t{Value}\t{Tolerance}\t{Quantity}\t{PCB Footprint}\t{Power}\t{Voltage}

9. При активной опции **Open in Excel** и нажатии **ОК** откроется Microsoft Excel с таблицей отчета. Остается только отформатировать (пример – Таблица 5.2) и скопировать таблицу в Word – заготовку отчета.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные для расчета.
3. Таблица 5.2 отчета по проекту и таблица 5.3 результатов выполнения экспериментов.

#### Результаты моделирования

Табл.5.3

Фактические границы полосы пропускания		C1, мкФ	Кус, дБ	Рвых ном, Вт	Рвых макс, Вт	Отношение сигнал/шум, дБ
F1, Гц	F2, кГц					

4. График зависимости нижней границы полосы пропускания усилителя от величины емкости C1 (Рис. 5.1).
5. График АЧХ (Рис. 5.2).
6. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Цель и содержание лабораторной работы.
2. Дать определение полосы пропускания усилителя.
3. Что такое АЧХ и как она связана с напряжением V(OUT) на выходе усилителя?
4. Пояснить ход АЧХ усилителя.
5. Расчет величины емкости разделительного конденсатора C1 в программе PSpice AA.
6. Назначение и структура директивы **.NOISE**.
7. Дать определение отношению сигнал/шум и пояснить методику его вычисления.
8. Режимы анализа электронных схем, задаваемые в профиле моделирования, и соответствующие директивы входного языка PSpice. Директивы **.DC**, **.AC**, **.Tran** и их структура.
9. Режим **Performance Analysis**.
10. Возможности графического постпроцессора PSpice для анализа результатов моделирования. Структура команд поиска и фиксации точек. Макросы и функции измерений. Синтаксис функций измерений.
11. Функции измерений и макросы, используемые в данной работе.
12. Последовательность выполнения лабораторной работы.
13. Проведите сравнение показателей настоящего усилителя и усилителя из 2-ой лабораторной работы.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

## РАЗРАБОТКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ

Цель работы: ознакомление с модулем OrCad Layout и применение его для проектирования печатной платы.

### А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В СИСТЕМЕ OrCAD.

Система OrCAD включает в себя взаимосвязанные пакеты программ Capture, Layout, Gerber Tool и IntelliCAD для проектирования многослойных печатных плат (ПП) РЭА. Тем самым она образует систему сквозного проектирования радиоэлектронной аппаратуры (Рис. 6.1).

#### 6.1. Типовые задачи, решаемые при проектировании ПП.

1. Создание печатной платы. В редакторе Capture создается файл списка соединений (.mnl), включающий при необходимости некоторые правила размещения и трассировки и загружаемый в Layout. Входными данными для Layout могут также быть файл .dxf модуля OrCAD IntelliCAD (в формате AutoCAD) или импортированные из других пакетов (PCAD, Protel, Tango и т.п.) базы данных ПП.

2. Спецификация параметров ПП. Задаются единицы измерения в английской или метрической системах, размеры сеток и величины зазоров, определяются типы и размеры контактных площадок и переходных отверстий, определяется набор слоев ПП; рисуются контуры ПП и зон, запрещенных для размещения компонентов или трассировки (obstacles). Для ускорения выполнения этих операций предусмотрено применение *технологических*

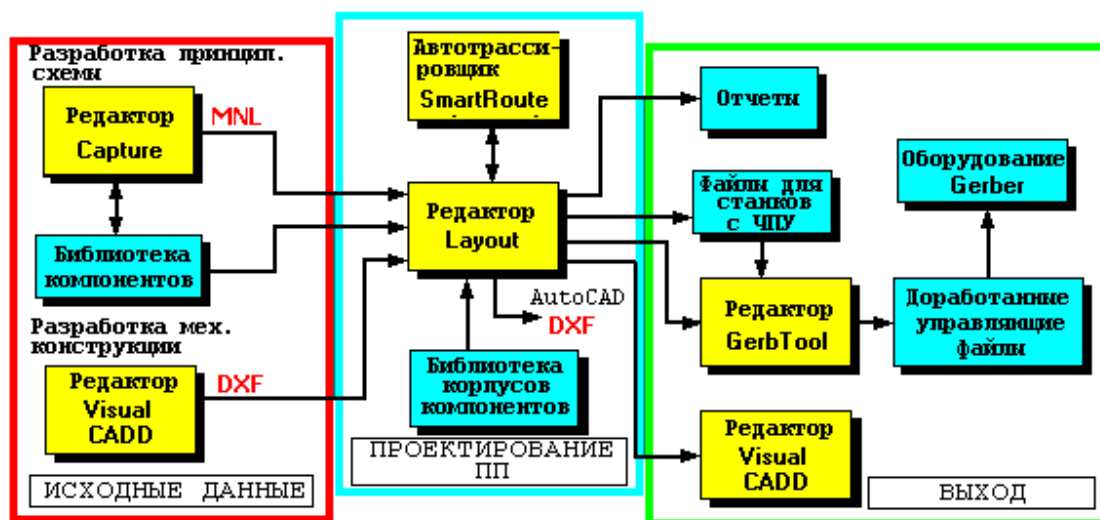


Рис. 6.1. Упрощенная схема взаимодействия модулей системы OrCAD в процессе проектирования.

*шаблонов* (файлов с расширениями имени .tch или .tpl), загружаемых вместе со списком соединений и содержащих спецификацию параметров [2, 3]. В дальнейшем эти установки можно изменять по отдельности или загрузить новый шаблон.

3. Размещение компонентов и контроль правильности размещения. Компоненты в Layout можно размещать группами, индивидуально или автоматически (Layout Plus). Средствами Layout проверяется правильность размещения с точки зрения соблюдения заранее определенных правил.

4. Трассировка соединений (разводка печатной платы). Для трассировки соединений можно пользоваться всеми преимуществами метода *push-and-shove*, который "расталкивает" уже проложенные трассы, чтобы освободить место для новых трасс



проводников. Доступны также альтернативные методы и программы (Smart Route, Specstra). Реализуется контроль правильности разводки.

При проектировании ПП могут использоваться режимы ручного и автоматического (Layout Plus) размещения компонентов; ручной, интерактивной или автоматической трассировки соединений как средствами пакета OrCAD, так и с применением популярной программы Specstra (размещение и трассировка) или Smart Route, одной из первых программ автоматизированного проектирования, основанной на искусственном интеллекте.

#### 5. Завершение разработки печатной платы:

Редактор Layout обеспечивает заданную последовательность команд из меню Auto для завершения проекта. Эти команды включают проверку выполнения установленных правил и ограничений (Design Rule Check), подчистку ПП (Cleanup Design), переименование компонентов, осуществляют взаимосвязь с принципиальной схемой, запускают постпроцессор и создают отчетную документацию (Reports). Применение метода Auto ECO (Engineering Change Order) позволяет осуществлять непосредственную связь между принципиальной схемой и конструкцией ПП. Так, например, любые изменения компонентов, связей между ними и т.п., в принципиальной схеме влекут автоматическую корректировку конструкции ПП. И наоборот, переименование компонентов, замена корпусов, перестановка выводов и некоторые другие изменения на ПП передаются в принципиальную схему (Back Annotate).

OrCAD содержит в своем составе редактор GerbTool (оборудование Gerber) для доработки ПП и создания технологической документации - управляющих файлов для станков и оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ).

Также в состав OrCAD входит графический редактор чертежей IntelliCAD (упрощенный вариант AutoCAD) для автоматизации процесса подготовки чертежной документации. IntelliCAD импортирует и экспортирует файлы форматов .DWG, .DXF и картотеки .GCD.

### 6.2. Особенности конструкций печатных плат.

Редактор ПП Layout Plus позволяет проектировать многослойные ПП с двусторонним размещением компонентов. Тип каждого слоя ПП определяется его функциональным назначением. ПП может содержать несколько однотипных слоев.



Рис. 6.2. Структура теплового рельефа

на слоях этого типа. Электрические контакты выводов компонентов с проводящей плоскостью обеспечиваются программой автоматически с помощью так называемых тепловых рельефов (thermal reliefs), как показано на Рис. 6.2. Таким образом, зона прогрева

#### 6.2.1. Типы слоев печатной платы.

Слои ПП редактора Layout классифицируются на шесть следующих типов.

1. Слой разводки (Routing Layer). На слоях данного типа разрешена трассировка соединений с обеспечением контактов для выводов компонентов.

2. Проводящая плоскость (Plane Layer). Слои сплошной металлизации обычно используются для объединения контактов цепей питания или "земли". Слои данного типа часто применяют в качестве внутренних электромагнитных экранов. Прокладка трасс проводников запрещена



при пайке проходящего через переходное отверстие вывода компонента ограничивается только кольцевой зоной вокруг ПО, в то время как электрический контакт обеспечивается со всем проводящим слоем.

3. Документационные слои (Documentation). Это слои неэлектрического типа. На них может наноситься разнообразная вспомогательная информация - маски для пайки, позиционные обозначения компонентов и другие надписи, метки для сверления отверстий и т.п. Не предназначены для прокладки трасс.

4. Слой перемычек (Jumper Layer). При разводке односторонних ПП, т.е. когда разрешена трассировка только на одной из внешних сторон ПП (верхней или нижней), необходимо определить противоположную сторону, как слой перемычек. Программа Layout автоматически размещает перемычки (отрезки проводников заданных размеров) на этом слое во избежание пересечения трасс. Параметры перемычек и стратегия трассировки с использованием последних задаются либо вручную в настройках, либо путем использования готовых шаблонов (файлы Jump6035.tch и Jumper\_v.sf, например).

5. Слой отверстий (Drill Layer). Этот слой используют как для генерации управляющей информации для сверлильных станков с ЧПУ, так и для просмотра расположения отверстий на ПП в окне редактора Layout. Печатная плата может содержать несколько слоев данного типа, особенно в тех случаях, когда кроме сквозных переходных отверстий (via) применяются не сквозные, достигающие только одного внешнего слоя ПП (blind via), или глухие ПО, вообще не выходящие наружу (buried via).

6. Неиспользуемый слой (Unused Routing). Слои такого типа не содержат трасс проводников и обычно используются в качестве резервных.

### 6.2.2. Имена слоев печатной платы.

Структура ПП полностью характеризуется набором разнообразных слоев, каждый из которых несет определенную информацию как для разработчика конструкции ПП, так и для изготовителя - автоматизированного технологического оборудования Gerber. В таблице 6.1 перечислен стандартный для редактора OrCAD Layout набор слоев ПП и их имена. Пользователь может включать в проект слои допустимых типов с новыми именами, удалять слои, изменять тип слоя и т.п.

Таблица 6.1. Характеристика слоев печатной платы

Имя слоя (Layer name)	Сокращ. название (Номер слоя)	Тип слоя по умолчанию	Примечания
Global Layer	<b>(0)</b>	Special	Рисование границ ПП, областей на различных слоях ПП и т.п.
TOP	TOP <b>(1)</b>	Routing	Верхняя сторона ПП (слой компонентов)
BOTTOM	BOT <b>(2)</b>	Routing	Нижняя сторона ПП (слой пайки)
GROUND	GND <b>(3)</b>	Plane	Внутренние проводящие плоскости для цепей "земля" и "питание", соответственно
POWER	PWR <b>(4)</b>	Plane	
INNER1, INNER2,...	IN1, IN2,...(5-16)	Routing	Все внутренние слои, предназначенные для разводки соединений
SMTOP	SMT <b>(17)</b>	Doc	Графика маски пайки на верхней и нижней сторонах ПП, соответственно
SMBOT	SMB <b>(18)</b>	Doc	
SPTOP	SPT <b>(19)</b>	Doc	Графика вставки пайки на верхней и нижней сторонах ПП, соответственно
SPBOT	SPB <b>(20)</b>	Doc	
SSTOP	SST <b>(21)</b>	Doc	Контуры корпусов компонентов на верхней и нижней сторонах ПП, соответственно
SSBOT	SSB <b>(22)</b>	Doc	

Продолжение таблицы 6.1

ASYTOP	AST (23)	Doc	Графика корпусов компонентов со всеми обозначениями на верхней и нижней сторонах ПП, соответственно
ASYBOT	ASB (24)	Doc	
DRLDWG	DRD (25)	Doc	Графика условных обозначений отверстий плюс таблица (Drill Chart) описания отверстий (диаметры, количество, допуски и т.п.)
DRILL	DRL (26)	Drill	Слой отверстий
FAB_DWG	FAB (27)	Doc	Любые графические комментарии
NOTES	NOT (28)	Doc	Любые текстовые заметки

Каждый слой имеет свой номер. Любой слой или группу слоев можно сделать видимыми или невидимыми. Возможен просмотр каждого слоя в отдельности путем нажатия клавиши Back Space и указания соответствующего слоя в меню редактора Layout, или *набором на клавиатуре номера слоя*.

### 6.3. Размещение компонентов на ПП.

Размещение компонентов выполняется в OrCAD Layout либо вручную, по очереди выбирая, поворачивая и перемещая компоненты или группы компонентов (кластеры\*) на верхнюю или нижнюю стороны ПП; либо автоматически (OrCAD Layout Plus).

### 6.4. Автоматическая трассировка соединений.

Автотрассировка проводников может выполняться в системе OrCAD Layout тремя способами [1]: во-первых, OrCAD Layout содержит в меню **Auto** группу соответствующих команд, достаточных для разработки простых ПП. Во-вторых, для разработки сложных плат предназначена уникальная программа Smart Route, использующая алгоритмы оптимизации нейронных сетей и обеспечивающая очень высокое качество трассировки. В-третьих, можно через меню **Auto** подключать внешнюю программу Specetra (размещение компонентов и трассировка соединений в ручном, интерактивном или автоматических режимах). Собственно Layout предлагает на выбор два способа автотрассировки проводников: сеточный (Grid-Based) и бессеточный (Shape-based).

При использовании сеточных технологий трассировки и размещения объекты ПП (проводники-трассы и компоненты) размещаются в узлах заранее определенной сетки. Для бессеточных технологий (Smart Route, Specetra) характерно моделирование объектов ПП в виде совокупности геометрических фигур (прямоугольник, круг, дуга, трасса, полигон), которым приписаны определенные электрические и физические характеристики и правила проектирования. В отличие от привязанных к сеткам технологий каждый объект моделируется геометрически точно, за счет чего достигается более плотный монтаж с меньшим числом слоев [4].

Из Рис. 6.3 видно, что при использовании сеток в качестве границ объекта принимаются ближайšie примыкающие снаружи узлы сетки (Рис. 6.3-а). За счет точного моделирования геометрических форм (Рис. 6.3-б) объектов бессеточными технологиями образуется свободное дополнительное пространство, которое можно использовать для более тесного расположения компонентов и проводников.

Характерная особенность бессеточной технологии – меньшие затраты памяти, поскольку в данном случае требуемый объем памяти не зависит от шага сетки, в то время как при

\* **Кластер** - группа близлежащих на принципиальной схеме компонентов (обозначенных пользователем).

использовании сеточных технологий объем памяти возрастает в квадратичной зависимости при уменьшении шага сетки.

В бессеточных технологиях память тратится только на описание геометрических форм

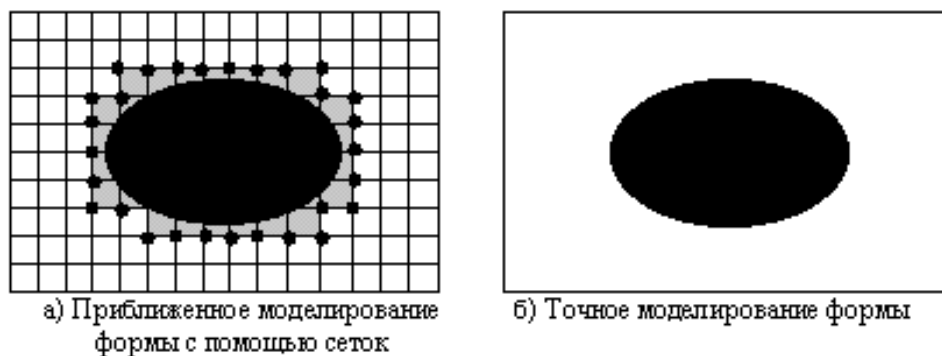


Рис. 6.3. Сеточное и бессеточное моделирование геометрической формы.

объектов, а не на запоминание координат помеченных узлов сетки.

Другая особенность бессеточных технологий – поддержка сложных правил проектирования. Для каждого объекта, расположенного на определенном слое ПП, можно задать ряд индивидуальных правил. Это означает, что при работе над сложным проектом не приходится прибегать к искусственным приемам при размещении компонентов и трассировке проводников.

Разрешающая способность бессеточных технологий составляет 0,01мкм в метрической системе и 0,0001мил (1мил=0,001дюйма) в английской системе, т.е. на три порядка выше, чем в широко распространенной системе PCAD - Accel EDA. Внутренняя точность представления данных еще выше [2].

#### 6.4.1. Особенности разводки трасс на ПП, содержащей планарные контактные площадки.

Обычные сквозные штыревые контактные площадки, к которым припаивают выводы компонентов, требуют сверления отверстий в ПП. В современных конструкциях ПП широко используют планарные технологии (Surface Mount Technology - SMT), предполагающие пайку выводов компонентов к планарным контактным площадкам (Surface Mount Devices - SMD) без сверления отверстий. При этом соединения планарных контактных площадок с внутренними слоями трассировки (Inner) или проводящими плоскостями (Plane) выполняются *методом ответвления* (Fanout) (см. Рис. 6.4): от планарного контакта делается отвод коротким отрезком трассы (stringером) до переходного отверстия, соединяющего внешнюю сторону ПП с внутренним

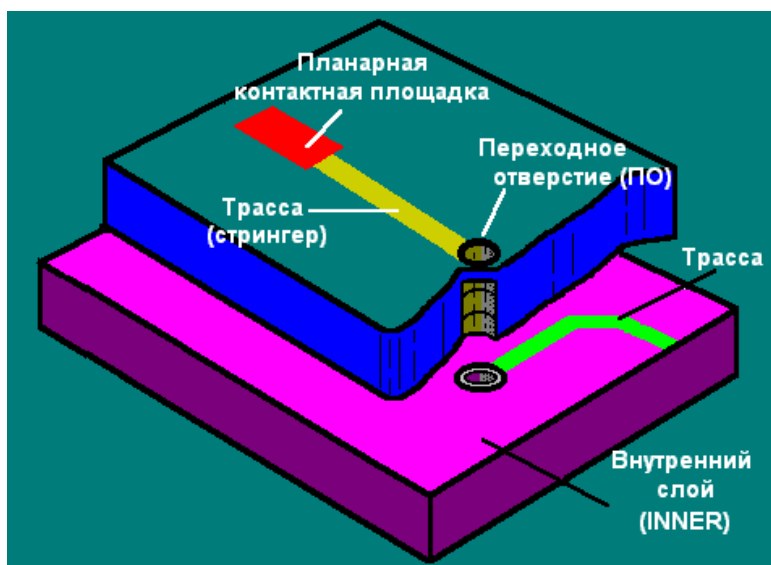


Рис. 6.4. Трассировка соединений планарных контактных площадок.

слоем. Если внутренний слой является проводящей плоскостью (PWR или GND), то в этом месте формируется тепловой рельеф (Рис. 6.2). Редактор Layout реализует метод ответвления в случаях невозможности прокладки отдельных трасс.

Этот метод особенно полезен для трассировки:

- многослойных ПП, содержащих проводящие плоскости PWR или GND;
- ПП с высокой плотностью монтажа, когда затруднена или запрещена прокладка проводников на наружных слоях.

## Б. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.

Основная задача, решаемая при выполнении лабораторной работы: разработка печатной платы для принципиальной схемы проектируемого устройства - размещение компонентов на плате и трассировка соединений выводов компонентов - реализуется полностью в редакторе OrCAD Layout.

### 6.5. Подготовительные операции.

Перед проектированием печатной платы необходимо выполнить в редакторе OrCAD Capture следующие операции:

1) Сопротивление нагрузки R<sub>H</sub> не должно размещаться на печатной плате, поэтому дважды щелкните левой кнопкой мыши по резистору R<sub>H</sub>, выберите **Filter by: OrCAD-PSpice** в редакторе Capture Property Editor и присвойте значение **True** свойству **PSpiceOnly** (только моделирование).

2) Создайте файл списка соединений (.mnl) для редактора Layout:

- Переключитесь в менеджер проекта и щелкните левой кнопкой мыши по схемной папке проекта.

- Выполните команду **Tools/Create Netlist**. В открывшемся окне выберите закладку Layout и активируйте опцию **User Properties are in inches** (английская система единиц). *Проследите, чтобы mnl - файл списка соединений был создан в Вашем рабочем каталоге.*

- Сохраните проект и запустите редактор Layout Plus (путь к файлу запуска программы: **c:\Cadence\SPB\_16.5\tools\layout\_plus\lsession.exe**).

При запуске программы Layout в автономном режиме становятся доступными команды меню основной оболочки (Lsession Environment), из которой можно подключать все основные модули OrCAD, импортировать и экспортировать файлы из одного формата в другой и т.п.

### 6.6. Начало работы в редакторе ПП Layout Plus.

1. По указанию преподавателя выберите вариант задания на выполнение лабораторной работы из таблицы 6.2.

Таблица 6.2. Варианты заданий

Типы слоев ПП, используемых для проектирования							Пояснения	
Имя слоя	TOP	BOT	GND	PWR	IN1	IN2		
№№ вариантов	1	Routing	Routing	Plane	Plane	Routing	Unused	двухсторонняя пятислойная ПП (промежуточные слои - проводящие плоскости для цепей питания и "земли")
	2	Routing	Routing	Plane	Unused	Unused	Unused	двухсторонняя трехслойная ПП (промежуточный слой - проводящая плоскость для цепи "земля")
	3	Routing	Routing	Unused	Plane	Unused	Unused	двухсторонняя трехслойная ПП (промежуточный слой - проводящая плоскость для цепи питания)
	4	Routing	Routing	Plane	Plane	Unused	Unused	двухсторонняя четырехслойная ПП (промежуточные слои - проводящие плоскости для цепей питания и "земли")
	5	Routing	Routing	Unused	Unused	Routing	Routing	двухсторонняя четырехслойная ПП (промежуточные слои-слои разводки)

Продолжение таблицы 6.2

6	Routing	Routing	Plane	Unused	Routing	Routing	двухсторонняя пятислойная ПП (промежуточные слои-слои разводки и проводящая плоскость для цепи "земля")
7	Routing	Unused	Unused	Plane	Routing	Routing	односторонняя четырехслойная ПП (промежуточные слои - слои разводки и проводящая плоскость для цепей питания)
8	Routing	Unused	Plane	Plane	Routing	Routing	односторонняя пятислойная ПП (промежуточные слои - слои разводки и проводящие плоскости для цепей питания и "земли")

**Примечания:** 1) На слое **TOP** (верхняя сторона ПП) всегда размещаются компоненты.

2) В 1, 5 – 8 вариантах используются внутренние слои типа **INNER (IN1 и IN2)** для трассировки соединений.

2. Выполните команду **File/New**. В строке диалога **Input Layout TCH or TPL or MAX file** укажите имя файла технологического шаблона: **default.tch** - для всех вариантов (но не **default.tch!**). Путь к файлу: **c:\Cadence\SPB\_16.5\tools\layout\_plus\data\default.tch**.

3. В строке **Input MNL netlist file** (входной файл списка соединений \*.mnl) найдите Ваш mnl-файл и нажмите кнопку **Открыть**.

4. После этого в строке **Output Layout MAX file** появится имя файла базы данных печатной платы (\*.max). Нажмите кнопку **Apply ECO** для выполнения утилиты метода AutoECO (Engineering Change Order), устанавливающей непосредственную связь между принципиальной схемой и конструкцией ПП.

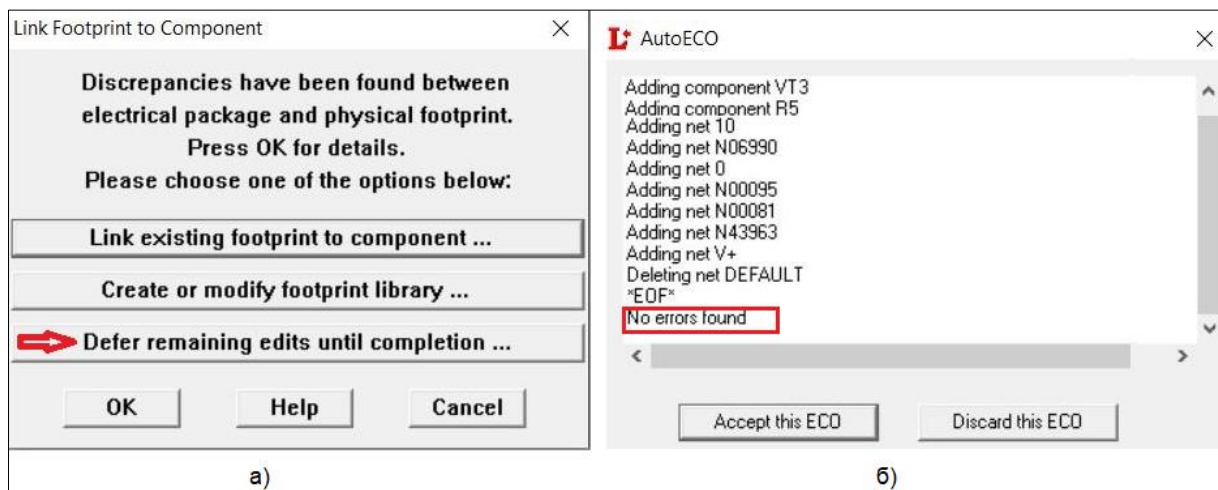



Рис. 6.5. Результаты команды **Apply ECO**: а) обнаружены несоответствия; б) все ОК.


Если выскочит окно Рис. 6.5-а, то кликните **Defer Remaining edits...** и **ОК**.

5. В открывшемся окне Auto ECO, если нет ошибок (Рис. 6.5-б), нажмите кнопку **Accept this ECO**, а затем **ОК** в окошке Processing complete. Через некоторое время произойдет запуск графического интерфейса Layout, при этом изображения корпусов всех компонентов автоматически переносятся на поле графического редактора и указываются их электрические связи светящимися "резиновыми" нитями.

6. Уберите лишнюю информацию в окне графического редактора Layout, сделав невидимыми слои **AST (23)** и **DRD (25)**. Это можно сделать нажатием клавиши "-" (минус) после того, как слой активирован. Если еще раз нажать на указанную клавишу, то слой становится видимым. Другой, более эффективный, способ визуализации сразу нескольких слоев без их предварительной активации состоит в использовании команды **Options/Colors** или кнопки **Color Settings**  на панели инструментов. Далее, нажимая и удерживая клавишу **Ctrl**, выделяют в электронной таблице **Color** нужные слои (**ASYTOP**,

DRLDWG) и, после щелчка правой кнопки мыши, выбирают пункт Visible<>Invisible (видимый-невидимый).


Примечание. Пиктограммы (команды) редактора OrCAD Layout представлены в Приложении (Таблица П.1).

7. Задайте структуру слоев ПП, соответствующую Вашему варианту. Нажмите кнопку View Spreadsheet  и выберите пункт Layers. В столбце Layer Type (тип слоя) электронной таблицы щелчком левой кнопки мыши выделяйте нужные слои и меняйте их типы (правая кнопка мыши, пункт Properties). Выделение сразу нескольких ячеек электронной таблицы - при одновременном нажатии клавиши Ctrl.

В редакторе Layout Plus возможно автоматическое размещение компонентов на ПП, а в Layout – только ручное размещение. Ниже рассмотрены оба варианта.

### 6.6.1. Автоматическое размещение компонентов схемы

Автоматическое размещение и трассировка основаны на выполнении последовательности операций, задаваемых в *sf*-файлах стратегий. Файл *Std.sf* определяет стандартный набор процедур авторазмещения и загружается автоматически при создании нового файла (\*.max) базы данных ПП.

1. Нарисуйте физический контур печатной платы (Рис. 6.6). Для этого активируйте слой Global Layer, используя либо ниспадающее меню слоев на панели редактора Layout, либо нажав клавишу с цифрой 0. Затем нажмите кнопку Obstacle Tool , поместите крест курсора в начальную точку контура ПП и щелкните левой кнопкой мыши. Крестик станет маленьким. Установите толщину линии, равную 10 mils (0,025 мм): нажмите правую кнопку мыши, выберите Properties, в окне Width диалога Edit Obstacle введите требуемую величину

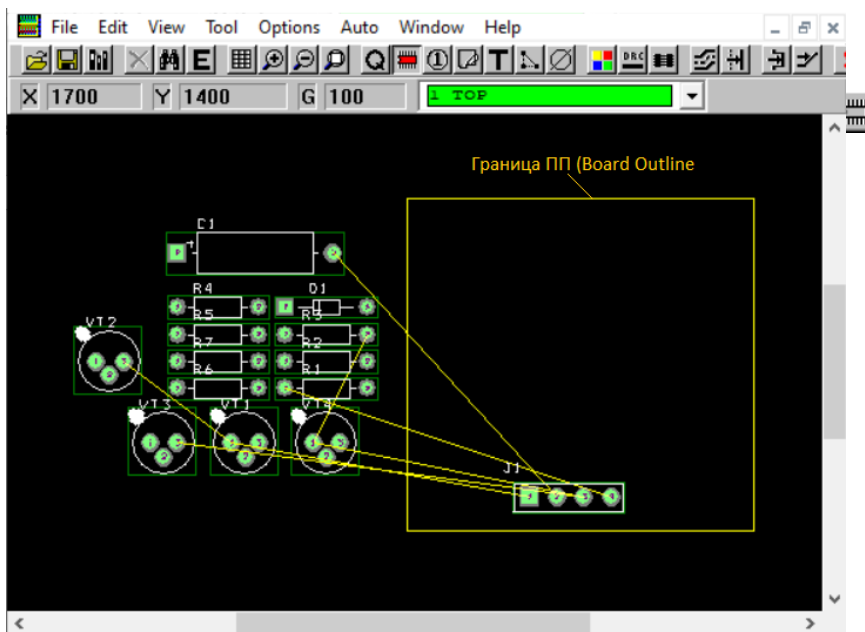



Рис. 6.6. Компоненты и контур ПП перед автоматическим размещением.

и щелкните кнопку ОК. Начинайте рисование, контролируя параметры DX и DY внизу в строке статуса и щелкая левой кнопкой мыши на вершинах многоугольника. Рекомендуемые размеры контура ПП  $DX=DY=1250$  mils (примерно 32мм×32мм) После завершения рисования в контекстном меню (правая кнопка мыши) выберите Finish.



2. Переключитесь на слой №1 (TOP) и нажмите кнопку меню Component Tool .

3. Вручную разместите разъем J1 ближе к границе ПП (Рис.6.6), выделяя и буксируя его мышью. При необходимости можно вращать компонент с угловым шагом  $90^0$  (клавиша R). Установив разъем в нужном месте, закрепите его (правая кнопка мыши, пункт Lock).

4. Для реализации автоматического размещения компонентов проделайте следующее.





- Выполните команду **Auto/Place/Board**. Дождитесь появления сообщения **Batch place completed in ...** и нажмите кнопку **OK**.

- Щелкните кнопку панели инструментов  (Design Rules Check). Если ошибок не обнаружено, при необходимости отредактируйте взаимное расположение компонентов на печатной плате. Не забудьте вернуться на слой TOP и нажать кнопку  Refresh All (освежить изображение).

**Примечание.** Если возникнет потребность заново провести авторазмещение, то сначала выполните команду **Auto/Unplace/Board** и запустите (**Auto/Place/Board**) заново процесс.

### 6.6.2. Ручное размещение компонентов схемы.

1. Переключитесь на слой №1 (TOP) и нажмите кнопку меню Component Tool  .
2. Вручную сгруппируйте компоненты (Рис. 6.7), выделяя и буксируя их мышью. Можно также вращать компонент с угловым шагом 90° (клавиша R).
3. После завершения группировки щелкните кнопку панели инструментов  (Design Rules Check). Если есть ошибки размещения, при необходимости отредактируйте взаимное расположение компонентов на печатной плате (посоветуйтесь с преподавателем).

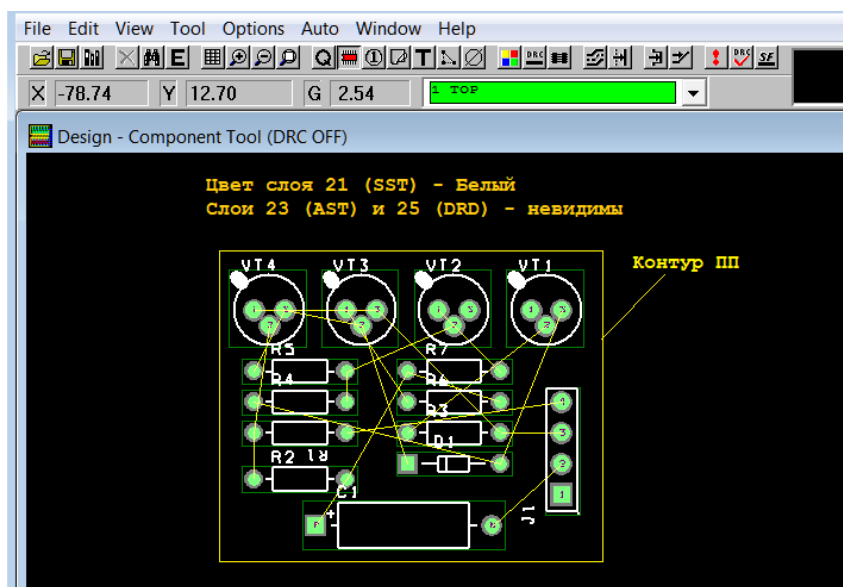



Рис. 6.7. Примерное расположение компонентов и контура ПП.

4. Нарисуйте физический контур печатной платы (Рис. 6.7). Для этого активируйте слой Global Layer, используя либо выпадающее меню слоев на панели редактора Layout, либо нажав клавишу с цифрой 0. Затем нажмите кнопку Obstacle Tool , поместите крест курсора в начальную точку контура ПП и щелкните левой кнопкой мыши. Крестик станет маленьким. Установите толщину линии, равную 10 mils (0,025 мм): нажмите правую кнопку мыши, выберите Properties, в окне Width диалога Edit Obstacle введите требуемую величину и щелкните кнопку **OK**. Начиная рисование, щелкая левой кнопкой мыши на вершинах многоугольника. После завершения рисования в контекстном меню (правая кнопка мыши) выберите Finish.

### 6.6.3. Выполнение автоматической трассировки соединений.


Последовательность действий при выполнении автоматической трассировки определяется структурой слоев проектируемой печатной платы (см. таблицу 6.2). Поэтому описываемая ниже последовательность проектирования дается с комментариями относительно номеров вариантов, для которых тот или иной пункт должен выполняться или может быть пропущен.

Итак, для выполнения автоматической трассировки соединений в редакторе Layout необходимо проделать следующие операции:

1. Для всех вариантов, кроме 5-го. Поставьте в соответствие проводящей плоскости, которая указана в варианте задания (PWR или GND), имя цепи на принципиальной схеме, подсоединяемой к этой плоскости. Например, если в задании указана плоскость GND, откройте электронную таблицу со списком цепей (команда **View/Database Spreadsheets/Nets** или соответствующая кнопка на панели инструментов), в столбце Net Name выделите строку с именем **0** (земля), а в контекстном меню (правая кнопка мыши) - пункт Properties. Далее в окне Edit Net нажмите кнопку Net Layers. В окошке Layers Enabled for Routing (Рис. 6.8) укажите слой GND (при этом должна быть **запрещена** прокладка трассы данной цепи на всех слоях TOP, BOTTOM, INNER1, INNER2). Аналогичная процедура для цепи питания V+, если Ваш вариант задания содержит проводящую плоскость PWR.

2. Все варианты. Командой **Auto/Autoroute/Board** запустите автотрассировку. После завершения трассировки кнопкой Zoom All  укрупните масштаб.

**Примечание.** При желании, можно выполнить автотрассировку программами Smart Route или Specstra, обеспечивающими высокое качество и рекомендуемых обычно для сложных схем.

3. Проверьте корректность результата трассировки (кнопка  Design Rule Check). Если ошибок нет, переходим к следующему, 4-му пункту, иначе выполняем команду

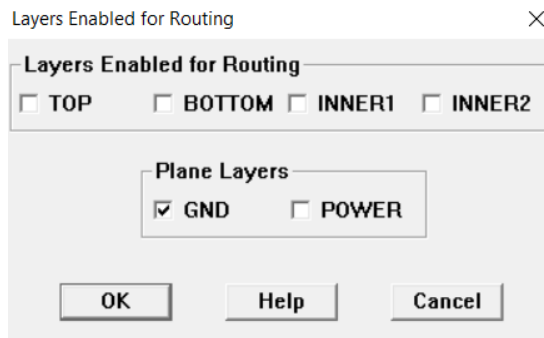



Рис. 6.8. Привязка цепи 0 к проводящей плоскости GND.

**Tool/Error/Select from Spreadsheet**, просматриваем сообщения об ошибках в электронной таблице и советуемся с преподавателем. Освежаем экран (кнопка Refresh All ). Для повторной трассировки (при изменении расположения компонентов, например) выполняется пункт меню **Auto/Unroute/Board**, а затем **Auto/Autoroute/Board**.

4. Выполните команду **Auto/Cleanup Design** для сглаживания трасс проводников и улучшения эстетики конструкции ПП.

5. Нанесите габаритные размеры в миллиметрах. Предварительно в меню **Options/System Settings/Display Units** задайте систему единиц измерения (mm). Затем выполните команду **Tool/Dimension/Select Tool** и поместите нижний конец крестообразного курсора выше левой верхней точки ПП, щелкнув при этом левой кнопкой мыши. Переместите курсор в правую верхнюю точку ПП и щелкните второй раз. Аналогично для размера по вертикали - движение левого конца крестообразного курсора вдоль правой кромки ПП от правого нижнего угла до правого верхнего (если в противоположном направлении, то цифры будут перевернуты).

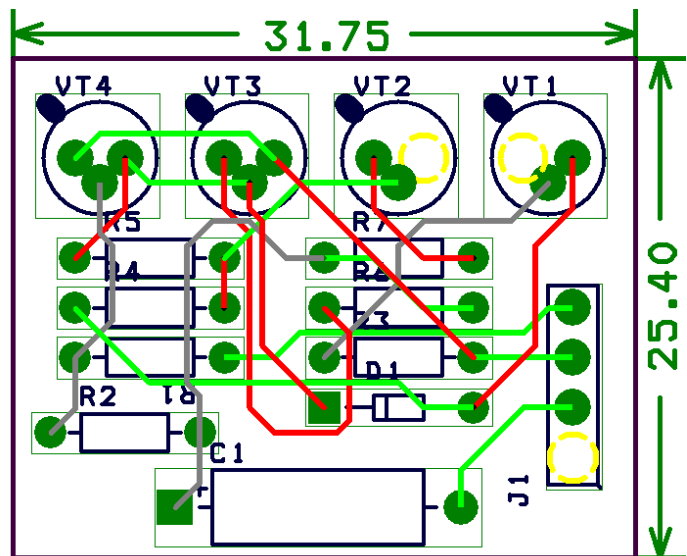


Рис. 6.9. Скриншот ПП.



#### **6.6.4. Сохранение результатов в файле отчета.**

Редактор Layout позволяет (**Options/Post Process Settings**) просматривать и выводить на принтер или плоттер чертежи отдельных слоев или всей совокупности слоев в целом (Batch Process). Что касается получения картинки общего внешнего вида ПП, когда нужно увидеть все интересующие нас слои ПП одновременно, то лучше это сделать с помощью скриншота (Рис. 6.9). Предварительно необходимо визуализировать имеющиеся в Вашем варианте слои PWR или GND, нажав цифровые клавиши 4 или 3, соответственно.

#### **Содержание отчета**

1. Упрощенная схема алгоритма проектирования печатной платы (последовательность действий при переходе от Capture к Layout).
2. Скриншот разработанной печатной платы с комментариями относительно элементов конструкции.
3. Выводы по работе.

#### **Контрольные вопросы**

1. Принцип организации сквозной системы автоматизированного проектирования РЭА на базе программного комплекса OrCAD.
2. Основные модули системы OrCAD, используемые в лабораторной работе и их назначение.
3. Взаимодействие графического редактора принципиальных схем OrCAD Capture с модулем проектирования печатных плат OrCAD Layout.
4. Задачи, решаемые при проектировании печатных плат.
5. Типы слоев ПП и их характеристика.
6. Принципы размещения компонентов и трассировки соединений.
7. Поясните структуру слоев проектируемой Вами печатной платы. Изобразите поперечное сечение ПП.
8. Моделирование геометрических форм объектов с использованием сеточных и бессеточных технологий. Пояснить, почему бессеточные технологии требуют меньшего объема памяти.
9. Последовательность выполнения лабораторной работы.

#### **Литература**

1. В.Д.Разевиг. Система проектирования OrCAD 9.2. - М.: Солон-Р, 2001. - 528с., ил.
2. В.Д.Разевиг. Система проектирования цифровых устройств OrCAD. - М.: Солон-Р, 2000. - 160с., ил.
3. С.А.Кузнецова, А.В.Нестеренко, А.О.Афанасьев. OrCAD 10. Проектирование печатных плат. - Горячая Линия - Телеком, 2005. – 454с., ил.
4. В.Д.Разевиг. Система проектирования печатных плат ACCEL EDA 12.1 (P-CAD для Windows). - М.: СК Пресс, 1997. – 368с., ил.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## 1. Некоторые команды редактора Layout.

В таблице П.1 приведен список режимов и команд редактора, которые могут использоваться при выполнении лабораторной работы. Более полное описание см. в книге [3].

Таблица П.1. Кнопки меню редактора Layout Plus

Кнопки	Краткое описание
 Open	Открывает существующий файл ПП. Эквивалент команды Open в меню File
 Save	Сохраняет файл ПП. Эквивалент команды Save в меню File
 Library manager	Открывает менеджер библиотек корпусов компонентов для просмотра и редактирования. Эквивалент команды Library manager в меню File
 Delete	Удаляет все, что Вы выделяете. Эквивалент команды Delete в меню Edit
 Find	Отображает диалоговое окно, которое используется, чтобы найти определенные координаты или компоненты на ПП. Эквивалент команды Find/Goto в меню Edit
 Edit	Отображает окно редактирования, вид которого зависит от того, что Вы выделили. Эквивалент команды Properties в меню Edit
 View Spreadsheet	Показывает список доступных электронных таблиц. Соответствует команде Database Spreadsheets в меню View
 Zoom In	Увеличивает изображение любой области ПП. Эквивалент команды Zoom In command в меню View
 Zoom Out	Уменьшает изображение любой области ПП. Эквивалент команды Zoom Out в меню View
 Zoom All	Увеличивает изображение ПП до границ окна редактора Layout. Эквивалент команды Zoom All в меню View
 Query	Показывает окно запроса, в котором перечисляются свойства выделенного объекта. Эквивалент команды Query Window в меню View
 Component	Активирует операции выделения, добавления, перемещения, редактирования или удаления компонентов ПП. Эквивалент последовательности команд Component/Select Tool в меню Tool
 Pin	Активирует операции выделения, добавления, перемещения, редактирования или удаления выводов компонентов ПП. Эквивалент последовательности команд Pin/Select Tool в меню Tool
 Obstacle	Активирует операции выделения, добавления, перемещения, редактирования или удаления барьеров (границ) на ПП. Эквивалент последовательности команд Obstacle/Select Tool в меню Tool. Отдельные вершины барьера выделяются щелчком левой кнопки мыши. Барьер в целом - при дополнительном нажатии клавиши Shift
 Text	Активирует операции выделения, добавления, перемещения или удаления текстовой надписи. Эквивалент последовательности команд Text/Select Tool в меню Tool

Продолжение таблицы П.1

	Connection	Активирует операции выделения, добавления, комбинирования, редактирования или удаления соединений выводов компонентов. Эквивалент последовательности команд Connection/Select Tool в меню Tool
	Error	Активирует операции выделения маркеров ошибок, вызванных нарушениями правил проектирования или несоблюдением допустимых зазоров между проводниками. Эквивалент последовательности команд Error/Select Tool в меню Tool
	Color	Отображает таблицу цветов, с помощью которой можно изменять цвета объектов и слоев ПП, делать их видимыми или невидимыми (visible or invisible). Эквивалент команды Colors в меню Options
	Online DRC	Активизирует режим DRC (design rule checking) - проверку соблюдения правил проектирования. Эквивалентно выбору опции Activate Online DRC в диалоговом окне User Preferences (предпочтения пользователя) меню Options
	Reconnect	При нажатой кнопке становятся невидимыми трассы проводников и линии соединений. Эквивалентно выбору опции Instantaneous Reconnection Mode в диалоговом окне User Preferences меню Options. Предпочтительно использовать этот режим при размещении компонентов (до трассировки соединений)
	Auto path route	Активирует режим интерактивной ручной трассировки соединений, который базируется на алгоритме расталкивания (shove algorithm) уже существующих трасс и размещения переходных отверстий (ПО). Эквивалентно выбору опции Auto Path Route Mode в диалоговом окне Route Settings меню Options
	Shove track	Становится доступной ручная трассировка соединений с использованием алгоритма расталкивания трасс (shove algorithm). Эквивалентно выбору опции Shove Track Mode в диалоговом окне Route Settings меню Options
	Edit segment	Активирует режим редактирования сегментов трасс путем выделения существующих трасс и изменения их положения на ПП. При этом автоматически поддерживается целостность редактируемой трассы. Эквивалентно выбору опции Edit Segment Mode в диалоговом окне Route Settings меню Options
	Add/Edit route	Активирует режим ручной трассировки соединений без использования алгоритма расталкивания (shove algorithm). Эквивалентно выбору опции Add/Edit Route Mode в диалоговом окне Route Settings меню Options
	Refresh all	Минимизирует соединения, обновляет статистику ПП и т.п. В общем, освежает (refresh) вид ПП. Эквивалент последовательности команд Refresh/All в меню Auto
	Design rule check	Запускает проверку соблюдения правил проектирования, установленных в диалоговом окне Check Design Rules, открывающемся при выборе опции Design Rule Check в меню Auto. Эквивалентно нажатию кнопки ОК в диалоговом окне Check Design Rules

## 2. Макросы, используемые в лабораторных работах

Макрос	Определение
$\text{Kharm}(x) = 100 \cdot \sqrt{A(x,2) + A(x,3) + A(x,4) + A(x,5) + A(x,6) + A(x,7) + A(x,8) + A(x,9) + A(x,10)} / \sqrt{A(x,1)}$	$K_r = \frac{\sqrt{A_2^2 + \dots + A_{10}^2}}{A_1} \cdot 100\%$
$A(x, n) = \text{Ar}(x, n) + \text{Ai}(x, n)$	<i>Квадрат модуля n-го коэффициента ряда Фурье</i>
$\text{Ar}(x, n) = \text{PWR}(S(x \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot \text{kHz} \cdot \text{time})), 2)$	$\text{Ar}(x, n) = \left( \int_0^t x(t) \cdot \sin n\omega_s t \cdot dt \right)^2$
$\text{Ai}(x, n) = \text{PWR}(S(x \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot n \cdot \text{kHz} \cdot \text{time})), 2)$	$\text{Ai}(x, n) = \left( \int_0^t x(t) \cdot \cos n\omega_s t \cdot dt \right)^2$
$\text{RNR}(x, A) = s(x \cdot x) / (A \cdot A)$	$\text{RNR}(x, A) = \frac{1}{A^2} \int_0^f x^2(f) \cdot df$

## 3. Функции измерений (measurements), используемые в лабораторных работах

### ➤ YatLastX(1)=y1

\*#Desc#\* Определяет значение ординаты Y в последней точке диапазона по оси X

\*#Arg1#\* Имя сигнала

\* Использование:

```
*   YatLastX(Имя сигнала)
{
  1| search forward Xvalue (100%) !1 ;
}
```

### ➤ LastAmpl(1) = (y1-y2)/2

\* Определяет амплитуду колебаний в конце интервала анализа

\*#Arg1#\* Имя сигнала

\* Использование:

```
*   LastAmpl(<имя сигнала>)
{
  1| search backward /end/ peak !1
  search backward /end/ trough !2;
}
```

### ➤ Cutoff\_Highpass\_3dB(1) = x1

\*#Desc#\* Определение частоты среза ФВЧ по уровню max-3dB

\*#Arg1#\* Имя сигнала

\* Использование:

```
*   Cutoff_Highpass_3dB(Имя сигнала)
```

\*#ForceDBArg1#\*

\*

```
{
  1|Search forward level(max-3,p) !1;
}
```

➤ **Bandwidth\_Bandpass\_3dB(1) = x2-x1**

\*#Desc#\* Определение ширины полосы пропускания ПФ по уровню max-3dB

\*#Arg1#\* Имя сигнала

\* Использование:

\* Bandwidth\_Bandpass\_3dB(*Имя сигнала*)

\*#ForceDBArg1#\*

```
{  
  1|Search forward level(max-3,p) !1  
  Search forward level(max-3,n) !2;  
}
```

➤ **SNR(1,2)= DB(1/sqrt(y2-y1))**

\*#Desc#\* Измеряет отношение сигнал/шум в полосе пропускания, замеренной

\*#Desc#\* по уровню max-3dB

\*#Arg1#\* V(out)

\*#Arg2#\* RNR(V(ONoise),<Aoutnom>)

\*#Desc#\* <Aoutnom>-Амплитуда вых. сигнала в номин. режиме

\*#ForceDBArg1#\*

```
{  
  1| sfle(max-3,p)!1  
  sfle(y1,n)!2;  
  2| sfxv(x1)!1  
  sfxv(x2)!2;  
}
```

#### 4. Стандартные ряды значений сопротивлений, емкостей и индуктивностей

##### Резисторы 1% (N= -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5), Ом

10.0eN	10.2eN	10.5eN	10.7eN	11.0eN	11.3eN	11.5eN
11.8eN	12.1eN	12.4eN	12.7eN	13.0eN	13.3eN	13.7eN
14.0eN	14.3eN	14.7eN	15.0eN	15.4eN	15.8eN	16.2eN
16.5eN	16.9eN	17.4eN	17.8eN	18.2eN	18.7eN	19.1eN
19.6eN	20.0eN	20.5eN	21.0eN	21.5eN	22.1eN	22.6eN
23.2eN	23.7eN	24.3eN	24.9eN	25.5eN	26.1eN	26.7eN
27.4eN	28.0eN	28.7eN	29.4eN	30.1eN	30.9eN	31.6eN
32.4eN	33.2eN	34.0eN	34.8eN	35.7eN	36.5eN	37.4eN
38.3eN	39.2eN	40.2eN	41.2eN	42.2eN	43.2eN	44.2eN
45.3eN	46.4eN	47.5eN	48.7eN	49.9eN	51.1eN	52.3eN
53.6eN	54.9eN	56.2eN	57.6eN	59.0eN	60.4eN	61.9eN
63.4eN	64.9eN	66.5eN	68.1eN	69.8eN	71.5eN	73.2eN
75.0eN	76.8eN	78.7eN	80.6eN	82.5eN	84.5eN	86.6eN
88.7eN	90.9eN	93.1eN	95.3eN	97.6eN		

##### Резисторы 2% - 10% (N= -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5), Ом

1eN	1.1eN	1.2eN	1.3eN	1.5eN	1.6eN	1.8eN
2eN	2.2eN	2.4eN	2.7eN	3eN	3.3eN	3.6eN
3.9eN	4.3eN	4.7eN	5.1eN	5.6eN	6.2eN	6.8eN
7.5eN	8.2eN	9.1eN				

##### Конденсаторы (N= -12, -11, -10, -9, ..., -1), Ф

1.0eN	1.2eN	1.5eN	1.8eN	2.2eN	2.7eN	3.3eN
3.9eN	4.7eN	5.6eN	6.8eN	8.2eN		

##### Индуктивности (N= -6, -5, -4, -3, -2), Гн

1.0eN	1.2eN	1.5eN	1.8eN	2.2eN	2.7eN	3.3eN
3.9eN	4.7eN	5.6eN	6.8eN	8.2eN		