Серия «Системы проектирования»

В. Д. Разевиг, Ю. В. Потапов, А. А. Курушин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ MICROWAVE OFFICE

Москва
СОЛОН-Пресс
2003

УДК 621.38
ББК 32.844-02
Р17

В. Д. Разевиг, Ю. В. Потапов, А. А. Курушин

Р17 Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В. Д. Разевига. — М.: СОЛОН-Пресс, 2003. — 496 с.: ил. — (Серия «Системы проектирования»).

ISBN 5-98003-089-1

В книге представлен материал двух типов. Во-первых, как это принято в большинстве «компьютерных» книг, приведены правила работы с пакетом программ Microwave Office 2002 фирмы Applied Wave Research (в основном мы ориентировались на версии 4.x и 5.x модулей MWO и VSS), предназначенным для проектирования устройств СВЧ. Во-вторых, сделана попытка описания принятых в пакете Microwave Office алгоритмов расчета.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием СВЧ устройств электроники, студентов и аспирантов технических университетов.

УДК 621.38
ББК 32.844-02

Книги издательства «Солон-Пресс» можно заказать наложенным платежом по фиксированной цене. Оформить заказ можно одним из двух способов.

1) послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20;

2) передать заказ по электронной почте (e-mail) на адрес: ***magazin@solon-r.ru***.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет Вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-Пресс». Для этого надо послать пустое письмо на робот-автоответчик по адресу: ***katalog@solon-r.ru***.

Получать информацию о новых книгах нашего издательства Вы сможете, подписавшись на рассылку новостей по электронной почте. Для этого пошлите письмо по адресу ***news@solon-r.ru***. В теле письма должно быть написано слово SUBSCRIBE

ISBN 5-98003-089-1

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2003
© В. Д. Разевиг, 2003
© Ю. В. Потапов, 2003
© А. А. Курушин, 2003

Введение

Американская компания Applied Wave Research (AWR) в 1994 г. начала разработку новой системы проектирования высокочастотных и сверхвысокочастотных радиоэлектронных устройств. Исходной предпосылкой ее создания было то, что большинство известных программ были разработаны в 70-х и 80-х гг. XX века, и к настоящему времени они претерпели лишь незначительные изменения. Кроме того, эти программы разрабатывались для компьютерных систем на базе ОС Unix, и поэтому, будучи перенесенными на персональный компьютер (ПК), они работают достаточно медленно и трудны в использовании. С появлением новой версии каждой такой программы ее ядро оставалось прежним, модификация же, как правило, сводилась к добавлению вспомогательных процедур для решения узких задач проектирования, а также к разработке пользовательского интерфейса, пытающегося догнать возможности очередной версии Windows.

Компания AWR начала разработку своих продуктов с создания принципиально новой среды проектирования, которая опиралась бы на аппаратную платформу ПК, операционные системы Windows 95 и NT, а также использовала методы объектно-ориентированного программирования. Первый продукт компании выпущен в начале 1998 г. — это система трехмерного электромагнитного моделирования многослойных структур EMSight, затем была разработана программа анализа нелинейных схем и систем VoltaireXL. Следующий продукт, носящий название Microwave Office, органично объединил в себе пакеты анализа СВЧ устройств EMSight и VoltaireXL.

Microwave Office (MWO) представляет собой полностью интегрированный пакет программ, предназначенный для разработки устройств СВЧ. Набор программ включает модуль VoltaireLS для линейного моделирования схем в частотной области, модуль VoltaireXL для нелинейного моделирования схем со значительной нелинейностью методом гармонического баланса и слабо нелинейных схем методом рядов Вольтерра, и модуль EMSight для трехмерного электромагнитного моделирования многослойных структур, а также разработанный позже модуль Aristan для проектирования печатных конструкций и топологии ИС. Последний продукт VSS (Visual System Simulator), выпущенный в начале 2002 г., позволят выполнять моделирование систем связи на основании библиотек, состоящих более чем из 700 элементов устройств аналогово-цифровой обработки сигналов (эта программа перенесена из системы ACOLADE). MWO2002 работает под управлением Windows 98/Me и Windows NT/2000/VP.

Microwave Office обеспечивает беспрецедентную высокую производительность и имеет весьма легко осваиваемый интуитивно понятный интерфейс. Этот пакет переводит технологию проектирования интегральных схем на современный уровень и дает возможность инженерам моделировать линейные и нелинейные схемы

различной сложности одиовременно с использованием результатов многомодового анализа электромагнитного поведения отдельных частей проекта (ЕМ-анализа), а также с учетом наличия цифро-аналогового функционального устройства обработки сигналов.

В настоящее время пакет Microwave Office включает одночастотный и многочастотный методы гармонического баланса для анализа нелинейных схем, анализа схем с малой нелинейностью методом на основе рядов Вольтерра, различные методы анализа шумов, в том числе и фазовых, анализ устойчивости усилительных схем и анализ генераторов.

Многие из возможностей пакета Microwave Office недоступны в существующих системах моделирования. Например, метод рядов Вольтерра, являющийся самым быстрым методом анализа интермодуляционных искажений (IM) в схемах со слабой нелинейностью, позволяет увеличить скорость анализа в 10...100 раз по сравнению с методом гармонического баланса. Более того, анализ на основе рядов Вольтерра легко интегрируется с методом линейного анализа, что позволяет производить оптимизацию коэффициента шума и таких линейных характеристик, как коэффициент передачи и КСВ одновременно с уровнем интермодуляционных искажений.

Реализация многочастотного метода гармонического баланса, использованная в пакете, является в настоящее время самой быстрой, благодаря использованию моделей, специально предназначенных для моделирования СВЧ устройств, современной технологии моделирования и программирования. Высокая скорость анализа является следствием объектно-ориентированного подхода к программированию, а также того, что система уравнений формируется непосредственно из схемного представления без промежуточного преобразования в файл списка соединений. В результате инженеры получили возможность настраивать и оптимизировать схемы с помощью инструмента **Tuner**, не имеющего аналога в других программах.

Для проектирования схем имеется обширная библиотека моделей сосредоточенных и распределенных, линейных и нелинейных, идеальных и неидеальных элементов. Сюда входят полосковые, микрополосковые и копланарные линии передачи, а также многие другие распространенные элементы. Имеется функция поиска нужных элементов и их моделей в Интернете. В случаях, когда правильная модель используемого устройства отсутствует или эффект близкого расположения элементов уменьшает точность модели, пользователи могут обратиться к модулю полного электромагнитного анализа EM-Sight. Он включает в себя собственный графический редактор и механизм моделирования топологических структур методом моментов. Он позволяет производить расчет характеристик антенн в дальней зоне, а также получать их эквивалентную схему замещения в формате SPICE.

Пакет включает в себя также специальный редактор топологий Aristan для схемотехнических модулей, позволяющий синтезировать топологию СВЧ устройства непосредственно по его принципиальной схеме, видоизменять ее и отслеживать изменения характеристик.

Для обмена с другими программами моделирования пакет имеет двунаправленные трансляторы файлов в формате SPICE и Touchstone. Кроме того, имеется возможность импорта и экспорта топологий в форматах Sonnet GEO, GDSII и AutoCAD.

Кроме того, Microwave Office 2002 интегрируется с программой Visual System Simulator (VSS), предназначенной для моделирования систем связи на функциональном уровне.

Работа по написанию книги распределилась следующим образом: глава 1 написана инж. Потаповым Ю. В, остальная часть книги написана совместно к.т.н. Разевигом В. Д. и к.т.н. Курушиным А. А. Общую редакцию выполнил к.т.н., доц. Разевиг В. Д.

Авторы благодарны профессору Банкову С. Е., ст. н. сотр. Грибанову А. Н., Крюкову А. В. и Подковырину С. И., вед. н. сотр. Текшеву В. Б., доц. Петрову А. А. (С-Петербург) и Львовичу А. А. за полезные замечания по отдельным главам, а также многочисленным корреспондентам, направившим свои замечания по электронной почте, в рамках дистанционного обучения на сайте «Проектирование и применение СВЧ приборов и устройств» (http://www.ioso.ru/ipso/distance/)

Все замечаниями по данной работе просим направлять по адресу: 113556, Москва, Нахимовский просп., д. 1, корп. 1, ЗАО «Родник Софт»; телефон: (095) 113-7001, факс: (095) 316-9754, электронная почта: *razevig@rodnik.ru*, адрес сайта в Интернете: *www.rodnik.ru, www.eltrade.ru*.

Глава 1
Интерфейс программы Microwave Office

Среда проектирования программы Microwave Office (MWO) внешне ничем не отличается от обычных Windows-программ. То, что компания AWR с самого начала ориентировалась на ОС Windows 95 и NT, а позднее Windows 2000, позволило сфокусировать основное внимание на разработке алгоритмов моделирования и не тратить время на разработку оригинального пользовательского интерфейса.

Основное окно среды проектирования (рис. 1.1) разделено на две части: окно просмотра проекта (слева) и рабочий стол. В верхней части основного окна расположено меню, в котором находятся все необходимые функции и команды работы с проектом. Под ним расположена панель инструментов, вид и состав которой меняется в зависимости от действия, выполняемого пользователем. Пользователь может легко изменить местоположение панели инструментов на экране компьютера, для чего нужно с помощью мыши захватить расположенный в ее левой части маркер и, удерживая левую кнопку мыши, перенести в нужное место.

Окно просмотра проекта содержит четыре вкладки: **Project** (проект), **Elements** (элементы), **Variables** (переменные) и **Layout** (топология).

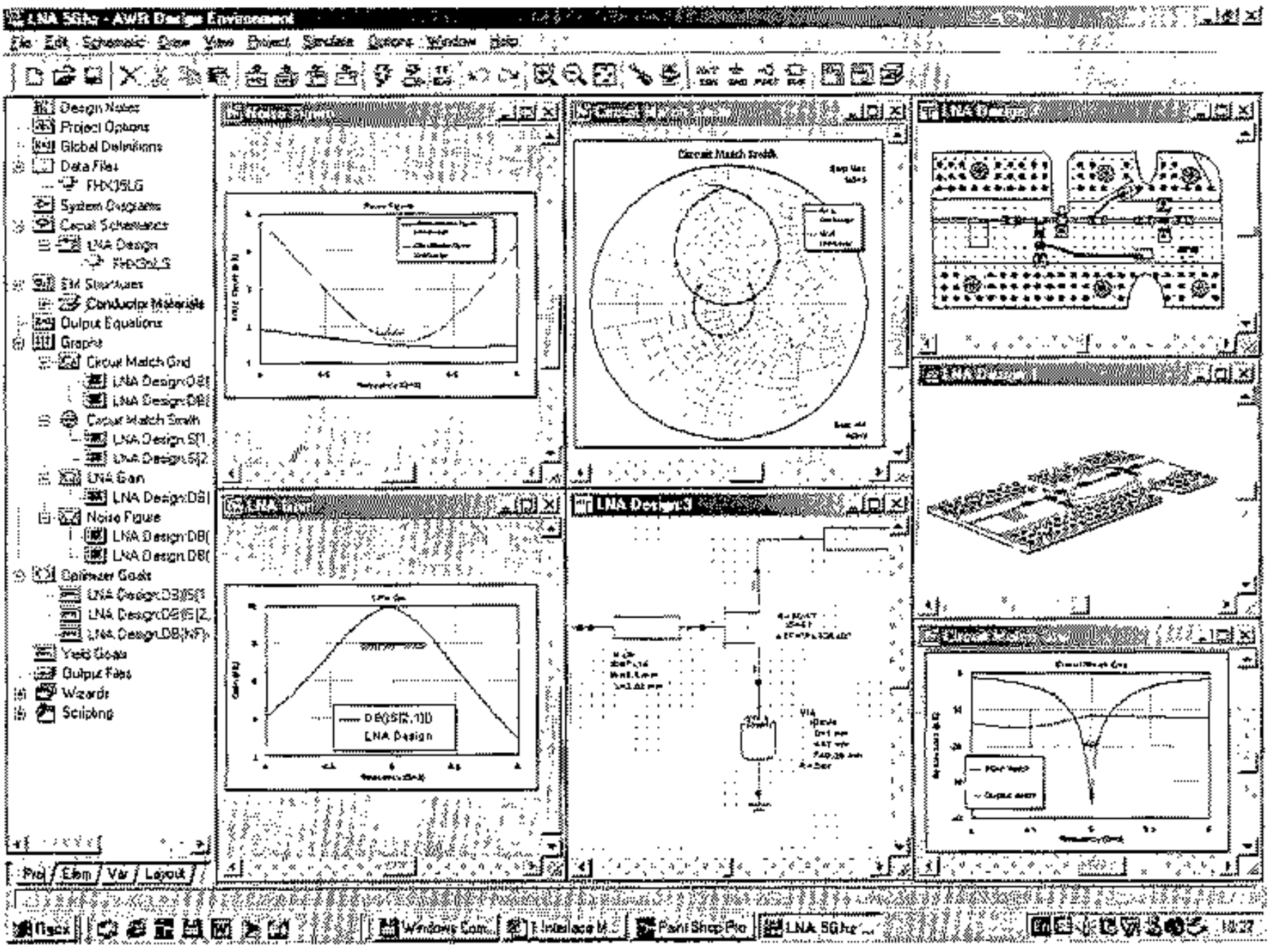


Рис. 1.1. Общий вид окна среды проектирования

1.1. Содержание проекта

На вкладке **Project** (сокращенно **Proj**, рис. 1.2) отображается дерево групп и модулей, которые уже используются, а также могут быть использованы в данном проекте. Сюда входят: блок комментариев, блок опций проекта, блок глобальных выражений, группа используемых внешних файлов данных, блок системных диаграмм, группа используемых схемотехнических модулей, группа используемых электромагнитных структур, группа используемых проводящих материалов, блок выходных выражений, группа отображения результатов расчета, группа целей оптимизации, группа статистического анализа и группа формирования выходных файлов. В последней версии программы включены также группа ассистентов Wizard и группа скриптов.

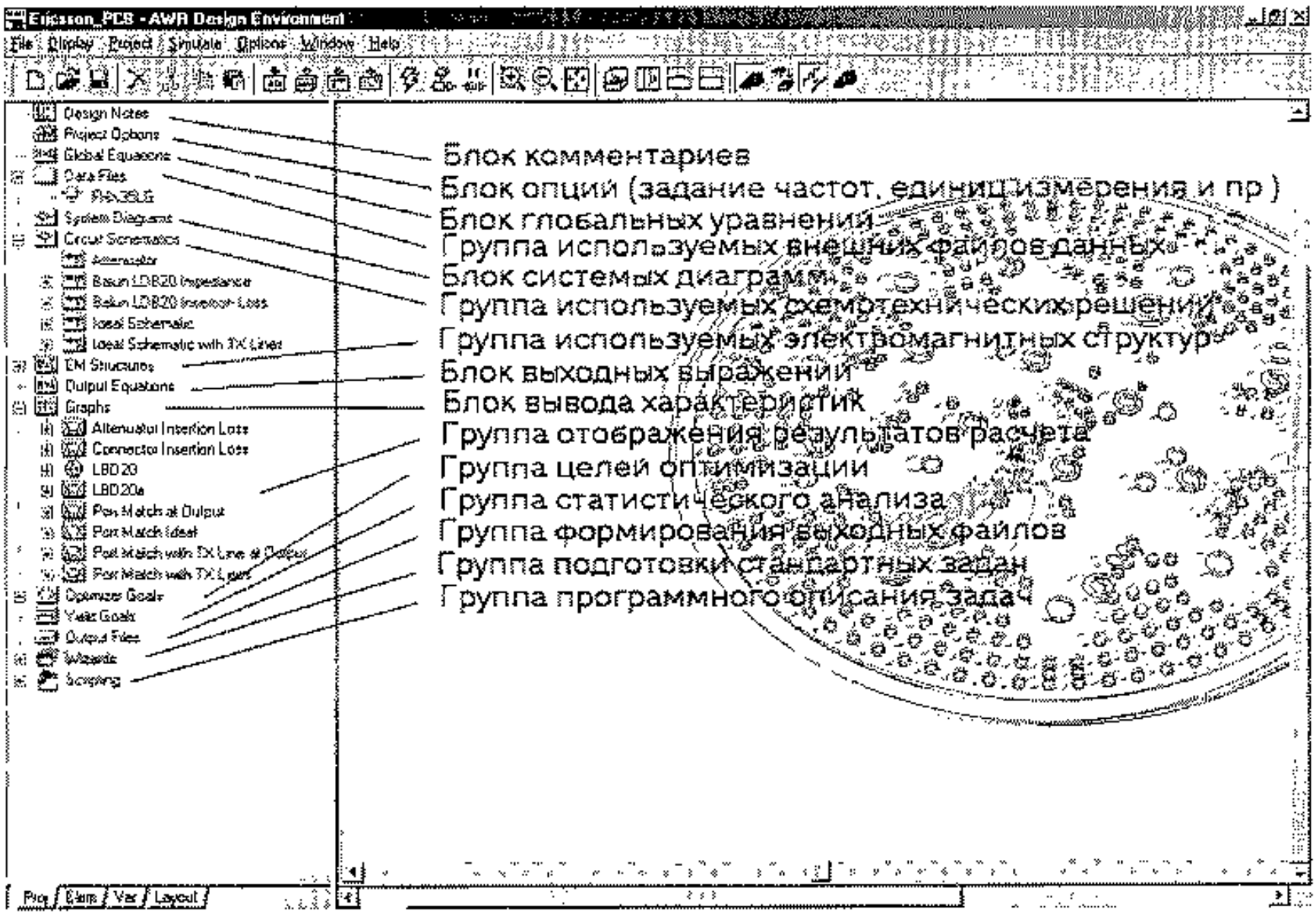


Рис. 1.2. Состав вкладки **Project**

Как правило, при открытии проекта вкладка **Project** открывается первой, в противном случае для перехода на нее необходимо щелкнуть на закладке с надписью **Proj** в нижней части окна просмотра проекта.

О наличии в группе вложенных модулей сигнализирует маленький квадратик в точке ветвления дерева проекта.

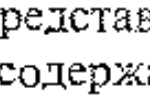
Если квадратик отсутствует, то это означает, что данная группа пуста.

Знак «+» внутри квадратика, свидетельствует о том, что содержимое данной группы скрыто. Чтобы просмотреть его, достаточно выполнить двойной щелчок левой кнопкой мыши на ее названии или один щелчок левой кнопкой на соответствующем квадратике.

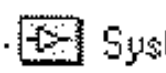
⊟ После этой операции на дереве проекта отразится содержимое данной группы с учетом внутренней иерархической структуры, а в квадратике появится знак «-». Повторное выполнение указанных операций будет иметь обратное действие: группа свернется.

Двойной щелчок на каждом модуле группы открывает соответствующее окно просмотра на рабочем столе Microwave Office или диалоговое окно, руководящее последующими действиями пользователя. Удобной подсказкой являются также контекстные меню, появляющиеся при нажатии правой клавиши мыши на любом объекте проекта и предлагающие на выбор список возможных дальнейших действий.

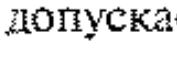
Перемещение между блоками и группами дерева проекта внутри вкладки можно также выполнить с помощью клавиш <↑> и <↓>.



Блок комментариев (Design Notes) предназначен для внесения сопроводительной информации в проект. В него может быть введена любая текстовая информация на русском языке, например, дата создания проекта, имя разработчика, название подразделения и организации, цели создания проекта, а также комментарии, призванные облегчить работу с проектом других инженеров по прошествию некоторого времени.



Блок опций проекта (Project Options) служит для задания значений частот, единиц, параметров по умолчанию проекта

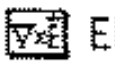


Блок глобальных определений (Global Definitions) служит для определения переменных, от которых зависят отдельные параметры элементов схем и изменение которых в проекте должно производиться пропорционально или синхронно. Сюда также вводятся выражения и уравнения, служащие для описания таких параметров схем, которые рассчитываются на основании других переменных по определенным формулам.

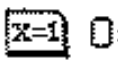
Группа внешних файлов данных (Data Files) содержит список файлов данных, которые были добавлены к проекту извне. Файлы данных, как правило, представляют собой стандартные таблицы S-параметров или файлы других типов, содержащие ранее определенные параметры многополюсника в частотной области. Внешние файлы данных дают возможность наглядно сравнивать результаты, полученные в ходе макетирования СВЧ устройств, с результатами расчета. Каждый элемент проекта, заданный как внешний файл данных, должен иметь уникальное имя, которое отображается в данной группе, рядом с которым в квадратных скобках прописывается путь расположения файла данных на диске компьютера.

Группа системных диаграмм (System Diagrams) содержит системные диаграммы, анализируемые программой VSS (Visual System Simulator). VSS допускает иерархическое построение, но подсхемы находятся в закладке Elem.

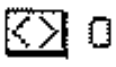
Группа схемотехнических модулей (Schematics) отображает список всех частей проекта, заданных в виде электрических схем. Список имеет иерархическую структуру с возможностью многократного вложения отдельных модулей, которые могут быть заданы как схемы, подсхемы, списки соединений, внешние файлы и EM структуры.

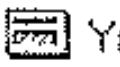
 EM Structures **Группа EM структур (EM Structures)** отображает список всех частей проекта, заданных в виде EM структур. Помимо списка модулей в данной группе содержится блок устанавливаемых по умолчанию параметров структур Default EM Options. Здесь устанавливаются параметры, действительные для всех без исключения EM модулей проекта, однако имеется возможность индивидуального задания параметров для каждого из них в отдельности.

 Conductor Materials **Группа проводящих материалов (Conductor Materials)** содержит список всех проводящих материалов, используемых в EM структурах проекта. По умолчанию в этой группе содержится идеальный и медный проводники, однако пользователь всегда может добавить сюда новые материалы, заданные своими электрическими и физическими параметрами.

 Output Equations **Блок выходных выражений (Output Equations)** служит для определения переменных, получаемых из рассчитанных характеристик. Такие переменные используются, например, в случае, когда требуется оценить и отобразить на графике разницу между двумя рассчитанными в процессе моделирования характеристиками. Главное отличие выходных выражений от глобальных состоит в том, что рассчитанные с их помощью переменные можно отобразить на графике.

 Graphs **Группа отображения результатов расчета (Graphs)** содержит все графики, диаграммы и таблицы, полученные в процессе моделирования. Рассчитанные данные могут быть отображены на графиках в прямоугольной и полярной системах координат, на круговых диаграммах (диаграммах Смита), в таблицах и на сигнальных созвездиях (в VSS). Имеется возможность интерполяции полученных характеристик, изменения масштаба их отображения. Для наглядности зависимости могут быть прорисованы линиями различного типа и цвета, а расчетные точки могут быть показаны специальными значками.

 Optimizer Goals **Группа целей оптимизации (Optimizer Goals)** содержит список рассчитываемых характеристик, которые необходимо оптимизировать в процессе работы с проектом. По этим характеристикам с учетом заданных весовых коэффициентов строится целевая функция проекта, минимум которой может быть найден с помощью различных методов оптимизации.

 Yield Goals **Группа статистического анализа (Yield Goals)** содержит список характеристик, которые необходимо рассчитать с учетом случайного изменения заданных параметров элементов проекта.

 Output Files **Группа формирования выходных файлов (Output Files)** содержит список файлов в различных форматах, которые формируются по итогам моделирования. Сюда могут входить файлы S-параметров устройств в формате Touchstone или эквивалентные схемы замещения EM структур в формате SPICE.

 Wizards **Ассистент проектов (Wizard)** содержит ряд новых возможностей, которые можно внедрить в проект: утилита синтеза фильтров (Filter Synthesis), утилита расчета нагрузочных линий (Load Pull) и утилита переменных параметров (Swept Variable).

 Scripting **Группа скриптов (Scripting)** содержит описания моделей и алгоритмов моделирования в виде файлов, описанных на языке C++.

1.2. Вкладка моделей элементов

Вкладка **Elements** (сокращенно **Elem**) предназначена для быстрого поиска и введения в проект модели элемента. Для перехода на нее необходимо щелкнуть на закладке с надписью **Elem** в нижней части окна просмотра проекта (рис. 1.3.). В верхней части вкладки отображается иерархическое дерево всех доступных библиотек, а в нижней части — состав выбранной библиотеки.

В состав встроенных библиотек моделей входят группы:

- копланарных элементов — **Coplanar**;
- базовых элементов — **General**;
- межслойных и межплатных соединений — **Interconnects**;
- линейных приборов — **Linear Devices**;
- сосредоточенных элементов — **Lumped Element**;
- измерительных приборов — **MeasDevices**;
- микрополосковых линий — **Microstrip**;
- нелинейных устройств — **Nonlinear**;
- моделей новых элементов — **PRE_RELEASE**
- портов — **Ports**;
- источников тока и напряжения — **Sources**;
- полосковых элементов — **Stripline**;
- подложек — **Substrates**;
- линий передач — **Transmission Lines.**

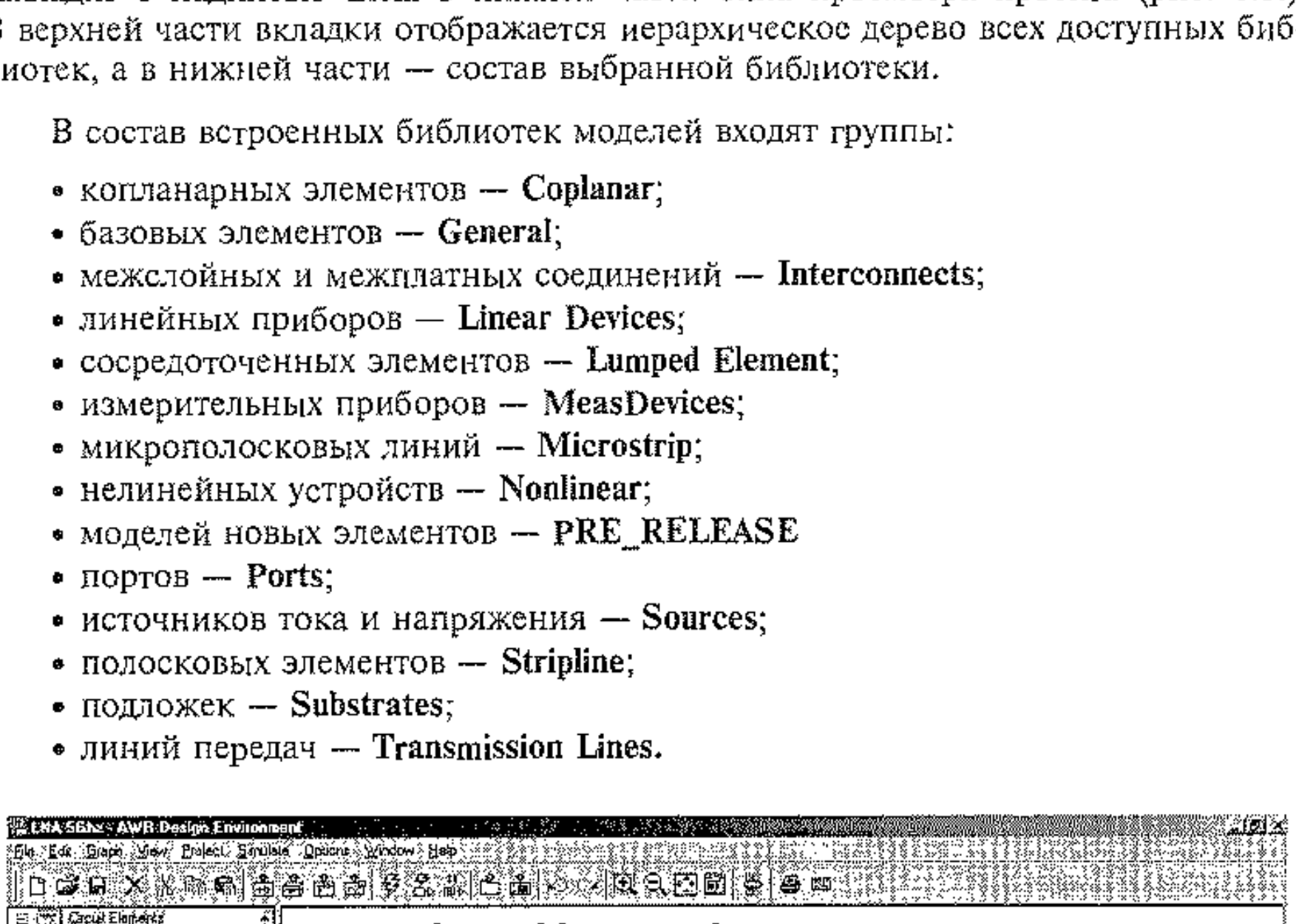


Рис. 1.3. Состав вкладки **Elements**

Кроме этого, в проекте возможно использование:

- библиотек моделей в формате Spice — **Library** и Touchstone — **Data**;
- доступных подсхем — **Subcircuits**;
- библиотек элементов через Internet — **XML Libraries**;
- библиотеки системных блоков — **System Blocks** (программы **VSS**).

Внешние библиотеки моделей в формате Touchstone представляют собой стандартные файлы S-параметров с расширением .s*p (где * обозначает число портов многополюсника), которые записываются в каталог \Awr2002\Library\data\. Внешние библиотеки моделей в формате Spice представляют собой файлы с произвольным расширением, которые записываются в каталог \Awr2002\Library\models\.

Библиотеки, доступ к которым возможен через сеть Internet описываются в файле \Awr2002\Library\lib.xml. Если по каким-либо причинам непосредственный доступ к Internet невозможен, допускается записать соответствующий файл с сервера фирмы-производителя электронных компонентов в файл \Awr2002\Library\lib.xml. Аналогичным образом можно поступить и с различной вспомогательной справочной информацией, то есть в соответствующих библиотеках надо прописать ссылки на адреса, где содержатся файлы с описанием нужного элемента, например, в формате Microsoft Word или Adobe Acrobat.

1.3. Вкладка переменных проекта Var

Вкладка просмотра изменяемых переменных проекта **Variables** (сокращенно **Var**) служит для быстрого просмотра и изменения значений, а также управления статусом различных параметров элементов схемы. Под статусом переменной подразумеваются три ее состояния: возможность изменения с помощью инструмента **Tuner** (кнопка **T**), возможность изменения в процессе оптимизации (кнопка **O**) и установки диапазона изменения переменной (кнопка **C**).

Для перехода на вкладку **Variables** необходимо щелкнуть на закладке с надписью **Var** в нижней части окна просмотра проекта. В верхней части появляется упрощенное дерево проекта, отражающее расположение параметров в схемотехнических модулях, внешних файлах данных, а также переменных в блоках глобальных и выходных выражений.

В закладке Var (рис. 1.4) в табличной форме отображается список всех изменяемых переменных указанного модуля, три кнопки управления статусом, текущие значения, а также границы их изменения.

1.4. Вкладка топологии проекта Layout

Вкладка **Layout** предназначена для работы с топологиями, соответствующими отдельным схемотехническим модулям проекта, и управления библиотеками топологических примитивов. В верхней части вкладки отображаются общие установки для работы с топологиями **Layer Setup** и список используемых библиотек **Cell Libraries**. В нижней части приведена таблица управления слоями топологии.

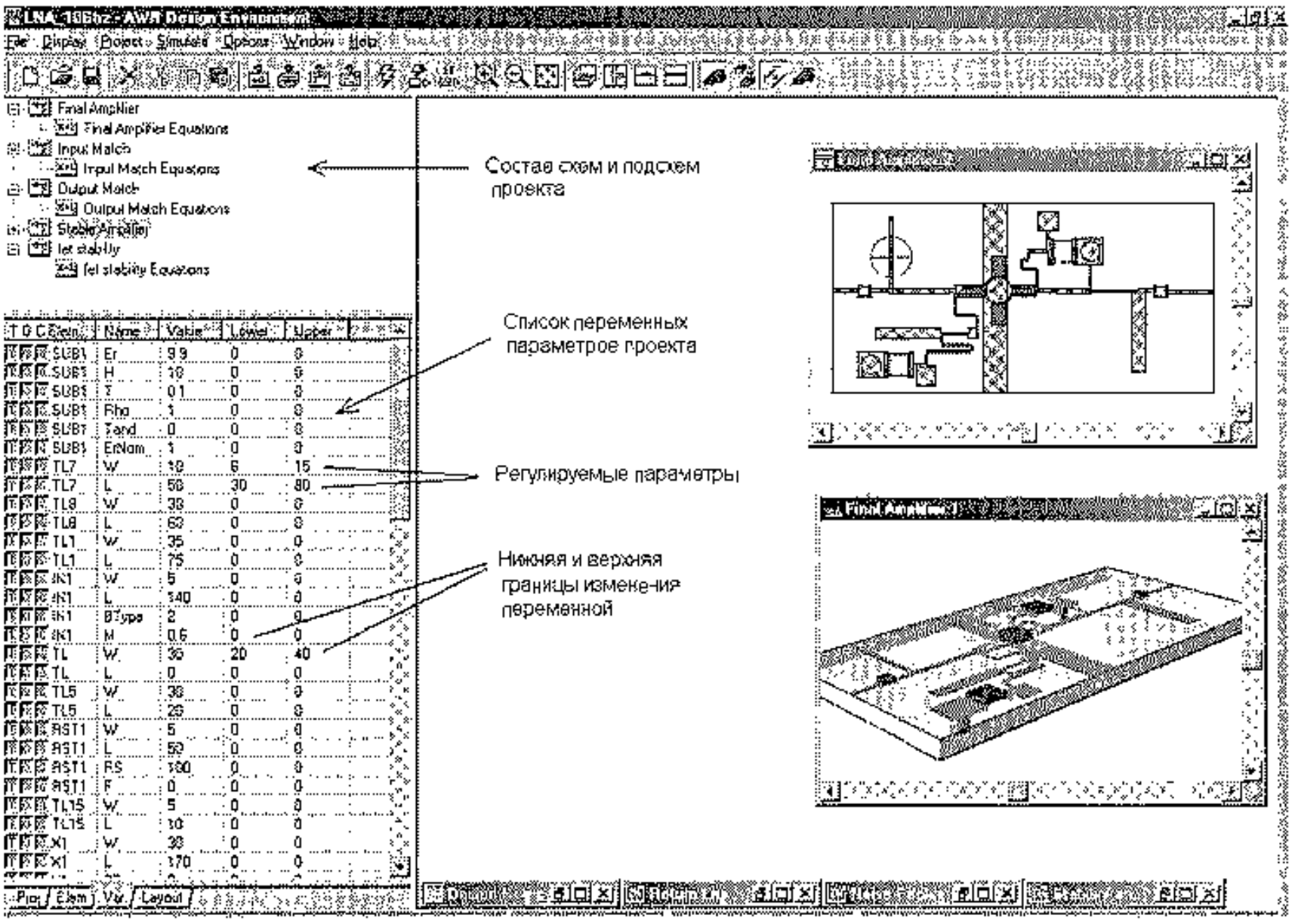


Рис. 1.4. Состав вкладки Variables

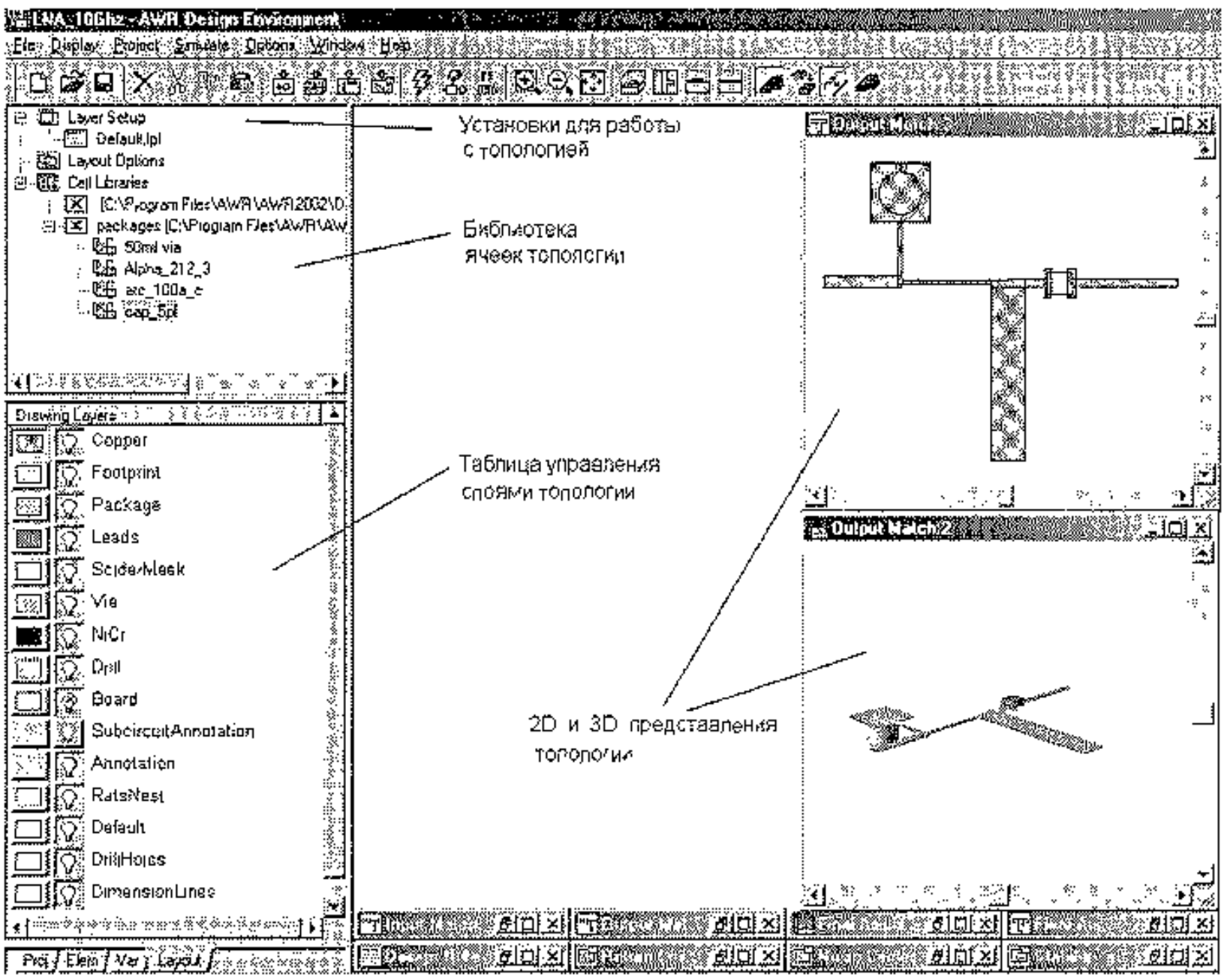


Рис 1.5. Состав вкладки Layout

1.5. Командное меню и панель инструментов

Командное меню располагается в верхней части окна среды проектирования (рис. 1.1) и содержит все необходимые команды для работы с проектом (рис. 1.6). Отличительной особенностью командного меню является то, что оно имеет некоторую базовую конфигурацию, которая видоизменяется в процессе работы в зависимости от выполняемой операции. На рис. 1.6 показаны команды, имеющиеся в командном меню.

Как и командное меню, панель инструментов MWO имеет базовую конфигурацию (рис. 1.7), которая видоизменяется в процессе работы в зависимости от вы-

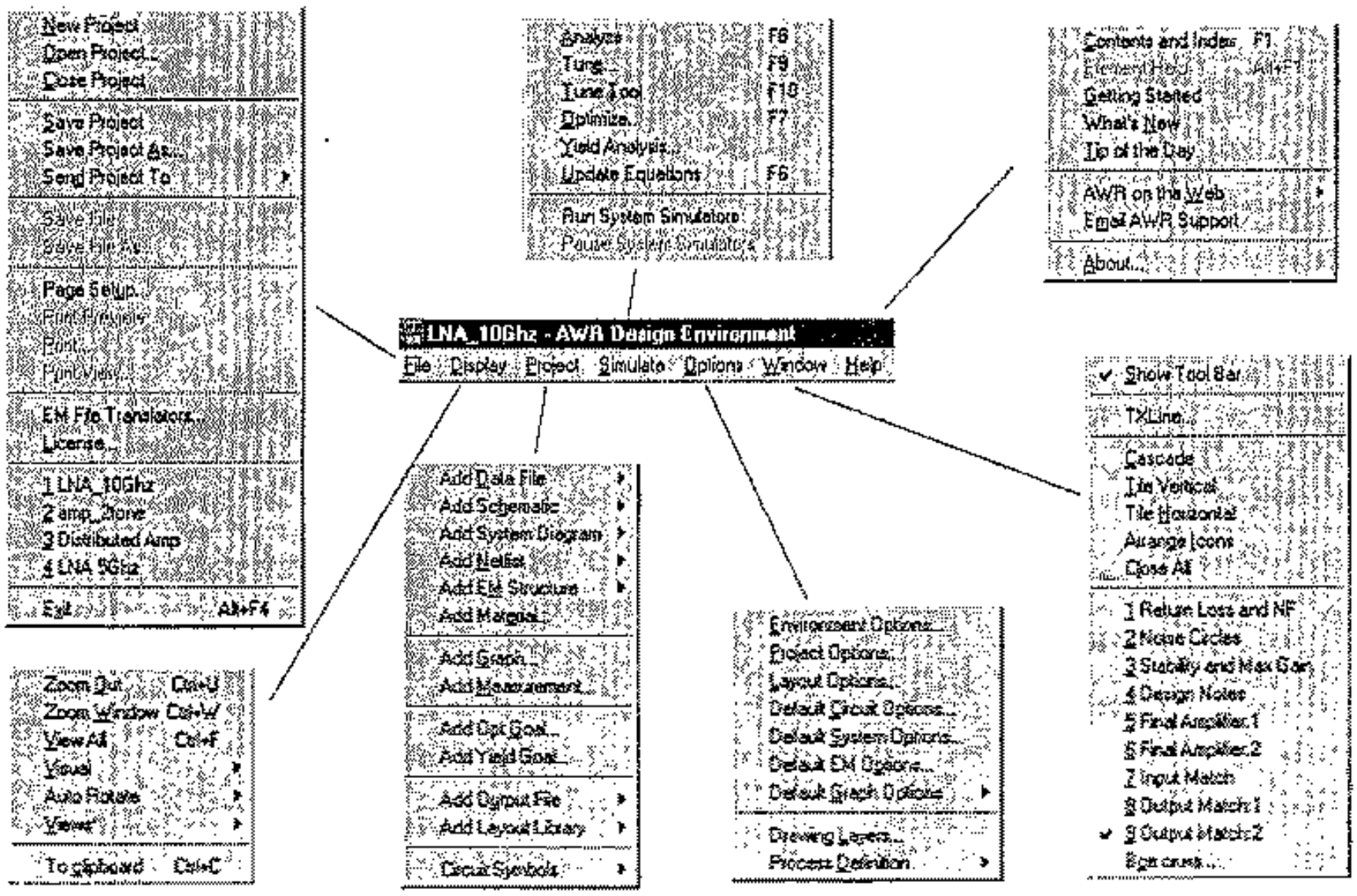


Рис. 1.6. Базовая конфигурация командного меню

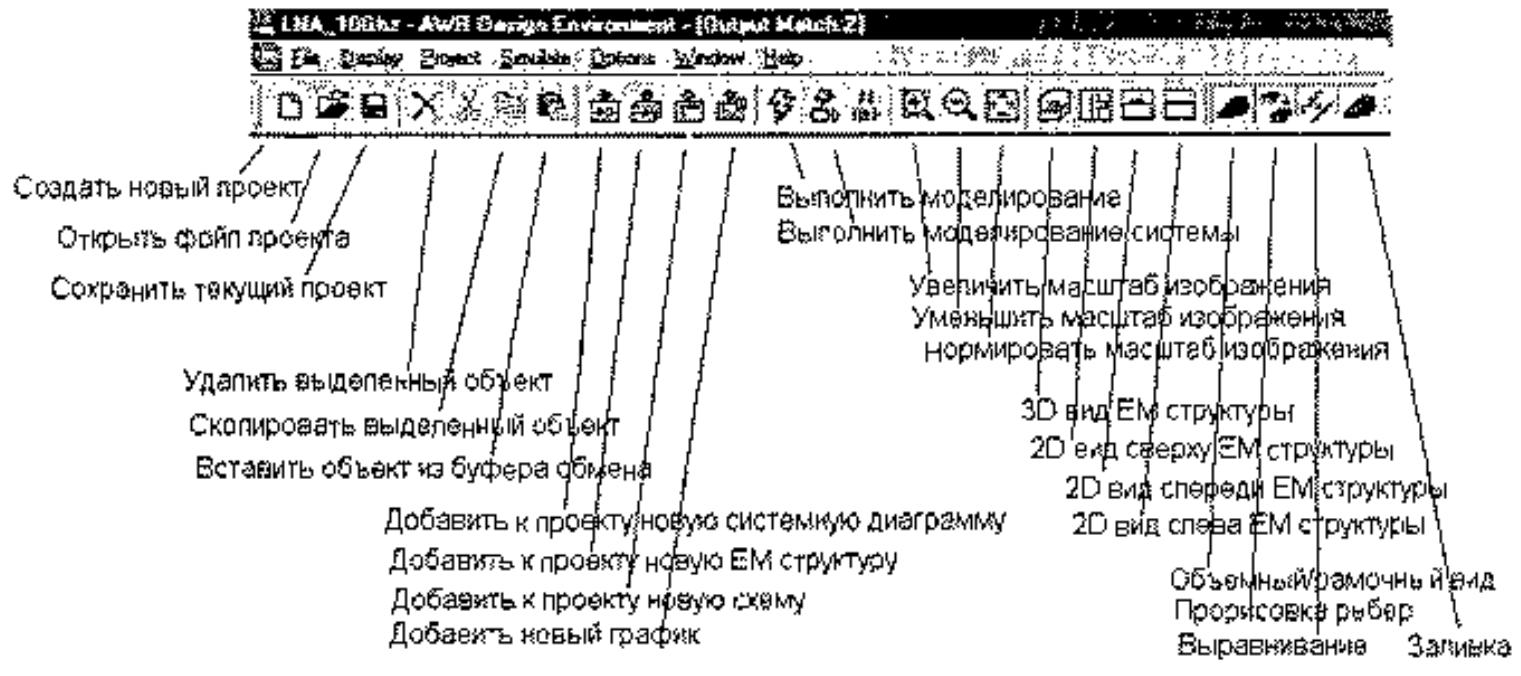


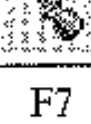
Рис. 1.7. Базовая конфигурация панели инструментов

полняемой текущей операции. Состав базовой конфигурации командного меню приведен в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Состав команд меню MWO

Команда меню	Кнопка	Описание
File — New Project		Создать новый проект
File — Open Project		Открыть доступный проект
File — Close Project	Alt+F4	Закрыть текущий проект
File — Save Project		Сохранить текущий проект
File — Save Project As		Сохранить текущий проект под другим именем
File — Save File		Сохранить файл
File — Save File As		Сохранить файл под другим именем
File — Print		Печать
File — Print View		Настройка печати
File — Print Preview		Предварительный просмотр распечатки
File — Print Setup		Выбор принтера и настройка печати
File — EM File Translators		Выбор транслятора для экспорта и импорта EM файлов
File — Options		Задание общих параметров программы
File — License		Конфигурация лицензии программы
File — Exit		Выход из программы
Edit — Copy		Копирование объекта в буфер
Edit — Paste		Внесение скопированного объекта
Edit — Delete		Удалить выделенный объект
Display — Zoom Out	Ctrl+U	Уменьшение изображения
Display — Zoom Window	Ctrl+W	Размер по выбору
Display — View All	Ctrl+F	Нормальный размер
Display — Visual		Режим визуализации
Display — Auto Rotate		Автоматическое вращение изображения
Display — Views		Направление просмотра
Display — To clipboard	Ctrl+C	Копирование в буфер
Project — Add Data File		Добавить файл данных
Project — Add Schematic		Добавить схему

Продолжение табл. 1.1

Команда меню	Кнопка	Описание
Project — Add Netlist		Добавить текстовый файл
Project — Add EM Structure		Добавить ЕМ структуру
Project — Add Material		Добавить материал
Project — Add Graph		Добавить график или таблицу
Project — Add Measurement		Добавить новую характеристику
Project — Add Opt Goal		Добавить цель оптимизации
Project — Add Yield Goal		Добавить цель статистического анализа
Project — Add Output File		Добавить выходной файл
Project — Add Layout Library		Добавить библиотеку ячеек (топологических примитивов)
Project — Circuit Symbols		Работа с символами схемы
Simulate — Analyze		Выполнить расчет (моделирование)
Simulate — Tune		Выполнить подстройку Tuner
Simulate — Tune Tool		Включить инструмент Tuner
Simulate — Optimize...	F7	Запуск оптимизации проекта
Simulate — Yield Analysis...		Запуск статистического анализа проекта
Simulate — Update Equations	F6	Добавить уравнения
Simulate — Run System Simulators		Запуск системного моделирования
Options — Environment Options...		Общие установки MWO
Options — Project Options...		Основные установки проекта (частоты и пр.)
Options— Layout Options...		Основные установки топологии
Options — Default Circuit Options...		Параметры моделирования схемы
Options — Default System Options...		Установки системного моделирования
Options — Default EM Options		Параметры электромагнитного моделирования
Options — Default Graph Options		Установки вида графика вывода
Options — Drawing Layers		Установки параметров слоев
Options — Import Process Definition		Импорт файла процессирования

Продолжение табл. 1.1

Команда меню	Кнопка	Описание
Window — Show Tool Bar		Показать панель инструментов
Window — TXLine		Запуск калькулятора микрополосковых линий
Window — Cascade		Расположить окна каскадно
Window — Tile		Расположить окна мозаикой
Window — Arrange Icons		Выстроить значки
Window — Close All		Закрыть все открытые окна
Help — Contents and Index	F1	Вызов содержания справки
Help — Element Help		Информация о выбранном библиотечном элементе
Help — Getting Started		Запустить учебник
Help — What's New		Новое в данной версии MWO
Help — Tip of the Day		Получить очередной полезный совет
Help — AWR on the Web		Перейти на сайт компании AWR
Help — Email AWR Support		Послать письмо компании AWR
Help — About		Справка о версии программы MWO

1.6. Работа с проектами

Проекты MWO и VSS сохраняются как файлы с расширением имени **.emp**, причем допускается использование длинных имен файлов с символами кириллицы. Программа MWO одновременно работает только с одним проектом, но сам проект может иметь несколько схем, подсхем и EM-структур.

При запуске программы через меню ***Пуск*** системы Windows, как правило, загружается пустой проект с большинством заданных по умолчанию параметров, которые в дальнейшем пользователь может изменить и сохранить под определенным именем.

Перед началом работы необходимо (но не обязательно) задать местоположение различных частей пакета Microwave Office. Для этого сразу после запуска программы нужно выполнить команду в меню **Options — Envirenment Options** и в появившемся окне, изображенном на рис. 1.8, сделать необходимые установки. При первых запусках программы рекомендуется оставить установки по умолчанию.

Создание нового проекта. Чтобы создать новый проект, достаточно просто запустить программу Microwave Office. Если вы уже работаете в системе, то необходимо выполнить команду меню **File — New Project** или нажать кнопку  на панели инструментов. В обоих случаях откроется проект, созданный по заданному в меню **File — Options** шаблону.

Открытие ранее созданного проекта. Чтобы открыть ранее созданный проект, необходимо выполнить команду меню **File — Open Project** или нажать кнопку  на панели инструментов. Откроется стандартное окно выбора файла (рис. 1.9).

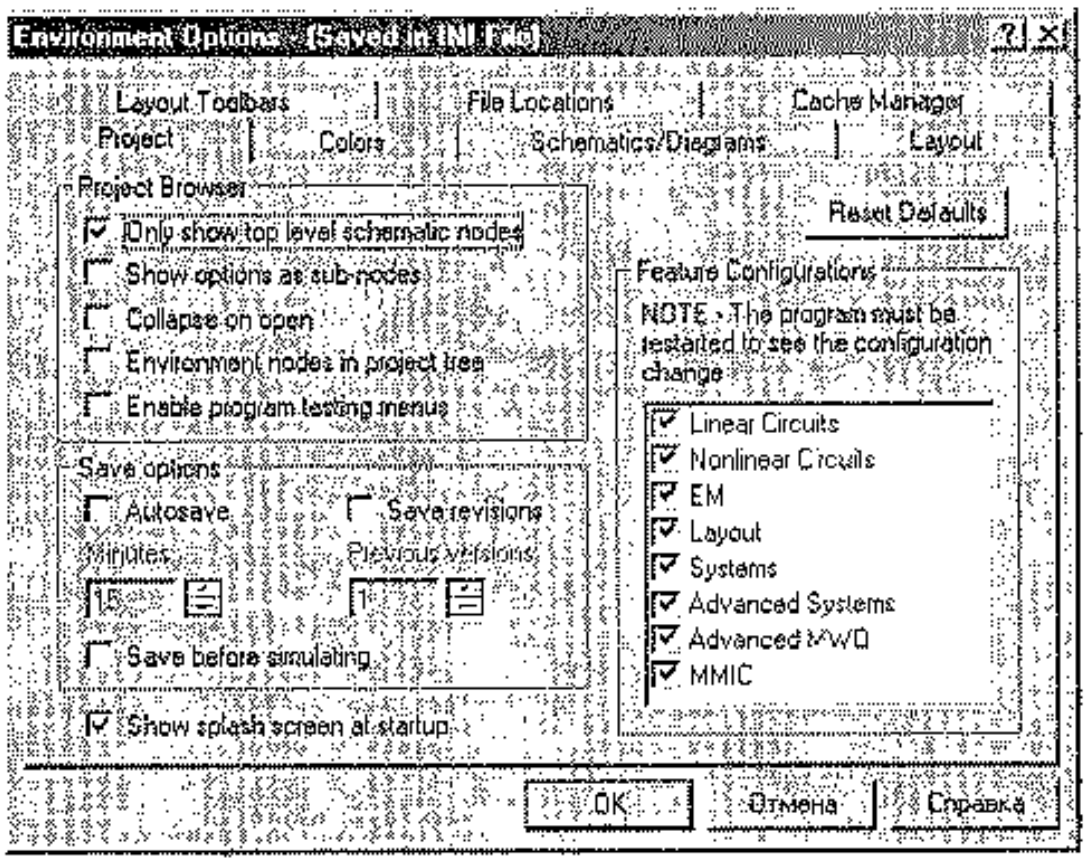


Рис. 1.8 Окно задания базовой конфигурации проекта

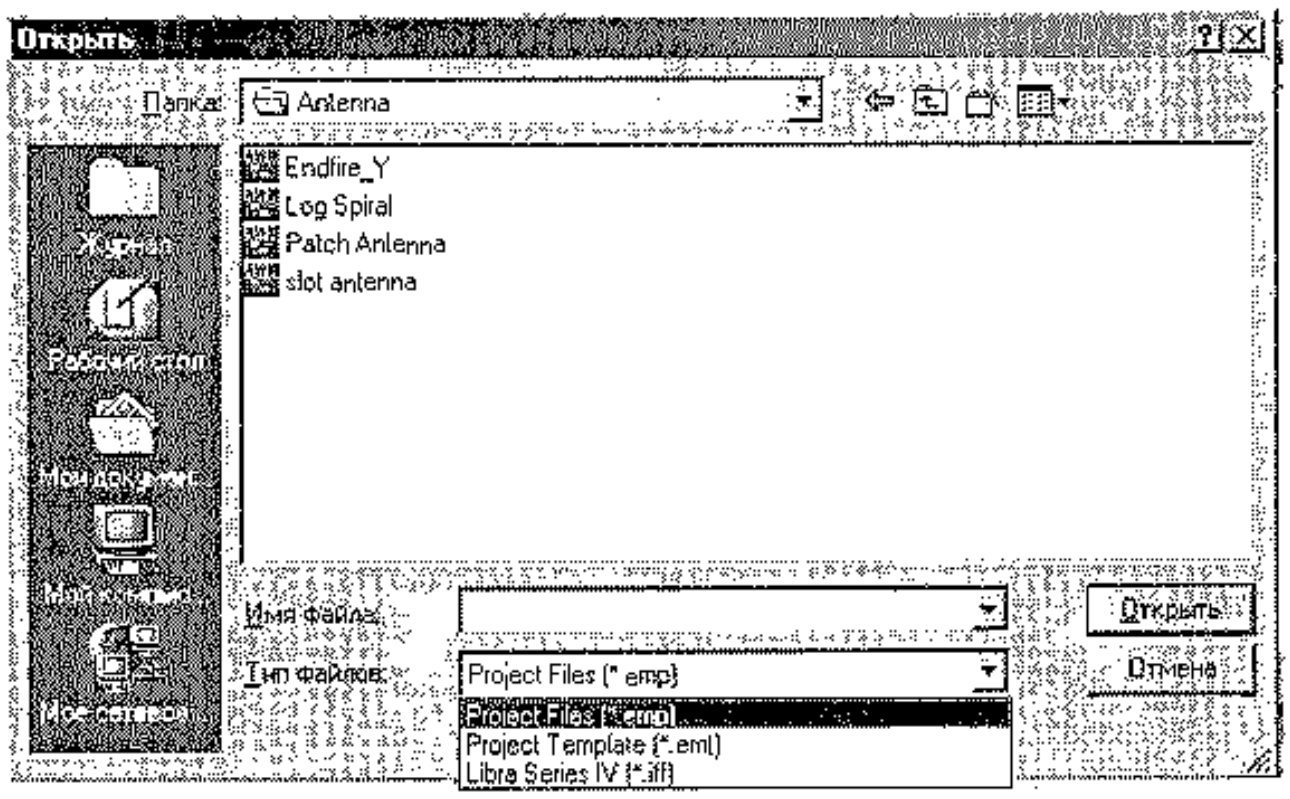


Рис. 1.9. Окно выбора доступного проекта

В списке расширений файлов необходимо выбрать строку **Project Files (*.emp)**, указать нужную папку и в ней выбрать нужный файл, после чего нажать кнопку <Открыть>.

Открыть ранее созданный проект Microwave Office можно также стандартным методом через проводник Windows, выбрав файл с расширением.emp или иконкой и дважды щелкнув на нем левой кнопкой мыши, или методом перетаскивания (drag-and-drop), для чего надо, захватив выбранный в проводнике Windows файл с помощью мыши и удерживая нажатой ее левую кнопку, перетащить его в окно запущенной программы Microwave Office.

Создание нового проекта по заданному шаблону. Чтобы создать новый проект по заданному шаблону, необходимо выполнить команду **File — Open Project** или нажать кнопку на панели инструментов и выбрать шаблон с расширением **.emt**.

Сохранение текущего проекта. Чтобы сохранить текущий проект, необходимо выполнить команду **File — Save Project** или нажать кнопку на панели инструментов.

Сохранение текущего проекта под другим именем. Чтобы сохранить текущий проект под другим именем, необходимо выполнить команду **File — Save Project As**. Откроется стандартное окно задания имени файла (рис. 1.10). В списке расширений необходимо выбрать строку **Project File (*.emp)**, указать нужную папку, вписать имя файла и нажать кнопку <Сохранить>.

Если требуется сохранить проект в формате более ранних версий программы MWO, необходимо выбрать соответствующую опцию в выпадающем списке расширений файлов.

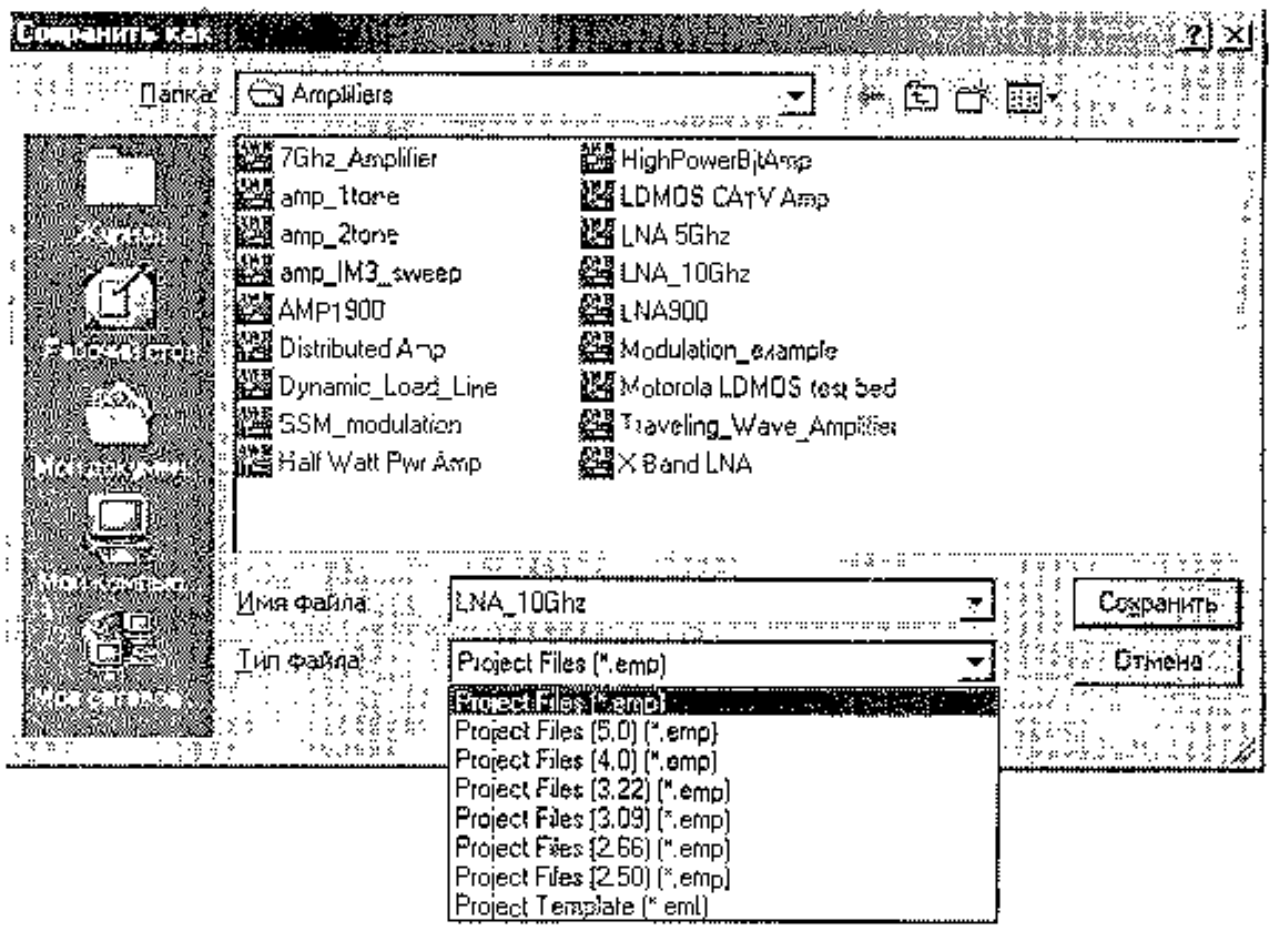


Рис. 1.10. Окно задания имени файла для сохранения проекта

Сохранение текущего проекта как шаблона. Чтобы сохранить текущий проект как шаблон, необходимо выполнить команду **File — Save Project As**. Откроется стандартное окно задания имени файла (рис. 1.10). В списке расширений необходимо выбрать строку **Project Template (*.emt)**, указать нужную папку, вписать имя файла и нажать кнопку <Сохранить>.

Закрытие текущего проекта. Чтобы закрыть текущий проект надо выполнить команду **File — Exit**, после чего программа выдаст запрос на закрытие проекта с его сохранением или без сохранения.

1.7. Установка параметров проекта

Перед созданием нового проекта необходимо сделать некоторые установки, например, наиболее часто употребляемую размерность величин, параметры интерполяции, формат внешних файлов данных (рис. 1.11).

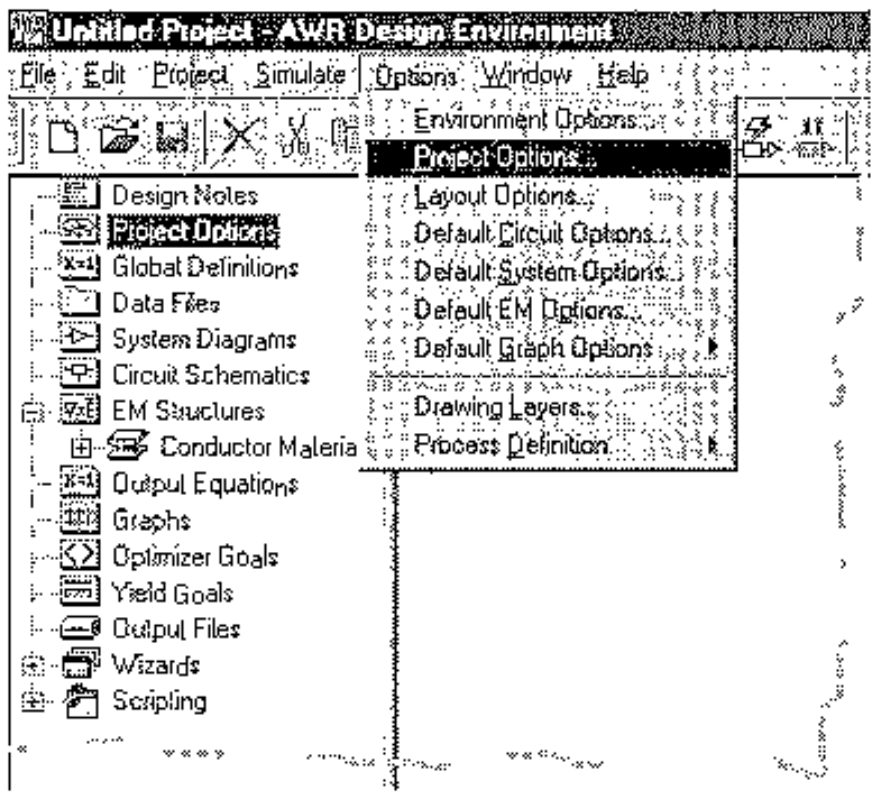


Рис 1 11 Изменение установок проекта

Установка размерности физических величин. Чтобы установить или изменить размерность физических величин выполните команду **Options — Units**. На экране появится окно *Global Units*, изображенное на рис. 1.12, в котором в соответствующих полях показаны текущие установки проекта.

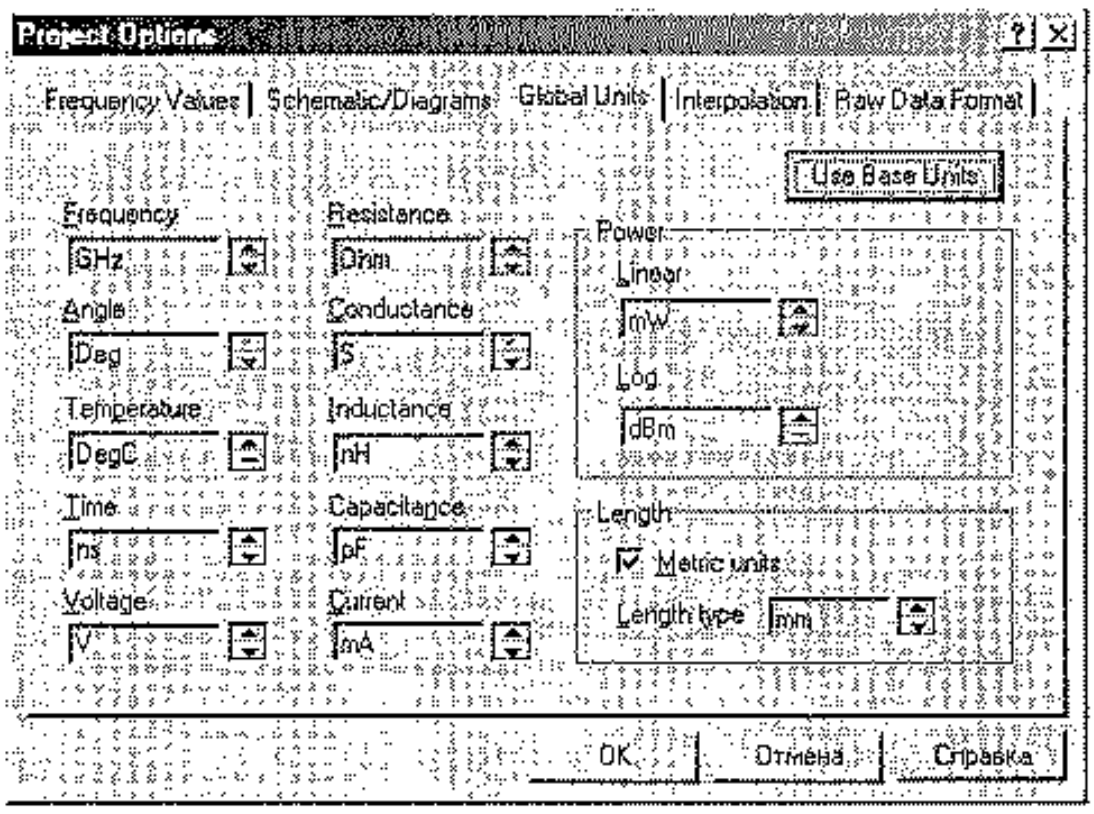


Рис. 1 12. Окно задания размерности величин

Изменение размерности можно производить на любом этапе работы с проектом, для чего нажатием кнопки последовательного перебора нужно выбрать требуемую размерность. Обратите внимание, что длина имеет два набора размерностей, принципиально отличающихся друг от друга: для метрической и дюймовой систем измерения. Выбор системы измерения производится установкой флажка **Metric units**. Далее для внесения сделанных изменений в проект необходимо нажать кнопку <**Ok**>, для их отмены — <**Cancel**>, для вызова справки — <**Help**>. После изменения размерности все величины указанного типа в проекте будут пересчитаны. Ниже приведены физические величины, размерность которых

может быть изменена с помощью данного окна (в скобках приведен список доступных размерностей).

- **Frequency** — частота (Hz, kHz, MHz, GHz, THz);
- **Angle** — угол (Deg, Rad);
- **Temperature** — температура (DegC, DegK, DegF);
- **Time** — время (fs, ps, ns, us, ms, s, ks, Ms, Gs, Ts);
- **Voltage** — напряжение (fV, pV, nV, uV, mV, V, kV, MV, GV, TV);
- **Resistance** — сопротивление (fOhm, pOhm, nOhm, uOhm, mOhm, Ohm, kOhm, MOhm, GOhm, TOhm);
- **Conductance** — проводимость (fS, pS, nS, uS, mS, S);
- **Inductance** — индуктивность (fH, pH, nH, uH, mH, H, kH, MH, GH, TH);
- **Capacitance** — емкость (fF, pF, nF, uF, mF, F);
- **Current** — ток (fA, pA, nA, uA, mA, A, kA, MA, GA, TA);
- **Power Linear** — мощность в линейном масштабе (fW, pW, nW, uW, mW, W, kW, MW, GW, TW);
- **Power Log** — мощность в логарифмическом масштабе (dBm, dBW);
- **Length** — длина в метрической (fm, pm, nm, um, mm, m, km) или дюймовой (mil, inch, foot, mile) системе.

Задание формата считывания нестандартных внешних файлов данных. Для задания формата считывания внешних файлов данных из произвольных текстовых файлов (не файлов в стандарте Touchstone) необходимо выполнить команду **Options — Settings — Raw Data File Format**, после чего на экране появится окно *Specify Data File Format,* изображенное на рис. 1.13.

Здесь в поле **Data Type** выбирается тип считываемых данных и волновое сопротивление тракта, необходимое для нормировки. Для S-параметров это значение **Ref. impedance**, а для Y- и Z-параметров — **Norm. impedance**, причем, если значение не определено, то по умолчанию подразумевается 50 Ом. Если в файле представлены ненормированные значения Y- и Z-параметров, то величина **Norm. impedance** должна быть равна 1.

Поле **Format** определяет формат считываемых данных, например, **Real/Imag** — пары действительная/мнимая часть, **Mag/Ang** — пары модуль/фаза, **Real** — только

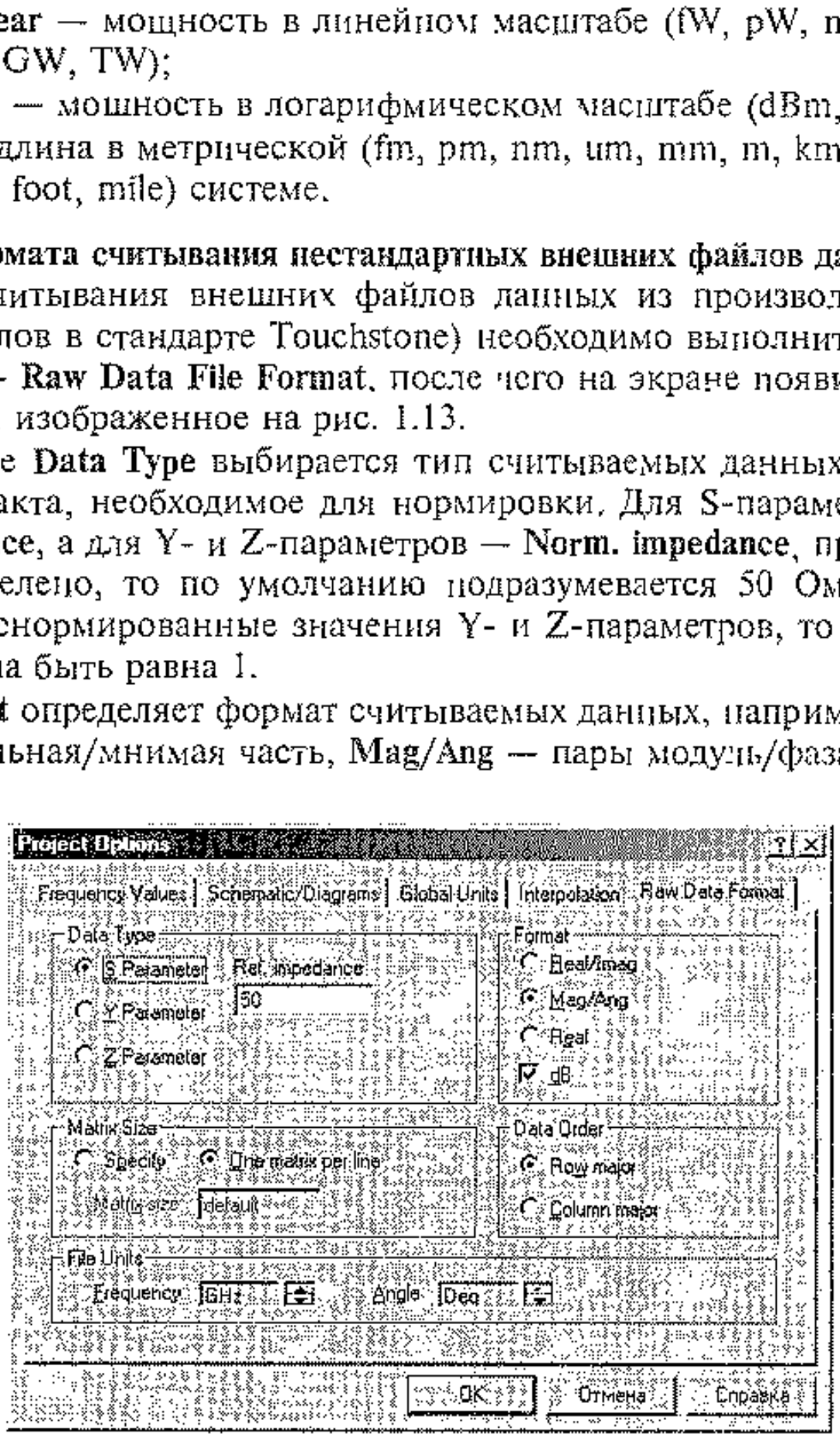


Рис. 1.13. Окно задания параметров считывания внешних файлов данных

действительная часть, причем в случаях **Mag/Ang** и **Real** допускается импорт данных в логарифмическом масштабе (включен флаг **dB**). В любом случае разделителем данных служит пробел или несколько пробелов.

В поле **Matrix Size** определяется стиль записи параметров многополюсника. При включенной опции **One matrix per line** параметры многополюсника записываются в одну строку, причем, первым числом в записи является значение частоты. Например:

```
f1 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS21 ImS21 ReS22 ImS22
f2 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS21 ImS21 ReS22 ImS22
f3 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS21 ImS21 ReS22 ImS22
```

При включенной опции **Specify** в активном окне **Matrix Size** необходимо указать количество портов многополюсника, а данные могут быть записаны в следующем виде:

```
f1 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS21 ImS21
ReS22 ImS22 f2 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12
ReS21 ImS21 ReS22 ImS22 f3 ReS11 ImS11
ReS12 ImS12 ReS21 ImS21 ReS22 ImS22
```

Поле **Data Order** определяет порядок следования элементов в матрице. Например, при включенной опции **Row major** данные будут расположены в виде:

```
f1 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS21 ImS21 ReS22 ImS22
f2 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS21 ImS21 ReS22 ImS22
f3 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS21 ImS21 ReS22 ImS22
```

При включенной опции **Column major** порядок данных будет следующим:

```
f1 ReS11 ImS11 ReS21 ImS21 ReS12 ImS12 ReS22 ImS22
f2 ReS11 ImS11 ReS21 ImS21 ReS12 ImS12 ReS22 ImS22
f3 ReS11 ImS11 ReS21 ImS21 ReS12 ImS12 ReS22 ImS22
```

В нижней части окна *Specify Data File Format* расположено поле **File Units**, служащее для задания размерности величин, содержащихся во внешнем файле данных. Выбор размерности частоты производится перебором списка доступных величин с помощью кнопки , а выбор единиц измерения угла возможен только в случае, если в поле **Format** выбрана опция **Mag/Ang**.

Выбор режима интерполяции. Для определения параметров интерполяции зависимостей, рассчитанных в процессе моделирования, необходимо выполнить команду меню **Options — Settings — Interpolation Settings**. На экране появится окно *Project Options* (рис. 1.14) с вкладкой **Interpolation**.

Метод интерполяции задается посредством выбора нужной опции из трех возможных в поле **Interpolation Method**.

- **Linear** — метод линейной интерполяции;
- **Rational function** — метод полиномиальной функции;
- **Spline curve** — метод сплайнов.

Режим интерполяции включается для каждой конкретной зависимости выбором опции **Smoothing** в окне *Modify Measurement*, появляющемся после двойного щелчка на ней на вкладке **Project**. При выключенной интерполяции зависимости имеют вид, изображенный на рис. 1.15.

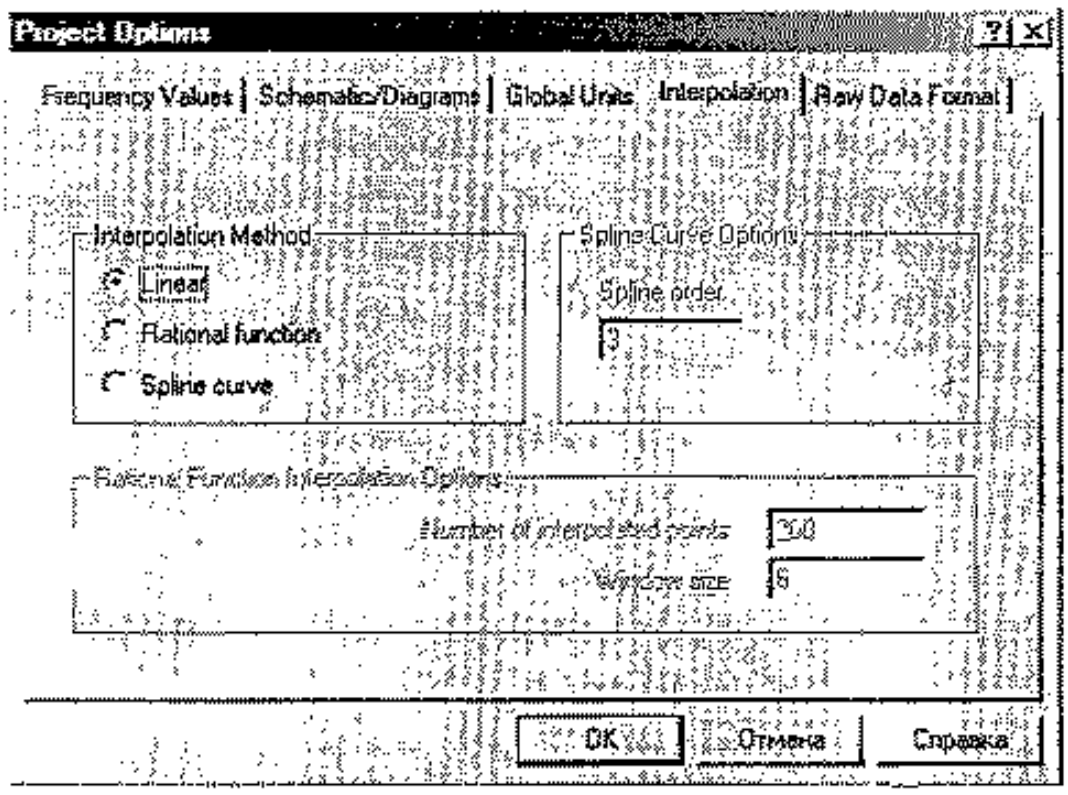


Рис 1.14 Окно задания параметров интерполяции рассчитанных зависимостей

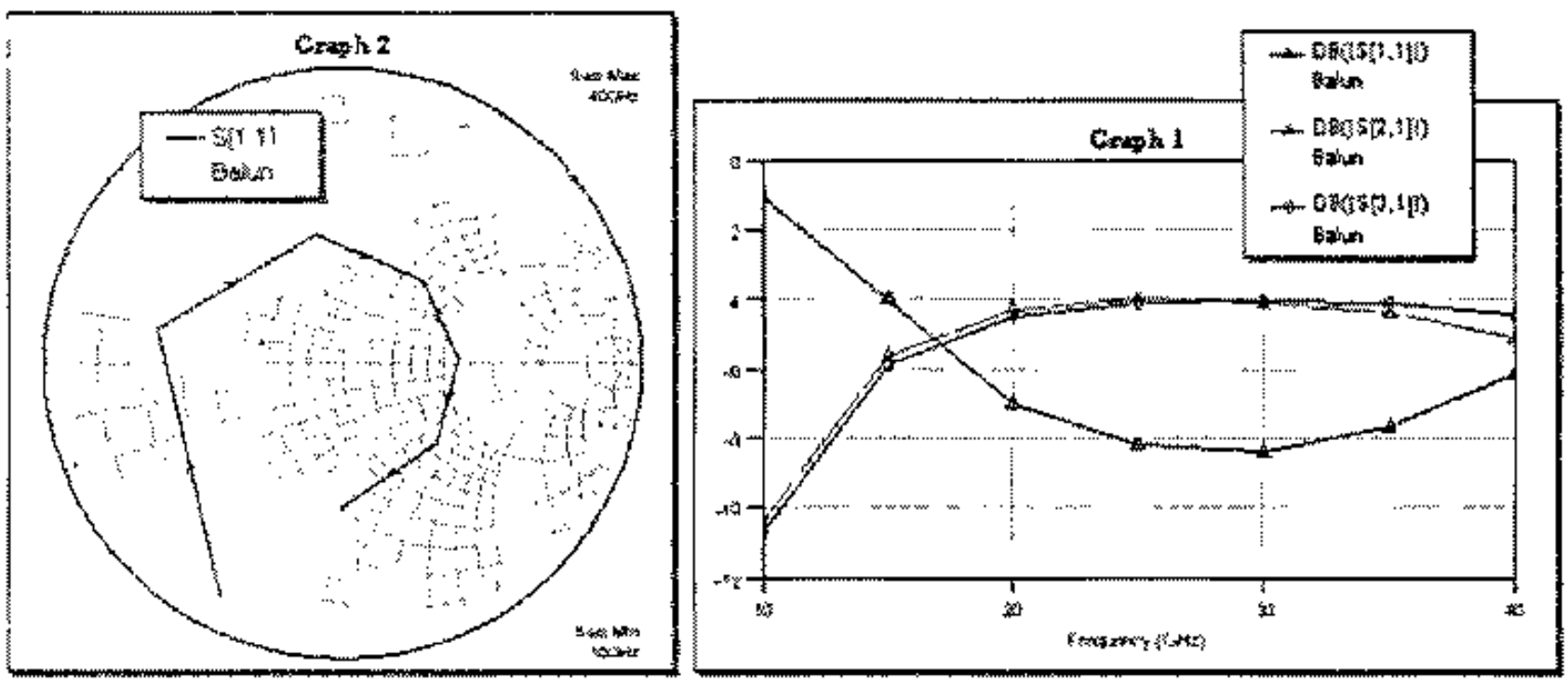


Рис. 1.15. Вид рассчитанных зависимостей при отключенной интерполяции

Метод линейной интерполяции **Linear** дополнительных параметров не имеет и в комментариях не нуждается.

Метод полиномиальной функции **Rational function** дает возможность предсказать значение характеристики в произвольной точке по фиксированному набору заранее рассчитанных точек. Для этого нужно установить параметры **Number of interpolated points** (число интерполированных точек) и **Window Size** (размер окна интерполяции) в поле **Rational Function Interpolation Options**. Число интерполированных точек лежит в пределах от 4 до 1000 и определяет, сколько точек будет отражено на конечной характеристике. Наиболее наглядно действие этого параметра можно продемонстрировать при выводе рассчитанных данных в табличной форме. Например, если в проекте рассчитывается амплитудно-частотная характеристика в 7 частотных точках, то при включенной интерполяции методом рациональной функции с числом интерполированных точек 200 в выходной таблице будет присутствовать 200 строк численных значений. Размер окна интерполяции определяет максимальное число точек, участвующих в интерполяции текущего отсчета дан-

ных и может принимать значения от 2 до 100. При этом те же зависимости будут иметь вид, изображенный на рис. 1.16.

Метод сплайнов **Spline curve** имеет два параметра. Значение порядка сплайнов **Spline order** задается в поле **Spline Curve Options** и определяет характер интерполяции, а число интерполированных точек **Number of interpolated points** задается аналогично методу рациональной функции и имеет тот же смысл. Вид характеристик при интерполяции методом сплайнов представлен на рис. 1.17.

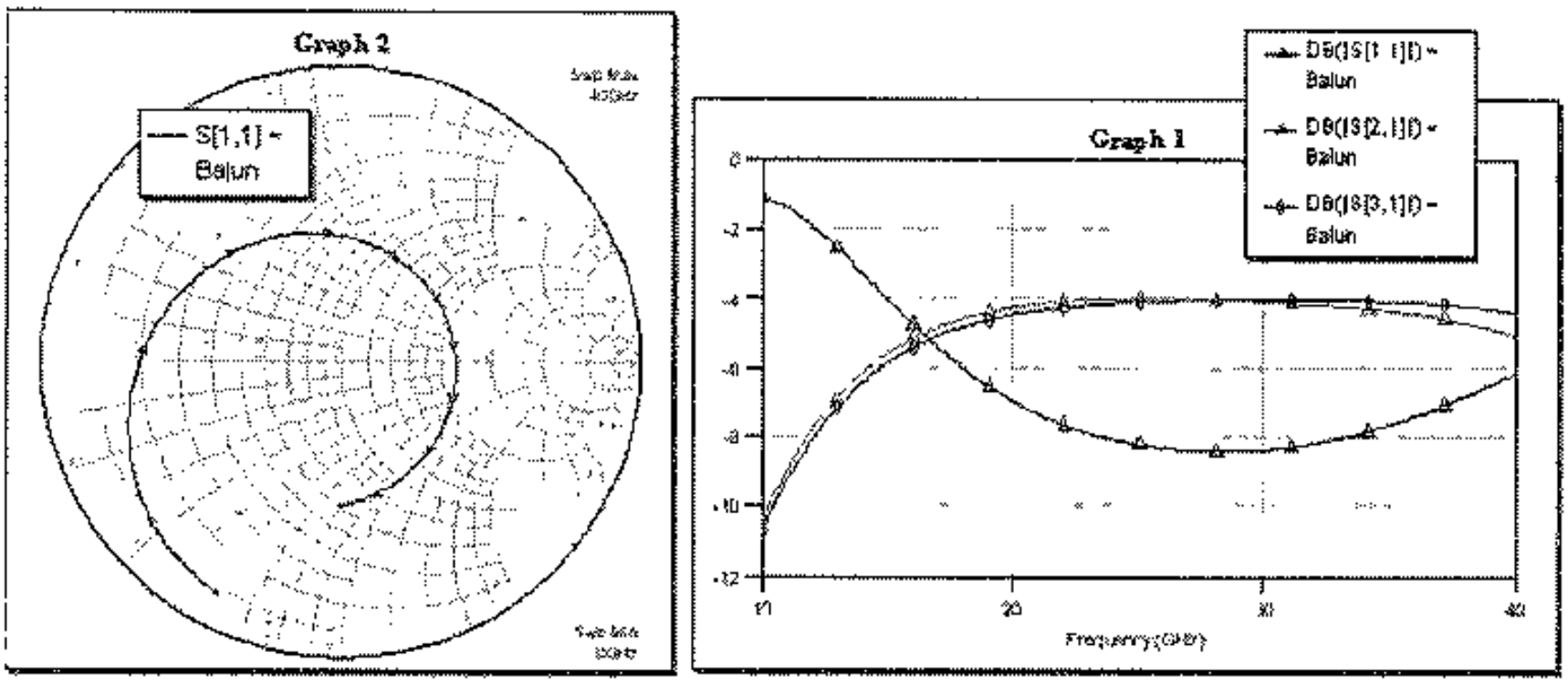


Рис. 1.16. Вид рассчитанных зависимостей при интерполяции методом полиномиальной функции

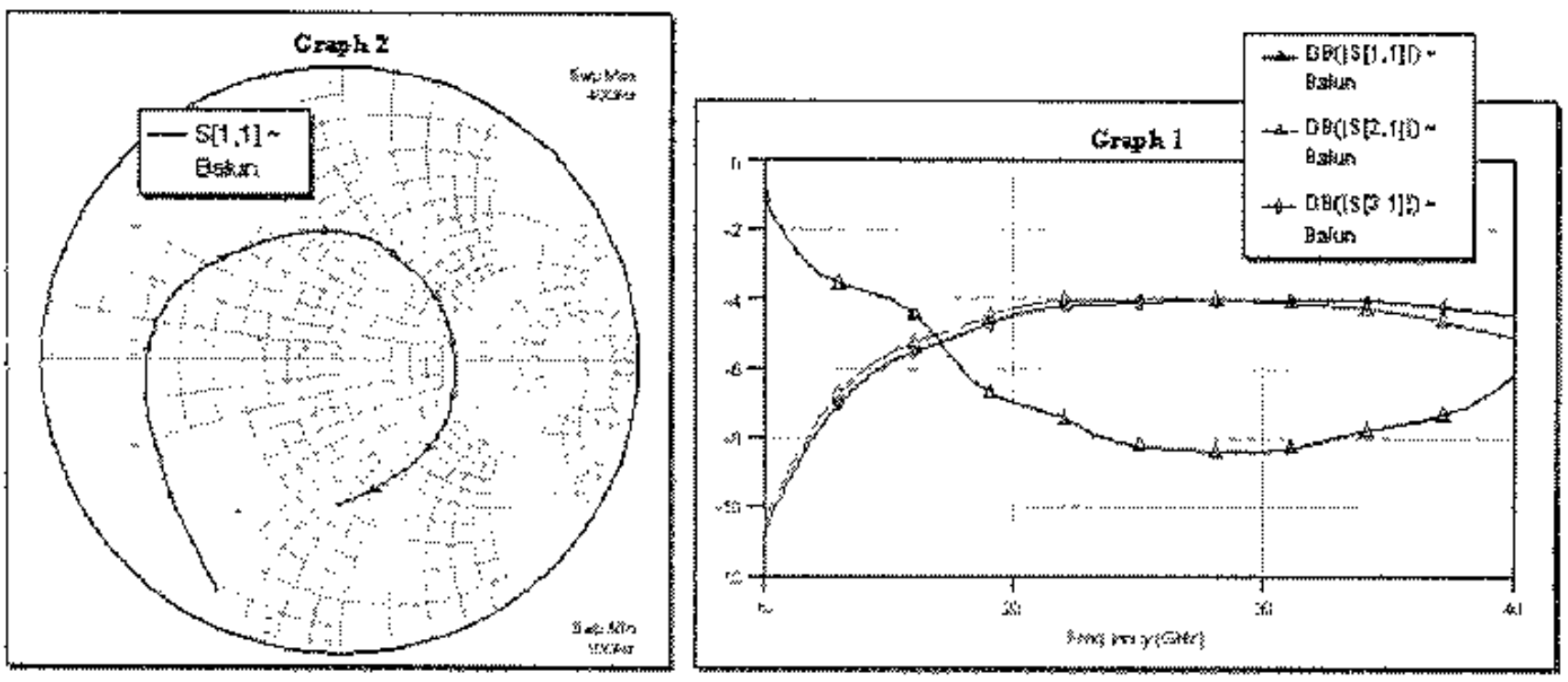


Рис. 1.17. Вид зависимостей при интерполяции методом сплайнов

Режим автоматического обновления данных. При работе с внешними данными имеется возможность как их внедрения, так и связывания с внешними файлами. В общем случае обновление данных, импортируемых из саязанных файлов, производится выполнением команды меню **Simulate — Analyze**, нажатием клавиши <F8> или нажатием кнопки  (**Analyze**) на панели инструментов. Однако обновление данных может производиться автоматически, для чего необходимо

включить опцию в меню **Options — Settings — Auto Update Files**. При включенной опции слева от нее появляется галочка.

Данная функция особенно полезна при работе пакета совместно с автоматизированным измерительным комплексом. В этом случае возможен одновременный просмотр характеристик реального устройства (например, фильтра), измеренных с помощью векторного анализатора цепей, с рассчитанными характеристиками, что позволит значительно ускорить процесс его настройки.

Работа с кэш-файлами при моделировании ЕМ структур. Для установки максимального размера кэша, используемого при моделировании ЕМ структур необходимо выполнить команду меню **Environment Options — Settings — EM Cache**, после чего откроется окно работы с кэш-файлами *Cache Manager*. В целом механизм кэширования здесь аналогичен механизму, используемому при работе любого распространенного Internet-браузера. Каждый кэш-файл имеет уникальное имя с расширением .dbm и представляет собой выполненное определенным образом описание области электромагнитного анализа (**Enclosure**), обеспечивающее ускоренное заполнение матрицы моментов при многократно повторяющихся однотипных расчетах. В поле **Files** в табличной форме отображается список всех существующих кэш-файлов, а также краткая информация об их использовании:

- **Name** — имя файла;
- **Last Used** — дата последнего использования файла;
- **Size** — размер;
- **Refs** — сравниваемый кэш-файл;
- **Diff** — количество производных, рассчитываемых при использовании метода FFS;
- **Freq (GHz)** — частота анализа в ГГц.

Для каждого отдельного файла может быть установлена опция **Can auto-remove**, разрешающая автоматическое удаление в случае переполнения кэша. С помощью кнопки <**Delete**> можно вручную удалять выделенные кэш-файлы, причем выделение производится стандартными для операционной системы Windows способами. При выделении одного файла становится активной кнопка <**View Structure**>, нажатие которой позволяет просмотреть параметры области анализа ЕМ структуры.

По умолчанию размер кэша устанавливается равным 5000 кбайт. При использовании многослойных подложек большого размера указанного объема кэша может оказаться недостаточным и его необходимо увеличить. Включенная опция **Automatic cleanup** разрешает удаление старых кэш-файлов при переполнении кэша. Размер кэша, требуемого для моделирования каждой конкретной ЕМ структуры, приводится в окне *EM Solver Information* в поле **Analysis Recommendations**. Для этого надо выполнить двойной щелчок на соответствующем объекте Information на дереве проекта. Для сохранения всех произведенных изменений нажмите кнопку <**Ok**>, для отмены изменений — кнопку <**Cancel**>, для получения справки — <**Help**>. Следует отметить, что операция ручного удаления кэш-файлов работает независимо от нажатия кнопок <Ok> и <Cancel>.

1.8. Добавление и изменение комментариев

Как уже говорилось, блок комментариев предназначен для сохранения пояснительной записки к проекту. Сюда может быть введена любая текстовая информация, например, дата создания проекта, имя разработчика, название подразделе-

ния и организации, цели создания данного проекта, а также комментарии, призванные облегчить работу с проектом других инженеров или по прошествию некоторого периода времени.

Чтобы ввести текст в блок комментариев, надо дважды шелкнуть левой кнопкой мыши в дереве проекта на объекте Design Notes или указателем мыши выделить его на дереве проекта и нажать клавишу <**Enter**>. На рабочем столе среды проектирования появится окно встроенного текстового редактора, а состав меню команд и панели инструментов изменится в соответствиями с выполняемыми здесь операциями. Вид панели инструментов на рис. 1.18.



Рис. 1.18 Вид панели инструментов при работе с блоком комментариев

При наведении на окно блока комментариев указатель мыши принимает вид стандартного курсора текстового редактора. Щелкните курсором в левом верхнем углу текстового окна и вводите необходимый текст на любом языке. Переключение раскладки клавиатуры производится стандартным для данной операционной системы образом. В окне блока комментариев можно применять все общепринятые способы форматирования текста, например, изменение используемого типа шрифта, его размера, цвета, начертания и атрибутов. При форматировании абзацев можно изменять способы их выравнивания, а также формировать маркированные списки.

Для быстрого редактирования текста используются стандартные команды из раздела меню **Edit** (Редактирование): **Undo** (Отмена), **Cut** (Вырезать), **Copy** (Копировать), **Paste** (Вставить) и **Delete** (Удалить), а также оригинальная команда **Clear All** (Очистить все). Для поиска нужной информации имеется команда **Find** (Найти), а для замены определенных слов — команда **Replace** (Заменить).

С помощью команды **Paste** в блок комментариев можно вводить фрагменты текста, подготовленные в любом другом текстовом редакторе, поддерживающем пересылку информации через буфер обмена Windows. При этом следует учитывать, что все внедренные объекты, например, рисунки, кнопки, ссылки, будут опущены.

1.9. Начальные установки фундаментальных частот проекта

Данный блок служит для задания фундаментальных частот проекта. Под понятием фундаментальных частот здесь подразумевается некоторый набор частот, в которых по умолчанию будет производиться анализ всех частей проекта.

Для задания фундаментальных частот проекта необходимо выполнить двойной щелчок левой кнопкой мыши на объекте Project Options или выделить этот блок на дереве проекта и нажать клавишу <**Enter**>. На экране компьютера появится окно *Project Options*, изображенное на рис. 1.19.

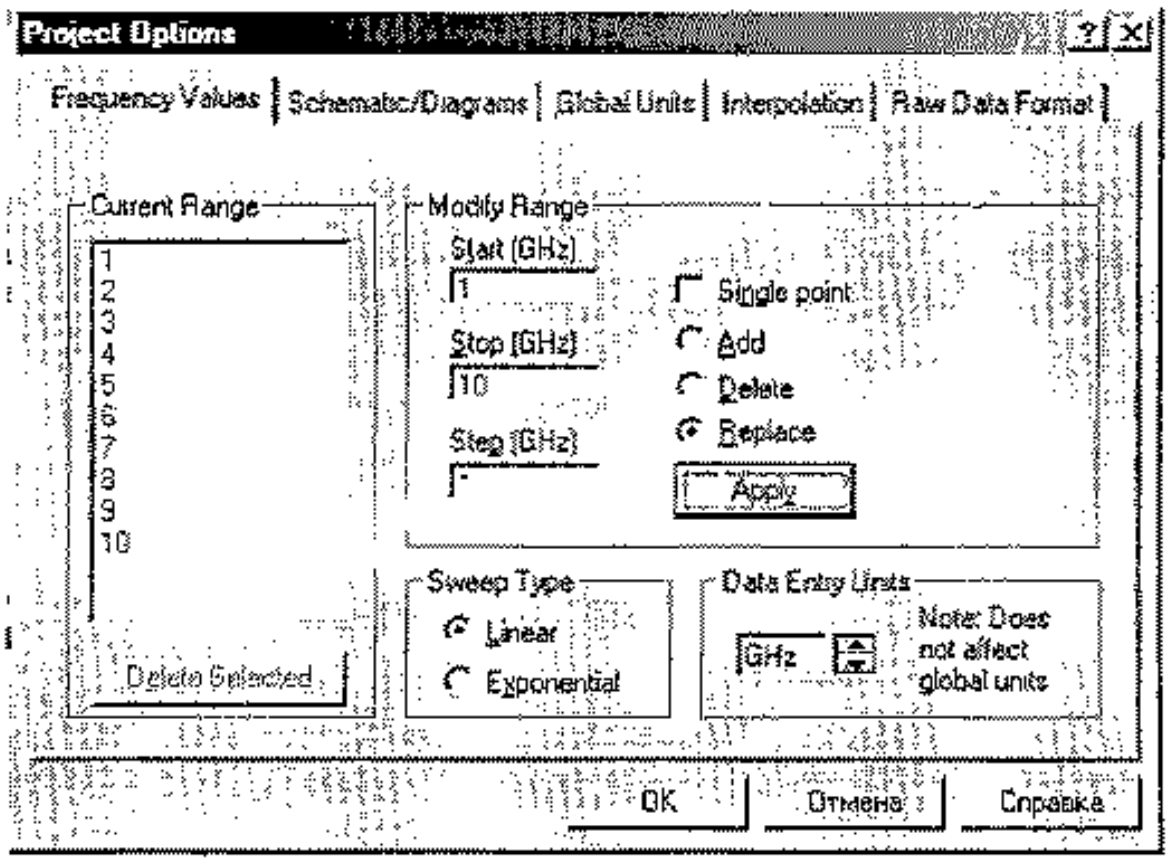


Рис. 1.19. Окно блока задания фундаментальных частот проекта

В левой части окна отображается текущий набор частот (поле **Current Range**), а в центральной — средства его модификации (поле **Modify Range**). В правом нижнем углу расположен переключатель размерности частоты **Data Entry Unit**, значение по умолчанию которого соответствует глобальным установкам проекта. Изменение текущей размерности можно производить перебором списка доступных размерностей последовательным нажатием кнопки .

Наборы частот можно задавать разными способами: отдельными значениями и диапазонами. Для задания отдельной частоты установите флаг **Single point** во включенное состояние, в единственное активное окно ввода **Point** введите значение частоты в нужной размерности, включите режим добавления (флаг **Add**) и нажмите кнопку <**Apply**>. Для добавления еще одной частотной точки введите новое значение частоты и снова нажмите кнопку <**Apply**>. Подобным образом можно удалять и заменять отдельные частоты, только для этого необходимо включить соответствующий режим (установить опцию **Delete** или **Replace**), ввести значение частоты и нажать кнопку <**Apply**>, после чего сделанные изменения сразу же отразятся в поле **Current Range**.

Для задания наборов частот диапазонами надо установить флаг **Single Point** в выключенное состояние, в активные окна ввода **Start**, **Stop** и **Step** ввести соответствующие значение частоты, включить режим добавления (флаг **Add**) и нажать кнопку <**Apply**>. При необходимости добавления в проект нового частотного диапазона необходимо ввести новые значения частоты и нажать кнопку <**Apply**>. Внутри диапазона частота может изменяться как по линейному, так и по экспоненциальному закону, для чего необходимо включить соответствующий флаг **Linear** или **Exponential** в поле **Sweep Type**. Удалять и заменять отдельные диапазоны можно аналогично тому, как это делалось для одной частоты.

Кроме того, для быстрого исключения определенных частот из текущего набора, можно выбрать отдельные точки стандартным для Windows методом (удерживая клавишу <**Shift**> или <**Ctrl**>) и нажать кнопку <**Delete Selected**>. После завершения всех этих операций необходимо нажать кнопку <**Ok**> для пересылки всех сделанных изменений в проект. В противном случае необходимо нажать

кнопку отмены <**Cancel**>. Для вызова раздела справки по данному диалоговому окну необходимо нажать кнопку <**Help**> или клавишу <**F1**>.

Столь гибкий механизм задания фундаментальных частот проекта позволяет пользователям акцентировать свое внимание только на интересующих их критических участках частотного диапазона и не тратить время на анализ ненужных участков. Кроме того, допускается внесение изменений в блок фундаментальных частот в процессе работы над проектом, а отдельные части проекта — схемотехнические модули и EM структуры — могут иметь собственные оптимальные для них наборы частот анализа.

1.10. Глобальные выражения

В блоке глобальных выражений Global Definitions описываются переменные аналогично тому, как это делается в объектно-ориентированном программировании. Термин «глобальное выражение» означает, что переменная, содержащая результат его расчета, будет доступна во всех без исключениях частях проекта. Простейшим примером такой переменной может служить ширина микрополосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом, которая должна быть изменена одновременно во всех линиях проекта пропорционально толщине подложки.

Для того, чтобы ввести глобальное выражение в проект, необходимо выполнить двойной щелчок левой кнопкой мыши на объекте Global Definitions или выделить этот блок на дереве проекта и нажать клавишу <**Enter**>. На рабочем столе среды проектирования появится окно *Global Definitions*, куда в дальнейшем будут введены глобальные выражения, а меню команд примет вид, изображенный на рис. 1.20.

Помимо основных меню здесь появились меню **Edit**, **Add** и **View**. Состав команд этих меню, также соответствующие кнопки панели инструментов представлены в табл. 1.3. В этой таблице также представлены команды раздела **Simulate** относящиеся к глобальным выражениям.

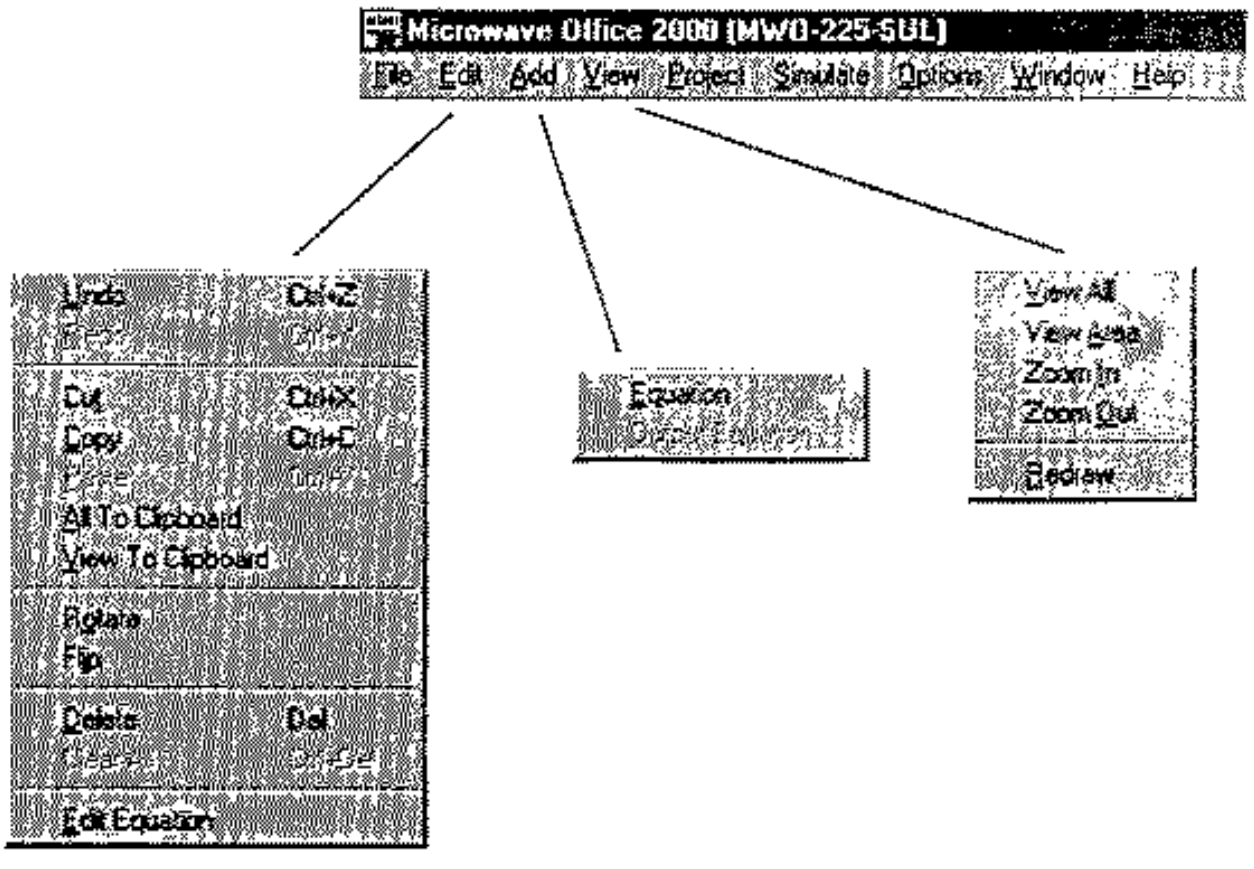


Рис. 1.20 Изменения в командном меню при работе с глобальными выражениями

Таблица 1.3. Команды меню MWO

Команда меню	Кнопка	Описание
Edit — Undo		Отменить последнее действие
Edit — Redo		Повторить последнее действие
Edit — Cut		Вырезать выражение в буфер обмена
Edit — Copy		Скопировать выражение в буфер обмена
Edit — Paste		Вставить содержимое буфера обмена
Edit — All to Clipboard		Скопировать все выражения окна в буфер обмена (охват)
Edit — View to Clipboard		Скопировать все выражения окна в буфер обмена (текущий вид)
Edit — Rotate		Повернуть выделенное выражение
Edit — Flip		Отобразить зеркально выделенное выражение
Edit — Delete		Удалить выделенное выражение
Edit — Clear All		Удалить все содержимое блока глобальных выражений
Edit — Edit Equation		Редактировать выделенное выражение
Add — Equation		Добавить выражение в блок
View — View All		Установить автоматическии масштаб (охват)
View — View Area		Установить вид по выбранному окну
View — Zoom In		Приблизить изображение в окне
View — Zoom Out		Отдалить изображение в окне
View — Redraw	F5	Обновить изображение в окне
Simulate — Tune		Включить модуль ручной настройки
Simulate — Tune Tool		Включить указатель модуля ручной настройки
Simulate — Update Equations	F6	Обновить выражения

Для того чтобы добавить в блок новое глобальное выражение, необходимо выполнить команду меню **Add — Equations** или нажать кнопку  на панели инструментов. После нажатия на эту кнопку указатель мыши приобретает вид курсора текстового редактора с прямоугольником, являющимся полем для введения вы-

ражения. Расположите его поле в определенное место окна *Global Definitions* и щелкните левой кнопкой мыши. Указатель мыши приобретет прежний вид, а в поле ввода выражения начнет мигать текстовый курсор. Введите требуемое выражение и нажмите <Enter>. Если текст выражения отобразился черным цветом, значит выражение введено правильно. Если выражение отобразится зеленым цветом, значит система проектирования восприняла его как комментарий. Это может произойти по разным причинам, вот некоторые из них:

- в выражении присутствуют русские буквы и другие недопустимые символы;
- выражение записано с нарушением синтаксических правил (непарное количество скобок, более одного знака равенства);
- имя переменной содержит пробелы;
- в выражение ошибочно введена размерность.

Общими правилами записи глобальных выражений являются:

- имя переменной должно состоять из произвольного набора цифр и букв английского алфавита;
- число символов в имени переменной теоретически не ограничено, но длинные имена труднее отображать на экране и в них легче сделать ошибку;
- в имени переменной система различает заглавные и прописные буквы, то есть переменные WIN и Win будут восприняты как две разные;
- размерность в выражении не пишется, так как она добавляется к переменной автоматически при подстановке ее в значение того или иного параметра схемы;
- число выражений в проекте теоретически не ограничено;
- при записи выражений допускается использование следующих математических операторов: сложения (+), вычитания (-), умножения (*), деления (/), возведения в степень (^).

Система имеет встроенные математические функции:

- sin(x) — синус (аргумент в радианах);
- cos(x) — косинус (аргумент в радианах);
- tan(x) — тангенс (аргумент в радианах);
- sinh(x) — гиперболический синус (аргумент в радианах);
- cosh(x) — гиперболический косинус (аргумент в радианах);
- tanh(x) — гиперболический тангенс (аргумент в радианах);
- arcsin(x) — арксинус (результат в радианах);
- arccos(x) — арккосинус (результат в радианах);
- arctan(x) — арктангенс (результат в радианах);
- exp(x) — экспоненциальная функция;
- log(x) — натуральный логарифм;
- log10(x) — логарифм по основанию 10;
- sqrt(x) — корень квадратный.

Программа Microwave Office имеет встроенные глобальные константы: _PI (число π = 3,14159...) и j (мнимая единица). Благодаря наличию мнимой единицы имеется возможность алгебраической записи комплексных чисел, например, выражение Z = 40 + j * 10 присваивает переменной Z комплексное значение (40, 10).

В блоке глобальных выражений имеется возможность определения пользовательских функций, например, выражение sum (a, b) = a + b определяет функцию sum (), после чего ее можно будет использовать как встроенную.

Все выражения блока рассчитываются последовательно, причем очередность расчета задается местоположением выражения: сначала идет расчет сверху вниз, затем слева направо.

В блоке также имеется возможность просмотра промежуточных значений переменных, например, последовательность выражений:

```
Z = 40 + j * 10
Z :
```

после пересчета примет вид:

```
Z = 40 + j * 10
Z : (40, 10)
```

Для пересчета глобальных выражений необходимо нажать кнопку  на панели инструментов, или выполнить команду **Simulate — Analyze**. Однако, выполнение этой команды повлечет за собой запуск пересчета всего проекта, что может быть нецелесообразно при достаточно сложной схеме. Для локального пересчета только математических выражений необходимо выполнить команду **Simulate — Update Equations** или нажать клавишу <**F6**>.

Основные приемы работы с глобальными выражениями можно продемонстрировать на следующем примере. Запустите программу MWO, в пустом проекте откройте блок глобальных выражений и введите четыре выражения как показано на рис. 1.21. Выполните команду **Simulate — Update Equations**, после чего в последнем выражении появится число 100.

Чтобы изменить сушествующие выражения, выполним щелчок правой кнопкой мыши на каждом из них, чтобы вызвать контекстное меню. На втором и третьем выражении контекстное меню будет иметь вид, показанный на рис. 1.22. В первом и четвертом выражениях будет отсутствовать опция **Edit Equation**, что означает, что данные выражения лишены математического смысла, то есть их результат никак не учитывается при моделировании. Тем не менее, редактировать их можно, выполнив двойной щелчок левой кнопкой мыши на данном выражении.

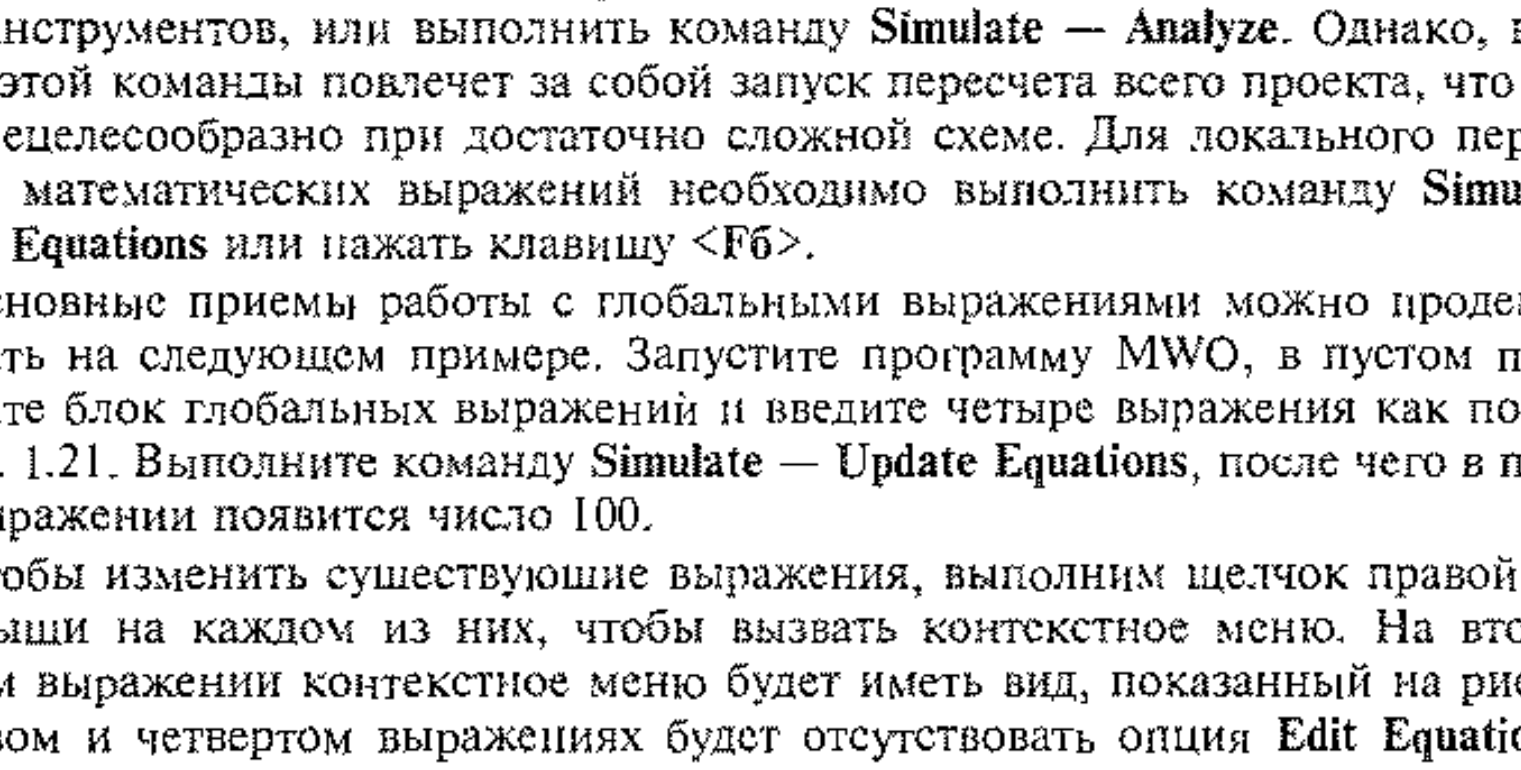


Рис. 1.21. Пример работы с глобальными выражениями

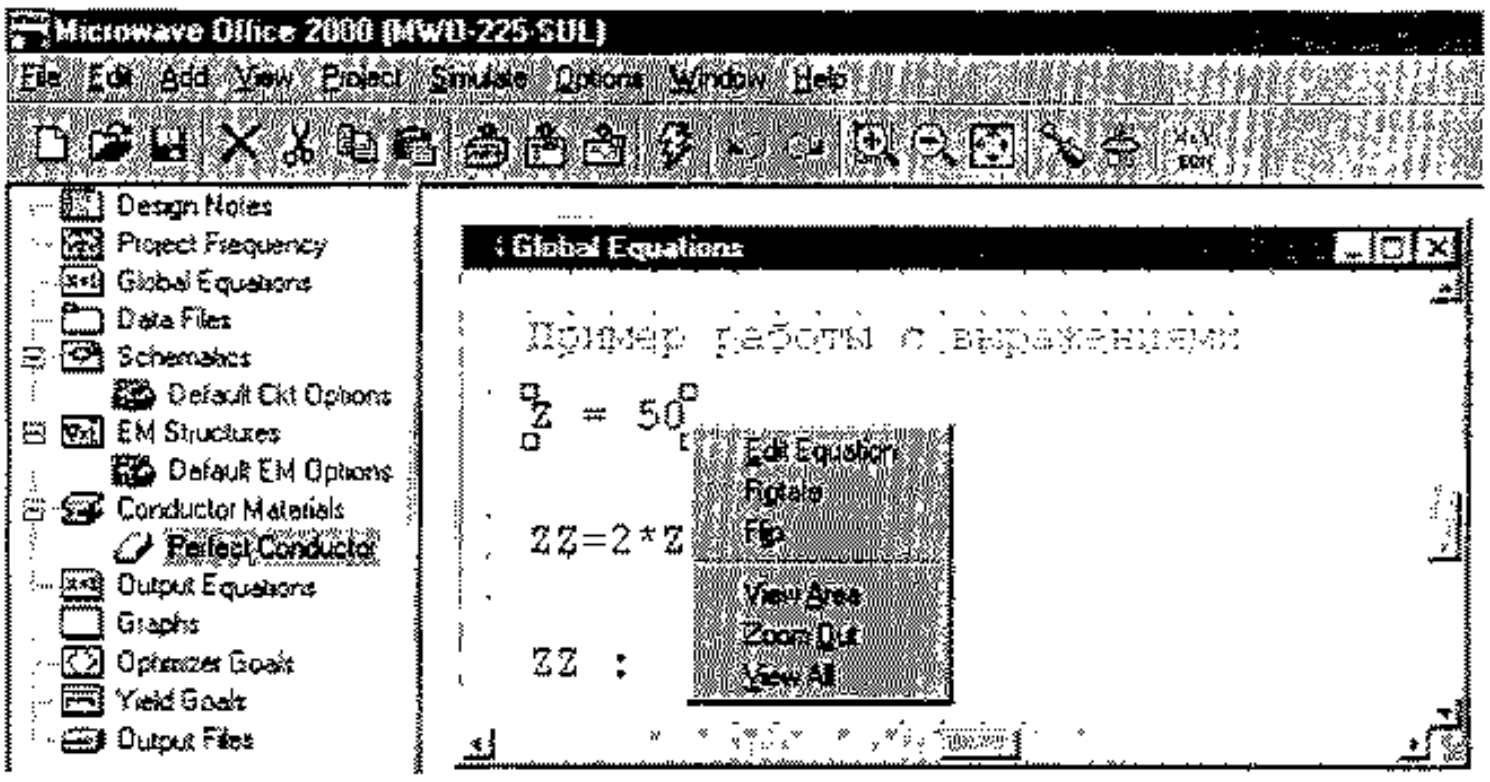


Рис. 1.22. Контекстное меню при работе с глобальными выражениями

Нам будет интересней редактировать второе или третье выражение, поэтому выделим второе выражение и выполним команду **Edit — Edit Equation**, но перед этим для наглядности перейдем на вкладку **Variables**, для чего щелкнем левой кнопкой мыши на корешке **Var** в левом нижнем углу экрана. На экране появится окно *Edit Equation*, изображенное на рис. 1.23, имеющее две вкладки **Parameter Value** и **Statistics**. (В последней версии MWO — одна закладка.)

В верхней части окна расположены два текстовых поля **Equation name** и **Expression**, а также переключатель **Independent**. Поле **Equation name** содержит имя переменной, которой будет присваиваться результат расчета выражения. Включенное состояние переключателя **Independent** и неактивное поле **Expression** говорит о том, что данная переменная является независимой. Независимой называется та-

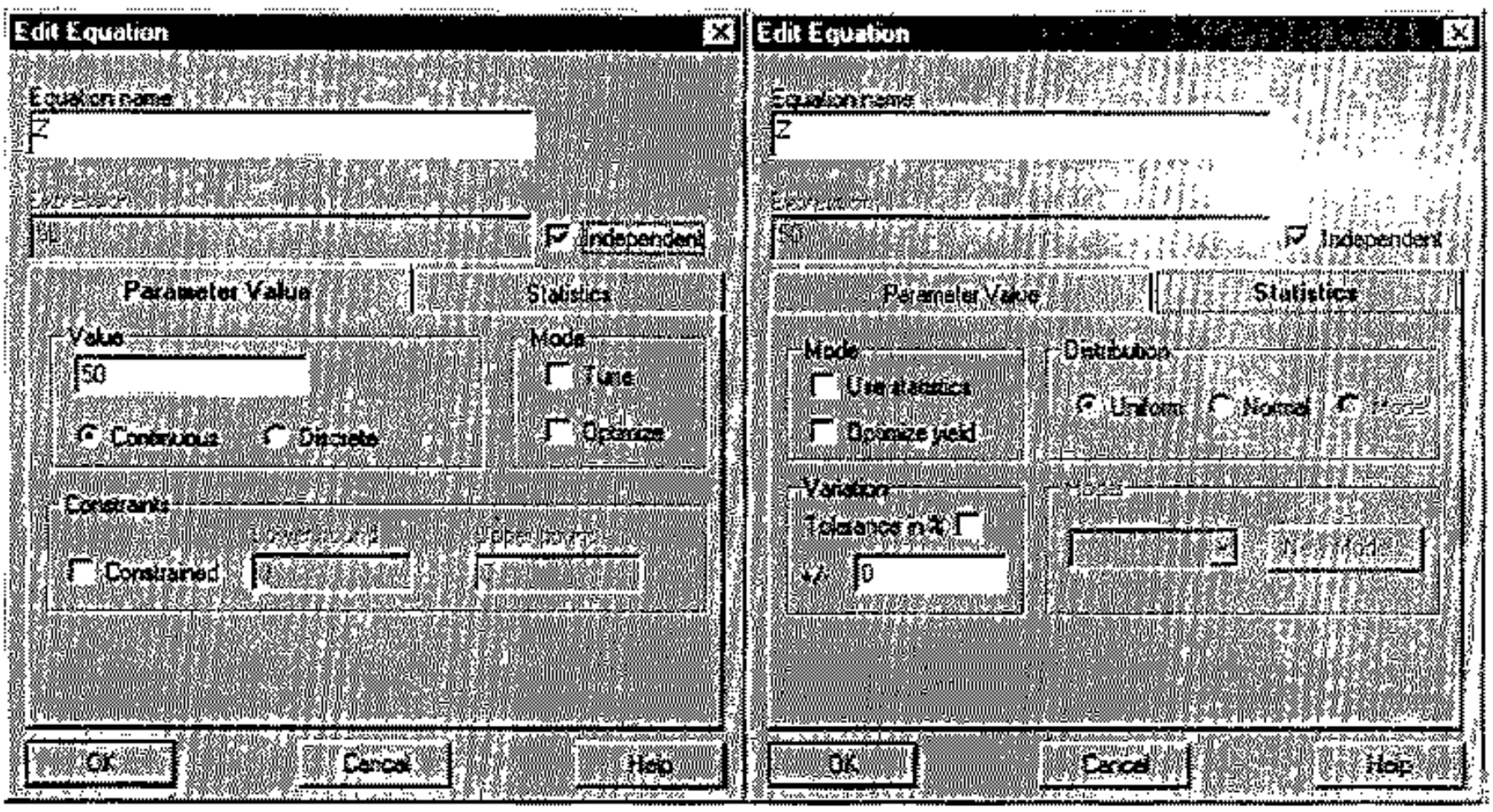


Рис. 1.23. Окно редактирования независимого глобального выражения. Закладки Parameter Value (слева) и Statistics (справа)

кая переменная, которой присваивается конкретное численное значение, в данном случае это число 50, отображаемое в поле **Expression**. В дальнейшем это значение может быть изменено в режиме ручной настройки или автоматической оптимизации.

Значение параметра отображается также на вкладке **Parameter Value** в поле **Value**. Здесь же присутствуют переключатели способа изменения переменной **Continuous** и **Discrete**. Включенная опция **Continuous** подразумевает плавное изменение значения данной переменной, включенная опция **Discrete** говорит о возможности пошагового изменения переменной. В поле **Mode** представлены два переключателя режима настройки: флаг **Tune** свидетельствует о назначении данной переменной на ручное изменение с помощью инструмента **Tuner**, а флаг **Optimize** — о назначении переменной на изменение в режиме автоматической оптимизации. В поле **Constraints** задается принудительный режим выбора границ изменения значения переменной, а также сами границы. При выключенной опции **Constrained** поля **Lower bound** (нижняя граница) и **Upper bound** (верхняя граница) остаются неактивными, а сами границы выбираются автоматически, причем нижняя граница рассчитывается как половина от текущего значения переменной, а верхняя граница — как ее удвоенное значение. Включим переключатели **Tuner**, **Optimize** и **Constrained**, введем границы изменения 10 и 100, нажмем кнопку <Ok>. Вкладка **Variables** примет вид, показанный на рис. 1.24. В верхней части вкладки будет отображен единственный модуль проекта, содержащий независимые переменные, — блок глобальных выражений. В нижней части вкладки в таблице появится единственная строка. В первом столбце имеются активные кнопки **T**, **O**, **C**, соответствующие включенным опциям **Tuner**, **Optimize** и **Constrained** в окне редактирования выражения. Далее приводится имя модуля, содержащего данную переменную, а также имя самой переменной, ее текущее значение и границы изменения. Изменить любое из этих значений можно непосредственно здесь, щелкнув в нужной клетке левой кнопкой мыши. После нажатия клавиши <Ok> новое значение переменной сразу же отобразится в соответствующем выражении в блоке глобальных выражений.

На вкладке **Statistics** задаются основные параметры для использования данной переменной при статистическом анализе. В поле **Mode** имеются опции, разрешающие использование переменной в статистическом анализе **Use statistics** и оптимизации схемы с точки зрения выхода годных изделий **Optimize yield**. В поле **Distribution** задается закон распределения плотности вероятности: равномерный (**Uniform**), нормальный (**Normal**) и специальный (**Model**). При включенной опции

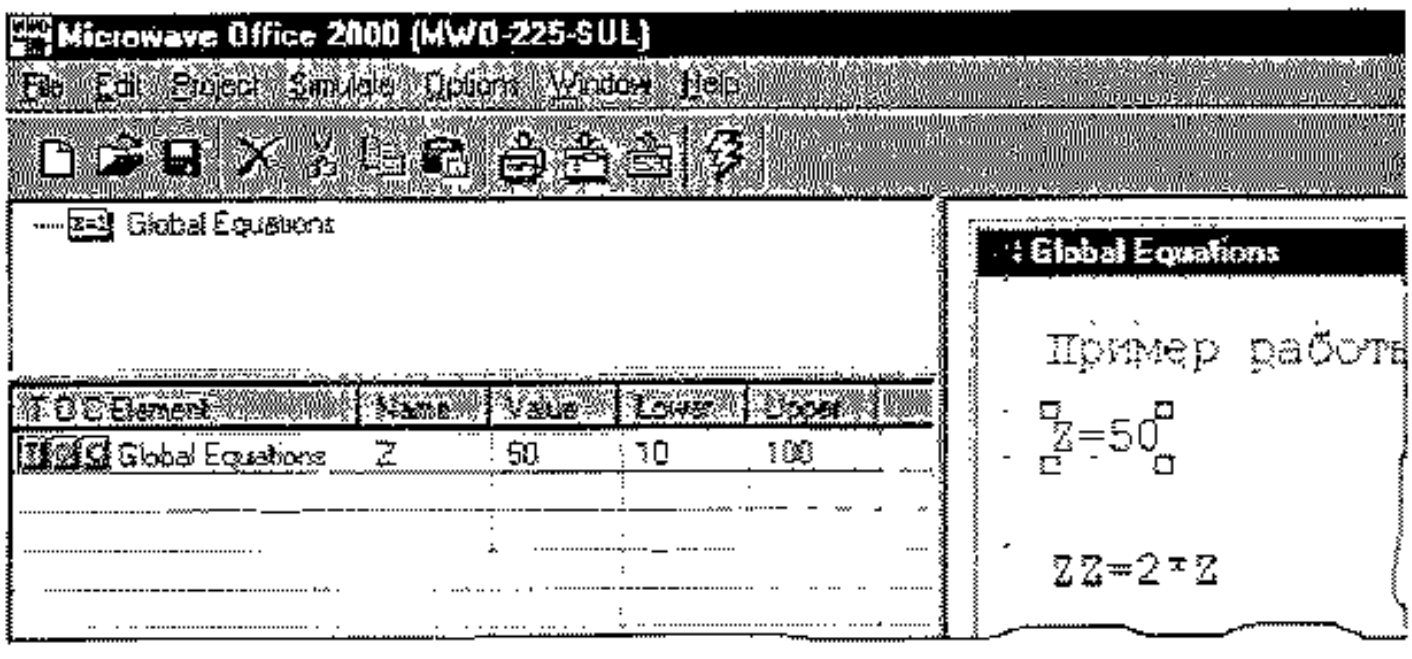


Рис. 1.24. Вид вкладки **Variables** при редактировании глобального выражения

Uniform в поле **Variation** задается диапазон изменения значения в явном виде или в процентах от текущего значения (при включенном флаге **Tolerance in %**). При включенной опции **Normal** в поле **Variation** задается среднеквадратичное отклонение от текущего значения переменной, которое также может быть выражено в процентах (при включенном флаге **Std. Dev. in %**). Тип специального закона распределения задается в поле **Model**.

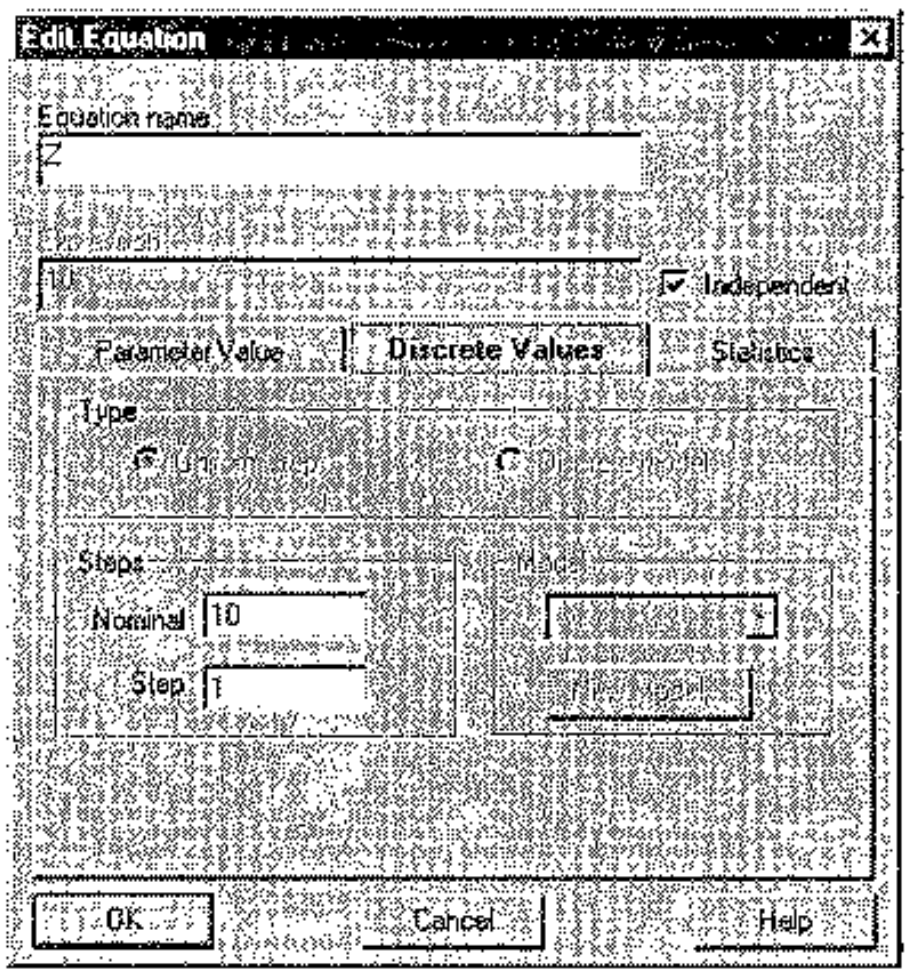


Рис. 1.25. Вкладка **Discrete Values** в окне редактирования глобального выражения

Включим опцию **Constrained** в поле **Constraints** и зададим значения **Lower bound** и **Upper bound** (например, 10 и 100 соответственно), затем включим опцию **Discrete** на вкладке **Parameter Value** в поле **Value**. В окне добавится вкладка **Discrete Values**, показанная на рис. 1.25. Здесь в поле **Type** задается способ изменения переменной: с одинаковым шагом (**Uniform step**) или специальный (**Discrete model**), в поле **Steps** задается начальное значение (**Nominal**) и шаг изменения (**Step**). Параметры специального режима изменения переменной задаются в поле **Model**.

Чтобы превратить независимое глобальное выражение в зависимое, необходимо выключить опцию **Independent**, после чего все вкладки заблокируются, а текстовое поле **Expression** станет активным. Сюда следует ввести формулу, по которой будет рассчитываться указанная переменная, и нажать кнопку <**Ok**>.

Редактирование зависимого глобального выражения

Отредактируем третье выражение, для чего выделим его с помощью мыши и выполним команду **Edit — Edit Equation**. На экране появится окно *Edit Equation*, изображенное на рис. 1.26, обе вкладки которого будут неактивны. Здесь опция **Independent** выключена, что говорит о том, что результат данного выражения рассчитывается из других переменных (текстовое окно **Expression** является активным). Изменим формулу в этом окне (правую часть выражения) на 3*Z и нажмем <**Ok**>. Пересчитаем выражения, выполнив команду **Simulate — Update Equations** или нажав клавишу <**F6**>, после чего в четвертом выражении появится число 150.

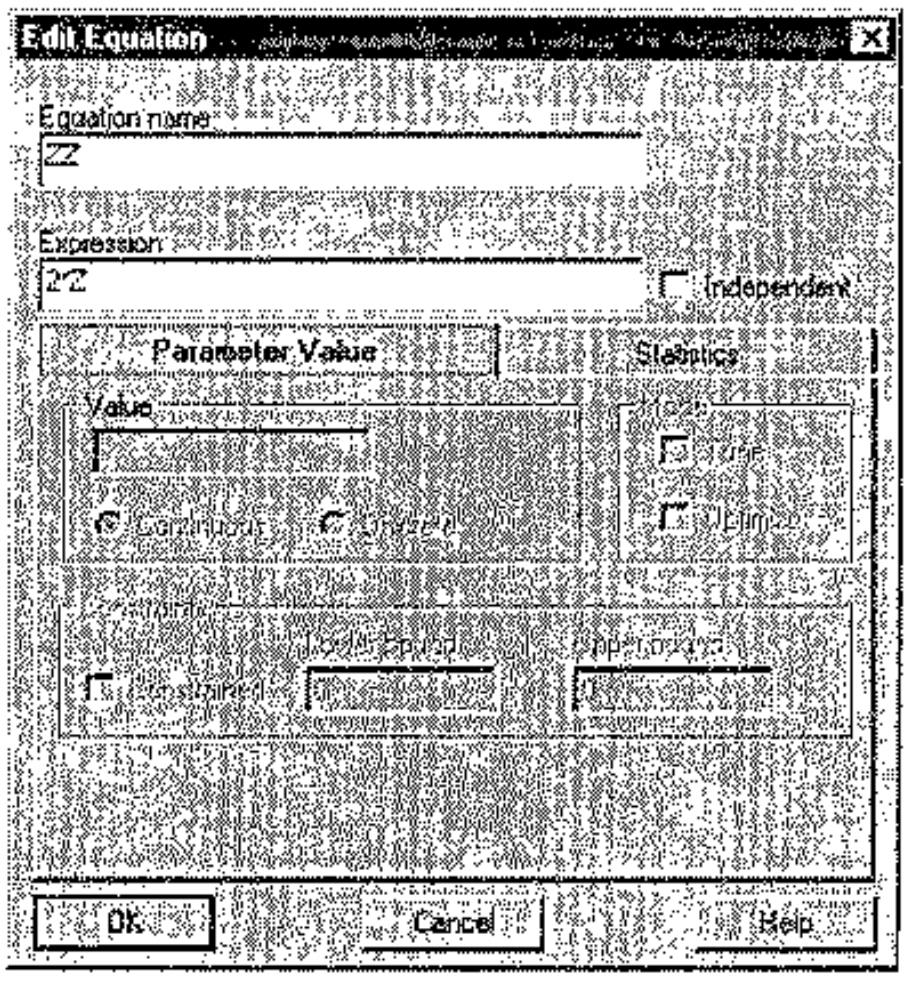


Рис. 1.26 Окно редактирования зависимого глобального выражения

1.11. Работа с внешними файлами данных

Как уже говорилось ранее, в проекте можно использовать внешние файлы данных, содержащие как параметры моделей различных устройств в стандартном формате Touchstone, так и просто данные, записанные определенным образом (отличным от стандарта Touchstone).

Файлы параметров моделей, как правило, используются в случае, если в проекте применяется некое готовое изделие, например, СВЧ-транзистор, в сопроводительной документации к которому производитель приводит его точно измеренные параметры. Следует отметить, что почти на все импортные электронные компоненты можно без труда получить соответствующие модели, обратившись в организацию-производитель или найдя параметры в Интернете. Более того, в последнее время широкое распространение получил стандартный промышленный формат построения библиотек компонентов XML, благодаря которому пользователи получают доступ через Internet к библиотекам элементов, расположенным непосредственно на серверах компаний-производителей. Таким образом, внешние файлы данных используются в случае, когда в проекте присутствует некое устройство, описанное как «черный ящик» с заранее измеренными параметрами. Эти параметры могут использоваться как для последующего расчета более сложной схемы, так и для сравнения характеристик рассчитанного и реального устройства.

Добавление внешних файлов данных может производиться вручную и автоматически. Автоматическое добавление происходит при введении в схемотехнический модуль модели элемента из библиотеки моделей в формате **Touchstone Data**, расположенной на вкладке **Elements**, и его мы рассмотрим позднее. Подробнее остановимся на ручном способе.

Добавить в проект внешний файл данных можно выполнив команду **Project — Add Data File — Import Data File** или **Project — Add Data File — Link to Data File**, а также с помощью контекстного меню, для чего щелкнем правой кнопкой мыши на значке Data Files. На экране появится меню с двумя командами **Import Data File** и **Link to Data File** (рис. 1.27). Первая команда выполняет внедрение файла в проект раз и навсегда, после чего он будет храниться непосредственно в проекте. Вторая команда обеспечивает связывание проекта с внешним файлом, который хранится на диске вашего компьютера вне проекта и может быть использовано совместно с другими приложениями.

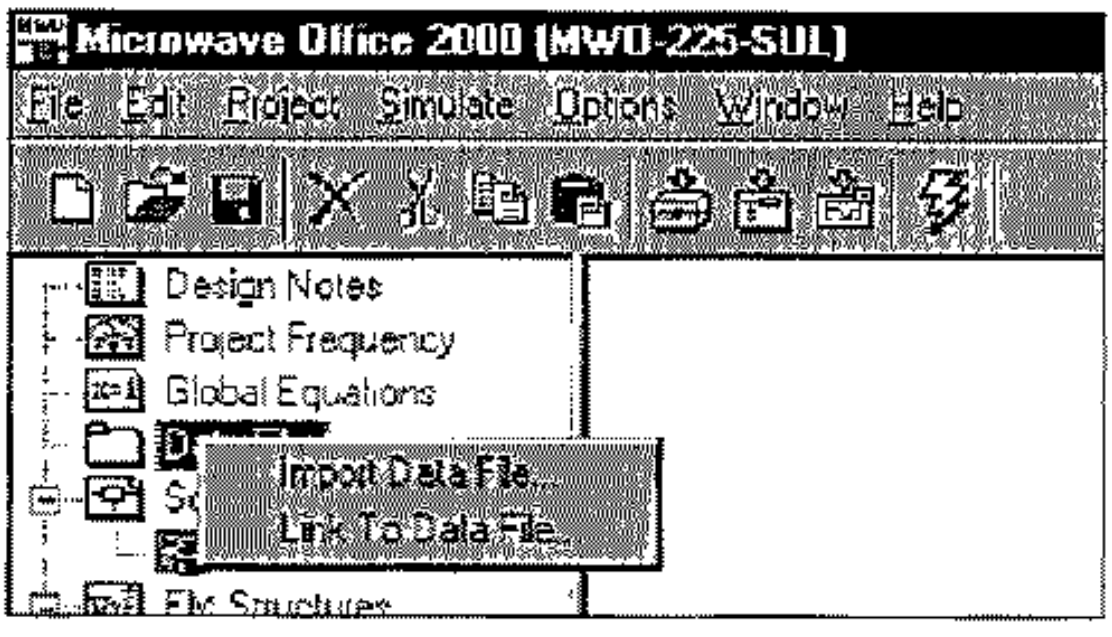


Рис. 1.27 Добавление в проект внешнего файла данных

Импорт внешнего файла данных

Выберите команду **Project — Add Data File — Import Data File**, после чего на экране появится окно *Открытие файла*, изображенное на рис. 1.28. Далее выберите в списке доступных расширений файлов опцию **Touchstone Files (*.g??, *.h??, *.s??, *.y??, *.z??)** и откройте файл **Nec710.s2p**, находящийся в папке C:\MWO2000\Examples\Amplifiers. На дереве проекта в группе использования внешних файлов данных появится новый объект Nec710. Выполним двойной шелчок левой кнопкой мыши на этом объекте и на рабочем столе пакета MWO откроется окно *Nec710* (рис. 1.28).

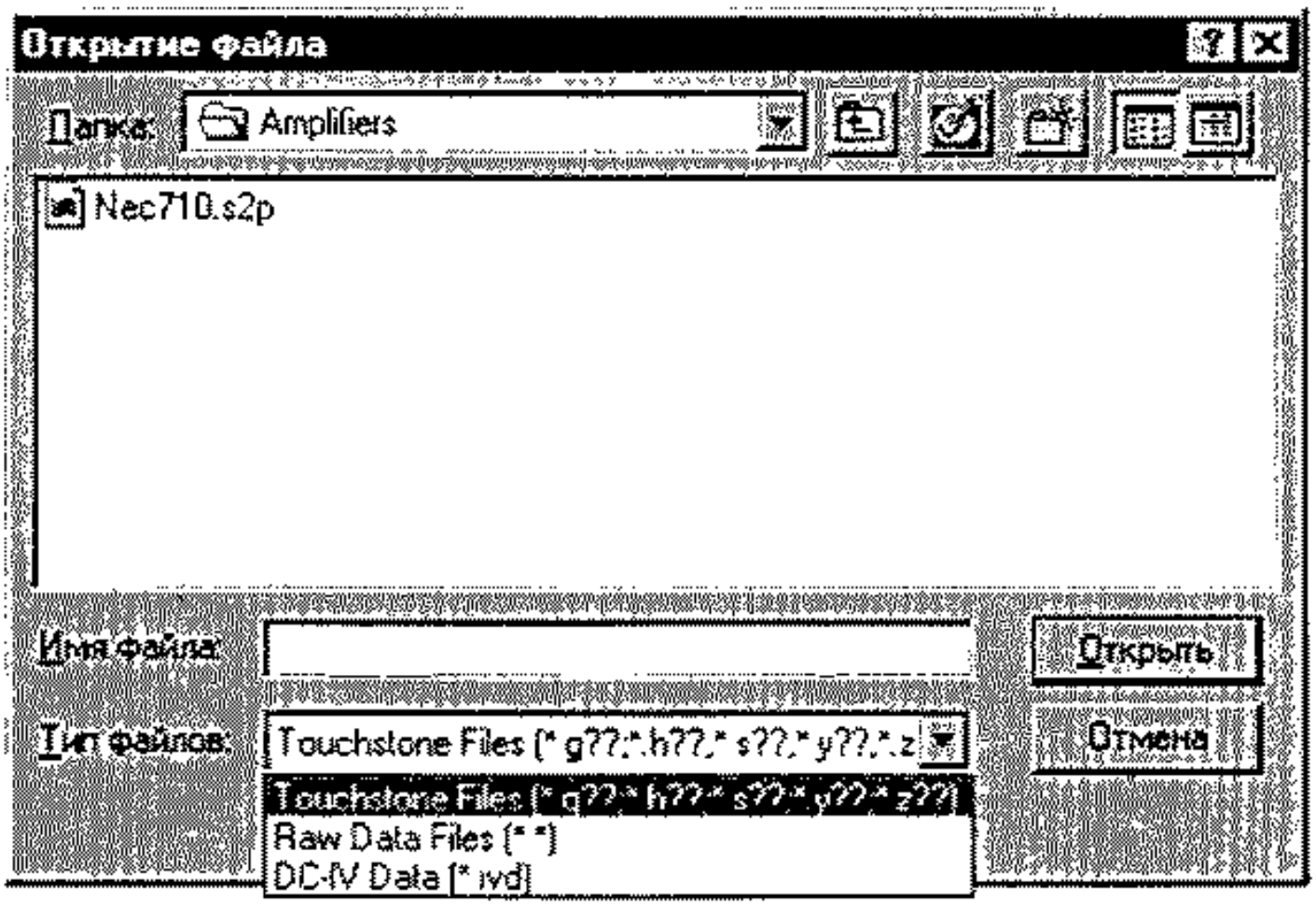


Рис. 1.28. Выбор внешнего файла данных

Легко видеть, что данный файл содержит две таблицы параметров многополюсника, определенных в некотором диапазоне частот. Попробуем разобраться, что за данные представлены в этом файле. Файл, который мы загружали, назывался Nec710.s2p. Буква «s» в расширении имени файла говорит нам о том, что в данном файле содержатся S-параметры (параметры матрицы рассеяния). Цифра «2» здесь свидетельствует о том, что описываемый многополюсник имеет 2 порта (т. е. является четырехполюсником). Буква «p» является сокращением от слова «parameters» и может быть опущена.

Однако расширение файла является лишь вспомогательным признаком, позволяющим систематизировать работу с обширными библиотеками файлов данных, основная же информация о типе и формате записи параметров содержится в заголовке файла в строке

```
# GHZ S MA R 50
```

Здесь «#» является признаком заголовка, «GHz» обозначает размерность частоты (в данном случае ГГц), «S» говорит о том, что это последовательность S-параметров (S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}), «MA» свидетельствует, что комплексные значения

S-параметров представлены в виде пар модуль-фаза (фаза всегда в градусах), а параметр «R 50» задает сопротивление нормировки. Таким образом, в следующей строке файла представлены S-параметры:

2.000	0.98 −29	3.23 157	0.06 72	0.65 −16
Частота в ГГц	Модуль и фаза S_{11}	Модуль и фаза S_{21}	Модуль и фаза S_{12}	Модуль и фаза S_{22}

После строки с частотой 26 ГГц (рис. 1.29) идет строка комментария, начинающаяся с символа «!» и сообщающая, что ниже следует таблица шумовых параметров.

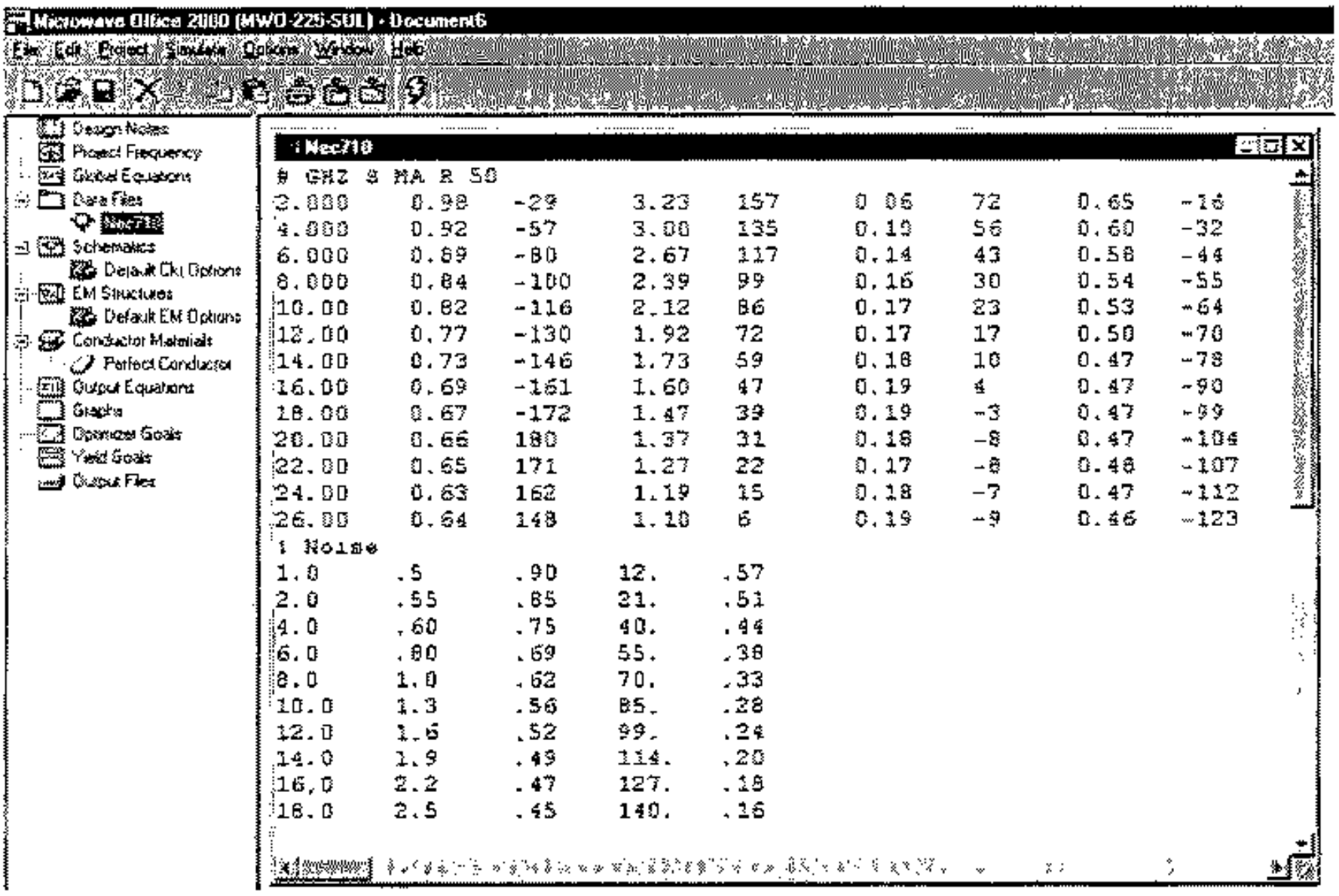


Рис. 1.29. Просмотр содержимого внешнего файла данных

Окно в котором отображается содержимое внешнего файла данных, является еше и универсальным текстовым редактором, позволяющим редактировать его содержимое. При наведении на это окно указатель мыши принимает вид стандартного курсора текстового редактора. Щелкнем левой кнопкой мыши в любом месте окна, и в этом месте появится мигающий курсор, показывающий текущую позицию для ввода текста. Состав панели инструментов относительно базовой не изменился, но в меню команд появились разделы **Edit** и **Search** (рис. 1.30).

Дополнительные возможности редактирования предоставляет контекстное меню, появляющееся при нажатии правой кнопки мыши в пределах окна просмотра внешнего файла данных. Состав этого меню показан на рис. 1.31, а подробное описание команд было представлено в табл. 1.3.

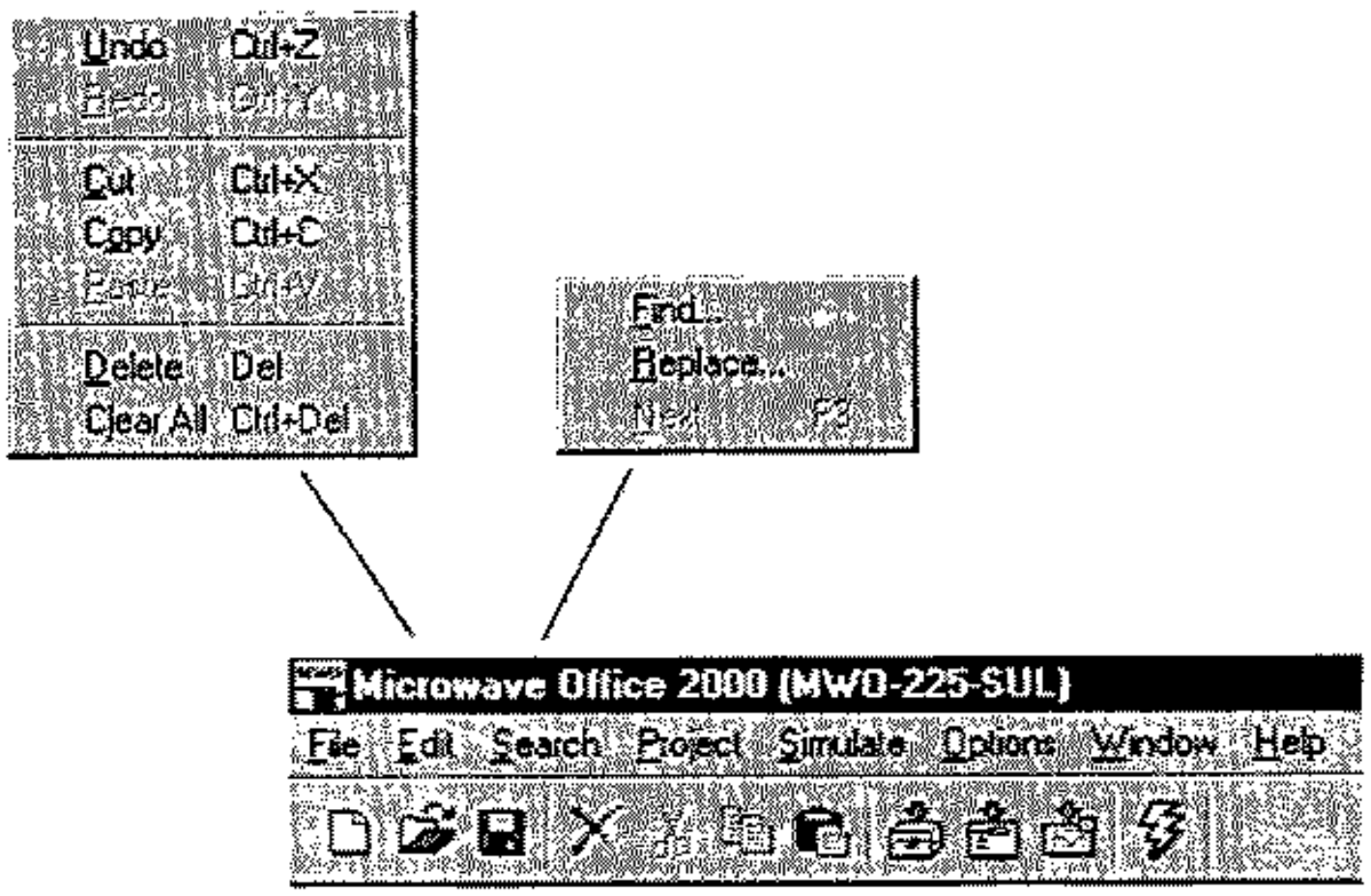


Рис. 1.30. Состав меню команд при редактировании внешнего файла данных

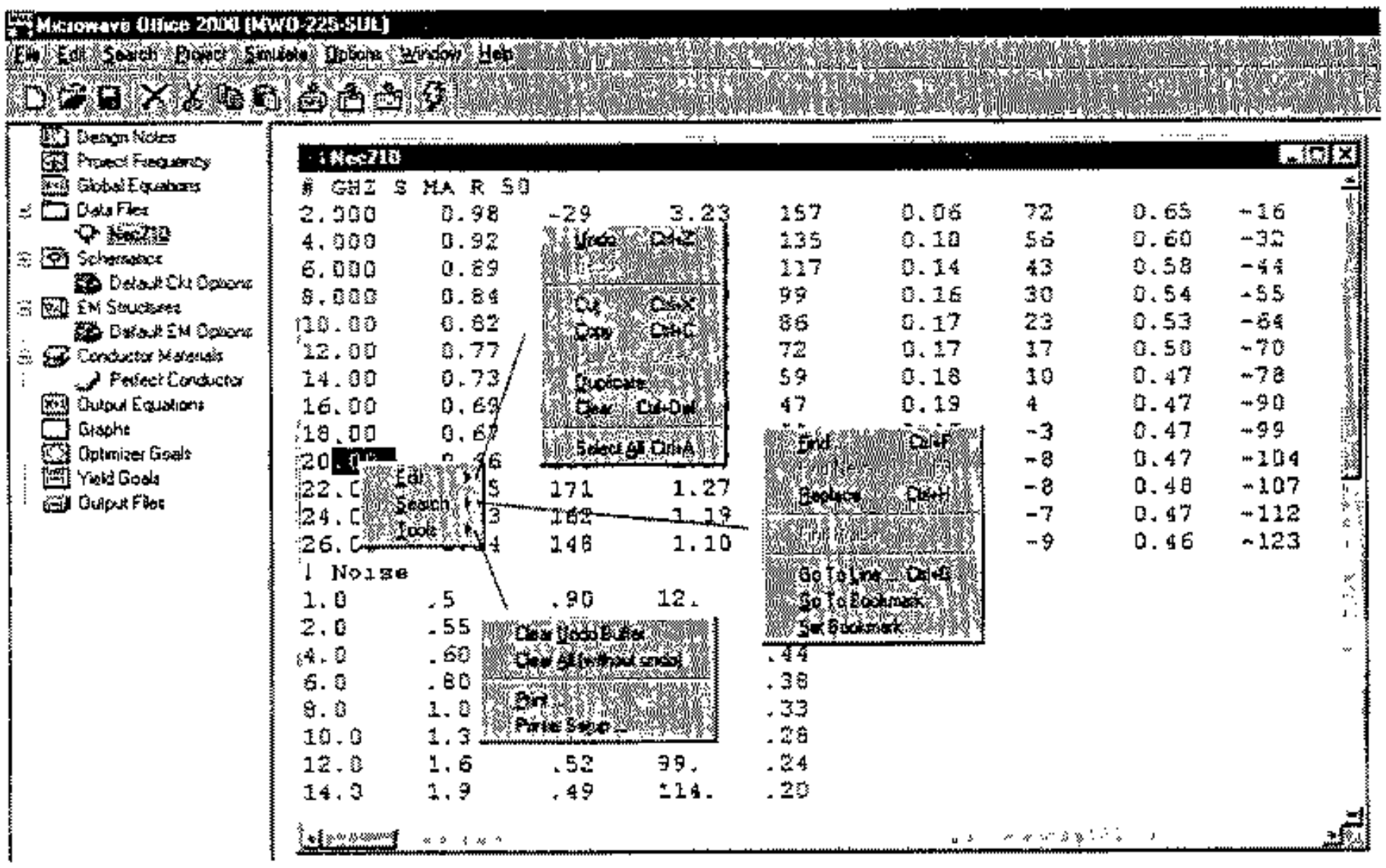


Рис. 1.31. Состав контекстного меню при редактировании внешнего файла данных

Связь с внешним файлом данных. Выберите команду **Project — Data File — Link To Data File**, после чего на экране появится окно *Открытие файла*. Далее выберите в списке доступных расширений файлов опцию **Touchstone Files (*.g??, *.h??, *.s??, *.y??, *.z??)** и откройте файл **Nec710.s2p**, находящийся в папке **C:\MWO2002\Examples\Amplifiers**. На дереве проекта в группе использования появится новый объект Nec710 [C:\MWO2000\Examples\Amplifiers\Nec710.s2p]. О том, что

это связанный файл, говорит адрес, записанный в квадратных скобках. После двойного щелчка левой кнопкой мыши на этом объекте на рабочем столе пакета Microwave Office откроется окно *Nec710 [C:\MWO2002\Example\Amplifiers \Nec710s2p]* аналогично тому, как это было при импорте внешнего файла данных. Это окно также работает как текстовый редактор, но сделанные изменения можно теперь сохранять как непосредственно в файле источника с помощью команды **File — Save File**, так и в новом файле с помощью команды **File — Save File As**.

Главное отличие в использовании импортированного внешнего файла данных от связанного состоит в том, что содержимое импортированного файла считывается только однажды и далее хранится непосредственно в проекте. При связывании содержимое внешнего файла данных загружается в проект при запуске его на расчет, а все остальное время данные хранятся в отдельном файле на жестком диске компьютера. Файл можно корректировать с помощью любого текстового редактора.

Практическое применение этой функции может быть следующим. Вы изготовили макет СВЧ фильтра и измеряете его S-параметры с помощью векторного анализатора цепей. Некоторое приложение считывает S-параметры из анализатора цепей через стандартный интерфейс IEEE-488 и записывает на жесткий диск компьютера в файл стандарта Touchstone. С другой стороны, вы смоделировали этот же фильтр с помощью программы MWO. Если в проект внедрить связанный внешний файл с измеренными S-параметрами макета фильтра, то на одном графике можно наблюдать и рассчитанные, и измененные характеристики фильтра. Более того, если включить опцию **Options — Settings — Auto Update Files**, то считываемая из анализатора цепей характеристика будет постоянно обновляться, по мере обновления содержимого внешнего файла вспомогательного приложения.

Общие правила записи файлов стандартном формате Touchstone. Файлы в стандартном формате Touchstone могут иметь расширения .g??, .h??, .s??, .y??, .z??. Здесь первая буква расширения обозначает тип приводимых в файле параметров, а два последних символа расширения могут быть произвольными. Тем не менее, в качестве второго и третьего символов в расширении файла в формате Touchstone принято использовать цифры, обозначающую количество портов описываемого многополюсника. Для четырехполюсника это цифра 2, для шестиполюсника — 3 и т. д.

В любом месте файла данных могут быть приведены комментарии, в которых может содержаться информация о дате создания фала, о правах на использование данного файла и многое другое. Признаком комментария является наличие символа «!» в начале строки.

Таблице параметров должен предшествовать заголовок, подробно описывающий тип и формат параметров, приведенных в файле. Признаком заголовка является символ «#» в начале строки. Общий вид строки заголовка можно записать как:

[размерность частоты] [тип параметров] [формат параметров]
[нормировочное сопротивление]

Размерность частоты задается ключевыми словами: **HZ**, **KHZ**, **MHZ**, **GHZ** и **THZ**, что соответствует Гц, кГц, МГц, ГГц и ТГц.

Тип параметров многополюсника определяется буквами: **G**, **H**, **S**, **Y** и **Z**, что соответствует описанию многополюсника с помощью G-, H-, S-, Y- и Z-матриц. Заметим, что описание с помощью G- и H-матриц возможно только для устройств с двумя портами (четырехполюсников).

Формат записи параметров описывается ключевыми словами: **MA**, **DB** и **RI**. При использовании ключевого слова **MA** комплексное значение того или иного параметра описывается парой чисел модуль-фаза, причем фаза всегда указывается в градусах, при использовании ключевого слова **DB** — также парой чисел модуль-фаза, но модуль приводится в логарифмическом масштабе (т. е. как $20\log_{10}(x)$), при использовании ключевого слова **RI** — парой чисел, соответствующей значениям действительной и мнимой частям комплексного числа.

Нормировочное сопротивление является необязательным параметром, имеет смысл только для таблиц S-параметров и задается ключевым словом R ##, где ## — значение сопротивления в Омах. В случае отсутствия этого параметра в заголовке, по умолчанию берется значение 50 Ом.

Параметры всегда записываются построчно, причем в начале строки присутствует частота измерения. В общем случае порядок записи элементов матрицы — сначала по строкам, затем по столбцам (**Row major**), однако для устройств с двумя портами (четырехполюсников) порядок записи обратный — сначала по столбцам, затем по строкам (**Column major**). Если в строке присутствует более четырех пар параметров, то запись необходимо продолжить на следующей строке. То есть для четырехполюсника матрица S-параметров будет записана в виде:

```
f1 ReS11 ImS11 ReS21 ImS21 ReS12 ImS12 ReS22 ImS22
f2 ReS11 ImS11 ReS21 ImS21 ReS12 ImS12 ReS22 ImS22
f3 ReS11 ImS11 ReS21 ImS21 ReS12 ImS12 ReS22 ImS22
```

Для шестиполюсника матрицу S-параметров следует записывать в виде:

```
f1 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS13 ImS13
   ReS21 ImS21 ReS22 ImS22 ReS23 ImS23
   ReS32 ImS32 ReS32 ImS32 ReS33 ImS33
f2 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS13 ImS13
   ReS21 ImS21 ReS22 ImS22 ReS23 ImS23
   ReS32 ImS32 ReS32 ImS32 ReS33 ImS33
f3 ReS11 ImS11 ReS12 ImS12 ReS13 ImS13
   ReS21 ImS21 ReS22 ImS22 ReS23 ImS23
   ReS32 ImS32 ReS32 ImS32 ReS33 ImS33
```

В качестве разделителя чисел в стоке в файле формата Touchstone используются пробелы или несколько повторяющихся пробелов. Кроме того в файле может присутствовать неограниченное количество пустых строк.

Работа с нестандартными внешними файлами. В проекте можно использовать текстовые файлы, содержащие данные, записанные в формате, отличном от формата Touchstone. Такие файлы могут иметь любое расширение, но на формат записи данных в них накладываются некоторые ограничения, которые устанавливаются в окне *Specify Data File Format*, появляющемся после выполнения команды **Options — Settings — Raw Data File Format**. Отметим, что в таких файлах не может быть комментариев.

Нестандартные внешние файлы можно как импортировать, так и связывать, аналогично файлам в стандарте Touchstone, для чего необходимо выполнить команды **Project — Data File — Import Data File** или **Project — Data File — Link To Data File**, соответственно. Далее в окне, изображенном на рис. 1.28, из списка доступных расширений необходимо выбрать опцию **Raw Data Files (*.*)**, выделить нужный файл и нажать кнопку <**Открыть**>. После этого с нестандартными внеш-

ними файлами можно выполнять все те же операции, которые допускаются для файлов в стандарте Touchstone.

Дополнительные действия с внешними файлами данных. Используемые в проекте внешние файлы данных можно удалять, переименовывать и экспортировать. Для этого необходимо выбрать нужный объект в группе использования внешних файлов и нажать правую кнопку мыши, после чего появится контекстное меню, изображенное на рис. 1.32. Назначение команд этого меню приведено в табл. 1.4.

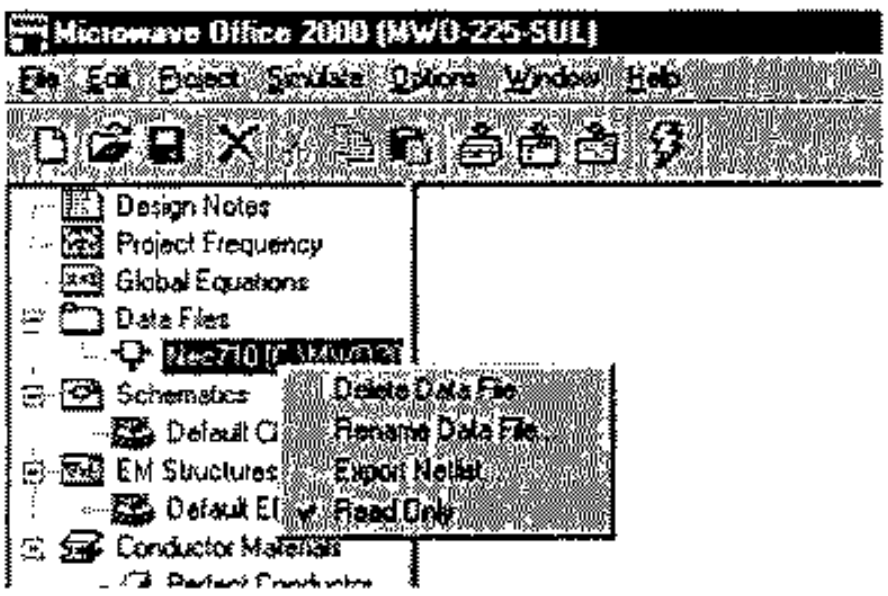


Рис. 1.32. Операции с внешними файлами данных

Таблица 1.4. Команды меню MWO

Команда меню	Кнопка	Описание
Delete Data File		Удалить файл данных из проекта
Rename Data File		Переименовать файл данных в проекте
Export Netlist		Выполнить экспорт файла
Read Only		Разрешить только чтение файлов (для связанных файлов)

Чтобы переименовать файл данных, выполним команду **Rename Data File**. Появится окно *Rename Data Source*, (рис. 1.33). Введите новое имя и нажмите кнопку <**Ok**>. Заметим, что изменение имени произойдет только внутри проекта, а на имени файла источника это никак не отразится. Чтобы синхронизировать ссылки на этот файл необходимо включить опцию **Synchronize references**.

Команда **Export Netlist** контекстного меню работает аналогично команде **File — Save File As** и позволяет сохранить выбранный файл на жесткий диск компьютера под другим именем.



Рис 1.33. Переименование внешнего файла данных

Глава 2
Редактор топологии EMSight

Проект MWO состоит из частей, описанных как электрические схемы, подсхемы, текстовые файлы, а также блоков, анализируемых, используя электродинамический метод расчета. Эта особенность MWO переводит проектирование СВЧ устройств на более высокий качественный уровень, по сравнению с программами Touchstone, Libra, MMICAD, и др., использующими методы, основанные на объединении матриц, каждая из которых рассчитывается методами теории цепей.

Если в проекте используется только символическая схема, то в программе MWO также применяются методы теории цепей (или метод Олинера, если в моделях учитываются неоднородности, неизбежно имеющиеся в местах соединения элементов). Другой метод расчета, используемый в MWO для СВЧ структур, является электродинамическим и реализован в подпрограмме, имеющей название **EMSight**. В этой главе мы покажем, как создается часть схемы, рассчитываемая как EM структура.

Для создания и редактирования составляющих проекта вы должны дважды нажать на соответствующем пункте в дереве проекта или использовать правую кнопку мыши (рис. 2.1).

Чтобы создать новую структуру, анализируемую электродинамическим методом моментов, выбирается команда **New EM Structure**. После этого появляется трехмерный объем, в котором задаются материалы заполнения этого объема и слои, на которых можно нанести все необходимые металлические формы.

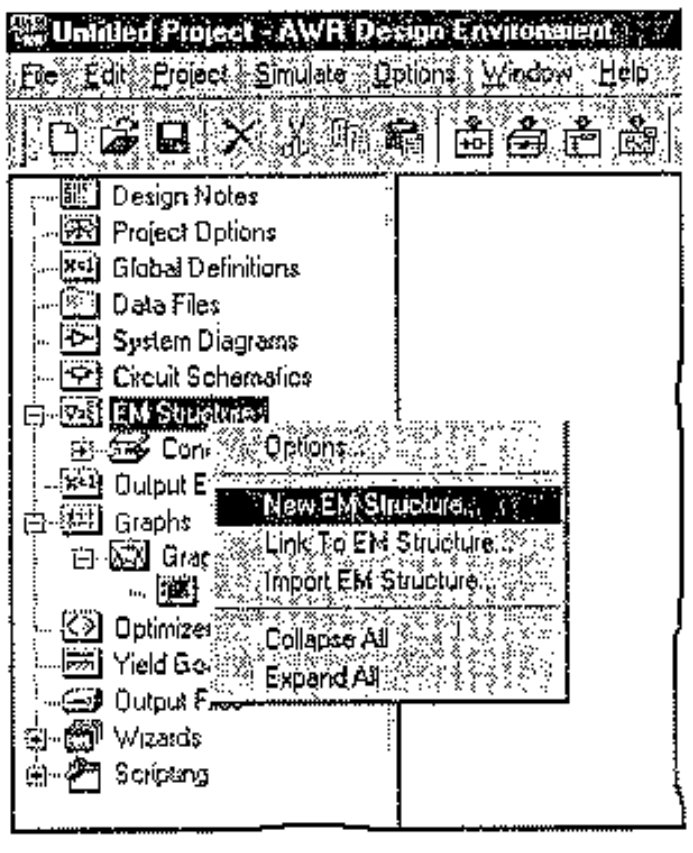


Рис. 2.1. Создание новой EM структуры как части проекта, в которую входят схемы, подсхемы

2.1. Редактирование геометрии структуры

EMSight имеет графический редактор, в котором возможен просмотр структур в двух- и трехмерном виде.

Двухмерный просмотр топологии



На рабочем столе могут быть открыты несколько 2-мерных видов, если выбрать команду **View>2D View** из меню или из инструментальной линейки.

Трехмерный просмотр конструкции



Просмотр трехмерного вида выполняется командой **View>3D View**. Возможна активизация 2- и 3-мерного просмотра той же самой структуры. Объект в трехмерном просмотре можно вращать, щелкая мышью в поле объекта и перемещая ее.

Представление конструкции связано с понятиями диэлектрических слоев и уровней. Причем номера слоев и уровней (Layer) одинаковы при просмотре слоя сверху, как принято при двумерном просмотре топологии. Каждый нарисованный слой соответствует одному из диэлектрических слоев в металлическом корпусе. Активный слой — это текущий слой, на котором могут наноситься металлические структуры произвольной формы. Диэлектрический слой, который соответствует активному слою чертежа, окрашен при трехмерном просмотре сиреневым цветом.

Уровень 1 — верхняя крышка корпуса (рис. 2.2, 2.4). Номера уровней и соответствующих им слоев увеличиваются при продвижении к нижним слоям. Число слоев и толщина каждого слоя задаются в диалоге **Substrate Information** (информация о подложке), к которому обращаются из меню **Structure>Enclosure**. Для очень тонкого или очень толстого слоя в этом меню можно установить более удобный масштаб просмотра.

2.2. Редактирование параметров корпуса

Реквизиты корпуса включают габариты и заполнение (структуру) прямоугольного корпуса. Чтобы изменить его габариты, сделайте двойной щелчок на пункте **Enclosure** в дереве проекта. Появляется диалог **Substrate Information**, в котором задаются и редактируются параметры корпуса, слоев, и граничных условий (см. рис. 2.2). Диалоговое окно **Subsrate Information** имеет 3 закладки:

- Enclosure (замыкающий корпус);
- Dielectric Layers (диэлектрические слои);
- Boundaries (границы).

Размер корпуса задается на первой странице диалога **Enclosure**. Общая высота корпуса не устанавливается, потому что она определяется суммарной толщиной всех диэлектрических слоев, которые устанавливаются на странице Dielectric Layers в диалоге **Substrate Information.**

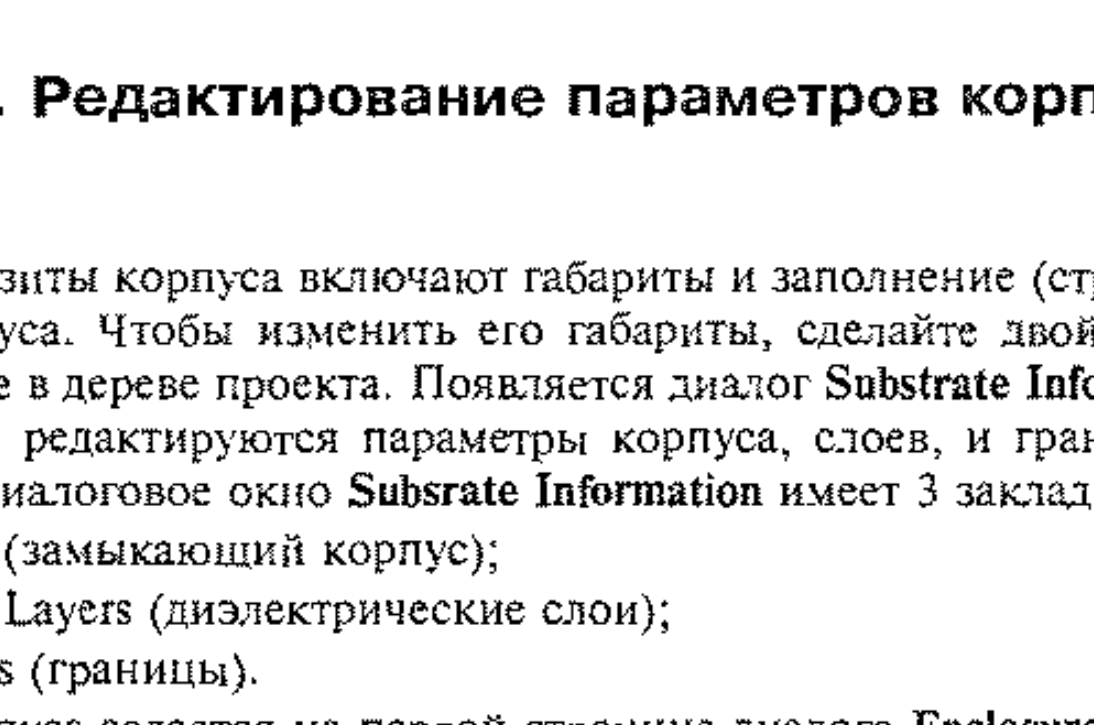


Рис. 2.2 Каждый слой разбит на 32 ячейки по координатам X и по Y (размер ячейки 20×20 мкм). Box Dimensions — размеры корпуса, X-Dimension — размер по оси X; Y-Dimension — размер по оси Y; X-Division — количество разбиений по оси X; Y-Division — количество разбиений по оси Y; Cell Size — размер ячейки в единицах длины, устанавливаемой в блоке Units

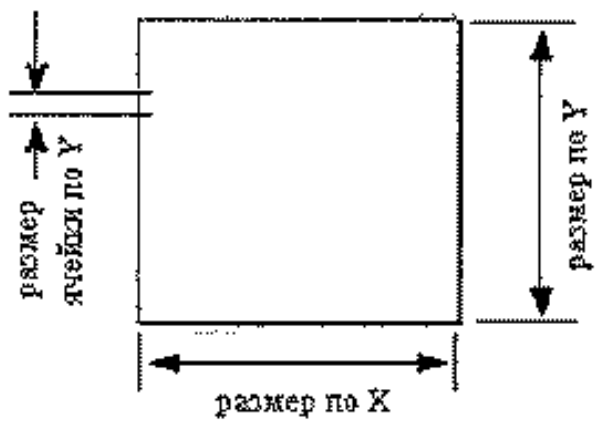


Рис. 2.3. Нанесение узлов сетки на слое (16 делений по осям X и Y)

Все формы, металлические и диэлектрические, которые заданы в **EMSight**, должны совпасть с сеткой чертежа. Вы можете вводить формы, которые не совпадают с этой сеткой, но после отпускания мыши или при перетаскивании формы **EMSight** автоматически совместит координаты формы с основной сеткой. Густота сетки определяется числом делений в направлениях X и Y. Моделирование выполняется быстрее, если число делений будет каким-то числом в степени 2 (т. е. равным 32, 64, 128 и т. п.). Если используется режим **FFS** (Fast Frequency Sweep), число делений должно быть четным. Число делений и размеры ячейки могут не быть одинаковыми по направлениям X и Y (рис. 2.3). Размер ячейки в каждом направлении соответствует размеру корпуса в этом же направлении, разделенному на число делений. Важно отметить, что для всех слоев используется одна и та же сетка.

Размер ячейки, который должен использоваться для определенной задачи, определен конкретным числом разбиений. Ячейки с меньшими размерами обеспечивают более точное моделирование, но требуют больших затрат времени на решение. Первоначально рекомендуется использовать самый большой размер ячейки, который достаточно точно аппроксимирует геометрию. Далее, на последующих этапах моделирования, размер ячеек можно уменьшать, увеличивая число разбиений корпуса.

2.3. Диэлектрические слои

Диэлектрические слои устанавливаются в закладке **Dielectric Layers**. Корпус содержит минимум два диэлектрических слоя. Самый верхний диэлектрический слой — Layer 1. Связь между уровнями чертежа и диэлектрическими слоями показана на рис. 2.4.

Часто верхний слой задается как воздушный слой, хотя это необязательно. К параметрам диэлектрических слоев относятся его толщина (Thickness), относительная диэлектрическая проницаемость (ε_r), тангенс диэлектрических потерь (Loss Tangent).

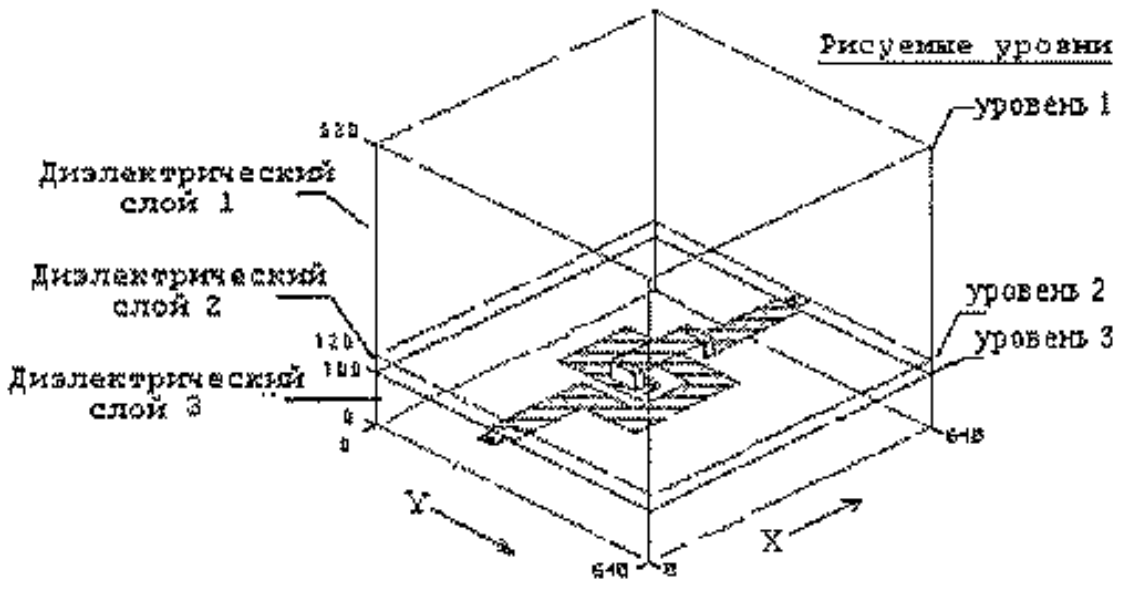


Рис 2.4. Соотношение между слоями и уровнями на чертеже конструкции

Параметры подложки можно найти в справочниках. В предварительных расчетах можно использовать данные, приведенные в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Материалы диэлектрической подложки

Материал	ε_r	Тангенс диэлектрических потерь
Воздух	1.0	0
Поликор	9.8	< 0.0015
Кварц	3 78	< 0.0001
Кремний	11.9	~ 0.003
Арсенид галлия	12.9	0.001
RT Duroid 5880	2,20	< 0.0009
RT Duroid 5870	2.33	0 0012
RT Duroid 6006	6.15	0.0019

Потери электромагнитной энергии в конструкции зависят как от потерь в подложке, так и от потерь в металлических проводниках. Неидеальность границ корпуса можно установить в заклалке **Boundaries**. Эта закладка (рис. 2.5) имеет две части, задающие модели верха и модели нижней границы корпуса.

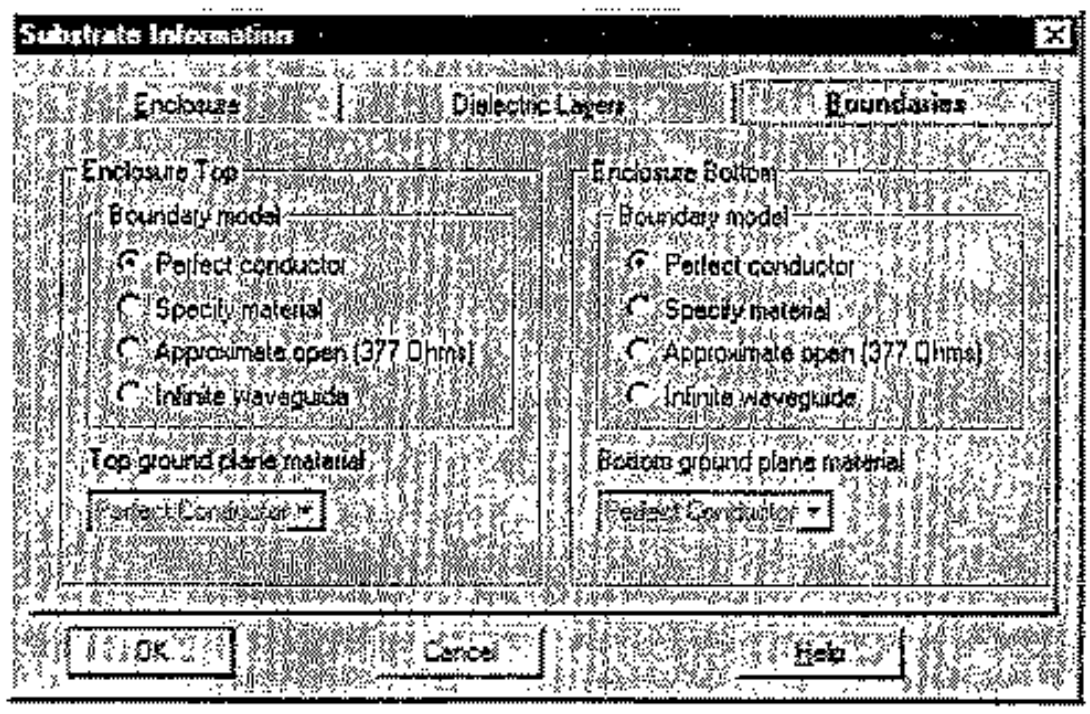


Рис 2.5. Диалоговое окно установки границ вверху и внизу корпуса

Опция ***Perfect conductor (Идеальный проводник)*** моделирует верхнюю или нижнюю границы корпуса как идеальный проводник без потерь.

Опция ***Specify material (Спецификация материала)*** позволяет задать свойства материала подложки, аналогично тому, как это делается для проводящих материалов (см. рис. 2.6). Сначала в проекте создают материал с желаемыми параметрами. Как только материал определен, его можно использовать в проекте: например, он может быть назначен границе корпуса, выбирая его в **Draw > Edit Shape Props** из списка доступных материалов.

Использование опции ***Approximate open*** (открытый конец) эквивалентно заданию границы как материала, который имеет удельное сопротивление постоянному току 377 Ом, что приблизительно равно волновому сопротивлению свободного

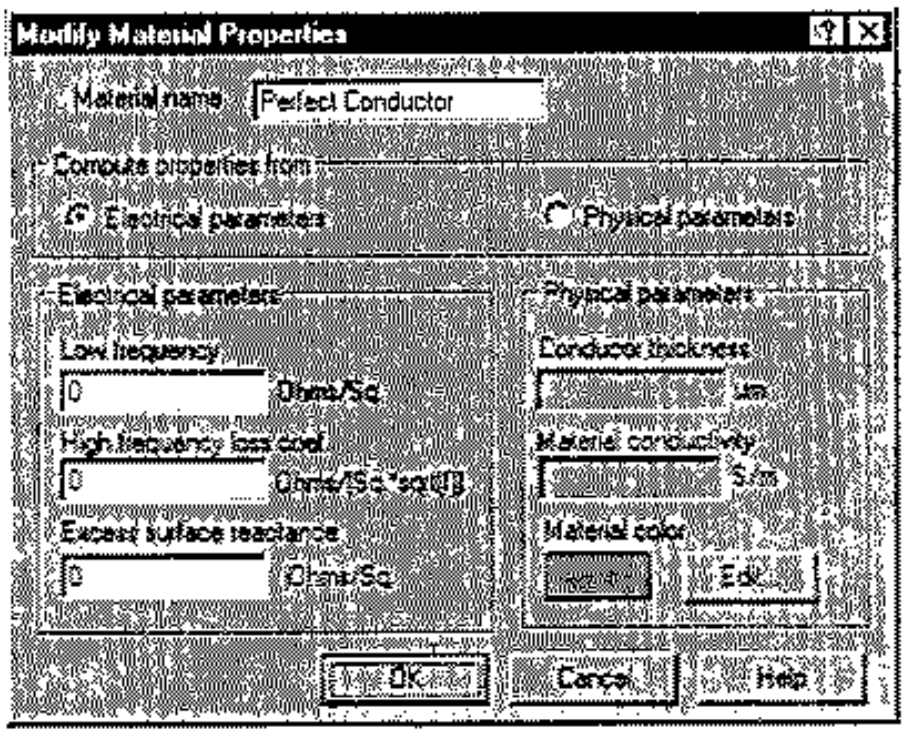


Рис. 2.6. Диалоговое окно установки и модификации свойств материала

пространства. При моделировании открытой границы верхняя крышка должна быть расположена достаточно далеко от схемы, чтобы в любой точке поля, излучаемого схемой, не было значительного взаимодействия с границей. Использование для границы сопротивления 377 Ом — это приближение для свободного пространства, что обеспечивает достаточную точность для большинства задач. Этот режим используется при анализе типовой структуры антенны (рис. 2.7).

При включении опции ***Infine waveguide*** верхний (или нижний) слой моделируется как бесконечно длинный волновод, заполненный тем же самым диэлектриком, что и верхний или нижний слой. Бесконечная граница волновода может использоваться для моделирования волноводно-микрополоскового перехода.

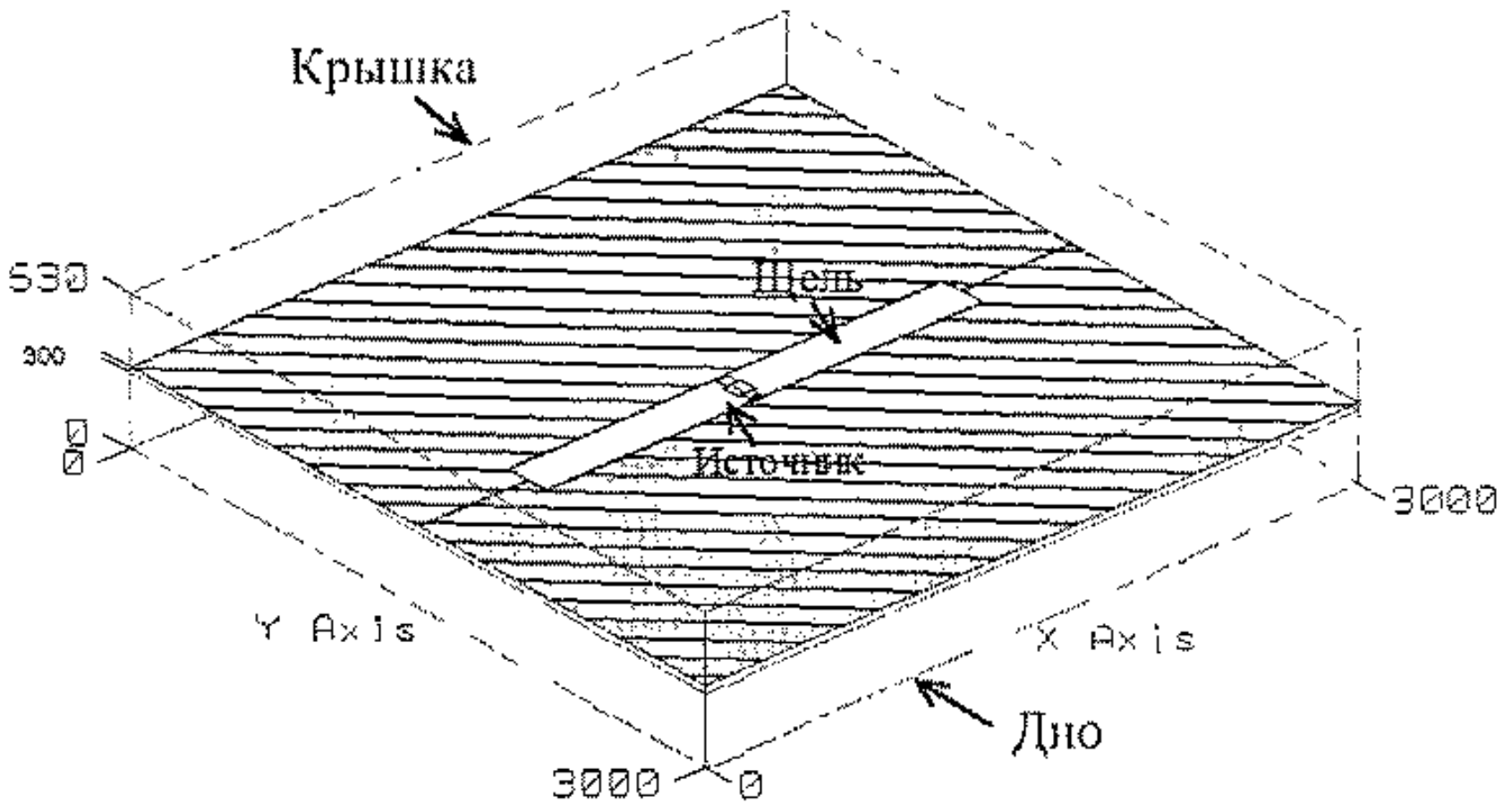


Рис. 2.7 Крышка и дно корпуса, разделенного на два слоя

2.4. Формы проводников

Выбор активного слоя чертежа

Активный слой чертежа может быть изменен, выбирая закладку слоя в нижней части окна 2-мерного просмотра структуры.

Выбор формы проводника

Чтобы выделить форму проводника, нажмите клавишей мыши на его рисунок. Чтобы выбрать одновременно несколько форм, удерживайте при этом клавишу **Shift**. По другому, несколько форм можно выбрать, охватывая их пунктирным прямоугольником.

Чтобы выбрать форму, которая находится ниже данной, удерживайте клавишу **Ctrl** и нажмите на нее несколько раз, пока нужная форма не будет выбрана.

Замораживание неактивных слоев

Когда неактивные уровни заморожены, только формы на текущем слое могут быть выделены или отредактированы. Выбор в меню или на инструментальной линейке команды **Draw > Freeze Non-Active Layers** позволяет замораживать слои и снимать замораживание.

Последовательная отмена создания конструкции и операция восстановления

При редактировании структуры выполненную операцию можно отменить, выбирая команды **Edit > Undo** или **Edit > Redo**, причем это можно делать многократно.

Черчение проводников

Планарные проводники могут быть начерчены на любом слое (хотя плоские проводники не могут быть на слое 1, который совпадает с крышкой корпуса). Чтобы прибавить к проекту новый планарный проводник, сначала выберите активный уровень, щелкая на закладке в нижней части диалога двухмерного просмотра. Плоский проводник может быть добавлен, используя одну из команд меню или инструменты черчения.

Добавление проводников

Если в проекте на каком-нибудь слое нужно добавить проводник, выбирают команду **Draw > Add**, щелкая левой кнопкой мыши в месте будущей вершины проводника и дважды нажимая на последнюю точку, чтобы создать проводник.

Добавление проводника прямоугольной формы

Чтобы добавить проводник прямоугольной формы, выберите команду **Draw >Add Rect Conductor**, нажимая левую кнопку мыши, и используйте мышь для рисования этого прямоугольника.

Редактирование проводников

Чтобы изменить форму проводника, дважды щелкните на нем мышью, чтобы перевести его в «режим редактирования». В этом режиме на каждой вершине и в середине каждой стороны появляются черные квадратики, захватывая которые можно растянуть форму (рис. 2.8). Можно использовать также несколько команд меню или инструментов черчения, чтобы редактировать форму проводника.

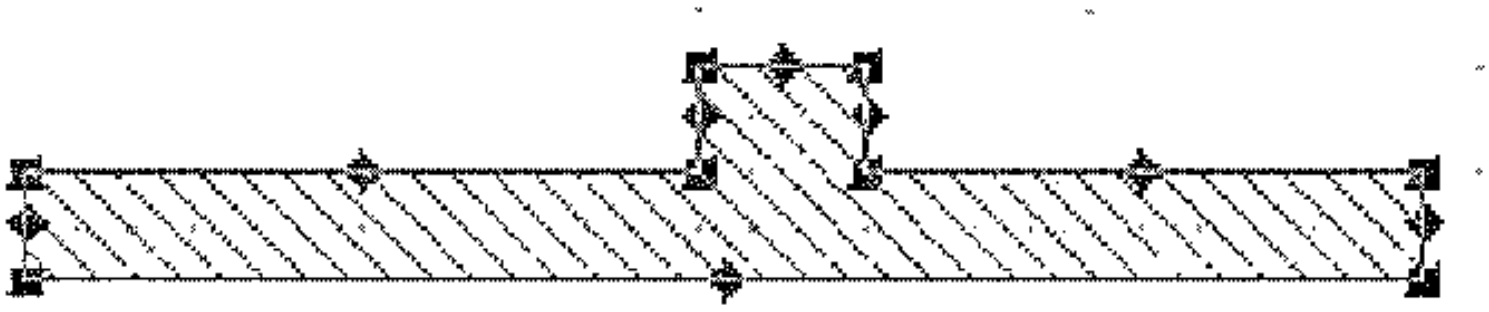


Рис. 2 8 Редактирование проводника произвольной формы

Проводник с канавкой (вырезом, пазом)

Чтобы сделать вырез в проводнике, сначала активизируйте его и затем выберите команду **Draw > Notch Conductor**. Нажмите левую кнопку мыши и переместите ее, чтобы нарисовать прямоугольник паза, и после этого канавка замкнется. Введение выреза внутри корпуса проводника прибавит к проводнику прямоугольную площадку. Ввод паза снаружи приведет к вычитанию этой площадки.

Растяжение площадки

Сначала выбирается форма, которую нужно растянуть, после чего выбирается команда **Draw > Stretch Area** из меню или инструментальной панели. В каждой вершине выбранной формы изображается полый квадратик. Нажмите левую кнопку мыши на нужном квадратике, чтобы выбрать его для растяжения. Чтобы выбрать несколько вершин, нажмите левую кнопку мыши снаружи форм и охватите пунктирным прямоугольником точки, которые хотите выбрать. Чтобы отказаться от выбора узла, нажмите клавишу **Shift** при щелчке или перемещении. Когда желаемая вершина выбрана, нажмите левую кнопку мыши на одной из точек, и переташите мышь, чтобы растянуть форму за выбранные точки.

После каждого сеанса растяжения лишние точки удаляются, также как и формы с нулевой площадью.

Перемещение проводников

Чтобы перемещать выбранные формы, нажмите на них левой кнопкой мыши, переташите мышью.

Для копирования выбранных форм в буфер, выполните команду **Edit > Copy**.

Чтобы отрезать часть проводника и переместить его в буфер, выберите команду **Edit > Cut**.

Чтобы вставить выбранные объекты из буфера обмена в проект, выберите команду **Edit>Paste**. Объекты из буфера обмена могут вставляться в тот же самый или в другой документ того же типа.

После выбора **Edit > Paste**, объекты для вставки появляются в точке, помеченной курсором. Для удаления выбранных форм выполняют команду **Edit > Delete**.

Чтобы выполнить вращение выбранных объектов, используйте команду **Draw > Rotate**. Нажмите левую кнопку в точке вращения, затем перетащите мышь, чтобы определить угол поворота, и отпустите ее. Или щелкните правой кнопкой мыши на вершине выбранной формы, и в появившемся меню запустите команду **Rotate**.

Для зеркального отражения выбранных объектов выполните команду **Draw > Flip**. Нажмите левую кнопку мыши в установленной точке относительно линии отражения, затем перетащите мышь, чтобы обозначить горизонтальную или вертикальную ось отражения.

Выбранные объекты могут перемещаться на другие уровни (слои) подложки по команде **Draw > Move Up One Layer** или **Draw > Move Down One Layer**.

Привязка проводящей формы к сетке

Чтобы привязать линии и узлы проводящей формы к сетке, выберите команду **Draw > Snap Shape**.

Узлы сеток

Чтобы сделать привязку проводника к сетке, когда сетка изменена, выполните команду **Draw > Grid Snap**.

Режим ортогонального черчения

Команда **Draw > Orthogonal** ограничивает проведение линий ортогональными направлениями.

Измерение расстояния

Чтобы измерить расстояние в 2D режиме, выберите в меню команду **Draw>Measure**, а затем нажмите левую кнопку мыши в начальной точке измеряемой линии. Перетащите мышь, чтобы растянуть линейку и измерить расстояние.

2.5. Реквизиты проводников

Характеристики материалов

Для каждого проводника в графе **Material Conductor** (материал проводника) указываются потери в нем. Проект может иметь несколько объектов Material Conductor. Характеристики проводящих материалов приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Проводимости материалов

Материал	Проводимость
Silver (серебро)	$6{,}14 \times 10^7$
Copper (медь)	$5{,}88 \times 10^7$
Gold (золото)	$4{,}10 \times 10^7$
Aluminum (алюминий)	$3{,}53 \times 10^7$
Nickel (никель)	$1{,}47 \times 10^7$

Чтобы изменить спецификацию материала или реквизиты проводника, выберите его, а затем выполните команду **Draw > Edit Shape Props** для редактирования (сделайте правый щелчок на форме, и затем из всплывающего меню выберите строку **Edit Shape Props**, после чего появится диалог рис. 2.9). Каждый материал должен иметь уникальное имя. Электрические реквизиты проводников могут иметь электрические параметры или физические параметры материала. Описание двух методов дано ниже.

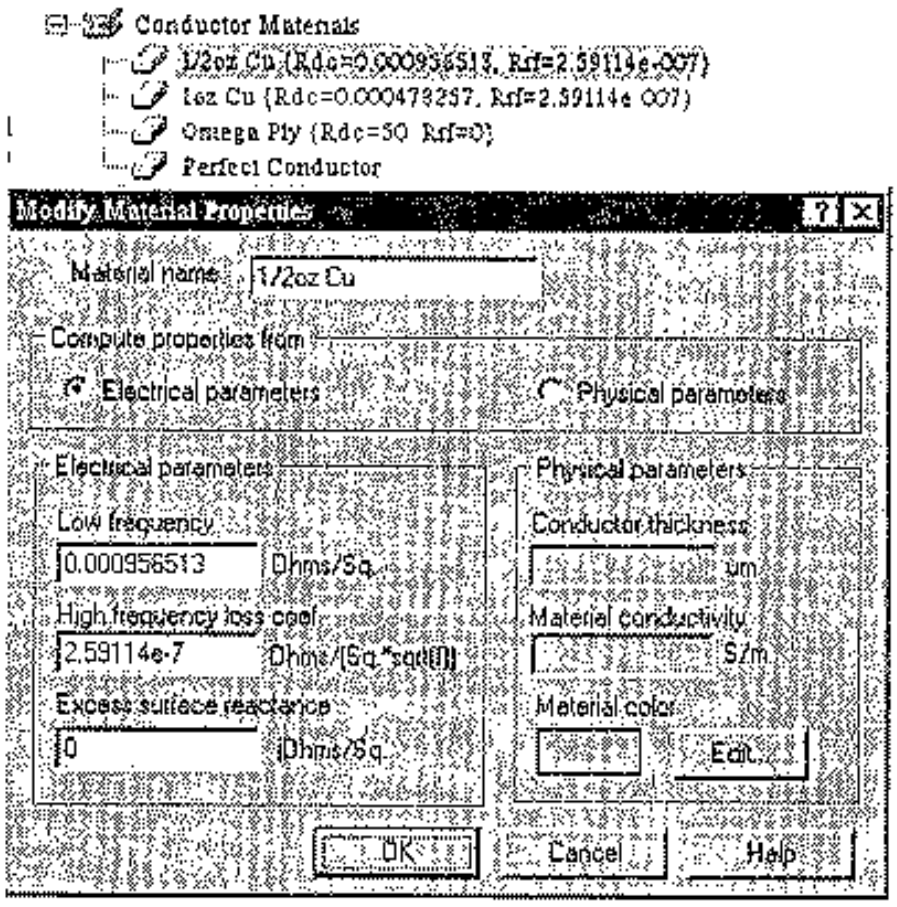


Рис. 2.9. Диалог задания параметров материалов, используемых в проекте

Электрические параметры. Сопротивление проводника постоянному току (ом на квадрат) определяется по формуле

$$R_{DC} = \frac{1}{\sigma t}, \tag{2.1}$$

где σ — проводимость проводника, t — его толщина.

Коэффициент высокочастотных потерь **High frequency loss coefficient** определяет потери проводника на частотах, где толщина проводника значительно больше, чем глубина поверхностного слоя. Так как потери, связанные со скин-эффектом, пропорциональны квадратному корню частоты, коэффициент потерь глубины поверхностного слоя умножается на квадратный корень частоты f. Коэффициент высокочастотных потерь:

$$R_{HF} = \sqrt{\pi \frac{f}{\sigma}}. \tag{2.2}$$

На низких частотах сопротивление R_{DC} используется при оценке потерь проводника, в то время как на высоких частотах для оценки потерь используется R_{HF}. При расчете на СВЧ (частотах, где глубина поверхностного слоя близка к толщине проводника) учитываются оба фактора.

Поверхностное реактивное сопротивление **Excess surface reactance** (поверхностный реактанс) используется, чтобы моделировать реактивное сопротивление, связанное со сверхпроводимостью. Для обычных проводников оно не используется.

Альтернативный (и более простой) метод определения электрических параметров материалов состоит в том, чтобы вводить их как параметры материалов и использовать EMSight для получения их электрических параметров. Чтобы точно определить параметры материалов, должны быть определены толщина и проводимость проводника.

Потери, вычисленные на основе параметров материалов, присваиваются идеальному проводнику. Примеси и шероховатость поверхности имеют тенденцию делать измеряемые потери несколько выше, чем моделируемые потери. Один способ для согласования состоит в уменьшении проводимости (обычно на 10—20 %) проводника, так что моделируемые потери согласуются более близко с измеряемыми потерями. Измеренные потери линии передачи могут быть приведены к моделируемым данным той же самой линии, итерационно регулируя «эффективную» проводимость проводника. Эту «действительную» («эффективную») проводимость можно затем использовать вместо идеальной проводимости для проводника.

2.6. Перемычки

Перемычки Via используются для межсоединения проводящих форм на различных слоях, и для подсоединения проводников к нижнему и верхнему слоям. Типичная перемычка, используемая для подключения линий к нижнему слою, показывается ниже слева. Перемычка, используемая для соединения проводников на различных слоях, показывается ниже справа (рис. 2.10).

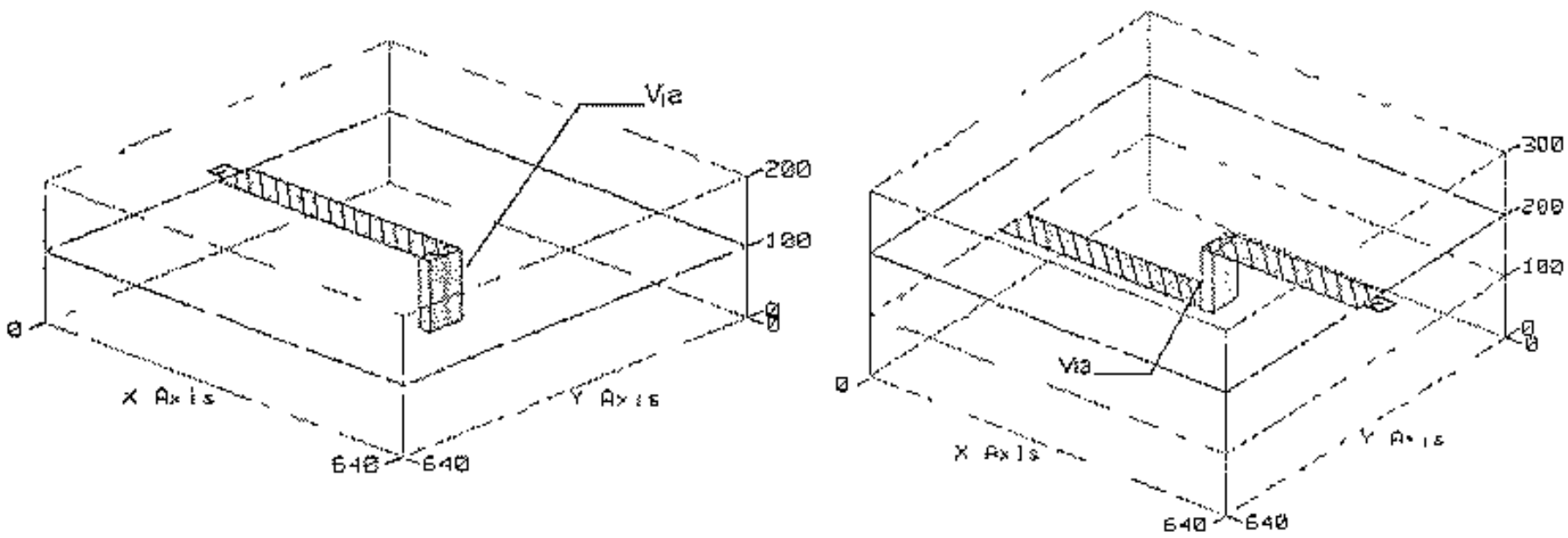


Рис. 2.10. Расположение перемычек

Добавление перемычек



Перемычка, соединяющая два слоя, всегда начинается от верхнего слоя вниз. Чтобы добавить перемычку, сначала активизируют верхний слой, выбирая закладку слоев. Затем выбирают **Draw > Add Via**, нажимая левую кнопку мыши, перетаскивают мышь, чтобы нарисовать прямоугольник (рис. 2.11). Таким образом, на слое рисуется форма, в виде прямоугольника, которая является сечением перемычки.

Как только перемычка введена, можно отредактировать присоединенный к ней проводник. Перемычка должна иметь ширину не менее размера одной ячейки сетки деления. Длина перемычки равна толщине диэлектрического слоя. Если пе-



Рис. 2.11. Включение перемычек

ремычка соединяет проводники больше, чем через один слой, перемычки рисуются сверху каждого диэлектрического слоя, через который должна пройти перемычка. Верхняя и нижняя граница перемычки замыкают проводящие формы как обычные плоские проводники, так что нет необходимости накладывать соединяющий планарный проводник. Ток, который идет через перемычку, моделируется как однородно направленный объемный ток. Одно из предположений, требуемых для моделирования перемычки — то, что длина перемычки (равная толщине диэлектрического слоя) короче длины волны. Если геометрия структуры получается такая, что длина перемычки стала соизмерима с длиной волны, то подложка может быть разбита на отдельные «более короткие» слои так, что перемычка будет состоять из отдельных более коротких перемычек, помещенных в стык друг к другу.

2.7. Порты

Порты — это две клеммы, которые используются для моделирования ввода СВЧ мощности в структуру и вывода ее из структуры. Физически порт представляет собой источник напряжения, который возбуждает ток в структуре. Ток находится в результате моделирования. По вычисленным токам затем могут быть найдены линейные параметры (многомодовые S-параметры и др.).

EMSight имеет три вида портов: порты на краю, порты перемычек и внутренние порты. Все типы портов требуют, чтобы был определен путь к земляной плате. **EMSight** допускает неограниченное число портов, и комбинация различных типов портов может использоваться в ЕМ структуре. Наиболее часто используются порты на краю.

Добавление портов на краю

Порт на краю всегда соединен с проводником так, что если направление стороны перемещается, порты движутся вместе с ними. Порт может быть добавлен только к той стороне проводника, которая совмещена с границей подложки.

Чтобы прибавить порт на краю, выделите проводник и выберите команду **Draw > Add Edge Port**. Поместите мышь на то ребро, где нужно добавить порт. Если это можно сделать в данном месте, сторона будет высвечена, и появится значок порта. Нажмите левой кнопкой мыши, чтобы создать порт.

При установке портов, нумерация назначается автоматически. Номера портов увеличиваются в порядке, в котором они добавляются к структуре (рис. 2.12). Чтобы изменить номер порта, удалите порт, и добавьте его снова.

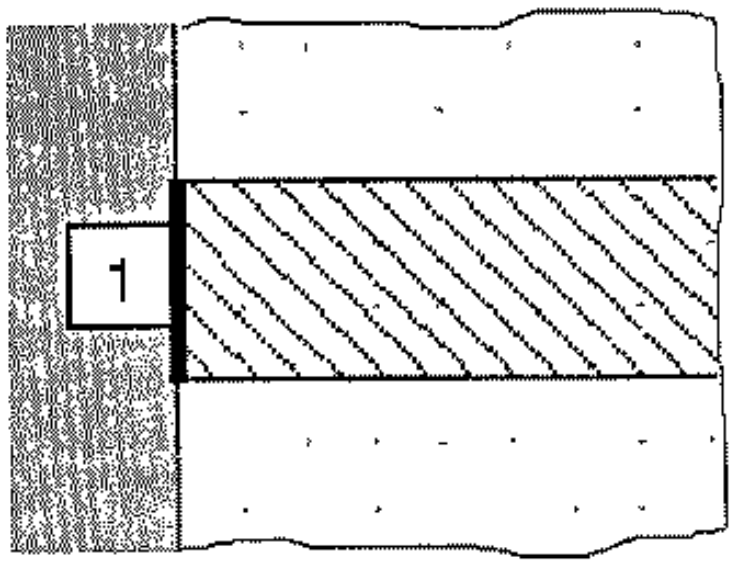


Рис. 2.12. Порт на краю металлической формы

Установка опорных плоскостей

Чтобы переместить опорную плоскость, выберите порт, нажмите на опорную плоскость в конце стрелки, и перетащите ее мышью. Если стрелка не видима, то опорная плоскость совпадает с краем, а перемещение изменит опорную плоскость, что проявится в виде толстой черной линии (рис. 2.13). Заметим, что если больше, чем один порт находятся на одном крае корпуса, все опорные плоскости для портов будут изменяться одновременно.

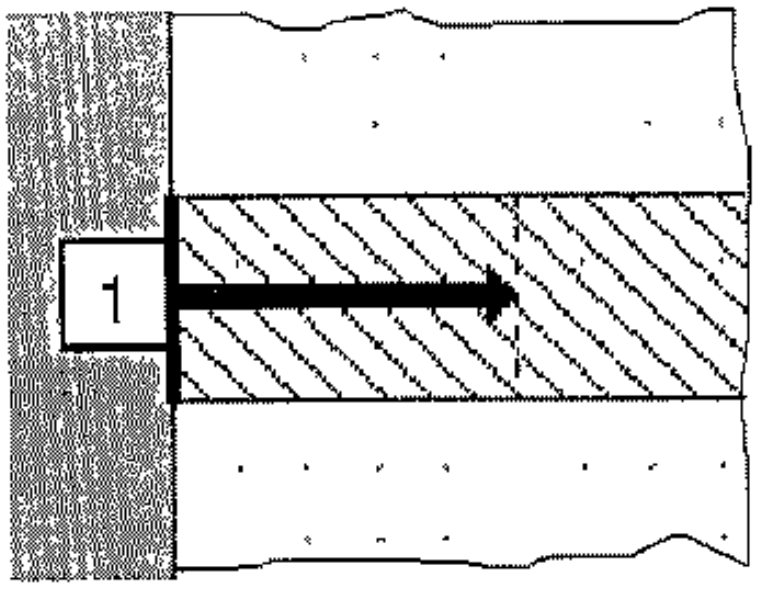


Рис. 2.13. Перемещение опорной плоскости де-герметизации

Установка возбуждения на порту или нагрузке

Вычисленные параметры структуры не зависят от сопротивления генератора или нагрузок на портах. Однако рассчитанная плотность тока, которая используется для анимации и визуализации, зависит от возбуждения на портах и нагрузок. Чтобы установить возбуждение или нагрузку порта, нажмите два раза мышью на порте, чтобы вывести окно атрибутов порта (рис. 2.14).

Чтобы подключить к порту генератор или нагрузку, нужно выбрать этот порт. При возбуждении нужно установить относительный уровень мощности и фазу возбуждения. Для описания нагрузки необходимо задать ее активное и реактивное сопротивление. Способность рассчитывать токи в структуре с нагрузками на портах позволяет с помощью анимации показывать волны, перемещающиеся через структуру.

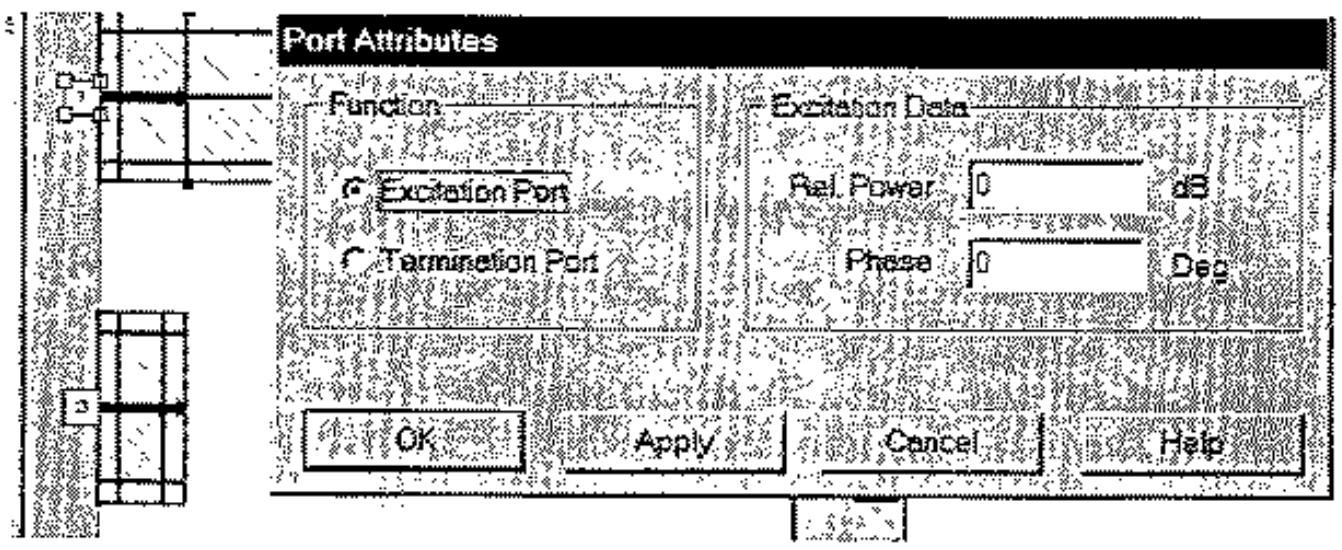


Рис. 2.14. Установление атрибутов порта как генератора

2.8. Перемычки-порты

Добавление портовых перемычек

Перемычки-порты подобны портам на краю, в которых они связаны с границей ЕМ корпуса. Перемычки-порты используются, чтобы соединить дно корпуса и ЕМ структуру. Эти перемычки-порты используются для создания зонда возбуждения, как показано, например, для плоской антенны на рис. 2.15.

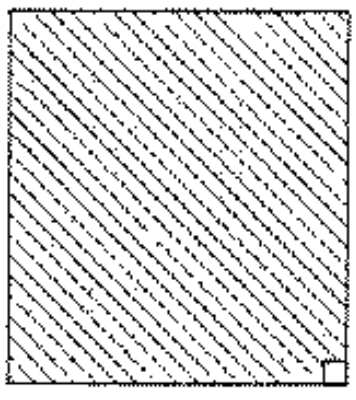


Рис. 2.15. Установка перемычки на углу плоскости

Перемычка-порт создается подобно перемычке в отверстии. Чтобы добавить перемычку-порт, выбирают команду **Draw > Add Via Port**. Поместите курсор на проводник, где необходимо поставить порт, и нажмите левую кнопку мыши, чтобы создать перемычку. Если только что созданный порт перемычки нужно изменить, дважды щелкните курсором на перемычке.

После отпускания курсора, нумерация портов выполнится автоматически. Номера портов увеличиваются в порядке, в котором они добавлялись к структуре. Чтобы изменить номер порта, удалите порт и вставьте его обратно.

2.9. Внутренние порты

Внутренние порты наиболее сложные из портов трех типов, и должны устанавливаться правильно. Использование внутренних портов требует хорошего понимания способов их реализации и концепции локальной (плавающей) опорной

земли. S-параметры, полученные в результате моделирования, при котором используются внутренние порты — не обычные S-параметры.

Пример внутреннего порта

Следующий пример поясняет использование внутренних портов. Для использования внутренних портов должны иметься два многоугольника, смежные друг другу, как показано на рис. 2.16. Внутренний порт будет добавлен между двумя многоугольниками, которые соприкасаются друг с другом.

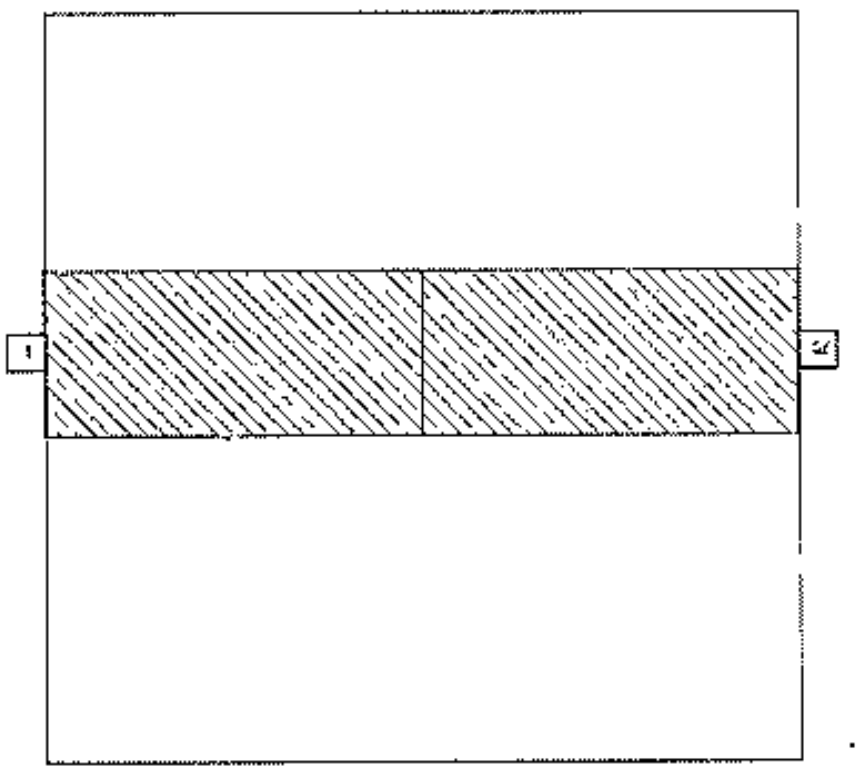


Рис. 2.16. Соприкосновение двух многополюсников

Чтобы прибавить внутренний порт, выделите многоугольник, который должен иметь отрицательный вывод для внутреннего порта, затем выберите команду **Draw > Add Internal Port** из меню. Переместите мышь на край многоугольника, где нужно поставить порт, и если установить его разрешается, то сторона будет под-

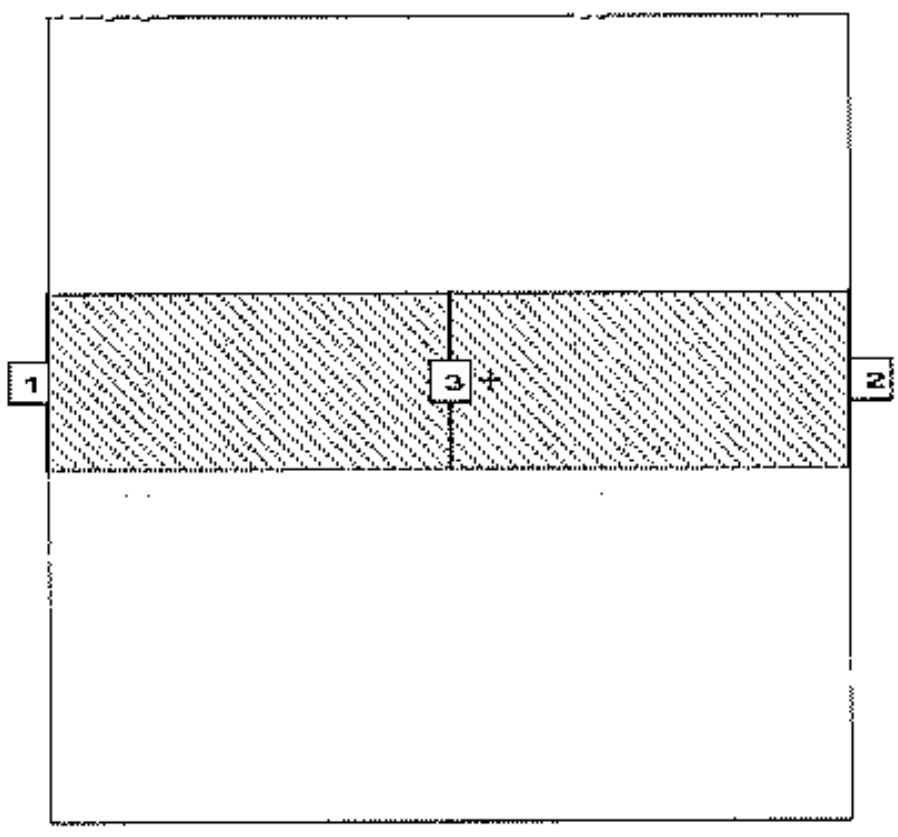


Рис. 2.17. Образование внутреннего порта

свечена, и появится иерархическая структура порта. Нажмите левую кнопку мыши, чтобы создать порт. Положительный вывод внутреннего порта появится со знаком «+» как показано на рис. 2.17.

Важно, что на каждой стороне внутреннего порта должен появиться многоугольник. **EMSight** не проверяет правильно ли установлен внутренний порт, так что анализ будет всегда выполняться, но результаты могут быть ошибочными, если внутренний порт установлен неверно.

Теперь, когда мы познакомились с основными элементами EM-структуры, рассмотрим пример создания и анализа микрополоскового фильтра.

2.10. Пример создания и анализа микрополоскового фильтра

Этот пример покажет следующие операции:
- создание новой EM структуры;
- задание размеров корпуса;
- задание параметров подложки;
- черчение топологии;
- моделирование перемычек;
- задание портов и линий исключения;
- моделирование, просмотр плотности тока и электрического поля.

2.10.1. Создание EM структуры

Для создания нового проекта:
1. Выберите **File > New Project.**
2. Выберите **File > Save Project As.** Появится диалог **Save As.**
3. Напечатайте имя проекта (например, «**EM_example**»), и нажмите **Save.**

Создание новой EM структуры:
1. Выберите **Project > Add EM Structure > New EM Structure.**
2. Напечатайте «**Interdigital Filter**» и нажмите **OK.** В рабочем окне MWO появляется окно EM структуры (рис. 2.18).

Заметим, что **EMSight** использует прямоугольную сетку для определения структур. Иногда выгодно использовать неравномерную сетку, это даст более быстрый процесс моделирования (обычно без ухудшения точности).

2.10.2. Задание корпуса

Корпус задает материал для всех слоев в EM-структуре, устанавливает граничные условия и определяет общий размер структуры и разбиения на сетки, которые будут использоваться для спецификации материала проводников в структуре.

Чтобы задать корпус:
1. Нажмите два раза на **Enclosure** под **Integrade Filter** в дереве проекта. Появляется диалог информации о подложке (рис. 2.19).
2. Выберите **Metric** в качестве единиц **Units**, и затем прокрутите стрелку и выберите mm.

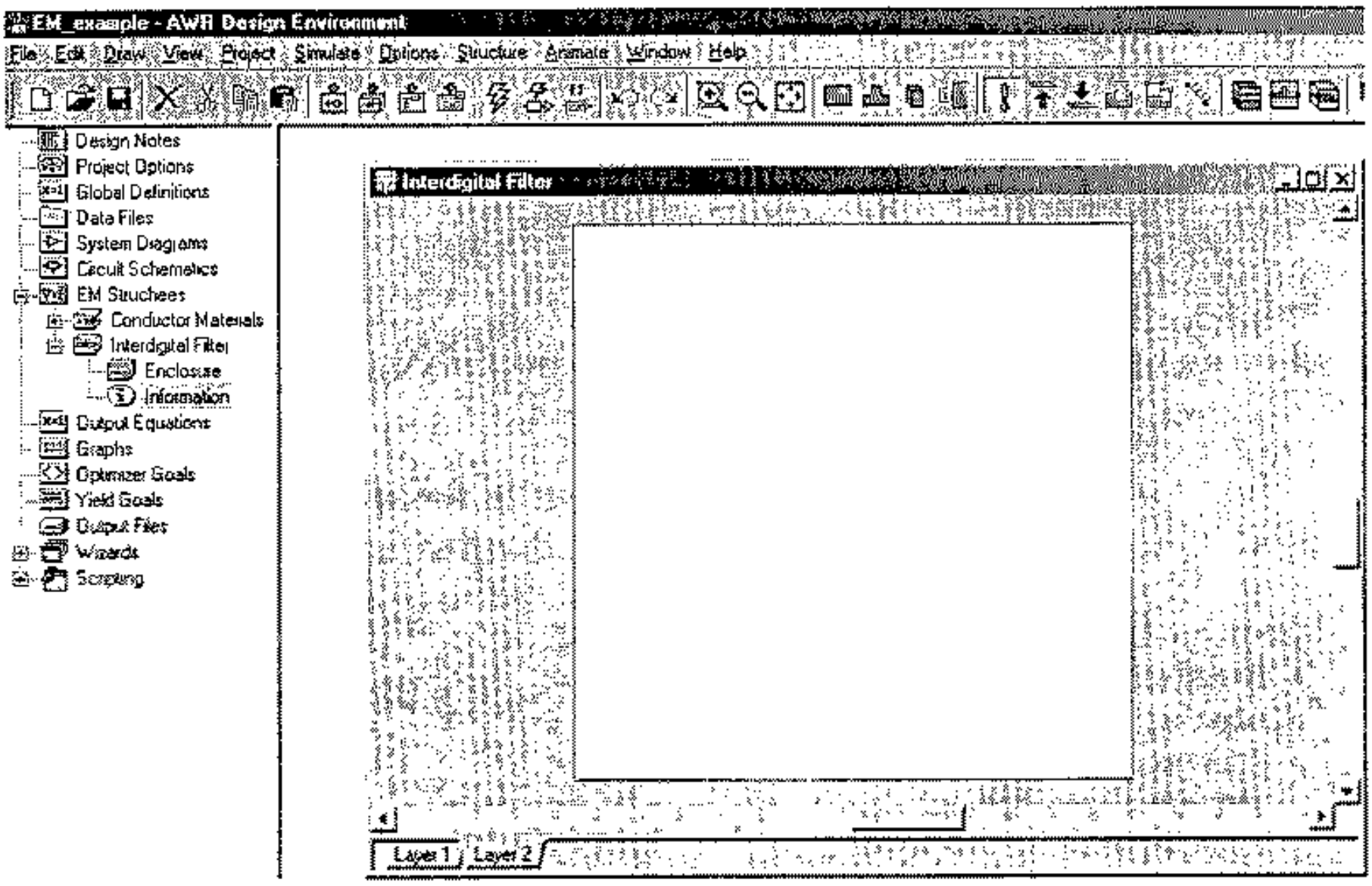


Рис. 2.18 Создание нового проекта **EM_example**

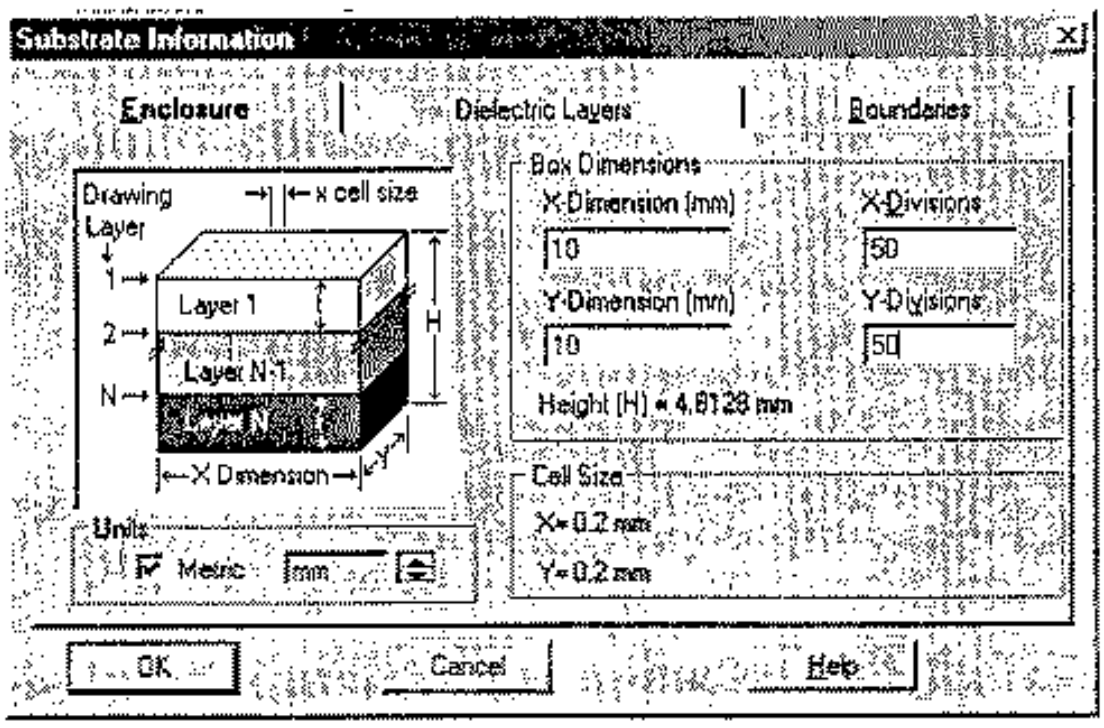


Рис. 2.19. Задание размеров корпуса и сетки деления по координатам

3. В разделе **Box Dimensions**. впечатайте «**10**» как X_Dimension, напечатайте «**50**» в X-Division, напечатайте «**10**» как Y-Dimension, и «**50**» как Y-Division.

Для определения диэлектрических слоев:

4. Откройте закладку Dielectric Layers в диалоге Substrate Information (рис. 2.20)
5. Выберите **Layer 1** в разделе **Dielectric Layer Parameters**. Напечатайте «**3**» в боксе редактирования (внизу диалога) в колонке Thickness и напечатайте «**1**» в боксе редактирования внизу колонки «**er**». Оставьте значения по умолчанию в других колонках.

Замечания. *Моделирование выполняется в два раза быстрее, если подложки без потерь. Таким образом, установите Loss Tangent=0 и используйте и идеальные проводимости всех металлизаций и перемычек в ЕМ-структуре.*

6. Выберите **Layer 2** в разделе **Dielectric Layer Parameters.** Напечатайте «**0.635**» в колонке **Thickness** (рис. 2.20) и напечатайте «**9.8**» в боксе редактирования внизу колонки «er». Напечатайте «0.001» в боксе редактирования Loss Tangent и «4» в блоке ниже в колонке View Scale (это расширяет 3D вид для слоя в четыре раза по сравнению с его нормальной толщиной).

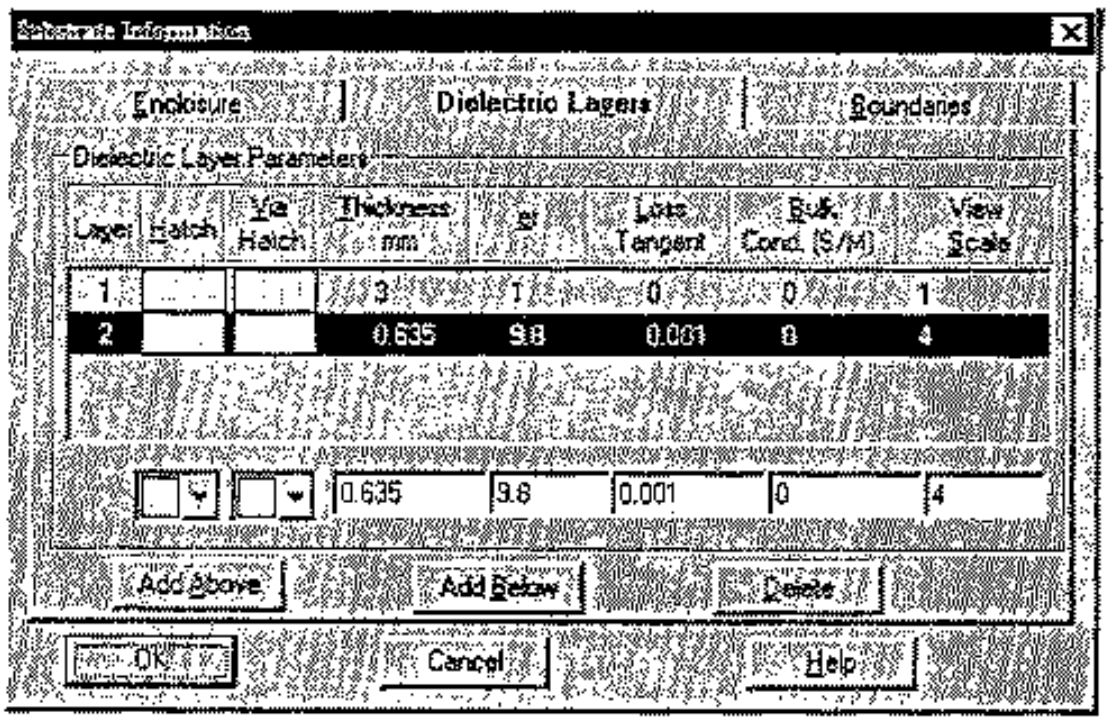


Рис. 2.20. Задание параметров диэлектрических слоев

2.10.3. Граничные условия

Граничные условия для стенок корпуса по умолчанию являются идеальными проводниками Perfect conductor, и могут изменяться. Граничные условия для верха и дна корпуса имеют граничные условия по умолчанию, но и они могут быть изменены по желанию.

Для просмотра и модификации граничных условий:

1. Откройте закладку **Boundaries** в диалоге Substrate Information. Затем нажмите **OK** для окончания процедуры задания граничных условий (рис. 2.21).

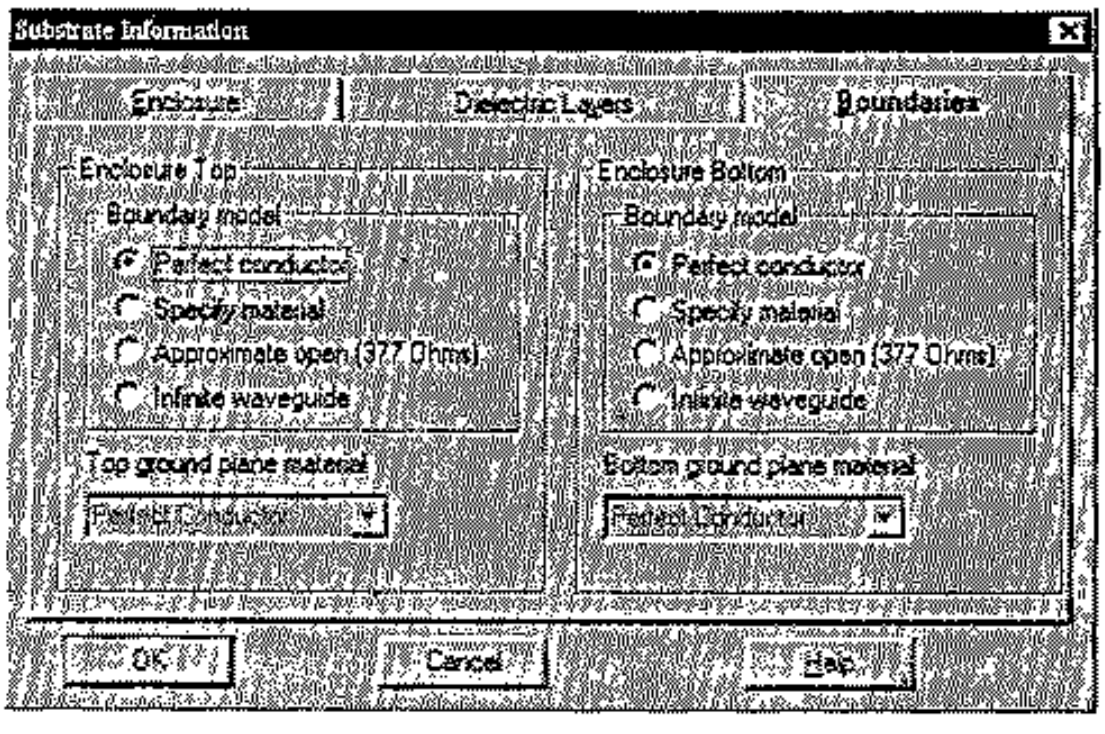


Рис. 2.21. Граничные условия

2.10.4. Добавление проводников к топологии

Вы можете использовать EM моделятор MWO для рисования физической структуры, а можете импортировать структуру непосредственно из топологического редактора AWR или импортировать формы из файлов AutoCAD, DXF, GDSII или Sonnet GEO. В данном примере вы нарисуете физическую топологию используя моделятор EM.

1. Выберите **Draw > Add Rect Conductor** для добавления прямоугольного проводника.
2. Сдвиньте курсор в окно фильтра и нажмите клавишу Tab. Появится окно диалога ввода координат Enter Coordinates (рис. 2.22).

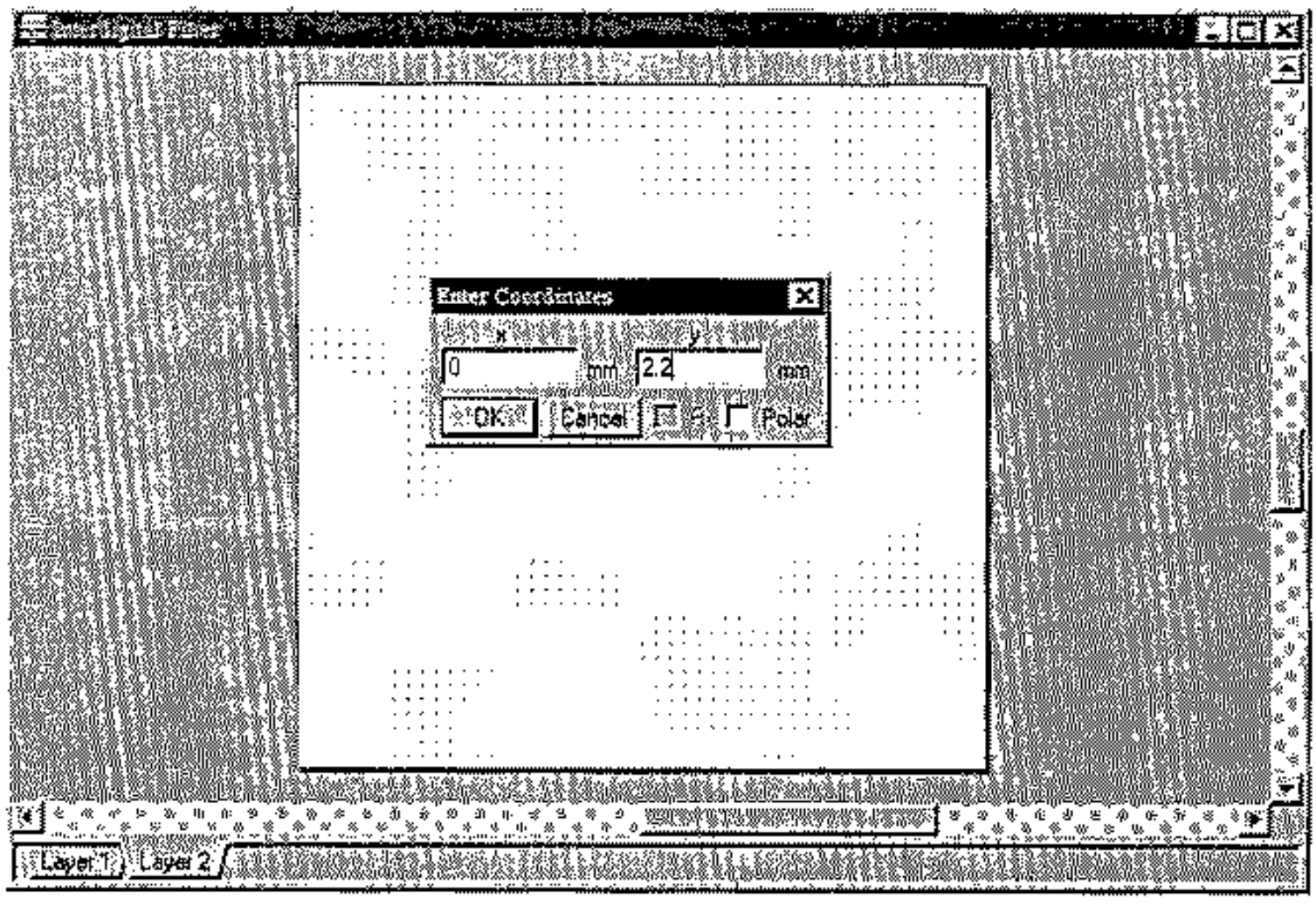


Рис. 2 22. Начало рисования топологии с помощью ввода координат

3. Напечатайте «**0**» в качестве величины **x** и «**2.2**» как величины **y**. и кликните **OK**.
4. Нажмите клавишу **Tab** снова, чтобы увидеть диалог Enter Coordinates. Отметьте Re и напечатайте «**2.2**» как величину **dx**, и «**0.6**» как величину **dy**, и затем кликните **OK**. Прямоугольный проводник будет иметь вид как на рис. 2.23.

Чтобы нарисовать второй прямоугольный проводник:

5. Выберите **Draw > Add Rect Conductor**.
6. Сдвиньте курсор в окно фильтра и нажмите клавишу Tab. Появится окно диалога ввода координат Enter Coordinates. Впечатайте «**4**» как величина **x** и «**2**» как величину **y**, и затем кликните **OK**.
7. Нажмите клавишу **Tab** снова чтобы вывести диалог Enter Coordinates. Напечатайте «**1.2**» как величину **dx**, и «**7.2**» как величину **dy**, и затем кликните **OK**. Прямоугольный проводник будет иметь вид как на рис. 2.24.

Чтобы сдвинуть второй прямоугольник к первому проводнику:

8. Кликните на втором прямоугольнике. Появятся квадратики по углам прямоугольника.

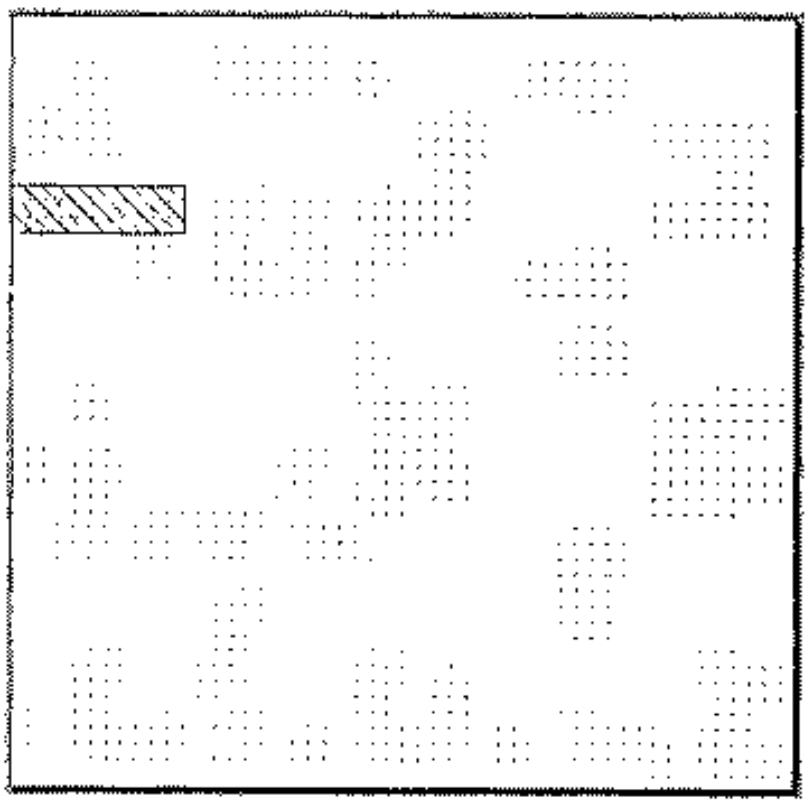


Рис. 2.23 Нарисованная форма проводника фильтра

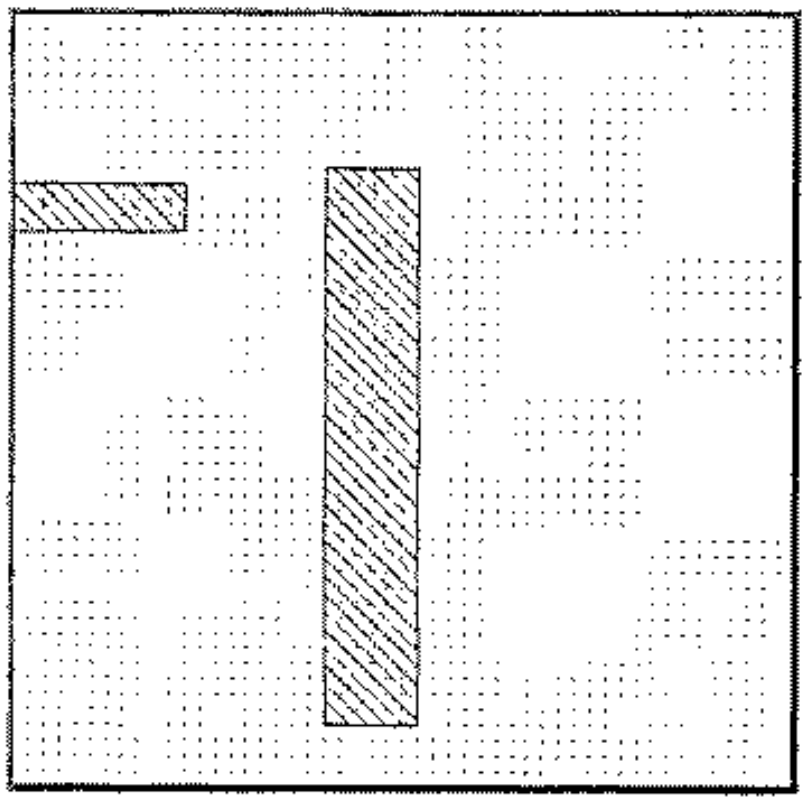


Рис. 2 24. Две нарисованные формы проводников фильтра

9. Передвигайте выбранный проводник, пока курсор имеет вид пересечения. Значения dx и dy будут показаны в окие, как на рис. 2.25.

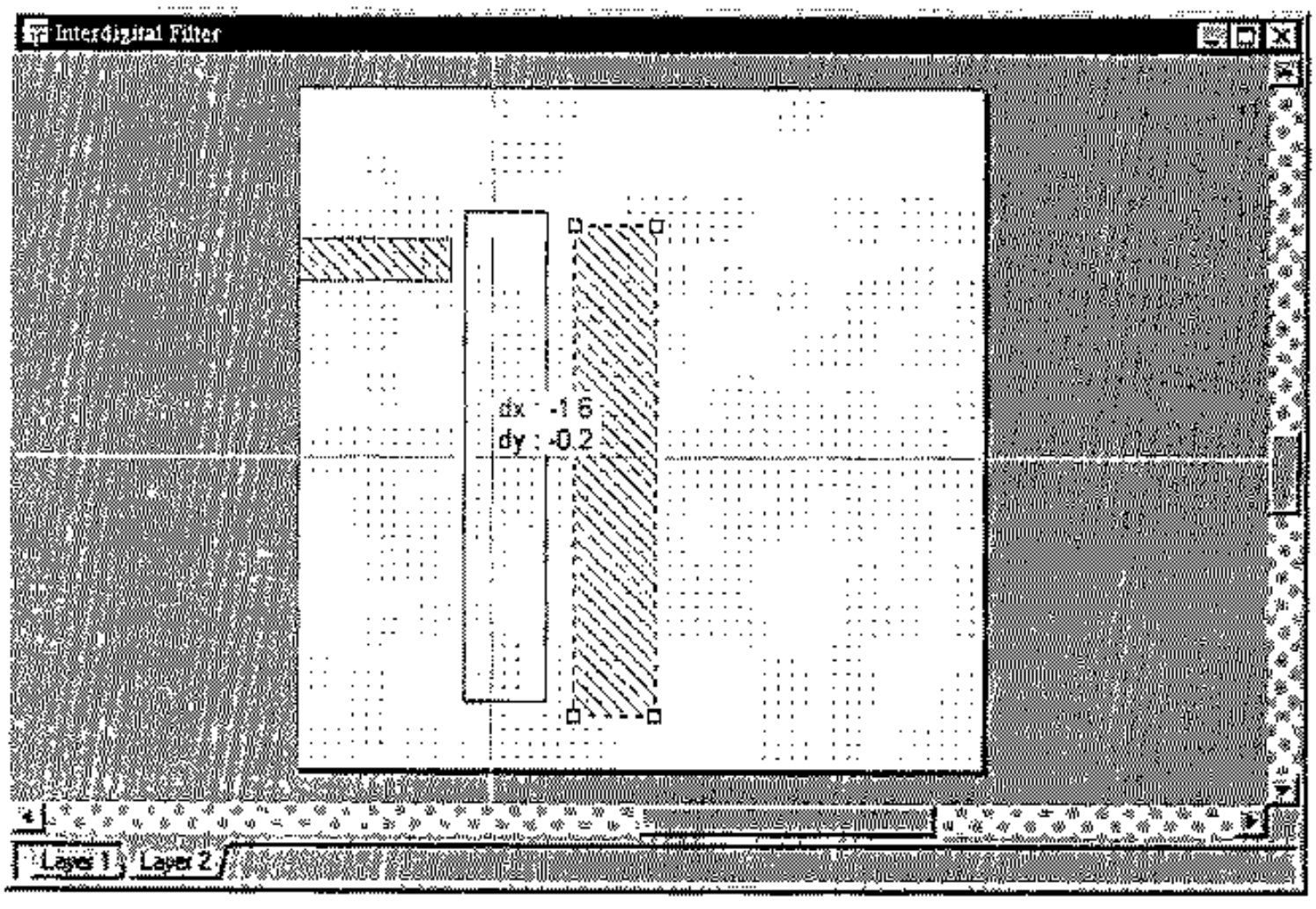


Рис. 2.25. Смещение нарисованных форм на слое Layer 2

Совет. *Используйте кнопку Ruler на инструментальной линейке для измерения размеров проводника, и размеров структуры EM-топологии.*

10. Удерживая кнопку мыши, перетащите курсор до тех пор, пока **dx** и **dy** будут соответствовать dx:-2 и dy:-1. При отпускании кнопку мыши прямоугольник примет положение, показанное на рис. 2.26.

2.10.5. Добавление перемычек VIA

Перемычки Via — это межсоединения между слоями подложки. Вы можете добавить перемычку к земляной плате с одной стороны или к низу металлического корпуса.

1. Выберите **Draw > Add Via.**
2. Сдвиньте курсор в окно фильтра и нажмите клавишу **Tab**. Появится окно диалога ввода координат Enter Coordinates. Впечатайте «**2.4**» как величину **x** и «**1.2**» как величину **y**, затем кликните **OK**.
3. Нажмите клавишу **Tab** снова чтобы увидеть диалог Enter Coordinates. Напечатайте «**0.4**» как величину **dx**, и «**0.8**» как величину **dy**, затем кликните **OK**. Перемычка будет показана голубым квадратиком.

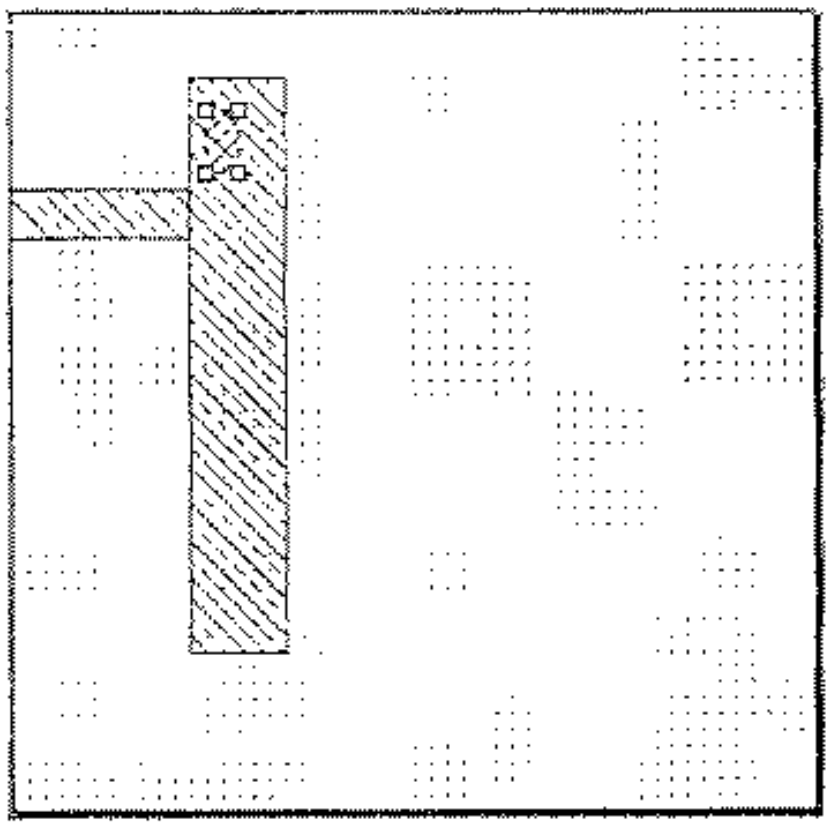


Рис. 2.26. Установка сечения перемычки Via

4. Выберите **Edit > Copy**, затем выберите **Edit > Paste.**
5. Сдвиньте мышь в окно ЕМ-структуры. Появится вторая перемычка.
6. Нажмите правой кнопкой мыши для вращения одной перемычки.
7. Нажмите клавишу **Tab** для вывода диалога Enter Coordinates. Деселектируйте **Re** для введения абсолютных координат. Напечатайте «**2.2**» как величину **x** и «**1.8**» как величину y и затем нажмите **OK.**

Просмотр трехмерного изображения

ЕМ моделятор выводит двухмерный и трехмерный виды. Чтобы создать 3D вид:

1. Выберите **View>3D View**. Появится окно, содержащее трехмерный вид конструкции.
2. Выберите **Window>Tile Vertical**. Окна располагаются рядом (рис. 2.27).

Чтобы изменить вид 3D структуры, кликните правой кнопкой мыши в 3D окне, затем выберите **Zoom Window, Zoom Out** или **View All.**

Чтобы вращать 3D структуру, кликните на ней, и, удерживая кнопку мыши, вращайте.

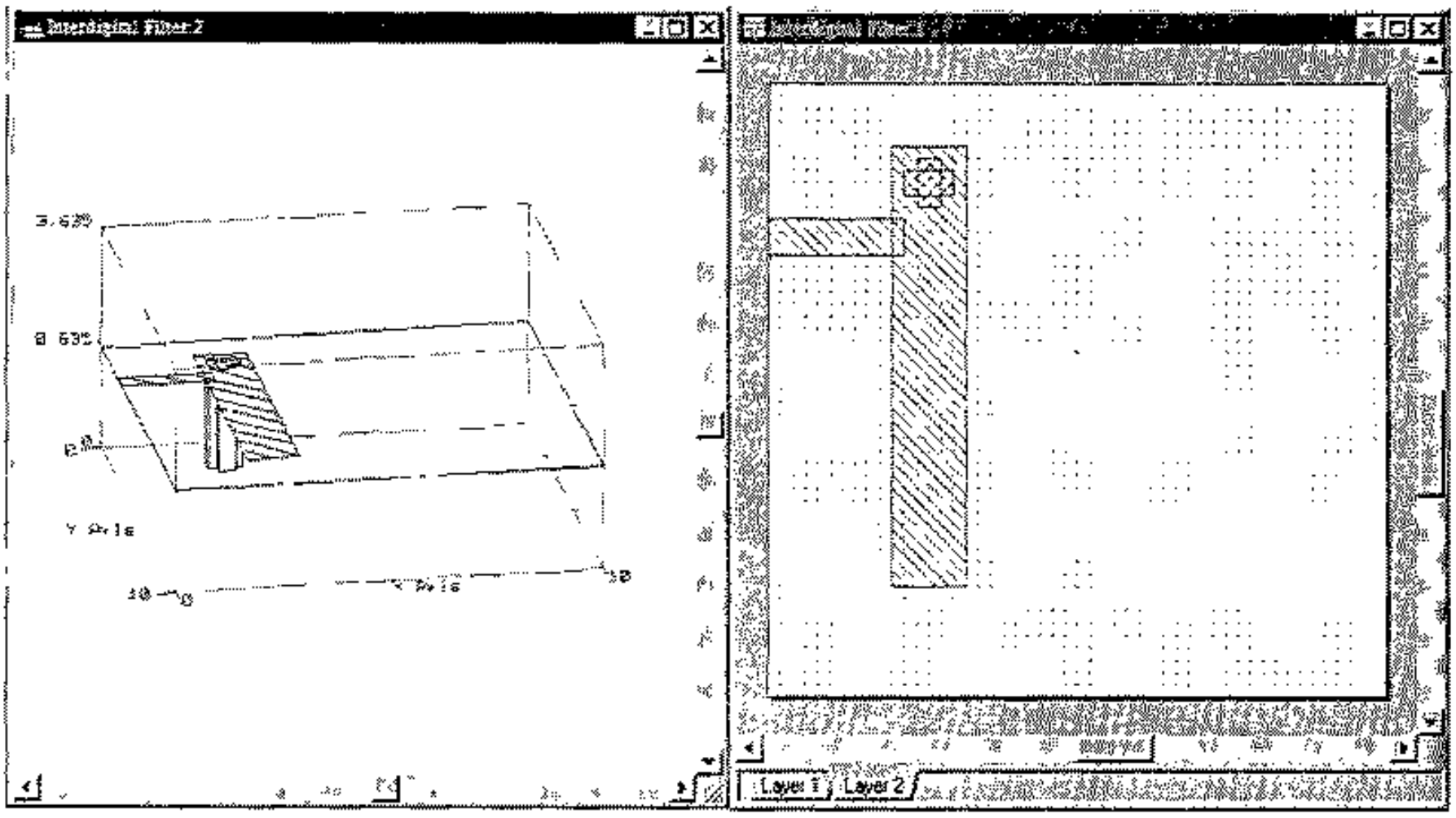


Рис 2.27 Трехмерный и двухмерный вид части фильтра

2.10.6. Добавление портов и плоскостей разгерметизации

EM моделятор может задать электрические порты на краю корпуса (красвые порты) и как пробники-перемычки, проходящие снизу или от поверхности дна (порты via). Для задания такого краевого порта:

1. Кликните меньший проводник в структуре EM. Заметим, что проводник должен быть расположен точно по срезу левого края (X:0; Y:2.2), перед тем, как вы добавите краевой порт к нему.

Совет. Выберите **View > Zoom In** один или два раза для лучшего просмотра вида.

2. Выберите **Draw > Add Edge Port.**
3. Поместите курсор с левого края маленького проводника пока не появится квадратик, и нажмите левую кнопку мыши, для размещения порта. Мвленький бокс с номером 1 (показывающий номер порта) появится с левого края проводника (рис. 2.28).

Для вычитания (разгерметизации) электрической линии из результата моделирования, референсные плоскости для порта должны быть сдвинуты от края корпуса.

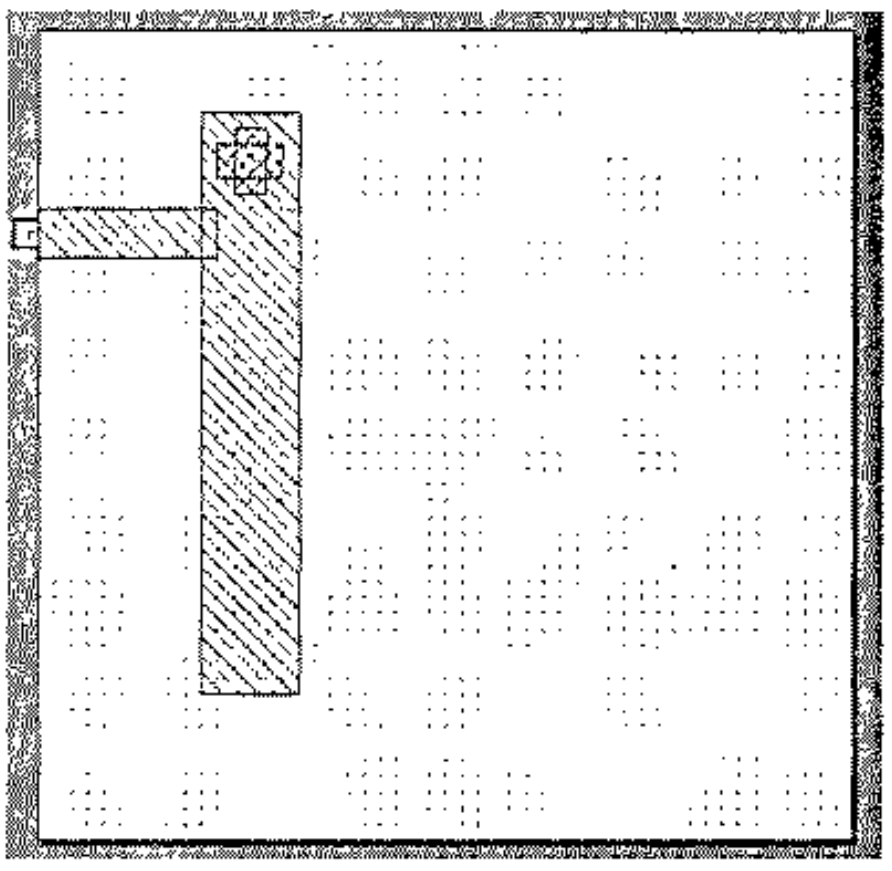


Рис. 2.28. Установка порта с левого края микрополоскового фильтра

Для разгерметизации электрической линии длиной 1 мм от порта 1:

4. Нажмите правой кнопкой мыши в окне EM структуры, и выберите **View Area**.
5. Кликните и удерживайте кнопку мыши чтобы увидеть увеличенный курсор, затем протяните курсор вокруг порта 1 и маленького проводника.
6. Нажмите на порту 1. Четыре квадратика показывают их углы.
7. Сдвиньте мышь вокруг края порта пока курсор не покажет двойную стрелку.
8. Кликните и удерживайте клавишу мыши, чтобы увидеть **dx** и **dy**.
9. Удерживайте кнопку мыши, протащите курсор вправо, пока dx не покажет 1.

Отпустите кнопку мыши чтобы увидеть линию разгерметизации (рис. 2.29).

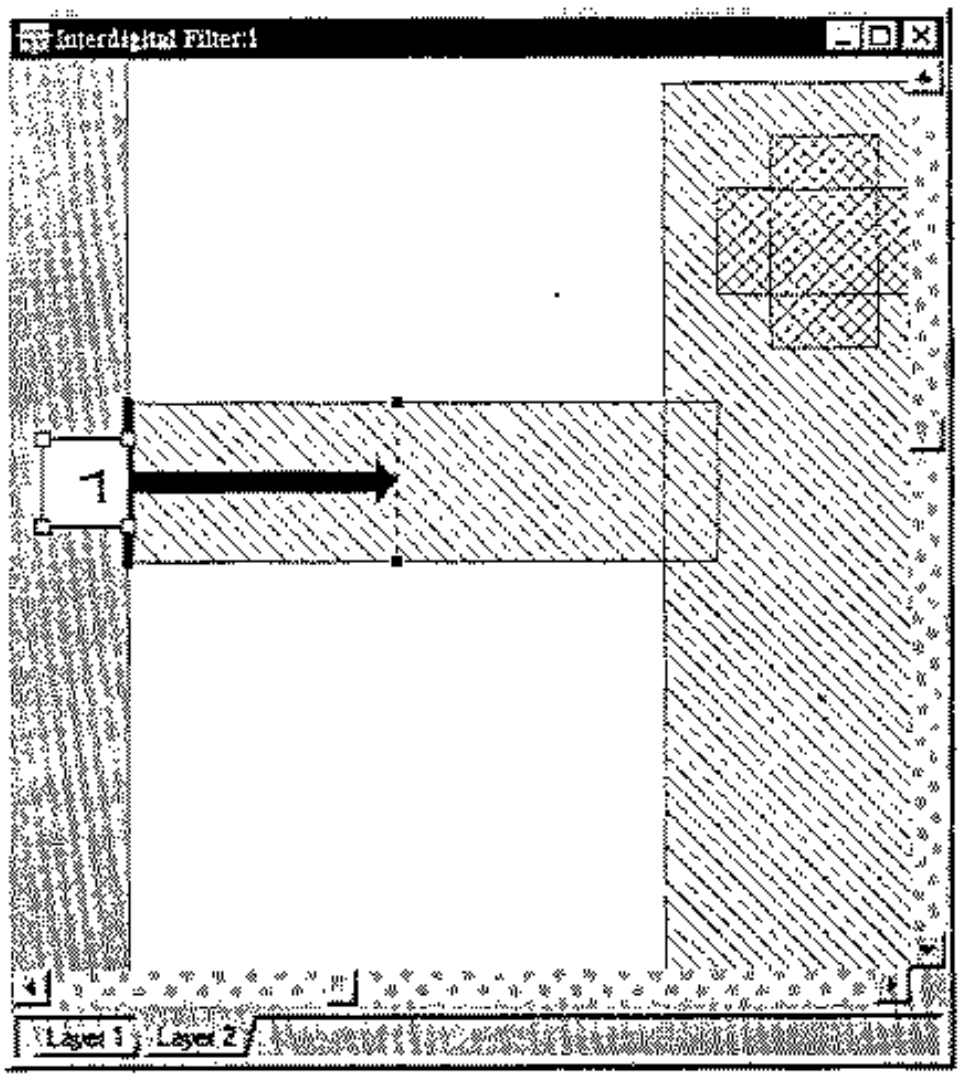


Рис. 2.29. Смещение опорной плоскости разгерметизации порта

2.10.7. Задание частот моделирования

Для задания частоты моделирования:

1. В дереве проекта кликните правой кнопкой на **Interdigital Filter** под **EM Structures** и выберите **Options**. Появляется диалог Options.
2. Выберите закладку **Frequency Values**.
3. Деселектируйте опцию **Use Project Frequency** для задания установки глобвльных частот поверх установки глобальных частот проекта.
4. Убедитесь что установлены единицы GHz в **Data Entry Units**. Вы можете задать глобальные частоты моделирования (выбором **Options > Project Options** и выбирая закладку Frequency Values). Лучше использовать установки локальных частот для EM структур.
5. Напечайте «**1**» в **Start** и «**5**» в **Stop**, и «**1**» в **Step**.
6. Кликните **Apply** и затем **OK**. Окно Current Range показывает диапазон частот и частотные шаги, которые вы задали (рис. 2.30).

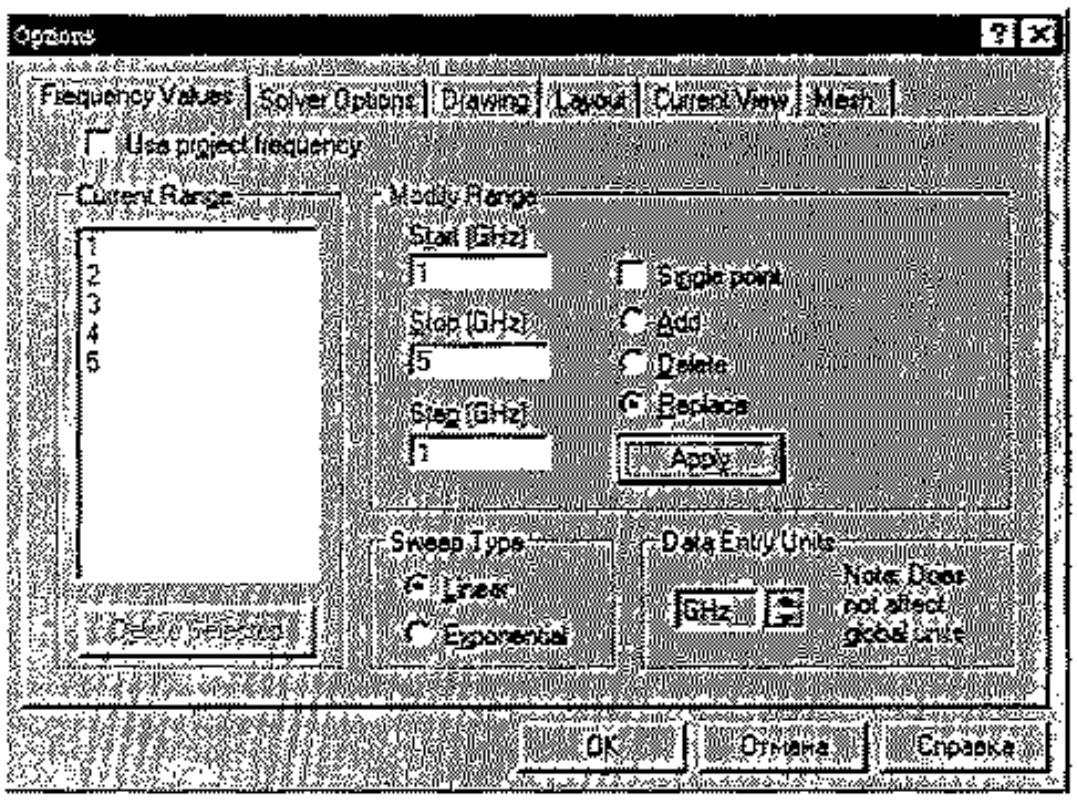


Рис. 2 30. Диалог установки частот моделирования

Запуск моделирования

EM моделятор очень быстро решает небольшие задачи. Чтобы найти резонансную частоту фильтра, запустим моделирование начальной топологии.

1. Дважды нажмите раздел Information в дереве проекта под **Interdigital Filter** (под EM Structure). Появляется диалог **EM Solver Information** (рис. 2.31) для оценки времени моделирования данной структуры.

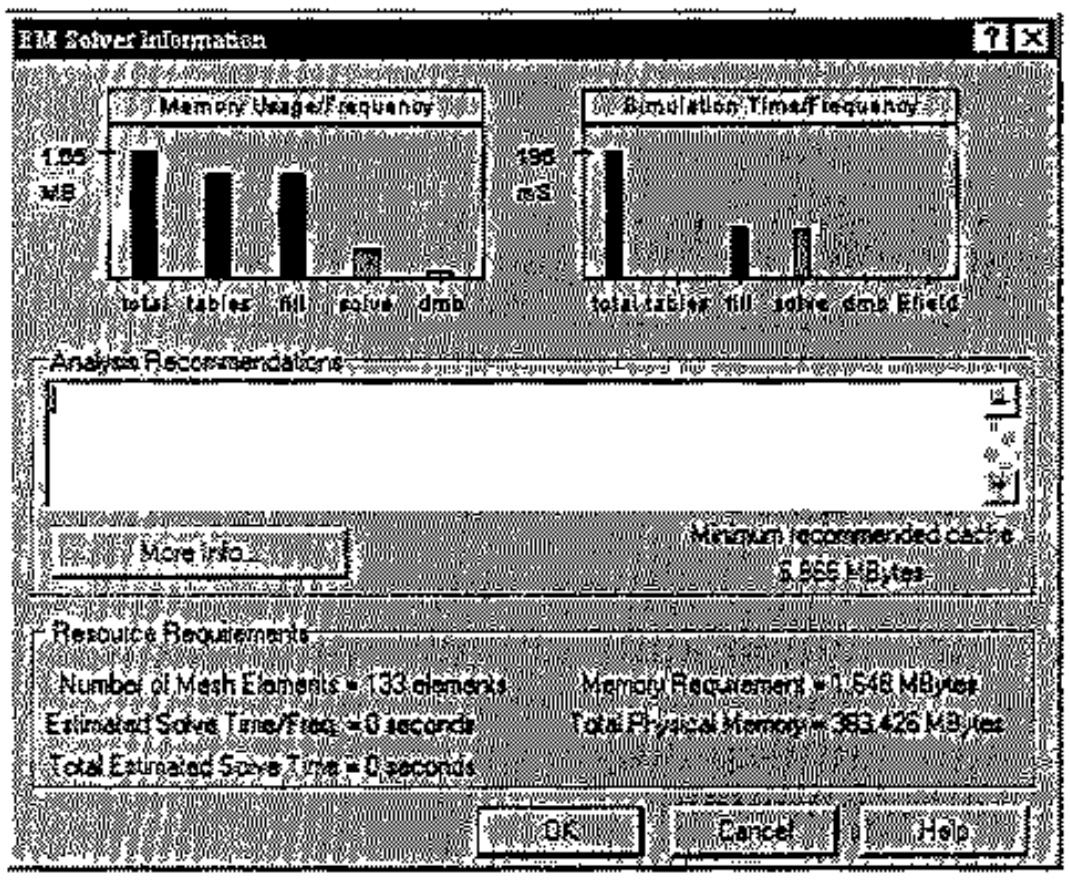


Рис. 2.31. Информация о необходимых ресурсах расчета EM задачи

2. Нажмите **OK** для закрытия этого диалога.
3. Выберите **Simulate > Analyze** или нажмите F8. Индикатор процесса расчета (рис. 2.32) покажет частоты, на которых выполняется решение пошагово и процесс решения электромагнитной задачи.

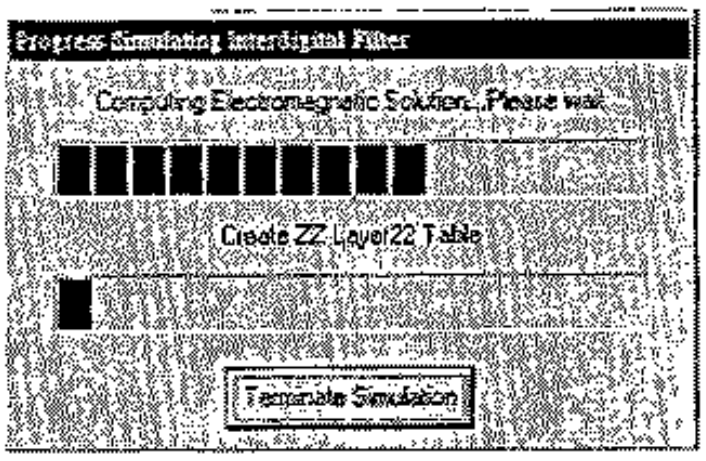


Рис. 2.32. Окно прогресса моделирования

Совет. *Если величина требуемой памяти для решения данной задачи больше чем имеющаяся память, попробуйте переопределить задачу так, чтобы она запускалась с имеющейся памятью компьютера.*

2.10.8. Вывод результатов моделирования

Для определения резонансной частоты вы можете вывести вносимые потери структуры. Чтобы показать характеристику на графике:

1. Выберите **Project > Add Graph**. Появляется диалог Graph.
2. Выберите **Rectangular** как Graph Type (рис. 2.33) и кликните **OK**.

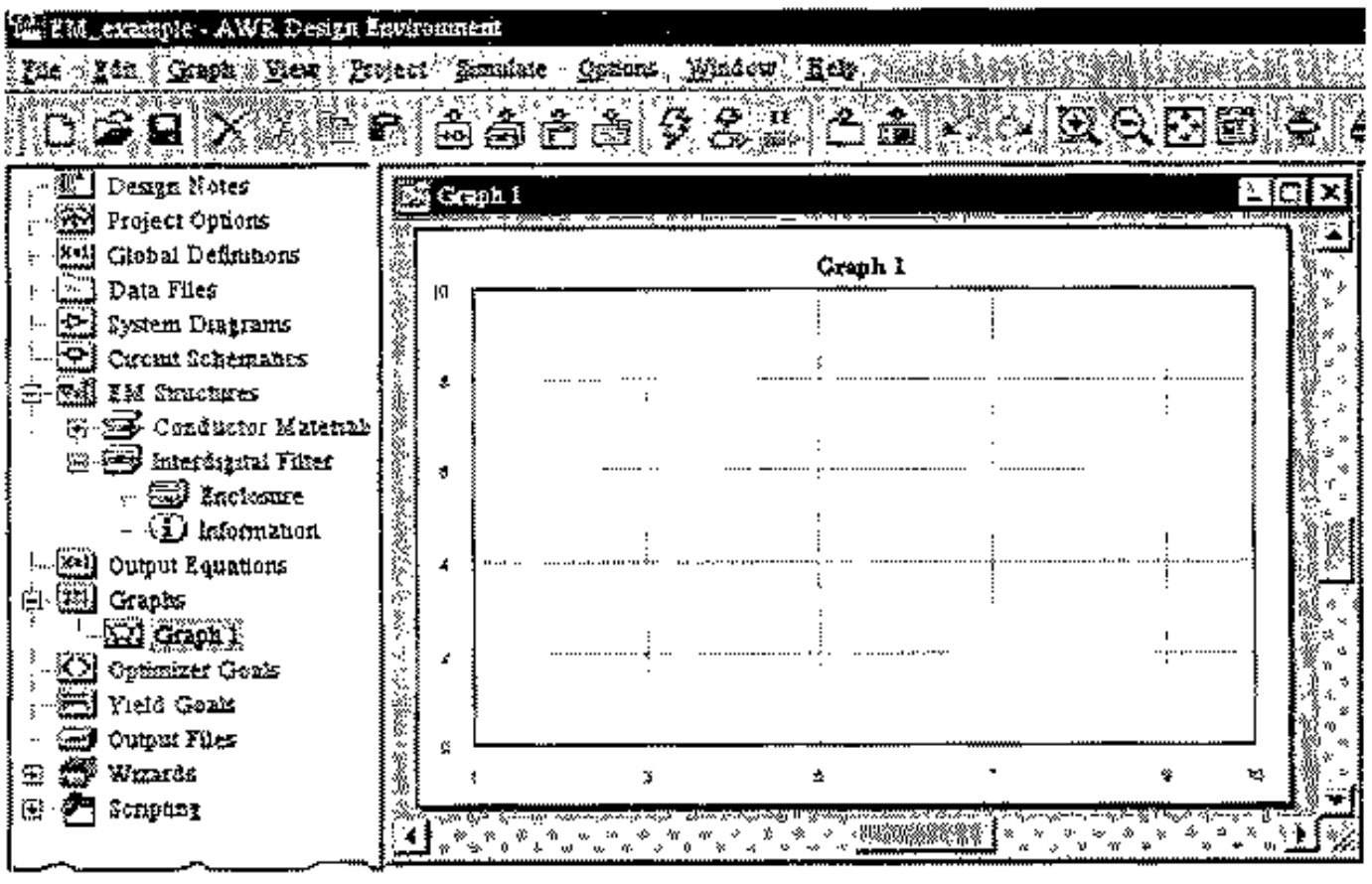


Рис. 2.33. Создания прямоугольного графика Graph 1

3. Кликните на окно Graph 1 для активизации его (рис. 2.33).
4. Выберите **Project>Add Measurement**. Появляется диалог Add Measurement.
5. Выберите **S(1, 1)** как характеристику (рис. 2.34), выберите **Interdigital Filter** как **Data Source Name**, отметьте **DB** в окне Result Type, кликните **ADD** и затем кликните **Close**.
6. Выберите **Simulate > Analyze**. Характеристика показывает, что резонансная частота находится вблизи 4 ГГц.

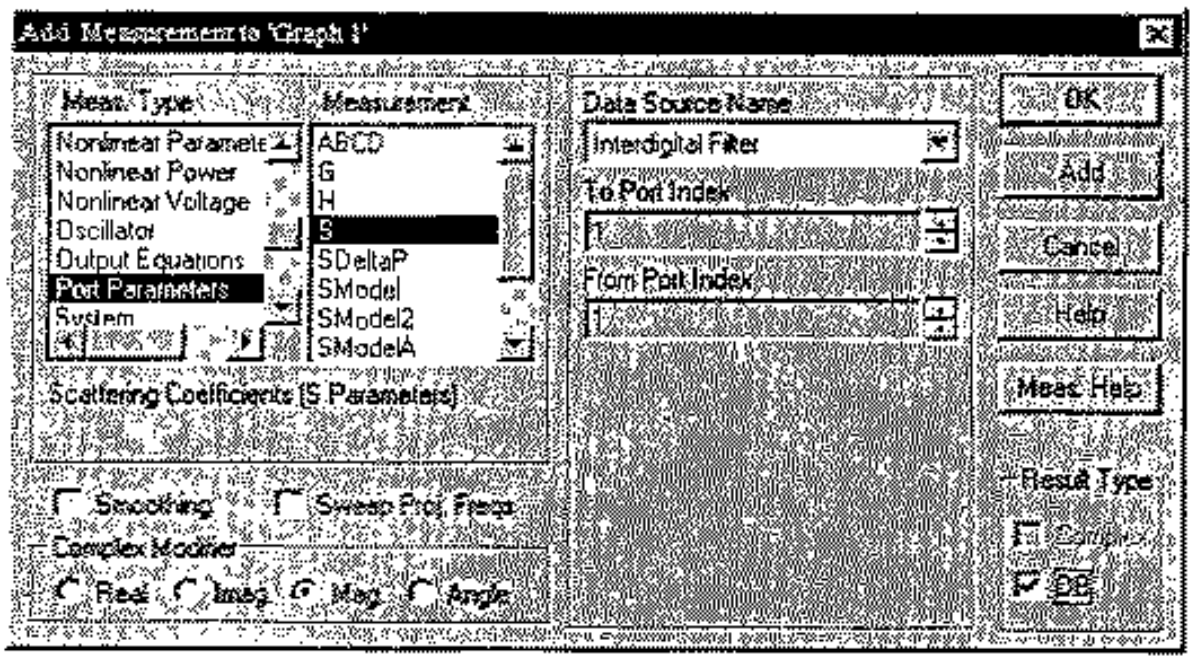


Рис. 2.34. Диалог вывода частотной характеристики на график

Для определения более точного значения резонансной частоты, вы можете изменить частотный диапазон и шаг частоты моделирования.

Изменение диапазона частот и размера шага:

1. В дереве проекта, нажмите правой кнопкой мыши на Interdigital Filter под EM Structures и выберите Options. Появляется диалог Options.
2. Выберите закладку Frequency Values.
3. Напечатайте «3» как значение Start, «5» как значение Stop, значение «0.1» как Step, и затем кликните Apply. Нажмите OK.
4. Выберите **Simulate** > **Analyze** для повторного моделирования структуры. Характеристика показывается на графике рис. 2.35.

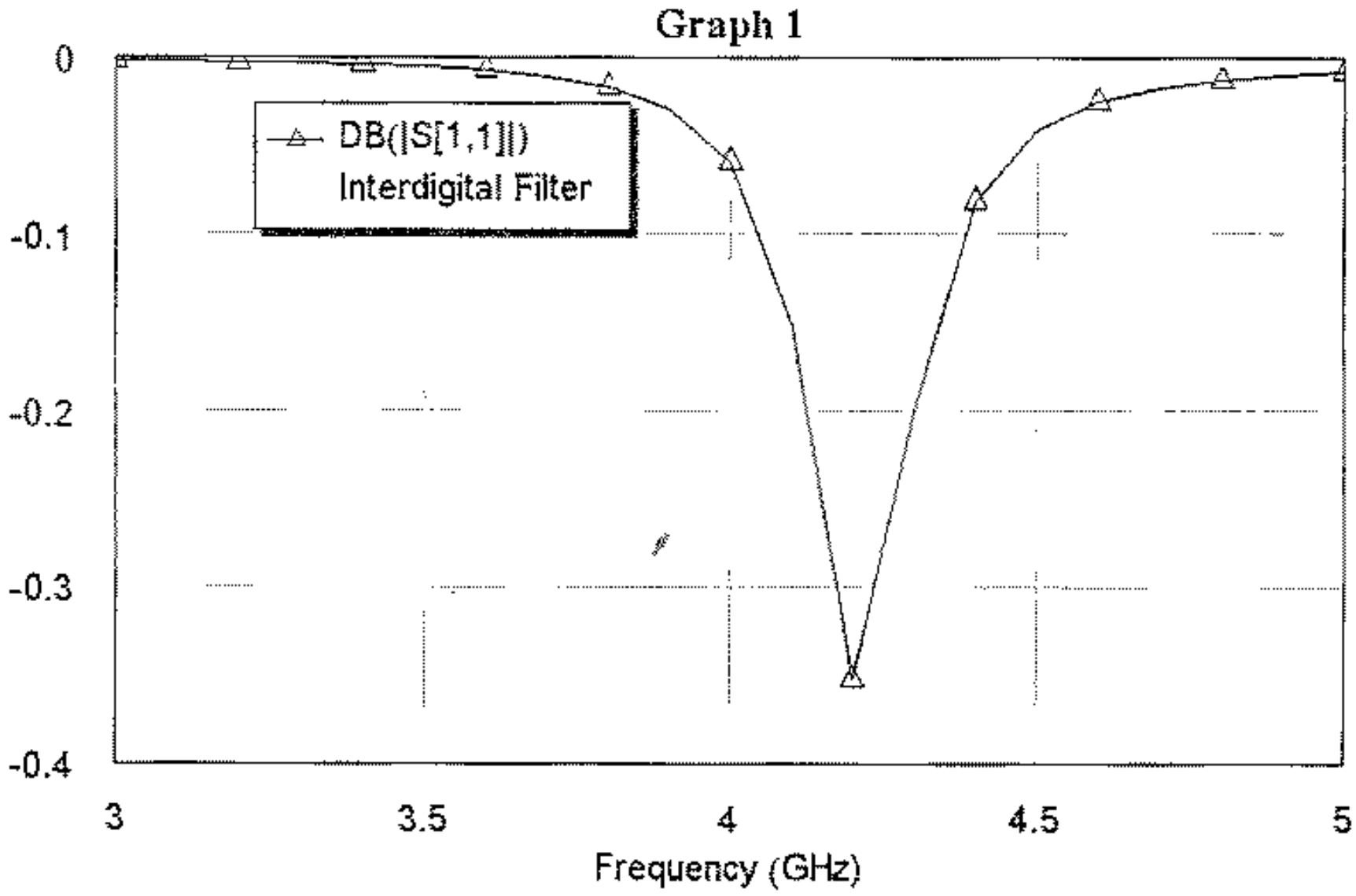


Рис. 2.35. Частотная характеристика

2.10.9. Анимированив тока и просмотр электромагнитного поля

Просмотр анимированного тока и поля в структуре может быть полезным при исследовании его физических характеристик. Для анимирования тока на проводниках:

1. Кликните окно 3D, чтобы сделать его активным.
2. Выберите **Animate > Animate Play**. Анимированные токи показываются на топологии в 3D виде (рис. 2.36).

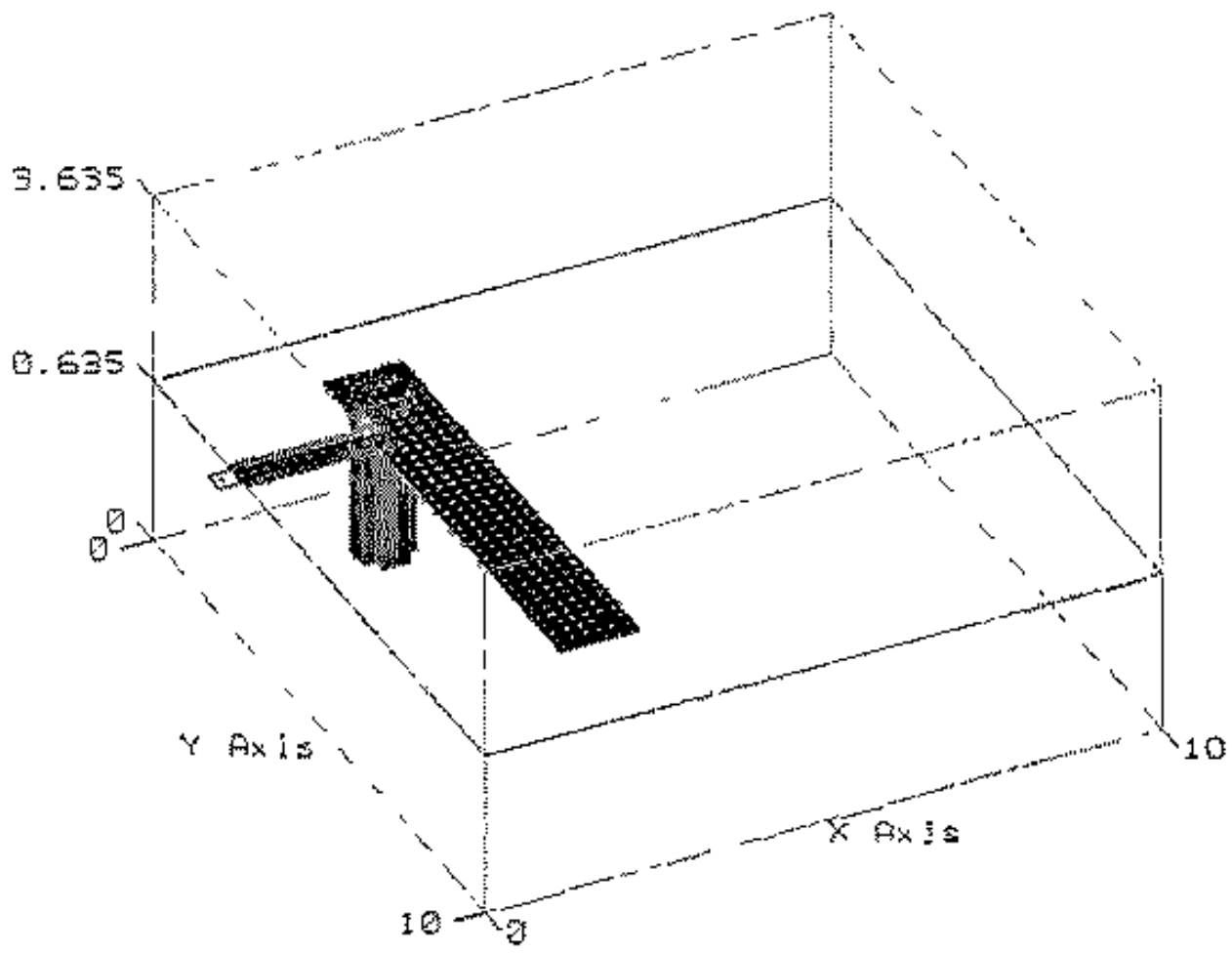


Рис. 2.36. Визуализация и анимация вида тока на поверхности проводника

3. Выберите **Animate > Stop** для прекращения анимации.

Чтобы показать электрическое поле на слое 2:

4. Выберите **Animate > E-Field Setting**. Появляется диалог E-Field Computation (рис. 2.37).

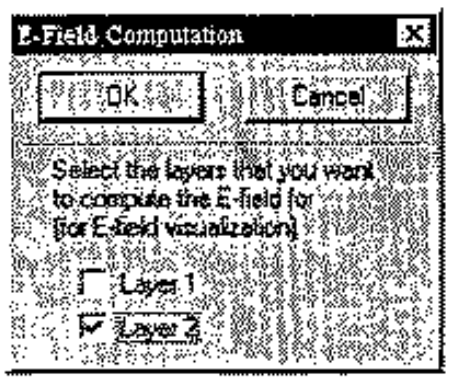


Рис. 2.37. Установка для расчета электрического поля в диэлектрическом слое

5. Выберите **Layer 2** и кликните **OK**.
6. Выберите **Animate > Analyze** для расчета электрического поля.

7. Выберите **Animate > Play** для просмотра тока и электрического поля (рис. 2.38).
8. Выберите **Animate > Stop** для остановки анимации.

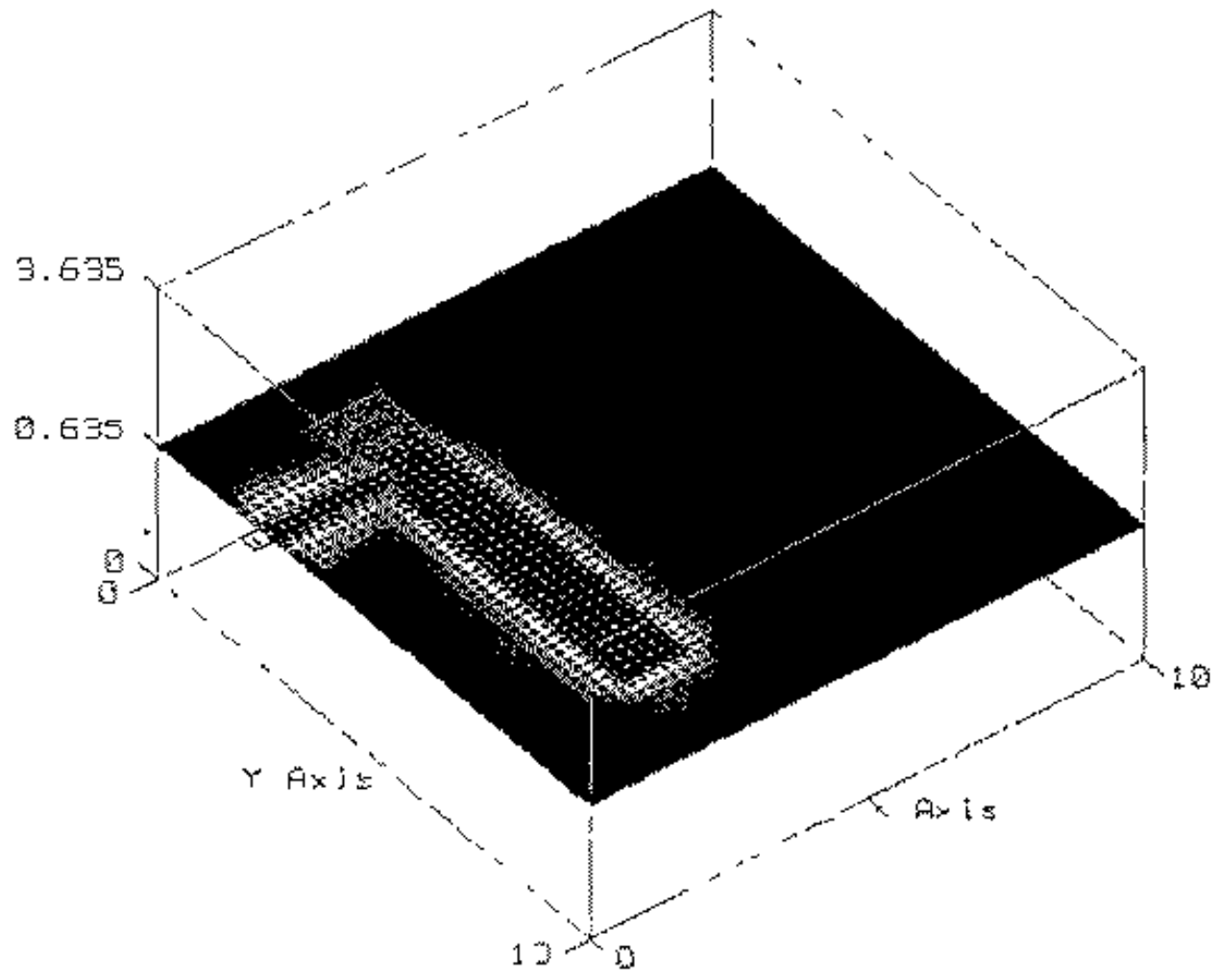


Рис. 2.38. Просмотр напряженности поля в плоскости слоя

Для исключения расчета поля:

9. Выберите **Animate > E Field Setting**. Появится диалог расчета поля, в котором деселектируйте **Layer 2** и кликните **OK**.

2.10.10. Завершение черчения топологии

Для того чтобы получить окончательную структуру фильтра, мы будем использовать несколько опций рисования.

Чтобы добавить маленький проводник в конце входного резонатора:

1. Кликните на окно Interdigital Filter чтобы сделать его активным.
2. Выберите **Draw > Add Rect Conductor**.
3. Сдвиньте курсор в окно Interdigital Filter и выберите **View > Zoom Out**. Нажмите клавишу **Tab**. Появляется диалог ввода координат.
4. Напечатайте «2» в окне *x* и «8.2» в окне *y* и затем нажмите **OK**.
5. Нажмите клавишу Tab снова и отметьте Re в дивлоге ввода координат.
6. Напечайте «-0.4» как величину dx и «-0.2» как dy и затем нажмите **OK**. Прямоугольный проводник покажется в окне EM структуры (рис. 2.39).

Чтобы нарисовать выходной резонатор:

7. Выберите **Edit > Select All**.
8. Выберите **Edit > Copy**, и затем **Edit > Paste**.

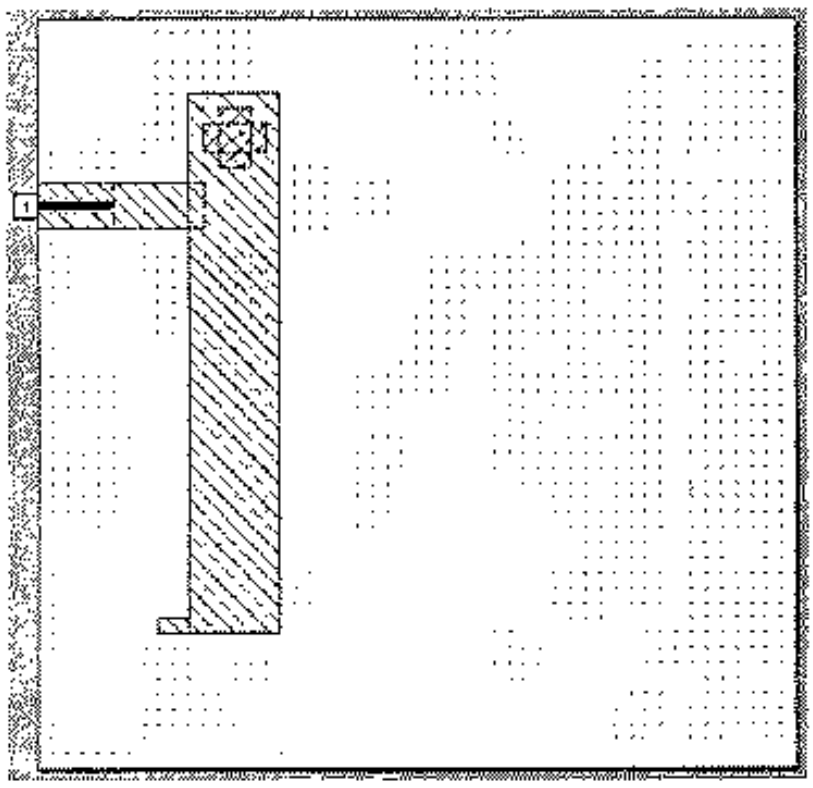


Рис. 2.39. Установка порта и сдвиг референсной плоскости

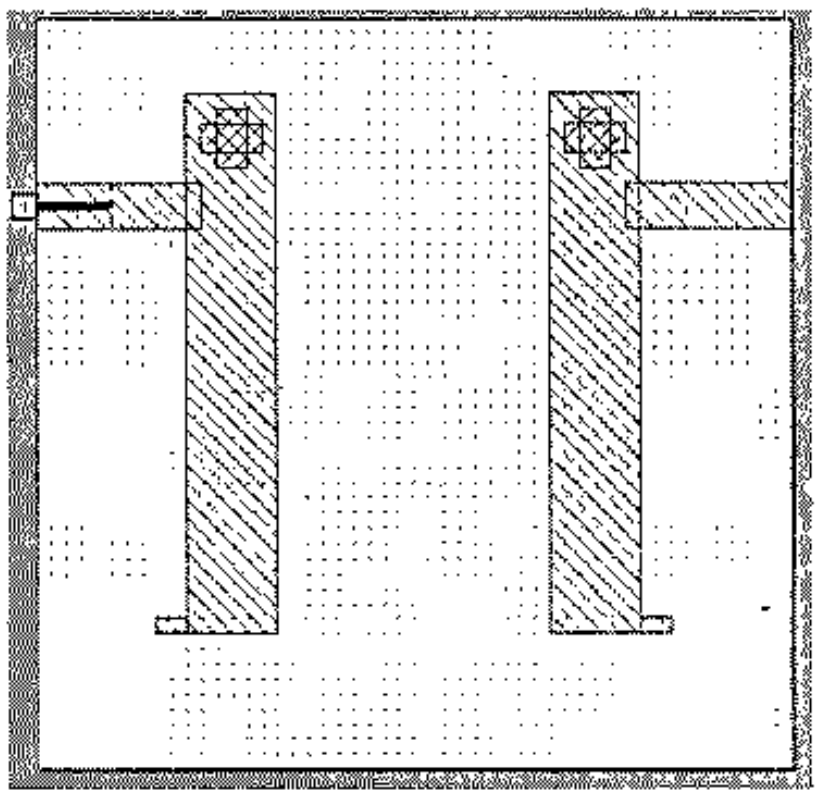


Рис. 2.40. Процесс создания топологии фильтра

9. Сдвиньте курсор и расположите копию вне входного резонатора.
10. Выберите **Draw > Flip**.
11. Сдвиньте курсор в середине EM окна. Кликните, а затем установите перевернутое изображение в место, противоположное входной линии (рис. 2.40).

Выровняйте перевернутую часть фильтра с выходным краем.

Для создания среднего резонатора:

12. Кликните вблизи левого угла левого резонатора и охватите резонатор.
13. Выберите **Edit > Copy** а затем выберите **Edit > Paste**. Затем нужно перевернуть внутренний резонатор на 180°.

Добавление порта

Для завершении EM структуры, необходимо добавить порт на выход фильтра.

Чтобы добавить порт и линию разгерметизации длиной 1 мм:

1. Кликните и активизируйте правую часть фильтра.
2. Выберите **Draw > Add Edge Port**.
3. Разместите курсор на правом краю фильтра и кликните на этом месте.
4. Внесите и передвиньте, аналогично первому порту, плоскость сдвига референсной плоскости, которую нужно протянуть до координаты dx: -1. Окончательно структура имеет вид показанный на рис. 2.41.

Выберите **Simulate > Analyze** для анализа топологии.

Добавьте на график также характеристику S21 в DB. График будет иметь вид, показанный на рис. 2.42.

Этим завершается пример моделирования EM структуры. Для сохранения работы выберите **File > Save Project**.

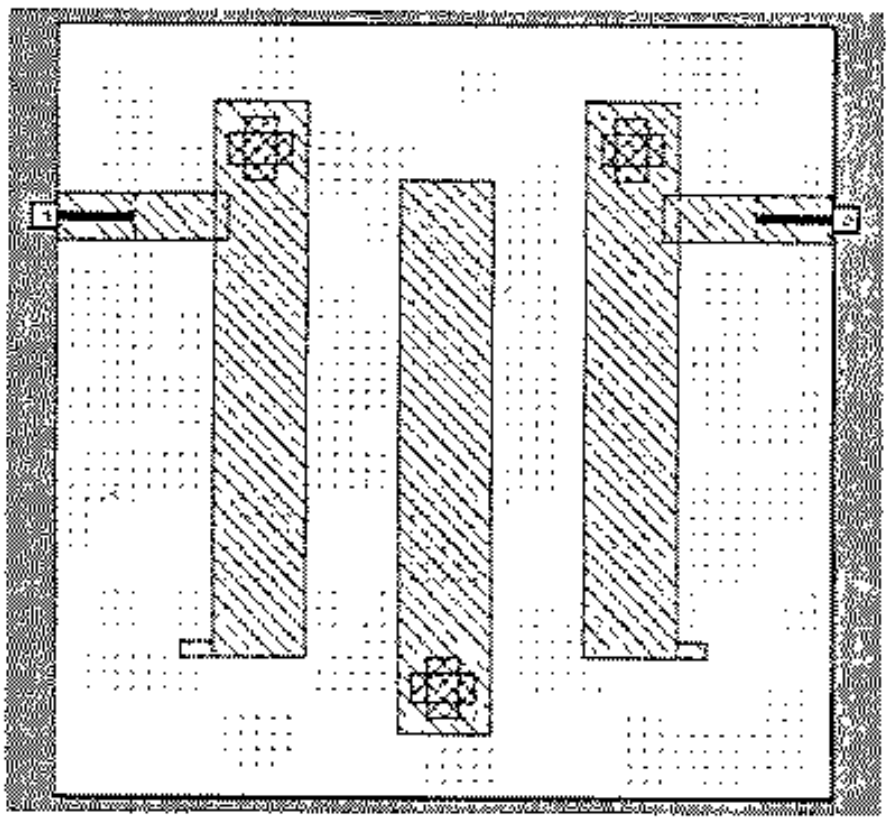


Рис. 2.41. Окончательная топология фильтра

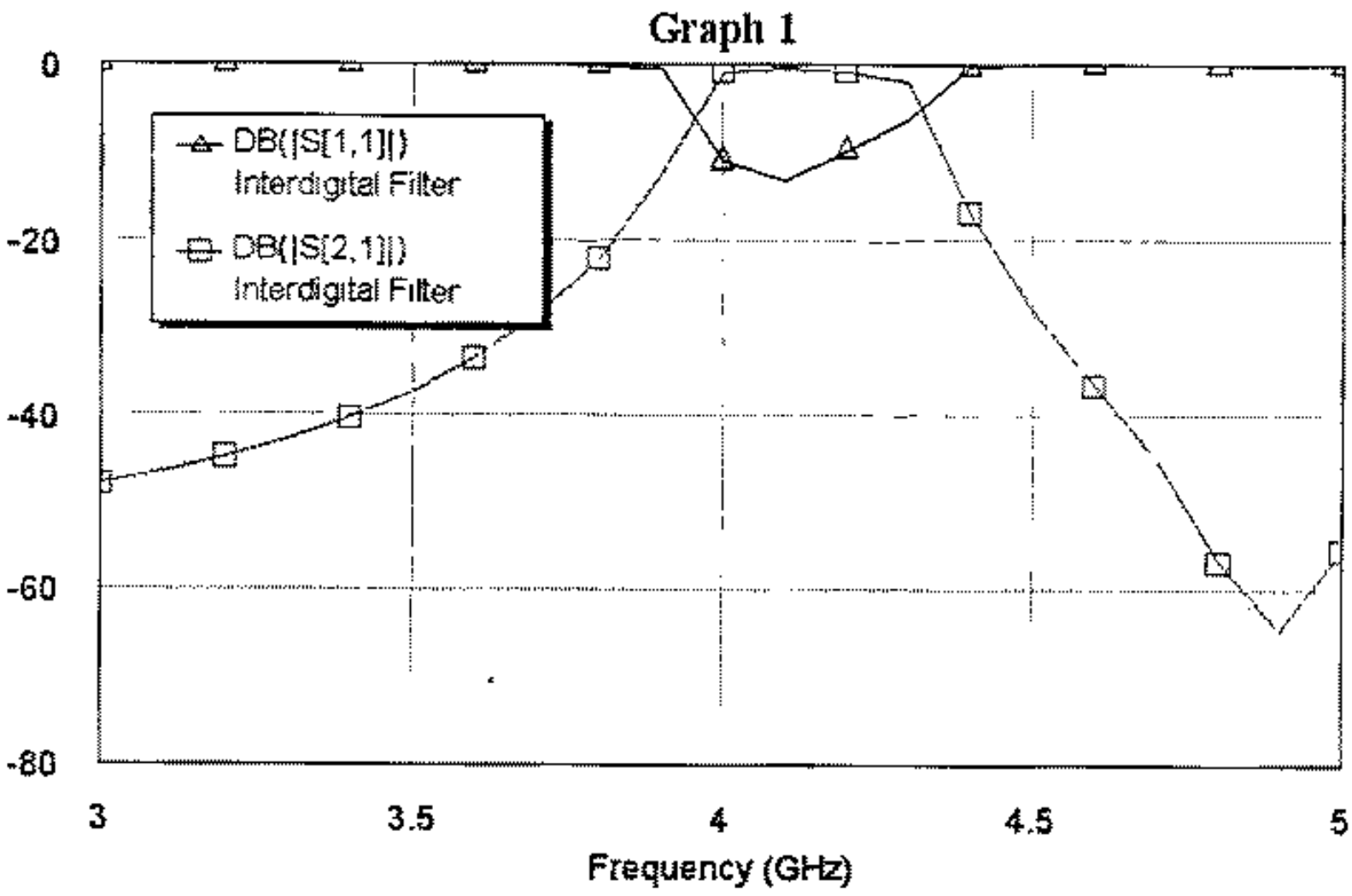


Рис. 2.42. Частотная характеристика фильтра

2.11. Моделирование в EMsight

Программа EMSight может анализировать структуры с неограниченным числом слоев и неограниченным числом портов. Соединения между слоями, как в виде проволочных перемычек, так и в виде вертикальных стенок, создаются с помощью элементов VIA. Автоматическое разбиение на ячейки с переменными размерами, выполняется так, что ячейки имеют меньшие размеры в местах с боль-

шим изменением плотности тока и большие размеры в местах с более равномерным изменением тока. Пользователь может управлять размерами ячеек, увеличивая плотность на отдельных многоугольниках из страницы **Mesh** диалога **EM Options**. Сгенерированное разбиение на ячейки можно просмотреть во время редактирования геометрии, так что влияние изменения сетки можно заметить немедленно.

Разбиение проводников. Ток, который вычисляется во время моделирования, относится к центрам различных прямоугольных ячеек, как показано на рис. 2.43. Режим разбиения структуры управляется из страницы **Mesh** диалога **EM Options**. Ячейки структуры могут просматриваться по команде **Structure > Show Mesh**.

Разбиение структуры на ячейки управляется со страницы **Mesh**. В дополнение к управлению генерированием ячеек для всей структуры, в диалоге **EM Options**, можно задать параметры на странице **Mesh** (рис. 2.44).

Размер ячеек определяется рабочей длиной волны для линии передачи на том же самом слое. Кроме того, при разбиении учитывается плотность разбиения **Low**,

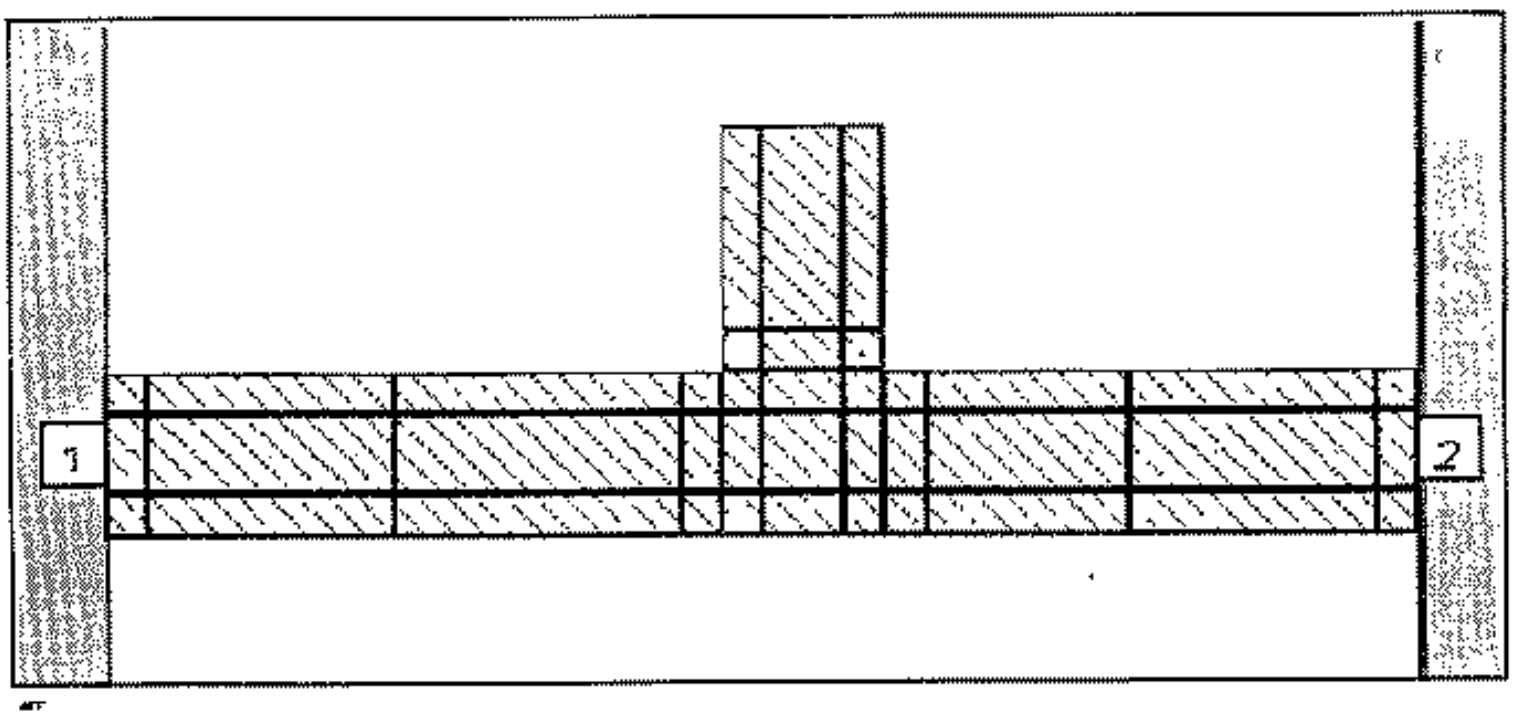


Рис. 2 43. Разбиение структуры на ячейки

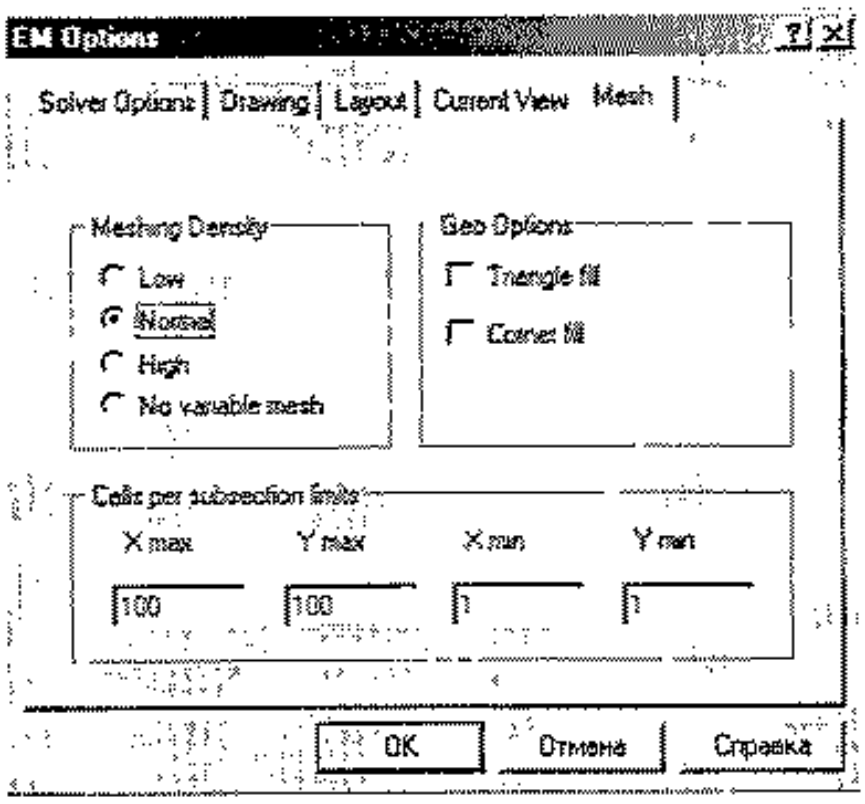


Рис. 2.44. Страница разбиения электромагнитной структуры на ячейки

Normal или **High**. Разбиение может также быть установлено, чтобы создать одинаковые ячейки сетки, выбирая **No variable mesh**. При задании ячеек с разбиением **Low** они будут иметь наибольшие размеры и соответственно меньшую точность расчетов. Нормальная плотность ячейки **Normal** — значение по умолчанию, в то время как переменные ячейки **High** или **No variable mesh** могут использоваться, когда желательна более высокая точность. Xmin и Xmax, Ymin и Ymax определяют минимальный и максимальный размер ячейки.

Задание специального разбиения проводника на ячейки. Специальные параметры ячеек могут быть установлены для отдельных форм проводника (в закладке **Mesh**, рис. 2.44). В областях, где предполагается, что плотность тока сильно меняется, устанавливается плотности разбиения **High**, а в областях с низкими плотностями тока — плотность **Low**, что может быть более оптимальным в этом случае.

Параметры Geo (требуются при работе совместно с программой Sonnet) используются для установки специального разбиения форм в формате файла Sonet GEO.

2.12. Параметры EM решающего устройства

Каждая EM структура в проекте **EMSight** имеет собственный набор параметров. Кроме того, проект EMSight также имеет установки по умолчанию. Параметры, используемые в конкретной структуре, могут быть установлены в диалоге **EM Options** (рис. 2.45).

Дивлог редактирования параметров проекта может быть открыт правой кнопкой на **EM Structure** или по команде **Project > Default Options**. В этом диалоге находятся следующие установки:

De-embed ports/feed lines (исключение линий питающих портов). Если эта опция включена, неоднородности портов, которые возбуждают высшие типы волн вблизи портов, будут автоматически удаляться и S-параметры пересчитываются к опорным плоскостям, приложенным к портам и обозначенным стрелками, с помощью алгоритма сдвига опорных плоскостей (разгерметизации) **EMSight**.

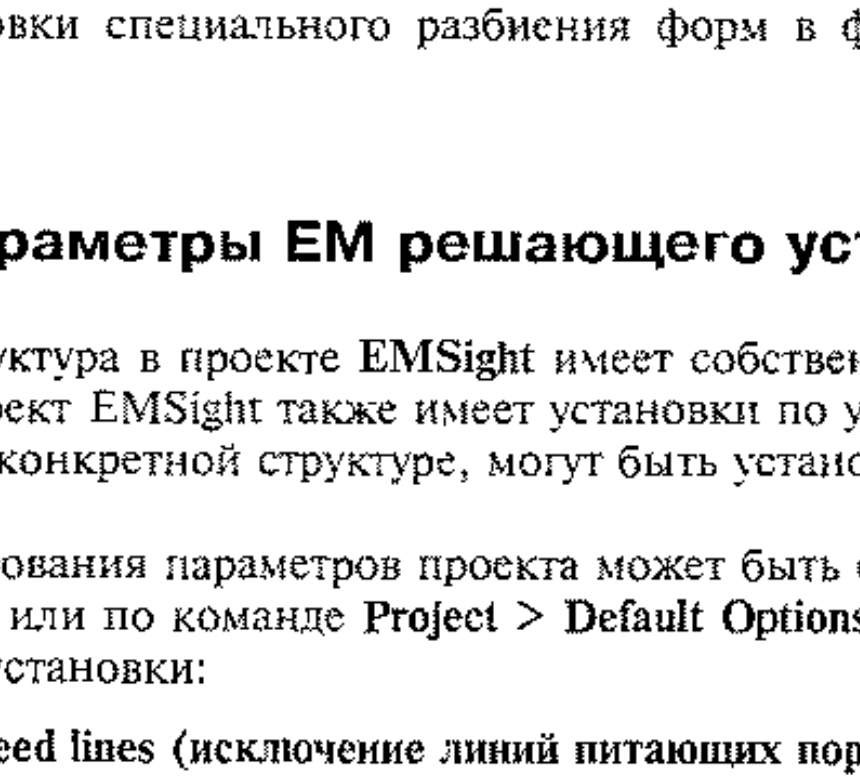


Рис. 2.45. Установка параметров решающего устройства

Compute loaded currents (вычисление токов в подводящих линиях). Когда эта опция включена, EMSight использует портовые нагрузки, чтобы показать токи в структуре, подключенной к нагрузкам. Решение с нагрузками используется только в случае анимации тока. Время, требуемое, чтобы вычислить токи нагрузок — относительно небольшое, так что эта опция обычно оставляется включенной. Если выбрана команда **Show Current**, будет показано решение для стоячих волн токов. Пример отрезка микрополосковой линии, параметры расчета которого установлены по умолчанию, показан на рис. 2.46. Ток в проводниках представляется в виде бегущих волн тока на металлических поверхностях.

Use fast de-embedding (использование быстрого исключения). Процедура исключения требует анализа двух отдельных «исключаемых» (de-embedding) линий-стандартов. Обычно это требуется для проведения полностью независимого анализа с различными размерами корпуса.

Алгоритм фиксированного исключения определяет требуемые «исключаемые стандарты», используя таблицы моментов для всей структуры, что устраняет необходимость вычислять новый набор таблиц моментов для разгерметизации.

Недостаток алгоритма фиксированного исключения состоит в том, что в настоящее время он выполняется исключительно для боковых сторон, которые имеют единственный порт. Когда имеется несколько портов на одной стороне, в программе автоматически используется стандартное исключение (исключение стандартов) вместо фиксированного исключения. Другой недостаток алгоритма фиксированного исключения состоит в том, что он не работает, когда длина корпуса близка к $N \times \lambda/2$. Решающее устройство предупреждает, когда обнаруживает это.

Fast Frequency Sweep (быстрая развертка частоты). Когда эта опция установлена, при моделировании будет использоваться быстрая частотная развертка (FFS). В режиме FFS можно получить частотную характеристику структуры в широком диапазоне частот (с шириной диапазона до 200%), при выполнении расчета только на одной частоте. Информация, которая вычислена на этой частоте, используется для экстраполяции частотной характеристики, что требует значительно меньших вычислительных затрат, чем те, которые требовались бы для расчета на всех частотах (алгоритмом «от точки к точке»).

Max Diff Order (максимальный порядок дифференцирования). Решающее устройство в режиме FFS не только вычисляет токи структуры, но также и их производные высших порядков. Величина **Max Diff Order** (рис. 2.45) определяет максимальный порядок производной тока, которых будет вычисляться в алгоритме FFS. Время, требуемое для вычисления производных высоких порядков, значительно возрастает с увеличением порядка производной, в то время как использование этих производных позволяет определить частотную характеристику в более широком диапазоне частот. Использование меньшего значения **Max Diff Order**



Рис. 2.46 Распределение тока в отрезке микрополосковой линии

ускорит моделирование структур, которые не нужно моделировать в широком диапазоне частот.

Error Tolerance (допуски на погрешность). Решающее устройство FFS использует оценку погрешности при экстраполяции, чтобы определить диапазон частот, в котором получается достоверное решение FFS. Если используется малый допуск, то частотная характеристика, полученная решающим устройством FFS, будет более широкой, но достоверность расчетов на краях полосы частот будет низкой. Если задается большой допуск, то будет большая уверенность в точности решения, но экстраполируемая ширина диапазона частот не будет широкой. По умолчанию обычно устанавливается удовлетворительное значение, хотя самая лучшая установка будет зависеть от задачи. Опция **Relative Error** использует оценку относительной ошибки вместо обычной оценки абсолютной погрешности. Если вы используете FFS, чтобы анализировать частотную характеристику, которая имеет малую величину S_{11} (например, меньше −30 дБ), то абсолютная погрешность между правильной и экстраполируемой характеристикой можете быть малой, в то время как относительная ошибка может быть очень большой.

Matrix Solver (решение матриц). В программе имеется возможность изменять отдельные параметры решающего устройства, которое оперирует с матрицей моментов. Выбор параметров решающего устройства влияет на требуемую память и время решения, кроме того опции **Single Precision** влияет на точность расчетов. Матрица моментов — симметричная (одна половина матрицы — зеркальное изображение другой половины). **EMSight** может сохранять матрицу моментов как полную матрицу (сохраняя все входы) или как симметричную матрицу (где сохранены только половина входов). Метод хранения матрицы определен параметрами решающего устройства, перечисленными ниже.

Default (значение по умолчанию). Опция ***Default*** позволяет EMSight выбрать оптимальные параметры, лучшие для данной задачи. Опция по умолчанию выберет между симметричным и полным решающим устройством на основании размеров задачи, доступной памяти и типа матрицы (действительная или комплексная).

Full Solver (полное решающее устройство). Полное решающее устройство сохраняет всю матрицу моментов. Его выгодно использовать только когда вся матрица умещается в памяти, и вся матрица действительная (нет потерь в диэлектриках, подложках или на границах). Причина этого — в том, что полное матричное решающее устройство настроено оптимально (для действительной математики) и работает значительно быстрее, чем решающее устройство, которое использует симметричную память (в два раза быстрее!).

Symmetric Solver (симметричное решающее устройство). Это более экономное решающее устройство использует симметричную матрицу и при этом необходимая память в два раза меньше, чем применяя полное решающее устройство.

Single Precision (единичная точность). Эта опция вынудит EMSight использовать при математических вычислениях матрицы моментов единичную точность. Эта точность требует в два раза меньшей памяти для расчета той же самой матрицы, сохраненной с двойной точностью, т. е. режим простой точности обычно используется, чтобы увеличить размер задачи, которая может быть вписана в физическую память. Использование простой точности будет иногда ухудшать точность решения (особенно на более низких частотах), но обычно точность ухудшается незначительно.

Страница Drawing. Страница Drawing (рис. 2.47) позволяет показывать координаты курсора во время операции рисования.

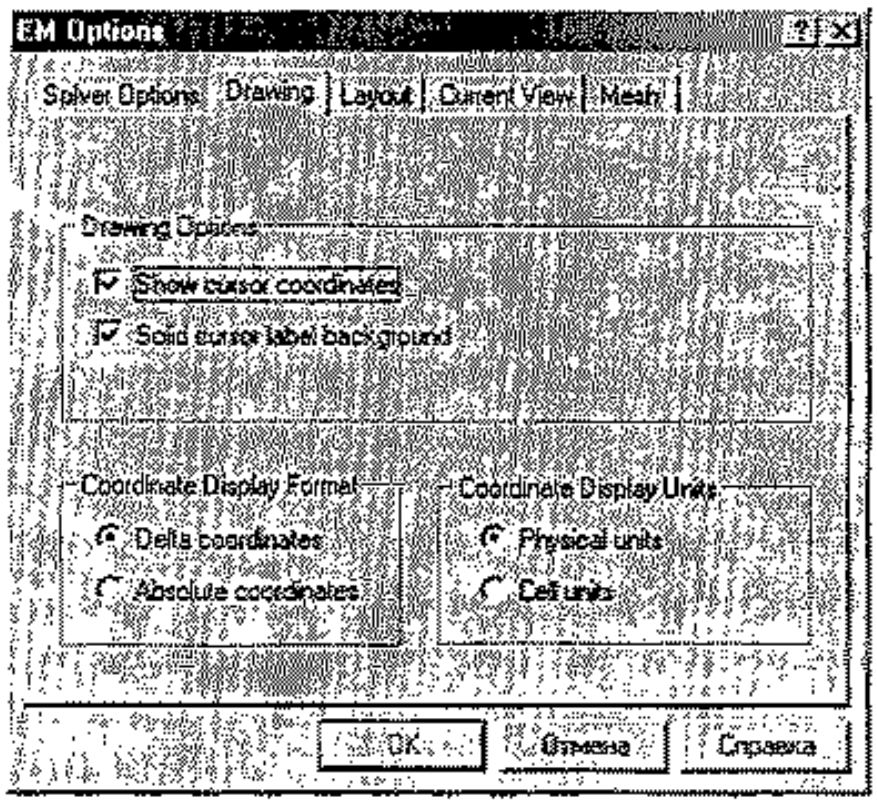


Рис. 2.47. Закладка черчения диалогового окна установки режимов

Далее, имеется возможность видеть курсор как черный на белой подложке (режим **Solid cursor label background**). Другие опции на этой странице означают следующее:

Coordinate Display Format переключает режим показа абсолютных или относительных координат (**Delta coordinates** — относительно той точки, где начинается редактирование).

Coordinate Display Units устанавливает режим показа позиции курсора в физических единицах или в количестве ячеек сетки.

2.13. Страница параметров топологии (Layout)

Страница топологии задает режимы просмотра в двухмерном и трехмерном видах (рис. 2.48). На ней устанавливаются параметры черчения топологии:

Hide non-active layers: *скрыть не активные слои.* В 2-мерном просмотре по этой команде скрываются формы, которые расположены не на активном слое подложки.

Fill non-active layers: *заполнить не активные слои.* В 2-мерном просмотре по этой команде заполняются штриховкой формы на не активных слоях.

Show enclosure outline: *показать контурную структуру корпуса.* В 3-мерном просмотре на подложке и корпусе рисуется иерархическая структура корпуса и слоев.

Draw only outlines: *чертить только контуры.* Эта команда используется, чтобы при вращении корпуса и при изменении перспективы в 3-мерном просмотре чертились только контуры.

Line Thickness: *толщина линии.* Эта настройка задает толщину линий различных элементов конструкции: корпусу, формам и стрелкам.

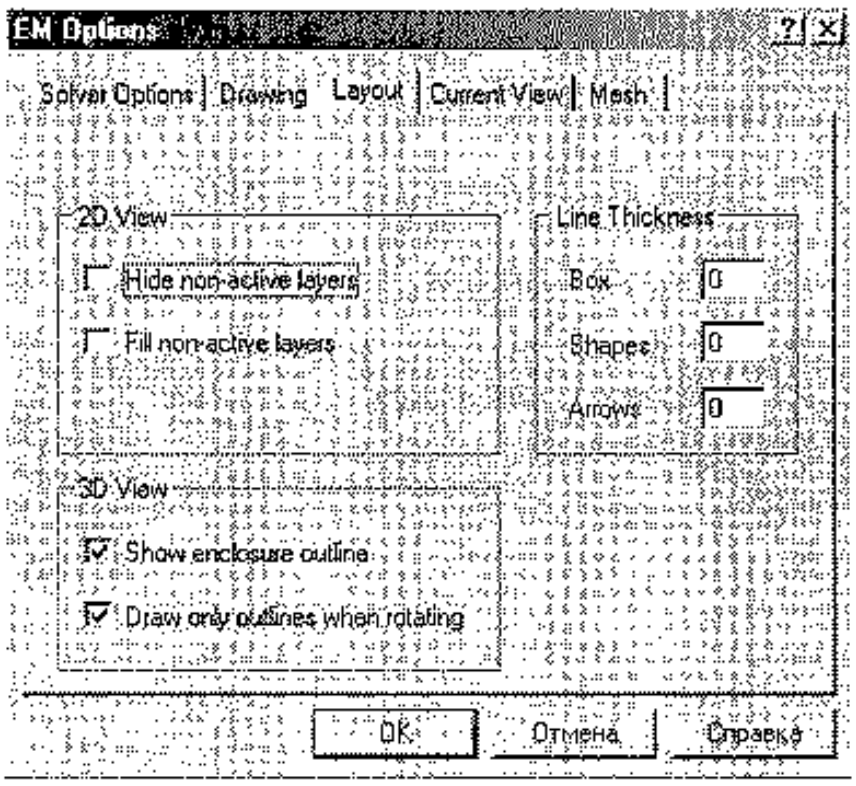


Рис. 2.48. Диалоговое окно топологии: выбор режимов показа активных и неактивных слоев

2.14. Просмотр тока

Страница **Current View** диалогового окна **Options** устанавливает режим показа тока во время анимации (рис. 2.49).

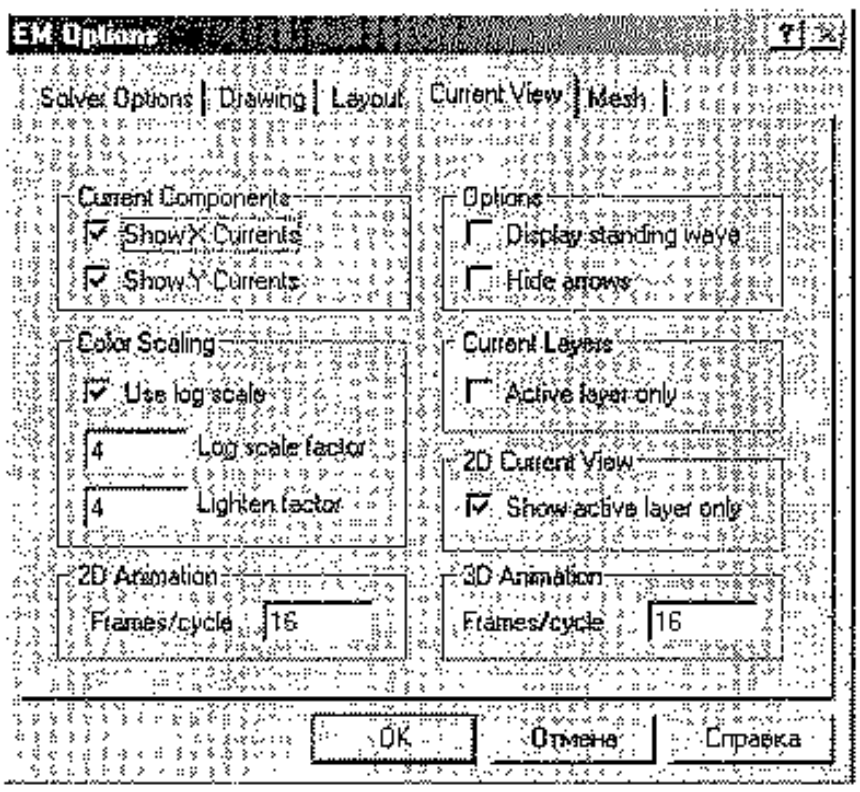


Рис. 2.49. Установка токовых компонентов: использование логарифмической шкалы; показать X- и Y-компоненты; установка режима анимации

Use log scale: *использование логарифмического масштаба.* Режим логарифмического масштаба **Use log scale** используется для задания плотности цвета, используя логарифмическую шкалу от минимума до максимума.

Show X Currents: *показ X-составляющих токов.* Показываются X-компоненты тока для каждой ячейки сетки при анимации распределения тока.

Show Y Currents: *показ Y-составляющих токов на металлических формах.* Показываются Y-составляющие токов для каждой ячейки сетки при анимации тока.

Active layer only: *активизирует только активный слой.* Эта установка выводит токи только на активном уровне в двухмерном, и трехмерном просмотрах. Разница между показом только на активном слое та, что показывается только активный уровень, используя один масштаб для величин токов на всех слоях. в то время как активный слой использует только пересчет токов на активном слое. Это различие важно, когда величина тока на каком-то слое намного больше, чем его величина на активном слое.

Show active layer only: *показать только активный слой.* В двухмерном просмотре по этой команде показываются токи только на активном слое (т. е. только на одном верхнем в режиме 2D).

Frames/cycle: *количество рамок на цикл.* Установка **Frames/cycle** для 2- и 3-мерных просмотров устанавливают число рамок картин поля на один цикл рисования при анимации плотности тока.

Назначение параметров ячейки

Параметры разбиения ячеек устанавливаются по умолчанию для всей структуры. Более подробную информации см. в разделе *Разбиение проводников.*

2.15. Исключение неоднородностей

Автоматическое исключение. Процесс разгерметизации (исключения) удаляет влияние неоднородностей в области портов и подводящих к ним линий на результаты моделирования (пример расчета фильтра показан на рис. 2.50).

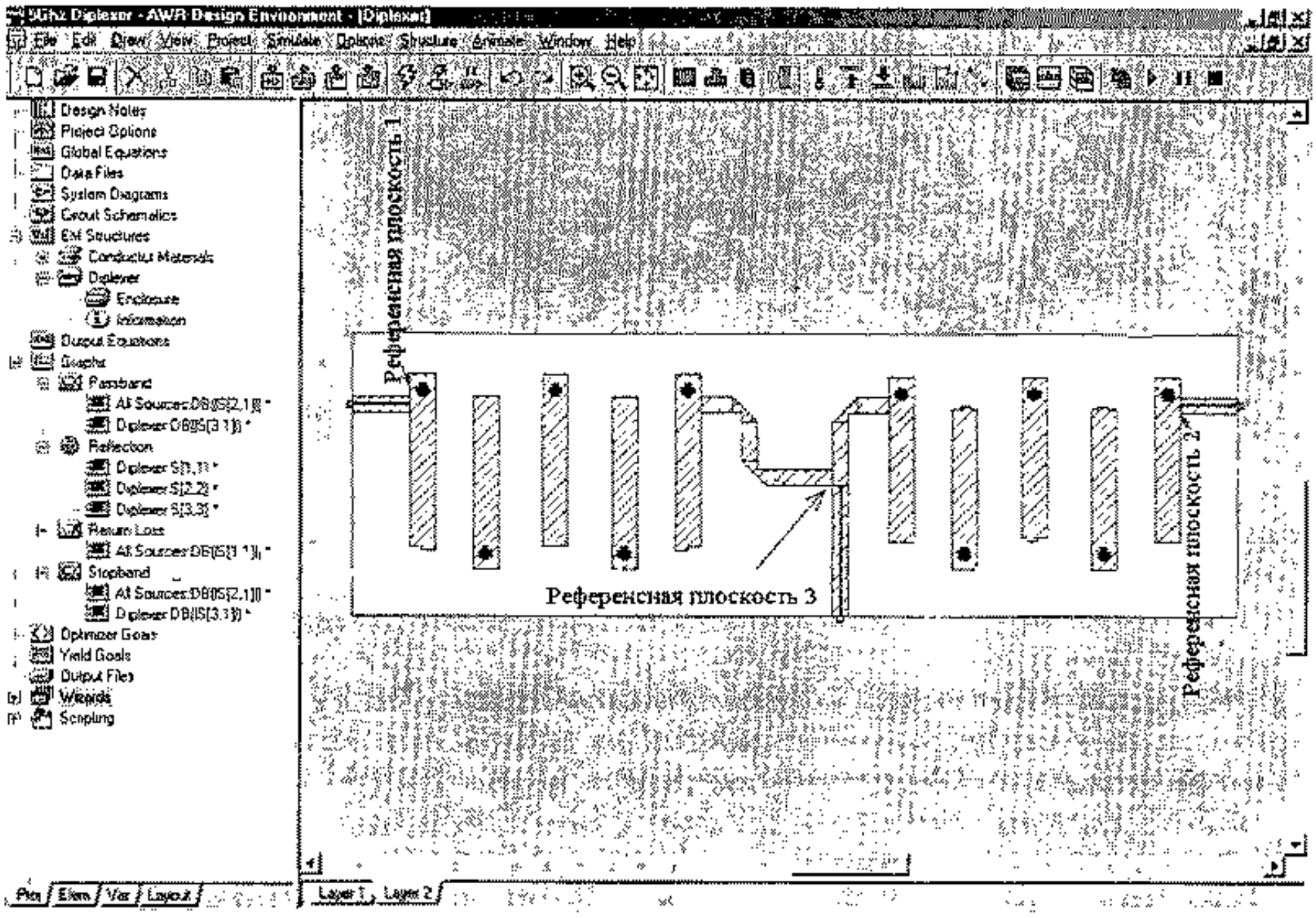


Рис. 2 50. Опорные (референсные) плоскости и исключаемые линии

Первоначально результатом ЕМ моделирования являются S-параметры всей структуры с учетом неоднородности порта и линии передачи до опорной плоскости. Эта структура может быть представлен тремя каскадно включенными цепями. Процедура автоматического удаления подводящих линий используется, чтобы вычислить S-параметры только самого исследуемого прибора DUT, используя первоначальное решение и решения для линий.

Стандартный алгоритм исключения

Процедура исключения требует выполнить анализ двух отдельных «исключаемых линий (стандартов)», чтобы реализовать затем операцию разгерметизации. Анализ исключаемого стандарта требует полностью независимого анализа с различными размерами по отношению к размеру корпуса. Корпус, используемый для независимого моделирования, имеет длину в два раза больше длины опорной плоскости, которая должна быть исключена.

Стандартный алгоритм иногда сталкивается с трудностью расчета, когда длина опорной плоскости кратна половине длины волны. Этот алгоритм может использоваться для любого числа портов на одной стороне. Исключение неоднородностей кратных портов на стороне учитывает связь, которая имеется между параллельными проводниками.

При использовании стандартного алгоритма опорные плоскости должны отстоять достаточно далеко от края корпуса, так чтобы высшие типы волн, вызванные близостью неоднородности порта, не влияли на результаты исключения. Эмпирическое правило — опорная плоскость должна быть удалена от края приблизительно на две высоты подложки. Исключение этому — когда опорные плоскости имеют нулевую длину и могут использоваться при удалении только неоднородности порта.

Алгоритм фиксированного (принудительного) исключения. Алгоритм фиксированного исключения определяет исключаемые «стандарты» используя таблицы моментов главной структуры, которая устраняет потребность вычислить несколько таблиц момента для процесса исключения.

Недостаток алгоритма фиксированного исключения состоит в том, что он в настоящее время реализован только для исключения сторон, которые имеют единственный порт. Когда на стороне имеется несколько портов, программа автоматически использует исключение стандартов вместо фиксированного исключения. Другой недостаток алгоритма фиксированного исключения состоит в том, что этот процесс оканчивается неудачно, когда длина корпуса кратна половине длины волны. Решающее устройство выдает предупреждение, когда обнаруживает эту проблему.

При использовании алгоритма фиксированного исключения опорные плоскости не должны далеко отстоять от края корпуса. Любая длина опорной плоскости должна обеспечить верные результаты, хотя, если неоднородность расположена очень близко к порту, результаты будут давать некоторую погрешность из-за взаимодействия порта и неоднородности.

Для небольших сдвигов опорных плоскостей (рис. 2.51), алгоритм фикси-

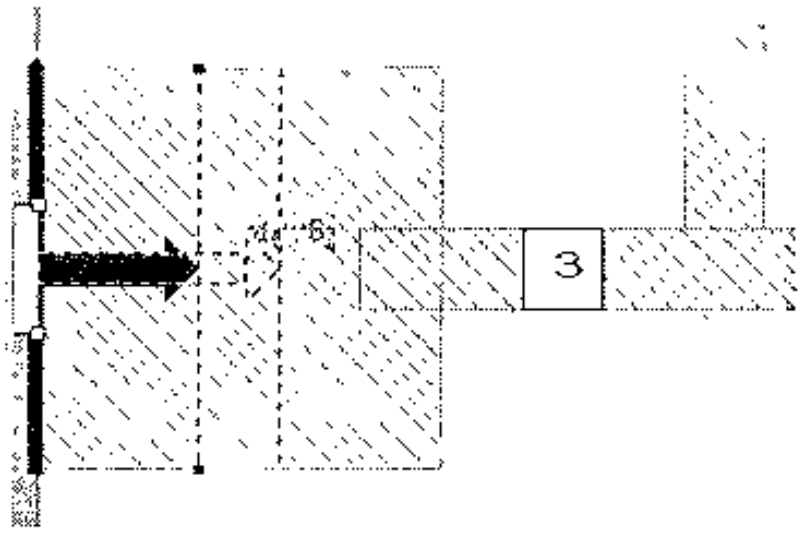


Рис. 2.51. Сдвиг опорной плоскости

рованного исключения и стандартный алгоритм эквивалентны, и они должны выдать идентичные результаты. Когда имеется нулевая опорная плоскость и запускается de-embedding, удаляется только неоднородность порта.

Решающее устройство вычисляет полное сопротивление и постоянные распространения подводящих линий со стороны корпуса, которые имеют только один порт. Если исключаемый стандарт кратен половине длины волны, то решающее устройство не может точно рассчитать постоянную распространения или полное сопротивление этой линии.

Исключение портовых перемычек. EMSight не исключает портовые перемычки автоматически, и любая неоднородность, которая вызвана наличием в схеме перемычек, станет частью решения. Хотя автоматическое исключение не поддерживается, операция исключения может быть выполнена, используя два отрицательных элемента NEG2, которые имеются в линейном моделирующем устройстве Schematics.

Пример. Для структуры, показанной на рис. 2.52, необходимо исключить влияние перемычки.

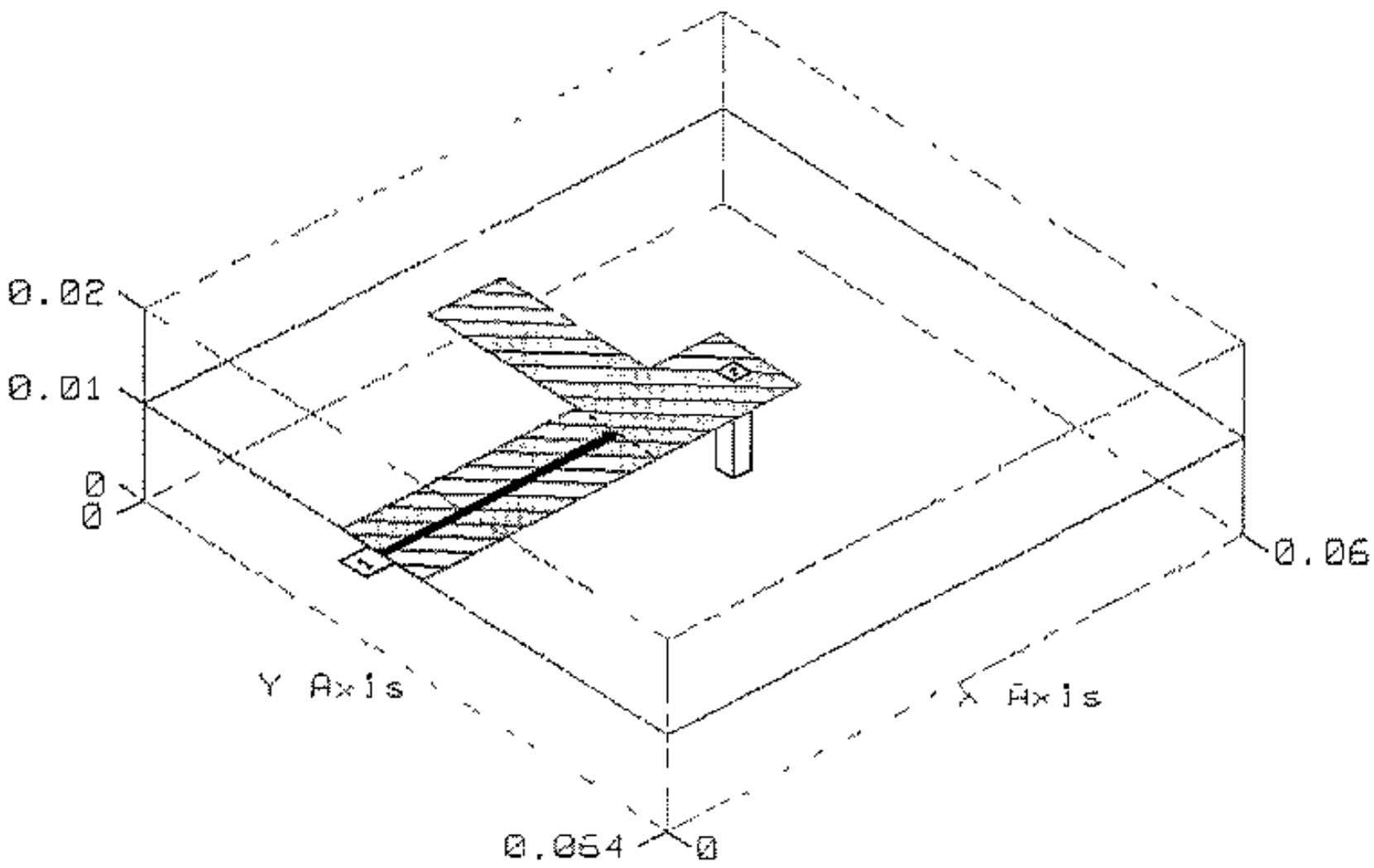


Рис. 2.52. Исключение влияния перемычки на результаты расчета разветвления

Чтобы использовать отрицательный элемент, должна быть создана вторая структура с внутренней портовой перемычкой и питающая линия (feedline), длиной от порта до самой перемычки, как показано на рис. 2.53. Эта структура должна иметь линию с той же самой шириной и высотой, как и исключаемая структура, и перемычка должна иметь то же самое сечение и положение относительно граней.

Процесс исключения должен быть выполнен для обеих сторон структуры, показанных выше. Как только решение будет получено, создается схема с основной структурой и отрицательным элементом, как показано на рис. 2.54.

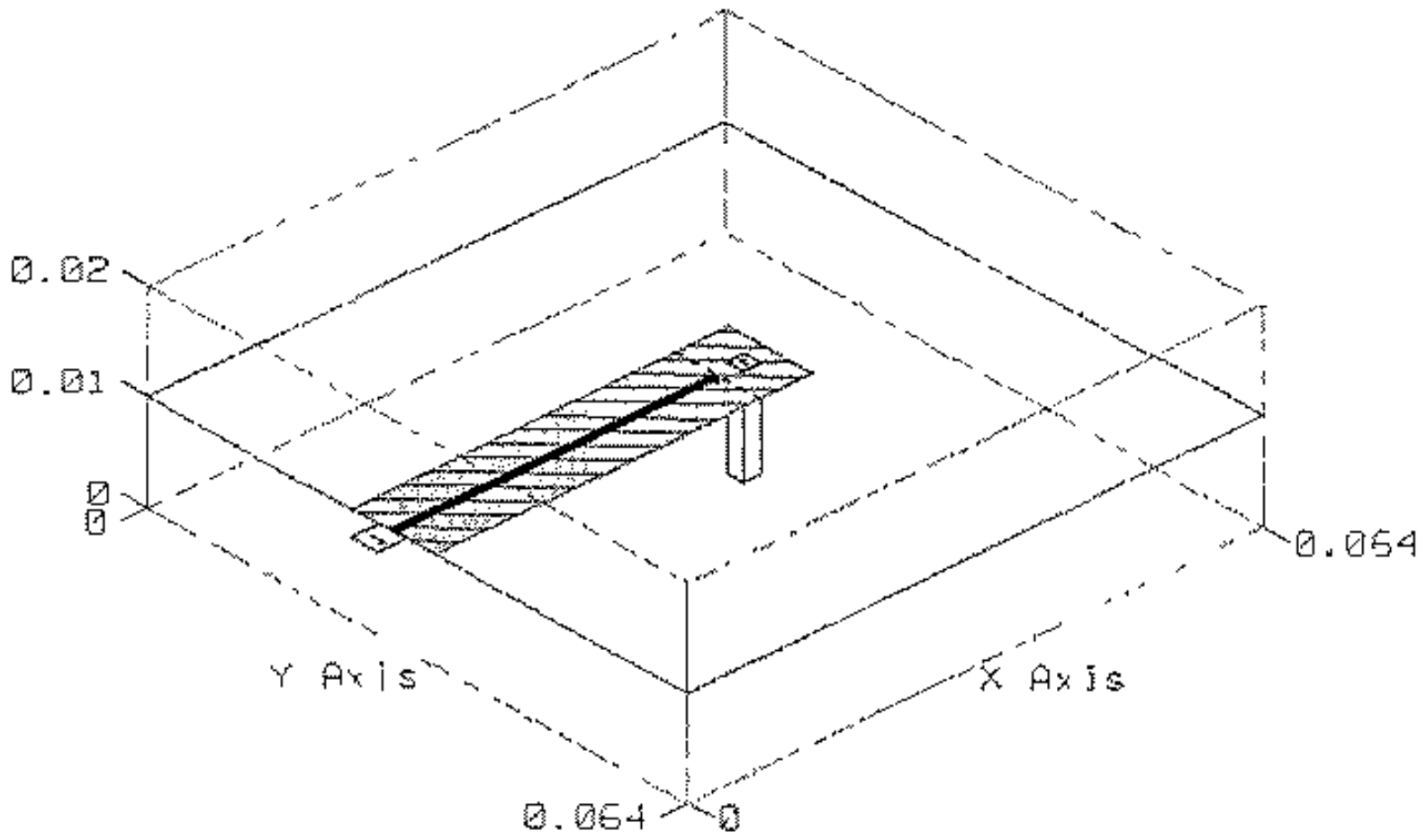


Рис. 2.53. Исключение длинной линии из порта

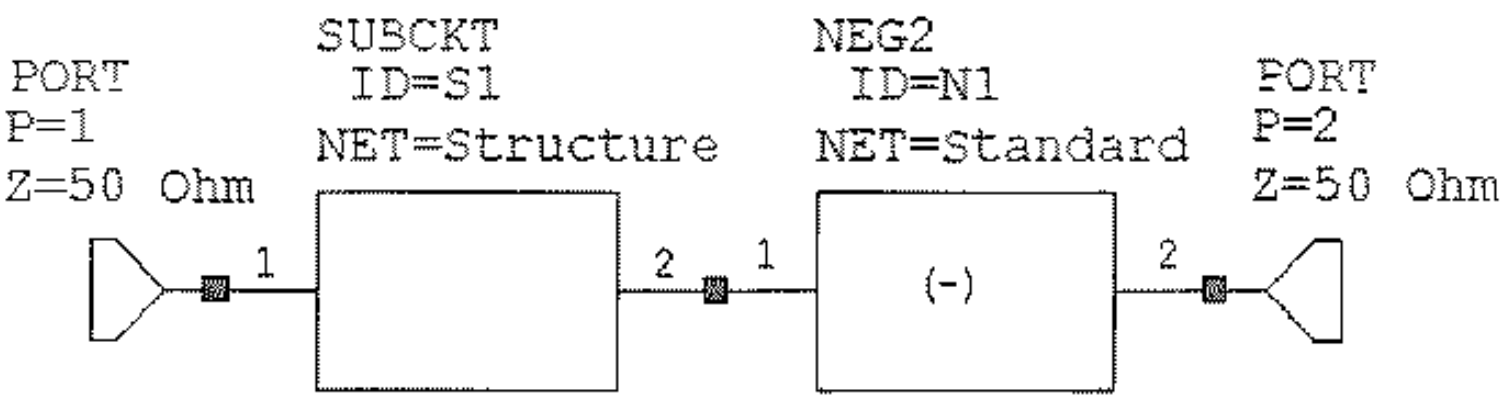


Рис. 2.54. Процесс исключения ЧП

Результирующие S-параметры для этой структуры будут зависеть от перемычки, удаленной в первой структуре, показанной на рис. 2.54.

Таблицы момента. И в решающем устройстве FFS, и в решающем устройстве «от точки к точке», используется алгоритм заполнения матрицы на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ), что увеличивает скорость заполнения и обработки матрицы моментов. Уникальным для EMSight является то, что алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), который используется, чтобы заполнить матрицу, использует кэш на жестком диске. Когда вы должны проанализировать схему, которая использует корпус того же самого размера и тот же самый заполняемый диэлектрик, информация о таблице БПФ читается из кэша, что приводит к значительной экономии вычислительных затрат.

Механизм кэширования полностью контролируется пользователем. Алгоритм управления кэшем автоматически удаляет кэшируемые таблицы, которые используются нечасто, и освобождает максимальное количество дискового пространства, которое может использоваться кэшем.

Механизм кэша может быть конфигурирован пользователем, выбирая в меню команду **Project > EM Cache**. Конфигурирование кэша производится в диалоговом окне, приведенном на рис. 2.55.

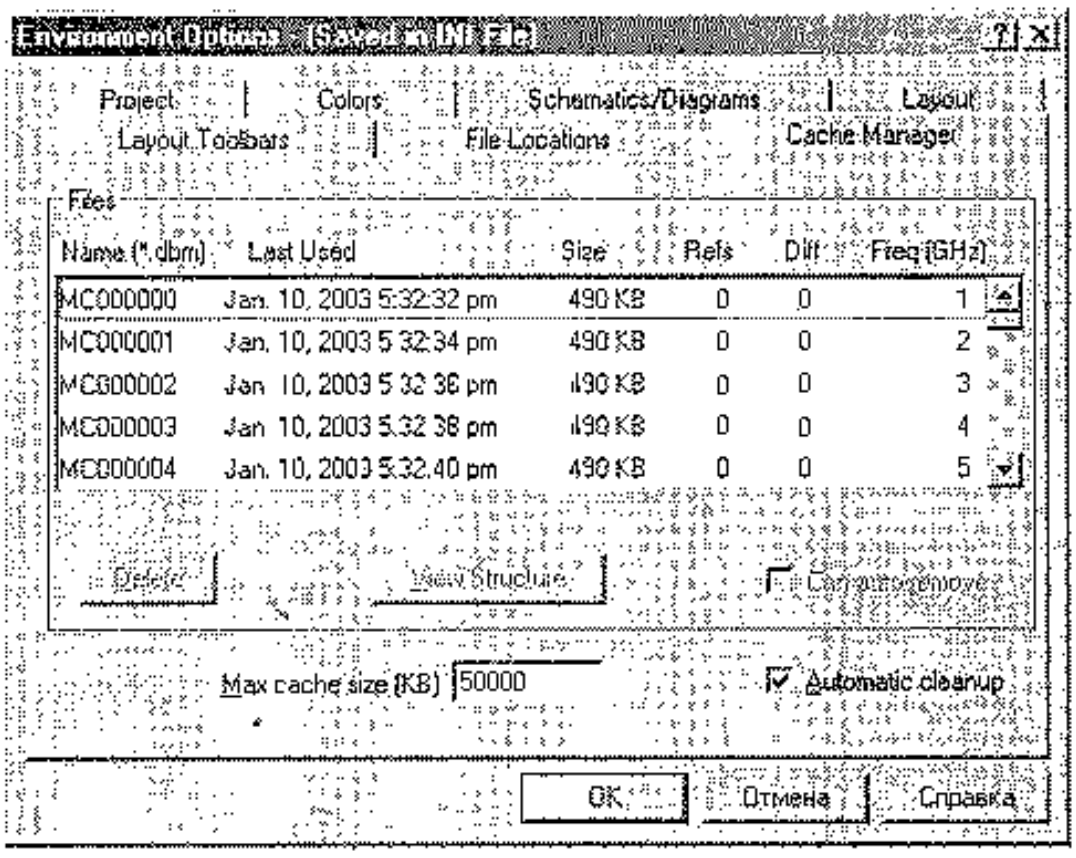


Рис 2 55 Окно буферной памяти

Каждая запись в списке менеджера кэша представляет собой файл, который сохраняет таблицы моментов в одной частотной точке.

Каждый файл кэша имеет несколько атрибутов, которые показаны на рис. 2.55. Файл данных, который использован EMSight последним, используется менеджером кэша, чтобы определить, какие файлы должны быть удалены, когда кэш заполняется. Параметр **Diff** определяет максимальный порядок дифференцирования, используемый для таблиц, созданных решающим устройством FFS. Параметр **Freq** показывает частоту, для которой была сгенерирована таблица. Если опция **Can auto-remove** разрешена для файла, то менеджеру кэша будут позволено удалить файл, когда кэш будет полон. Этот атрибут должен быть отменен, если вы не хотите, чтобы менеджер кэша удалил конкретный файл таблицы моментов.

Если опция **Automatic cleanup** включена, то менеджер кэша автоматически удалит файлы, когда кэш заполнится. Опция **Max cache size (KB)** определяет размер кэша в килобайтах. Если вы моделируете большую структуру, и таблицы моментов не умещаются в кэше, то увеличьте размер кэша.

Если вы моделируете много различных небольших структур, то можно уменьшать размер кэша. Каждый раз решающее устройство должно использовать таблицу моментов, которая разыскивается через список файлов в кэше. Если в кэше имеются тысячи файлов, то время расчета становится значительным.

Глава 3
Теоретические основы работы EMSight

Решение электродинамической задачи в **EMSight** основано на решении в спектральной области уравнений Максвелла, сформулированных для трехмерного устройства, находящегося в прямоугольном корпусе, заполненном планарными кусочно-ломанными слоистыми средами. Четыре боковые стенки прямоугольного корпуса всегда являются идеально проводящими. Верхняя и нижняя границы корпуса могут моделироваться как идеально проводящие поверхности, поверхности с потерями или как бесконечные волноводы (в Z-направлении).

Полная задача электромагнитного моделирования всегда разделяется на набор задач в отдельных блоках, в которых можно численно решить уравнения Максвелла. Электромагнитные моделирующие программы традиционно относятся к трем категориям: «2-D», «3-D» и «2.5-D».

2-D моделирующие программы могут анвлизировать только непрерывные структуры, бесконечные в одном направлении. Практически, к этому классу относятся лишь идеальные линии передачи и некоторые волноводные задачи. 2-D моделирующее устройство анализирует планарные структуры и определяет постоянную распространения однородного отрезка линии, волновое сопротивление и коэффициент связи. 2-D моделяторы самые быстрые, но наиболее ограниченные.

3-D моделирующие программы могут анализировать практическн любую структуру и предназначены для расчета планарных конфигураций с коаксиальным Т-соединением и других трехмерных задач. 3-D моделирующие устройства могут анализировать почти любую задачу, но они требуют большего времени и больших вычислительных затрат.

2.5-D моделирующие программы разработаны в основном для планарных схем (содержаших микрополосковые, полосковые линии и т. п.). В то же время они менее гибкие, чем 3-D программы, но работают намного быстрее и идеально подходят для микрополосковых линий, полосковых и других подобных конфигураций.

EMSight выполнен как моделирующее устройство 2.5-D. Он может решать планарные задачи, а также задачи с перемычками через отверстия и другими Z-направленными токами. Таким образом, эта программа классом выше, чем 2.5-D моделяторы, которые не предполагают задания Z-направленных токов. Фактически, **EMSight** можно рассматривать как 3-D моделирующее устройство, потому что он может учитывать токи, текущие в *Z*-направлении.

На рис. 3.1 показана структура, в которой имеются три диэлектрических слоя. Плоские проводники считаются бесконечно тонкими листами между слоями. Токи J_Z, направленные по оси *Z* (рис. 3.1), моделируют токи между различными слоями и токи, направленные к земляному слою. *Z*-направленные токи протекают через металлические перемычки, смоделированные как колонки токов в направлении *Z* без составляющих в направлениях *X* или *Y*.

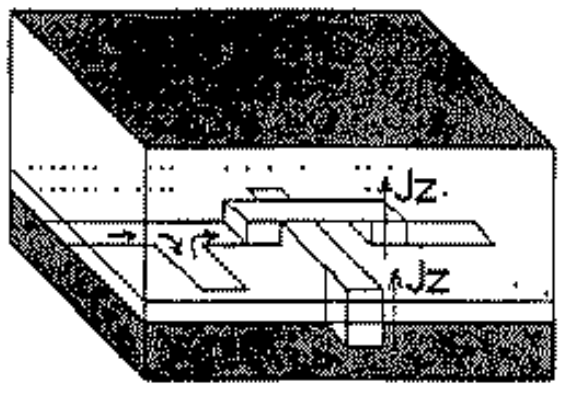


Рис. 3.1. Моделируемое устройство содержит корпус и три диэлектрических слоя

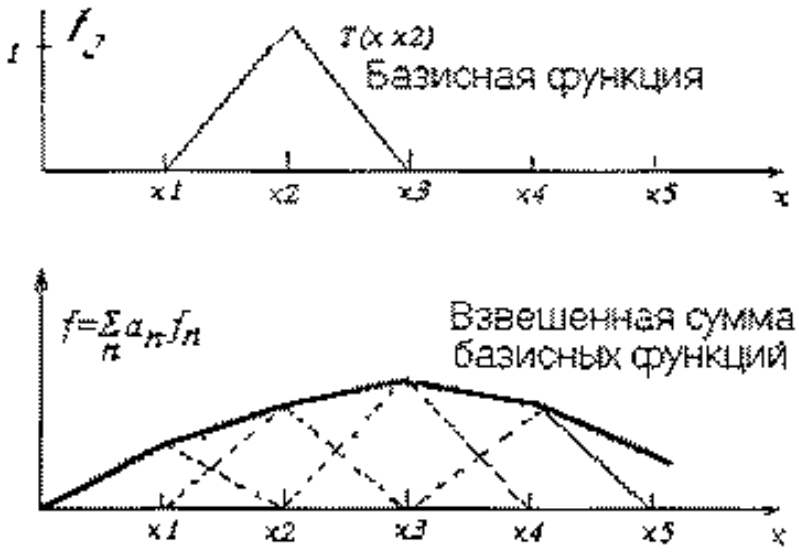


Рис. 3 2. Крышная функция и суммирование решения в методе моментов по одной координате

Эти *Z*-направленные токи — приближение, справедливое для слоев, которые считаются тонкими относительно длины волны.

Токи проводников пространственно дискретизируются посредством базисных крышных функций (см. рис. 3.2) для токов в *X* и *Y* направлениях и перемычек, по которым токи текут в Z-направлении.

Разбиение проводников выполняется на однородной прямоугольной сетке. В процессе решения определяется вклад отдельных базисных функций так, что когда все базисные функции суммируются, вместе они обеспечивают точную аппроксимацию токов на проводниках. Процесс решения разделен на отдельные шаги.

3.1. Формулировка электромагнитной задачи

Дадим общее описание краевой задачи, которая решается численно.

Анализируемая структура монолитной ИС находится внутри трехмерного прямоугольного объема, ограниченного электрическими или магнитными стенками. В общем случае объем заполнен слоистой средой, которая может состоять из произвольного числа изотропных однородных диэлектриков или магнитных слоев, как показано на рис. 3.3.

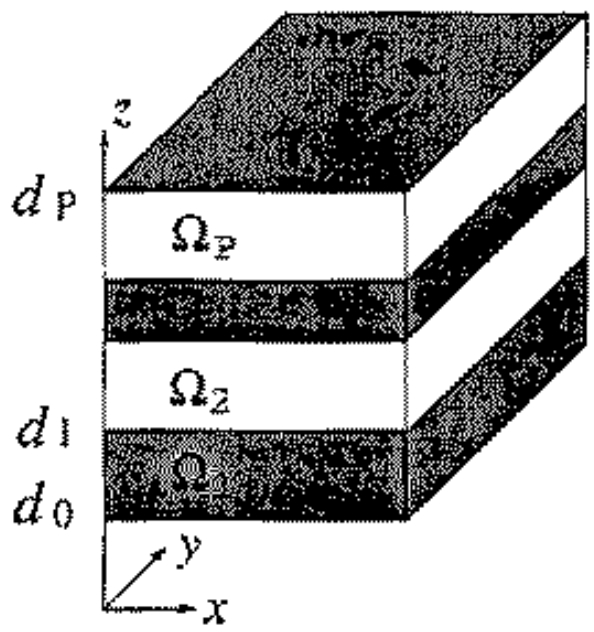


Рис. 3.3. Многослойная планарная структура со слоями, лежащими на координатах d_i и средой Ω_i

Электрический (**E**) и магнитный (**H**) векторы поля связаны системой уравнений Максвелла (в частотной области):

$$\left.\begin{aligned} rotH &= i\omega\varepsilon_p E + J_Z \\ rotE &= -i\omega\mu_p H \\ divE &= 0 \\ divH &= 0 \end{aligned}\right\} (x, y, z) \in \Omega_p, \qquad (3.1)$$

где J_Z — вектор объемной плотности Z-направленных токов; ε_p и μ_p — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемость сред слоев (для среды с потерями ε_p — комплексная величина).

Токи, направленные вдоль оси Z, считаются постоянными внутри слоя, но они могут изменяться от слоя к слою, что дает возможность дискретизации по оси Z. Таким образом, мы имеем шесть составляющих электрического *E* и магнитного *H* поля внутри слоя с постоянным током поперек него. Компоненты тока вдоль *X* и *Y* могут существовать только в металлическом слое $z = d_j$, параллельном поверхностям раздела. Граничные условия для металлического слоя имеют вид:

$$1_z * \left\{H(+d_j) - H(-d_j)\right\} = \eta, \qquad (3.2)$$

$$1_z * \left\{E(+d_j) - E(-d_j)\right\} = 0, \qquad (3.3)$$

где η — поверхностный ток.

Металлическнй слой может иметь произвольную форму, частично с областями идеальной проводимости, частично заполнен металлом с потерями, резистивными пленками и областями, предназначенными для дискретных компонентов.

3.2. Описание моделируемой структуры

Поскольку **EMSight** — это программа, соответствующая формуле 2.5-D, все структуры, которые она анализирует, сводятся к многослойным, каждый из слоев которых — это пассивная схема с дискретными элементами. Диапазон возможных устройств, которые может анализировать программа, достаточно широк, но часто интегральная схема СВЧ требует разбиения на несколько ЕМ-структур и схем, состоящих из дискретных элементов: отрезков линий, L, C, FET и т. п. Первый шаг в решении задачи с помощью **EMSight** состоит в разбиении структуры и распределение ее по слоям. Включение активных элементов предполагает разделение задачи на ЕМ-структуру и отдельные схемы, и описание всей структуры в виде блоков, используя различные конструкции (см. рис. 3.4).

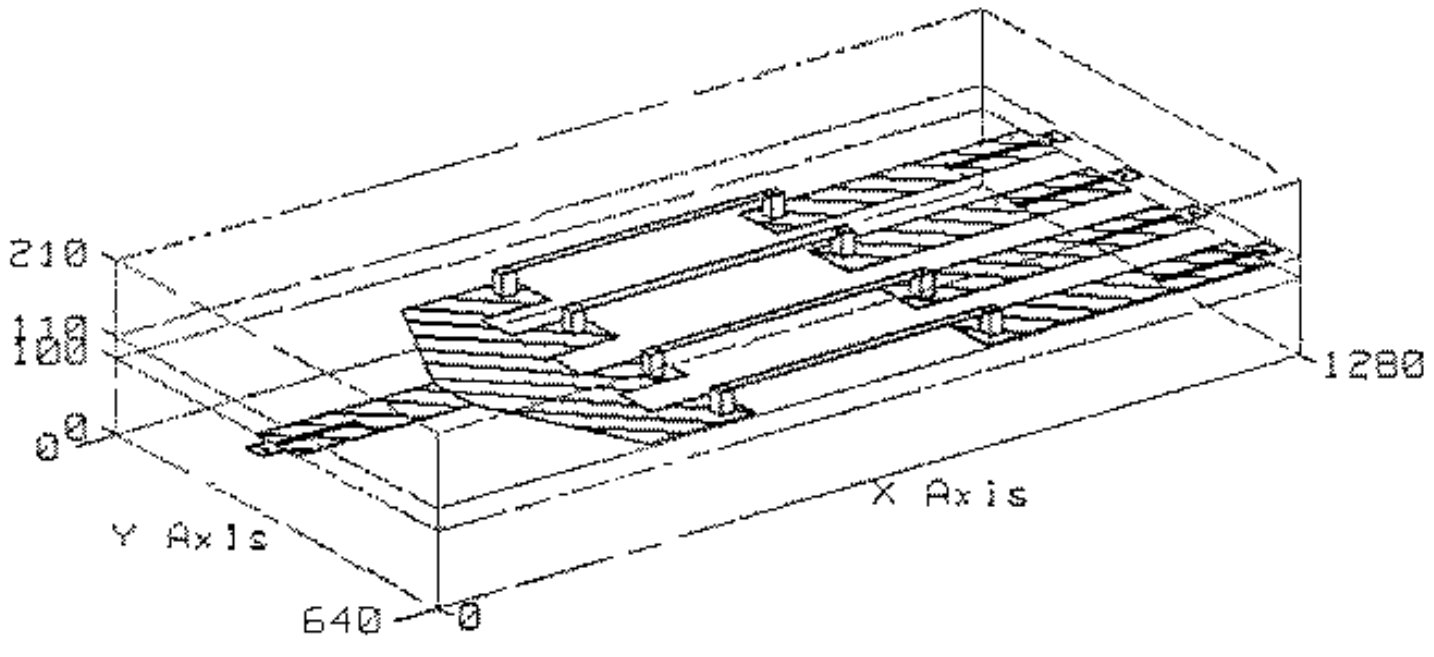


Рис. 3.4. Делитель/сумматор мощности

Формально в **EMSight** не имеется ограничения на максимвльное число слоев, но реально это 5—10 слоев. Часто встречающийся случай с двумя диэлектрическими слоями используется, чтобы моделировать микрополосковые структуры, когда верхний диэлектрик — воздух, а нижний — подложка микрополосковой линии. Диэлектрические слои могут быть без потерь или с потерями (рис. 3.5). Если все диэлектрические слои структуры не имеют потерь, то элементы матрицы моментов — действительные числа.

Диэлектрический слой без потерь имеет нулевой тангенс угла потерь и нулевую объемную проводимость. Если какой либо из диэлектрических слоев имеет эти параметры ненулевыми, то для расчета элементов матрицы моментов требуется использование комплексной математики. Преимущество использования диэлектриков без потерь состоит в том, что вычисление элементов матрицы моментов, использующее математику действительных чисел выполняется значительно быстрее, чем вычисления комплексных чисел. Для некоторых задач время, требуемое на вычисления элементов матрицы моментов, не занимает большое время по

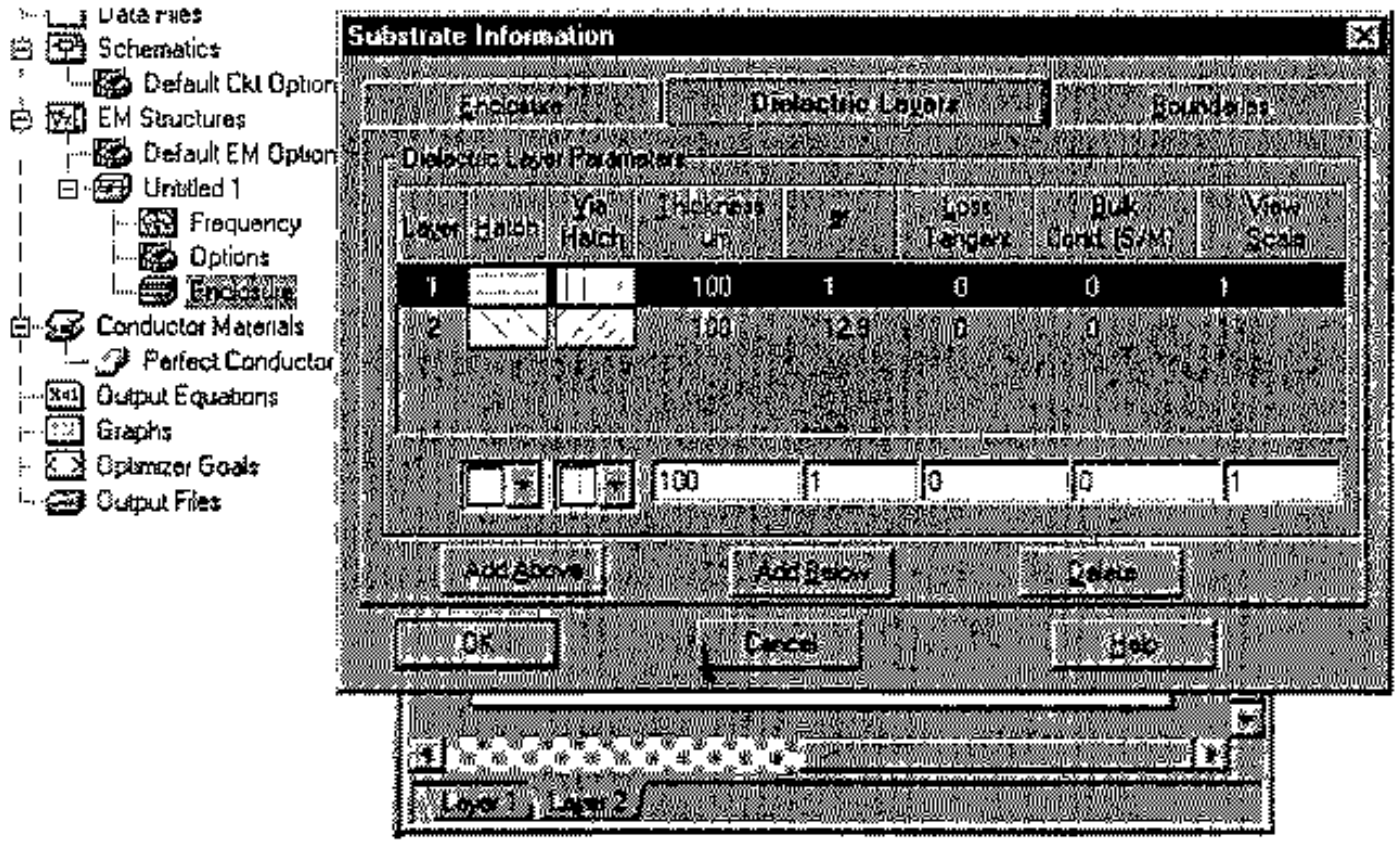


Рис. 3.5. Диалоги описания слоев, корпуса и границ в EMSight

сравнению с общим временем решения, для других задач этот шаг может занимать значительное время.

Задание структуры проводников

Кроме диэлектрических слоев должны быть определены проводники, которые иногда называются сигнальными, поскольку традиционно считается, что поле распространяется вдоль проводников. ЕМ-структура может иметь настолько произвольную форму, что в ней уже трудно выделить традиционные микрополосковые линии, шлейфы и пр. элементы. В типичной микрополосковой структуре из двух диэлектрических слоев проводники будут рисоваться сверху подложки (слой 2). Проводники, как и диэлектрики, могут быть смоделированы как без потерь (идеально проводящие), так и с потерями. Если все проводники и все диэлектрические слои в структуре не имеют потерь, то рещение матрицы моментов может быть найдено, используя вычисления только действительных чисел, что обеспечивает значительную экономию времени для большинства задач. Использование математики действительных чисел уменьшет время расчета матрицы моментов в 3—7 раз (в зависимости от параметров анализируемого устройства).

3.3. Разбиение форм на ячейки

В EMSight производится разбиение металлических слоев на ячейки, чтобы представить планарную конструкцию в виде набора перекрывающихся крышных функций в X и Y направлениях. Каждая такая функция строится на площадке, имеющей ширину, равную по крайней мере одной ячейке и длину — двум ячейкам. Базисная функция имеет конфигурацию (одна ячейка на одну ячейку) самого наименьшего планарного базиса, и это — примитивный конструктивный блок для больших базисных функций. Примитивная базисная функция состоит из двух примитивных ячеек. Базисные функции размером больше, чем 1 × 1 ячейка, кон-

струируются из взвешенной суммы примитивных базисных функций. Например, на рис. 3.6 показаны базисные функции по координате *X*, которые соответствуют прямоугольной ячейке, показанной в основании графика. Пунктирные линии на рис. 3.7 представляют собой однородную сетку координат, в то время как сплошные линии представляют ячейки с переменными размерами. Такие ячейки будут всегда соответствовать однородной сетке.

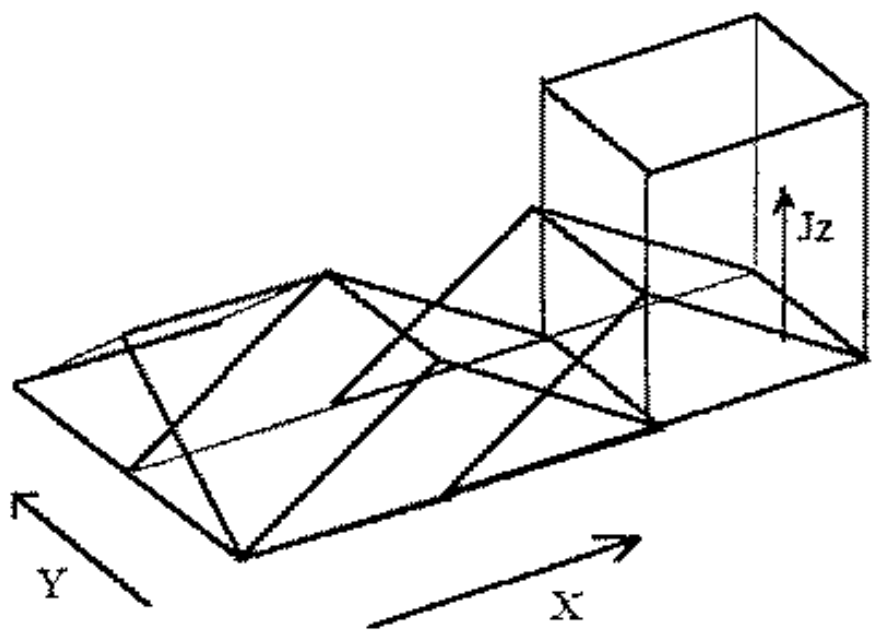


Рис. 3.6. Базисные функции распределений плотности тока (крышные функции) формируются раздельно по осям X и Y

Для того чтобы использовать крышную базисную функцию, необходимо осуществить привязку топологии к сетке. Метод решения, используемый **EMSight**, требует, чтобы геометрия была согласована с узлами однородной прямоугольной сетки. Однородная сетка требуется потому, что точки излома крыш должны совпасть с узлами однородной сетки. **EMSight** во время разбиения топологии автоматически передвинет любые формы к сетке, хотя часто это может привести к непредвиденным результатам. Например, очень узкие линии, которые имеют ширину меньше, чем ширина одной ячейки, могут быть превращены в формы нулевой ширины. Для форм, которые имеют грани, не совпадающие с однородной сеткой, желательно просмотреть ячейки перед решением, чтобы удостовериться, что разбиение форм проведено правильно.

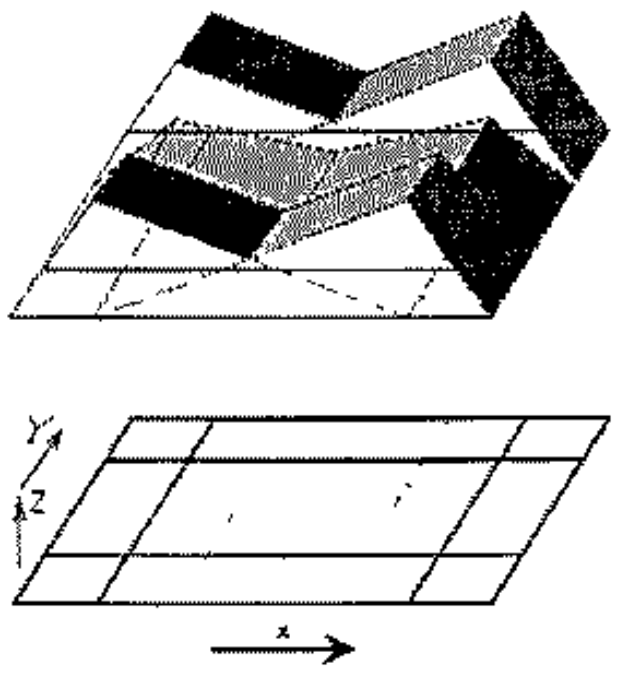


Рис. 3.7. Базисные функции разложения поверхностного тока. Моделирование токов только в направлении X

Приведенные на рис. 3.7 графики показывают базисные функции, используемые для моделирования тока в направлении *X*. Токи в направлении *Y* будут представлены другим набором базисных функций по оси *Y*. Когда в расчете применяются «крышные» функции как базисные, то их максимальные значения совпадают в одной точке и они равны нулю в остальных узловых точках.

3.4. Формулировка метода моментов

Рассмотрим геометрию (рис. 3.8), где несколько проводящих объектов находятся в слоистой среде. Эта среда составлена из N параллельных слоев между верхним полупространством $z > 0$ (обычно воздух) и земляной плоскостью $z = -d_N$.

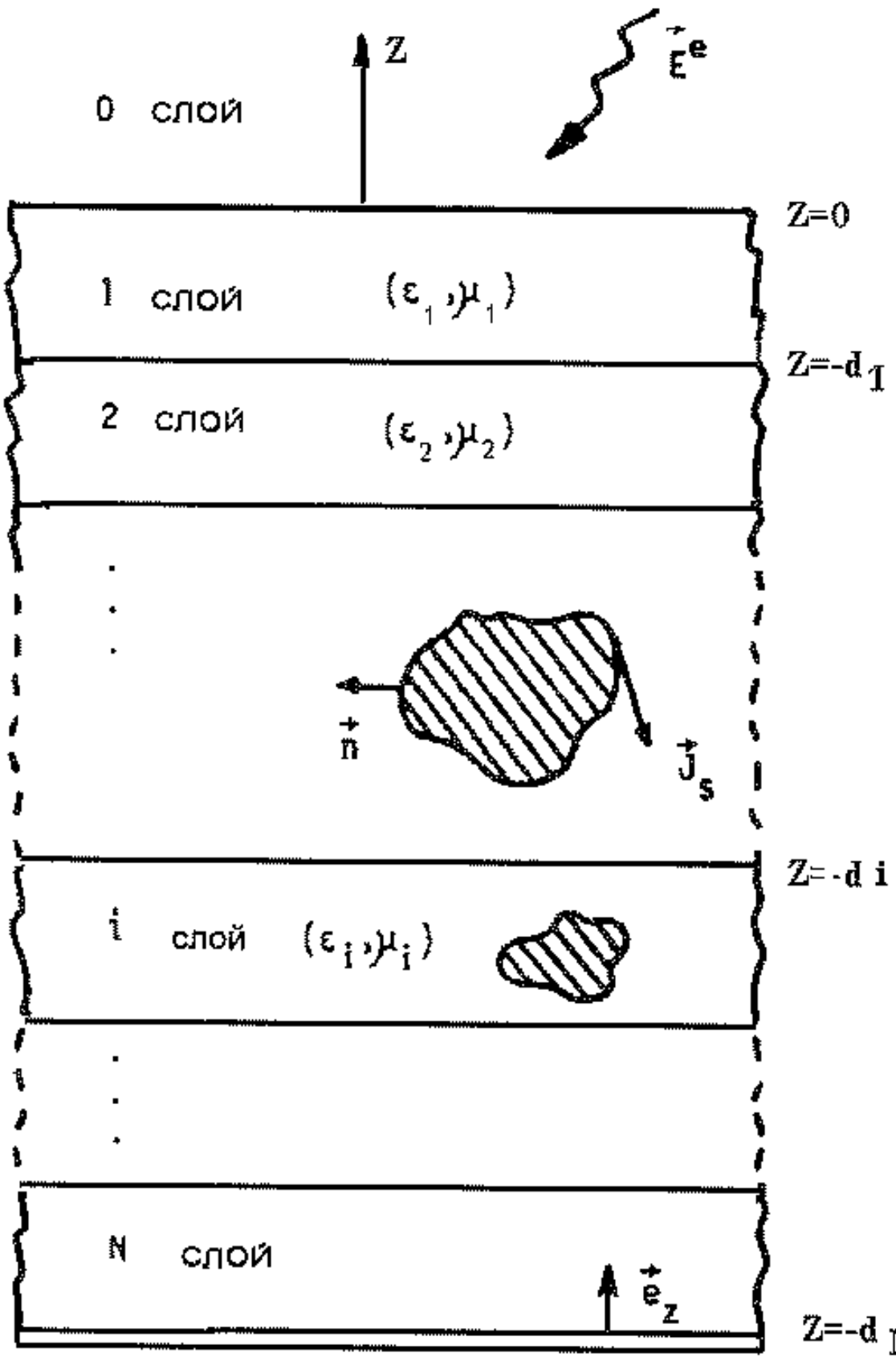


Рис. 3.8. Многослойная среда, которая включает несколько проводящих объектов. Эти N слоев соприкасаются со средой, наполовину заполненной воздухом, $0 < z < \infty$ и импедансной стенкой при $z = -d_N$

Предположим, что плоскость соприкосновения двух слоев может быть смоделирована как импедансная граница, на которой существует простая связь между касательным электрическим E_t и магнитным полем H_t, а именно

$$E_t = e_z \times Z_s H_t, \tag{3.4}$$

где Z_s — поверхностный импеданс (s означает surface — поверхность). Электрические и магнитные стенки включены в уравнение (3.4) как частные случаи при $Z_s = 0$ или $Z_s = \infty$ соответственно. Существование импедансной стенки подразумевает, что задача может быть решена без знания фактических полей, которые могут существовать ниже конечной плоскости $z = -d_N$.

Каждый слой считается изотропным (однородным) и с возможными потерями, т. е. материал имеет комплексную диэлектрическую постоянную ε и комплексную проницаемость μ.

Аналогично предполагаем, что металлические проводники в слоистой среде характеризуются граничными условиями на своих поверхностях:

$$n \times E = Z_s n \times J_s, \tag{3.5}$$

где Z_s — поверхностный импеданс, равный нулю для идевльных электрических проводников; n — внешний вектор, нормальный к поверхности S (рис. 3.1); J_s — поверхностный ток, существующий в проводнике. Этот ток возбуждает поле E^e и, в свою очередь, создает отраженное и/или дифракционное поле E^d (все векторы). Суммарное поле в уравнении (3.5) — сумма возбуждаемых и рассеиваемых (дифракционных) полей.

Дифракционное поле E^d в каждой точке может быть выражено с помощью двухмерной функции Грина $\overline{\overline{G}}_E(r|r')$:

$$dE^d(r) = \overline{\overline{G}}_E(r|r') \cdot I(r')dl', \tag{3.6}$$

где r — система полярных координат. Суммарное дифракционное поле получается интегрированием уравнения (3.6) над поверхностью проводников S.

Строго говоря, вложенные проводники должны рассматриваться как диэлектрики, имеющие очень высокие омические потери, и каждое частное поле E^d явилось бы результатом эквивалентных магнитных токов, определенных на поверхностях проводников. Однако если проводимость очень высокая, этими магнитными токами можно пренебречь. Окончательно, граничное условие (3.5) приводится к виду

$$n \times E^e(r) = -n \times \int_S \overline{\overline{G}}_E(r|r') \cdot J_s(r')ds' + Z_s n \times J_s, \tag{3.7}$$

который является обобщенной формой интегрального уравнения электрического поля (EFIE-Electric Field Integral Equation) для неизвестного тока J_s. Функция Грина $\overline{\overline{G}}_E(r|r')$ известна для простых форм, например, для прямоугольной площадки это диаграмма направленности поля источника, близкого к точечному. Знак интегрирования в (3.7) — это суммирование полей от всех площадок, по которым текут токи.

Численные методы решения интегрального уравнения (3.7) сводятся к так называемым проекционным, к которым относится и метод моментов, являющийся развитием метода Галеркина. В методе Гвлеркина базисные функции и функции тестирования идентичны. В методе моментов используется базисные треугольные (крышные) функции, и дельта-функции как весовые (иногда их называют тестовые). Если базисные и весовые функции различны, как в методе моментов, то правая часть системы уравнений приобретает как бы «момент», вместо нулевой правой части.

3.5. Алгоритм метода моментов

Метод моментов (МоМ) преобразует интегральное уравнение (3.7) в систему алгебраических уравнений, которая решается численно. Метод моментов широко используется в современных программах (например в Momentum, Microwave Explorer, 1E3D).

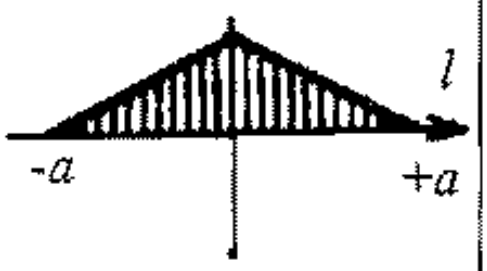
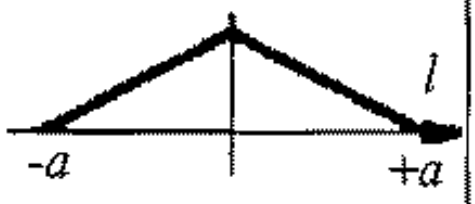
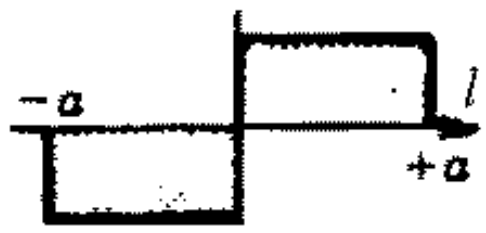
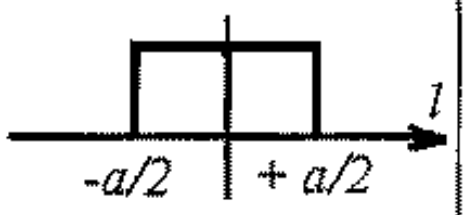
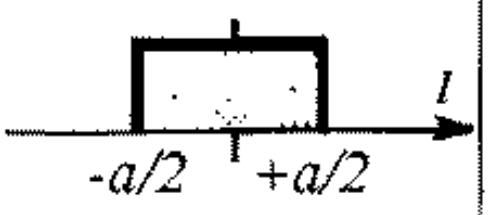
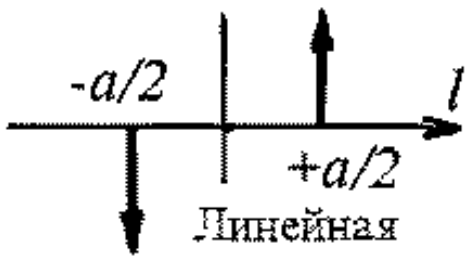
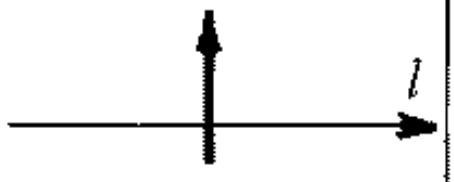
Повторим, что сначала металлическая область разбивается на малые элементарные ячейки, и задаются простые аппроксимации для поверхностного тока на каждой ячейке.

Размер ячеек зависит от характера и геометрии задачи. В любом случае линейный размер ячейки не должен превысить одну десятую от длины волны.

Неизвестные токи нужно разложить в системе базисных функций (см. табл. 3.1). Чтобы заряд в пределах площадки был постоянным, ток растет линейно от одного края к другому. В общем случае поверхностный ток будет зависеть от двух координат x, y, но возможно использовать базисные функции, которые внутри каждой ячейки постоянны вдоль поперечной координаты. Это позволяет разложить и J_s по координате x и y, соответственно, но имеющийся связанный заряд в этом случае несингулярен.

Некоторые возможные наборы A, B, C базисных и тестовых функций, определенных в прямоугольных областях, приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Виды базисных и весовых функций

	Базисные функции		Весовые функции
	Ток	Заряд	
A	 2D - крыша	 **2-D** меандр (импульсный дуплет)	 **2-D** крыша
B	 2D - крыша	 **2-D** меандр (импульсный дуплет)	 1-D импульс
C	 2D-импульс	 Линейная функция Дирака	 Дельта-функция Дирака

Матрица моментов формируется на основании тестовой (весовой) функции. Существует, по крайней мере три возможные комбинации базисных и весовых функций. С точки зрения использования вида аппроксимации решения, можно считать, что метод моментов это сочетание крышных базисных функций и метода Галеркина.

Крышная функция для двух составляющих поверхностного тока состоит также из двух компонентов J_{sx} и J_{sy}. Согласно уравнению непрерывности базисные функции для заряда q_s имеют вид меандровых функций (табл. 3.1). Уравнения

MP1E тестируются (проверяются) в этом случае, используя те же самые «крышные» функции, в отличие от метода Гвлеркина, где базисные и тестовые функции разные. Определим функцию T_i как векторную крышную функцию, связанную с двумя смежными ячейками S_s^+ и S_s^- (рис. 3.9). Границу этих двух ячеек обозначим как S_j. В общем, нам нужно рассмотреть N_x функций в направлении x и N_y функций в направлении y, и таким образом общее число базисных функций равно $N = N_x + N_y$

$$T_i = \begin{cases} e_x T_{ix}, & i = 1,\ldots,N_x \\ e_y T_{iy}, & i = N_x + 1,\ldots,N. \end{cases} \tag{3.8}$$

Ток и заряд представляются в виде

$$J_s = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i T_i, \qquad q_s = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \Pi_i, \tag{3.9}$$

где α_i являются неизвестными коэффициентами, а функции $\Pi_i = -\nabla \cdot T_i / j\omega$ имеют форму прямоугольных меандров. Стандартное применение метода моментов теперь дает матричное уравнение (которое получается, подставляя (3.9) в (3.7))

$$M\alpha = b. \tag{3.10}$$

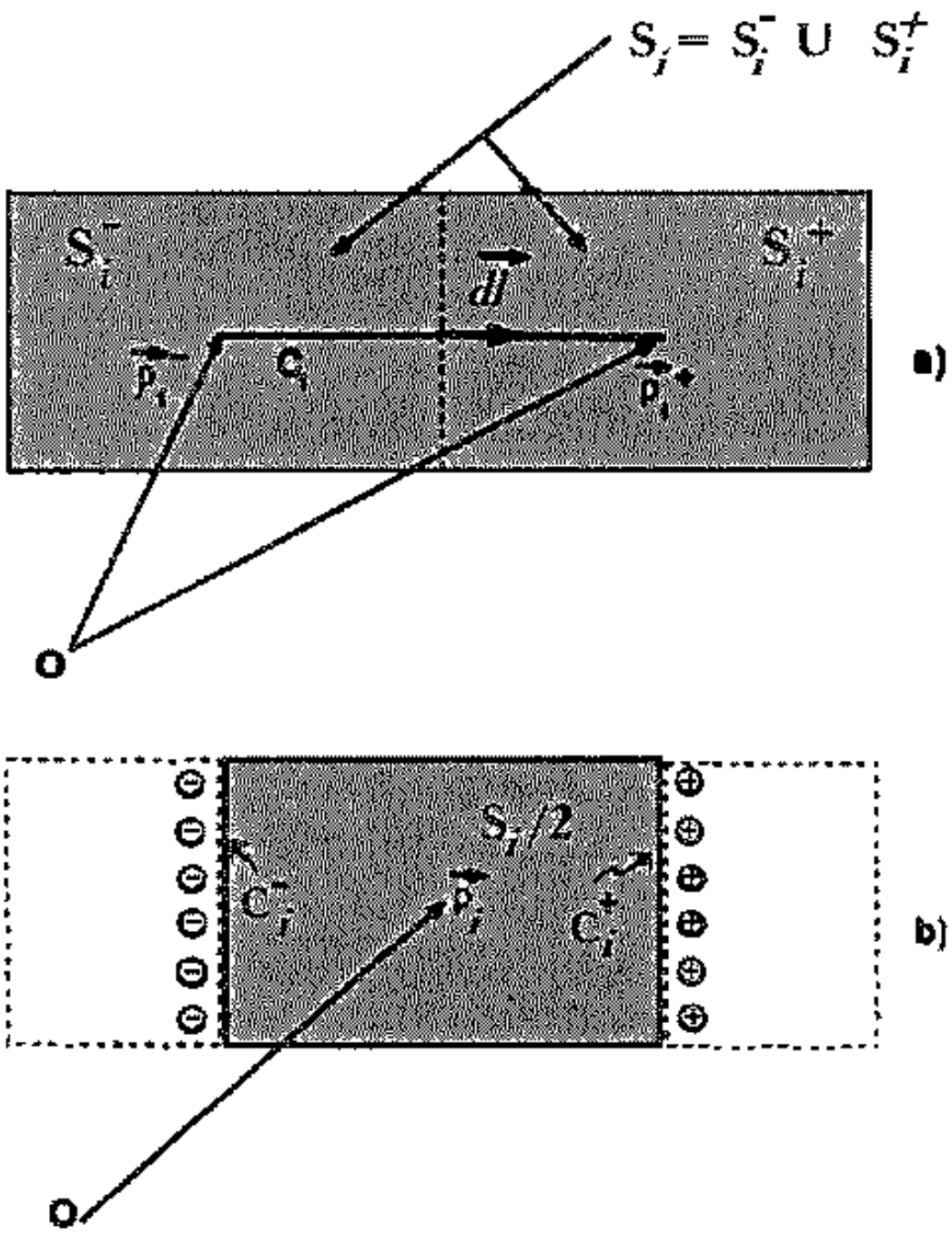


Рис. 3.9. Продольные сегменты тестирования C_i, связывающие центры смежных ячеек S_i^+ и S_i^-. Поперечные сегменты C_i^+ и C_i^- содержат линии плотности зарядов в точках согласования

Элементы матрицы моментов M описываются выражением

$$m_{ij} = a_{ij} + v_{ij} + I_{ij}, \tag{3.11}$$

где вклады излучаемых A, отражаемых V и омических (тепловых) потерь I равны соответственно:

$$a_{ij} = jw \int_{S_i} T_i(\rho) \cdot \int_{S_j} \overline{\overline{G}}_A(\rho|\rho') \cdot T_j(\rho') dS' dS, \tag{3.12}$$

$$v_{ij} = \frac{1}{jw} \int_{S_i} \Pi_i(\rho) \cdot \int_{S_j} G_V(\rho|\rho') \Pi_j(\rho') dS' dS, \tag{3.13}$$

$$I_{ij} = Z_s \int_{S_i} T_i(\rho) \cdot T_j(\rho) dS. \tag{3.14}$$

Численную процедуру формулирования и составления матрицы C мы наблюдаем как процесс создания, заполнения и решения матрицы моментов.

3.6. Формирование матрицы моментов

Применение метода моментов для решения электромагнитной задачи — это применение вариационного подхода, сводящегося к оптимизации вектора всевозможных решений с целью минимизации сформулированной целевой функции. В нашем случае цель состоит в удовлетворении граничным условиям на границах каждой ячейки, на которые разбита анализируемая структура.

Чтобы провести начальную аппроксимацию искомой функции (распределение тока J_{sx} и J_{sy} в нашем случае), необходимо выбрать набор базисных функций (у нас это крышные функции). Обозначим этот набор $f_1, f_2, f_3, \ldots$ в области корпуса по координатам M и L и положим

$$f = \sum_n \alpha_n f_n, \tag{3.15}$$

где α_n — неизвестные постоянные коэффициенты. M и L — это линейные операторы (матрицы), описывающие скалярную среду и связанные через собственные решения (числа) λ:

$$L(f) = \lambda M(f). \tag{3.16}$$

M и L зависят от металлических форм и корпуса. Подставляя (3.15) в (3.16), имеем

$$\sum \alpha_n L(f_n) = \lambda \sum \alpha_n M(f). \tag{3.17}$$

Теперь предположим, что определена операция скалярного произведения (или проекция) $<f, \omega>$, где ω — весовая функция.

Тогда мы выбираем набор тестовых (или весовых) функций $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ в области L и M и проведем тестирование для m областей (у нас m — все ячейки, которые нужно «пересечь» со всеми другими с тем, чтобы удовлетворить граничным условиям на всех границах). Считаем, что для каждой точки m (т. е. на внутренних границах ячеек) эти произведения (проекции) равны

$$\sum_n \alpha_n < \omega_m, L f_n >= \lambda \sum_n \alpha_n < \omega_m, M f_n >, \tag{3.18}$$

где $m = 1, 2, 3, \ldots$ могут быть записаны как элементы матрицы

$$[l_{mn}][\alpha_n] = \lambda[m_{mn}][\alpha_n]. \tag{3.19}$$

Итак, матрица моментов имеет вид

$$[m_{mn}] = \begin{bmatrix} <\omega_1, Mf_1> & <\omega_1, Mf_2> & \ldots & \ldots \\ <\omega_2, Mf_1> & <\omega_2, Mf_2> & \ldots & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \end{bmatrix}, \tag{3.20}$$

Левая матрица $[l_{mn}]$ имеет вид (3.20), но с заменой M на L, вектор-столбец $[\alpha_n]$ — вектор постоянных чисел (который, по сути, ищется).

Уравнение (3.18) имеет решение, если

$$\det|l_{mn} - \lambda m_{mn}| = 0. \tag{3.21}$$

Итак, элементы матрицы $[m_{mn}]$ есть $<\omega_i, Mf_e>$. Эта проекция — интеграл каждой базисной (крышной) функции, умноженной на тестовую функцию ω_i. Эта матрица трехмерная. Сначала находятся связи на первом слое, затем межслойные связи на основании условий (3.4) и (3.5).

Так как матрицы моментов могут быть очень большими, то в каждый момент времени только одна матрица моментов может уместиться в оперативной памяти. Размер задачи, которая может быть решена **EMSight**, определяется только общим объемом физической памяти, доступной для хранения матрицы моментов. Программа **EMSight** будет решать очень медленно, если матрица моментов не умещается в ОЗУ и требует использования находящейся на диске виртуальной памяти. Объем памяти, требуемый для запоминания матрицы моментов, показан в диалоге **Information** меню **View**.

Матрица моментов — всегда симметричная матрица. **EMSight** может сохранять матрицу моментов как полную матрицу (сохраняя все элементы) или как симметричную матрицу (где только половина элементов сохранена). Обычно лучше всего использовать симметричную память, так как в этом случае требуется половина памяти. Единственный случай, где выгодно использовать полное решающее устройство — когда вся матрица умещается в памяти, и вся матрица действительная (нет потерь в диэлектриках, подложках или границах). В этом случае решающее устройство оптимизировано и работает значительно быстрее, чем решающее устройство, которое использует симметричное хранение (вдвое быстрее!). Если опция **Matrix Solver** установлена как **Default** (рис. 3.12), то **EMSight** автоматически выберет лучший метод на основании размера задачи и доступной физической памяти.

3.7. Определение портов в злектродинамической задаче

Кроме того, что уравнение (3.17) связывает граничные условия на поверхностях всех ячеек, существуют еще порты, которые имеют собственные граничные условия.

Анализируемая структура замкнута четырьмя проводящими стенками, а в плоскостях стенок верхней и нижней границы корпуса, могут быть полубесконеч-

ные прямоугольные волноводы. Граничные условия для поверхностей раздела слоев и сред — это формулировка задачи, которая требует получение однозначного решения. Различные граничные условия даны в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Граничные условия на поверхности раздела слоев

1	Область без металлизации	$\eta = 0$
2	Металлизация без потерь	$1_z * E(d_j) = 0$
3	Поверхностный импеданс	$\eta = \sigma E$
4	Область порта вдоль оси x (то же самое вдоль оси y)	$\int_C \eta dy = Y_1 \int_l E_x dx$
5	Внутренний порт (область дискретного элемента) вдоль оси x (и аналогично вдоль оси y)	$\int_C \eta dy = Y_1 \int_l E_x dx$
6	Внутренний порт вдоль оси z	$\iint_C j_z d\lambda dy = Y_1 \int_l E_z dx$

Порты используются для выводов ЕМ-схемы. Практически не имеется никакого ограничения на число портов, которые могут быть определены для структуры **EMSight**. Подключение порта в электромагнитной структуре — это связывание подсхем разных категорий: схемы с распределенными параметрами и дискретного порта. Поэтому для увеличения точности расчета применяется алгоритм исключения (de-embedded), под которым понимается процесс исключения влияния на окончательные результаты расчета неоднородности в области порта.

Есть 3 режима расчета: без исключения; алгоритм быстрого исключения; алгоритм стандартного исключения. Если на стороне имеется больше, чем один порт, то эта сторона будет исключаться, используя стандартный алгоритм исключения. Для случая, когда опорные плоскости имеют нулевую длину (опорная плоскость лежит на границе корпуса), всегда используется алгоритм быстрого исключения, даже когда на стороне имеется больше, чем один порт. Использование режима **Use fast deembed** (быстрое исключение) эффективно только тогда, когда имеются два возможных способа для исключения порта на стороне. **EMSight** всегда автоматически выбирает корректный метод (см. рис. 3.10).

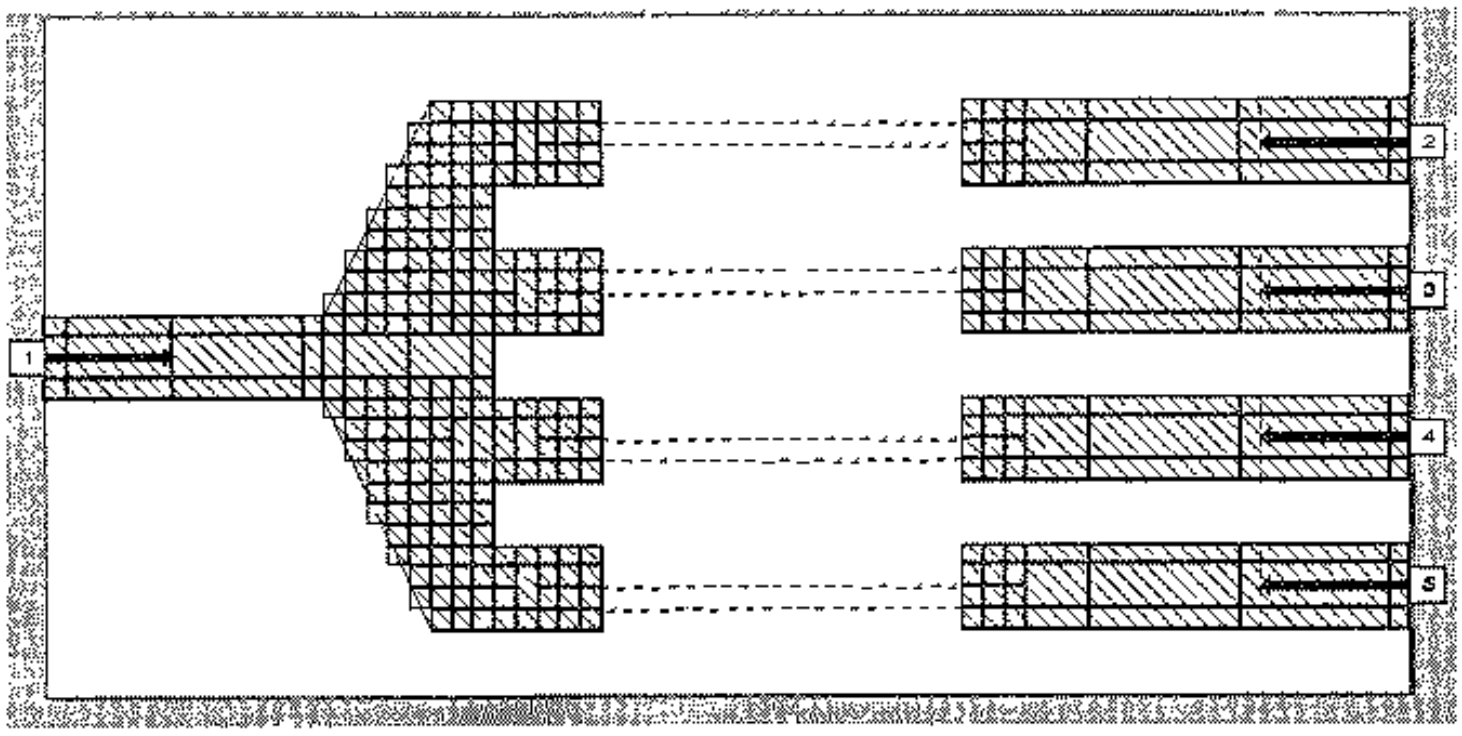


Рис. 3.10. Разбиение делителя мощности на ячейки и установка опорных плоскостей

Размещение внешних портов

Рис. 3.11 показывает сравнение между портом в теории цепей и портом в **EMSight**. В теории цепей (схема слева) имеются два порта. Каждый порт имеет два вывода, нижний вывод в общем случае является землей. При моделирование в **EMSight**, показанном на рис. 3.11 справа, секция линии заканчивается на краю корпуса, и в этом месте начинается порт. Как и в схеме теории цепей, имеются два порта, и каждый порт имеет два вывода.

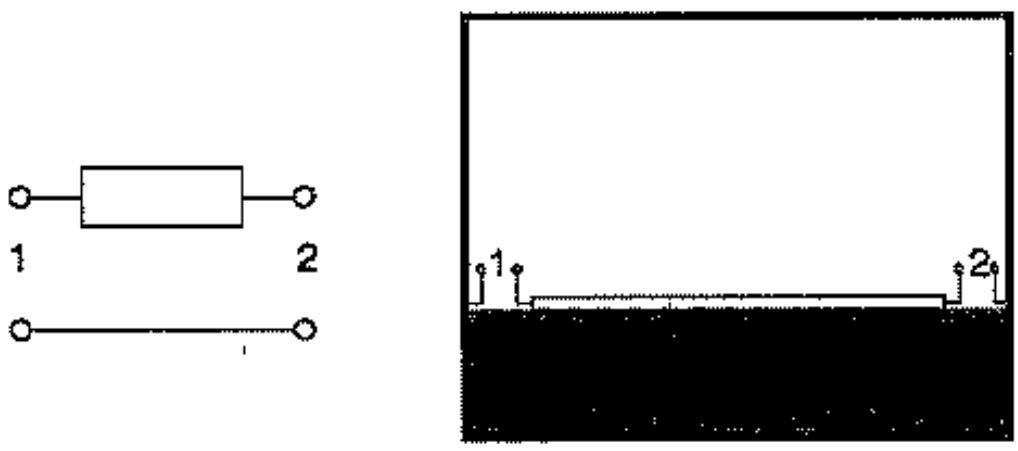


Рис. 3.11. Сравнение между схемой, рассчитываемой методом теории цепей и реализованной в EMSight

Однако в **EMSight** вместо заземляющей плоскости, моделируемой как простое короткое замыкание, учитывается влияние токов, текущих через корпус.

Параметры EM портов

Когда создается порт, он автоматически конфигурируется как внешний с присущими ему характеристиками. Эти характеристики устанавливаются и модифицируются в диалоговом окне **EM Port Properties.**

Положительный сдвиг опорной плоскости прибавляет в процессе исключения к схеме линию дополнительной длины; часто встречаются линии отрицательной длины, что сдвигает опорные плоскости внутрь корпуса. Опорная плоскость показывается на топологии как жирная стрелка.

EMSight нумерует порты автоматически. Если вы хотите изменить размер, или для линии типа паз ввести внутренние порты, можете точно определить ширину Width и длину Length. Заметьте: ширина и длина измеряется относительно направления линии передачи.

3.8. Алгоритм исключения

Алгоритм исключения (deembedding) уже рассматривался в главе 2 при описании установок режима расчета. Он необходим для нахождения S-параметров внутренней СВЧ структуры, используя опорные плоскости, и исключении влияния портовых неоднородностей на результаты расчета. Линия от края корпуса до опорной плоскости названа feedline (питающая линия). Когда влгоритм исключения (de-embedding) выключен, опорные плоскости совпадут с границами корпуса, где размещены порты, и решение будет содержать влияние портов (параллельные емкости на портах). Когда включен алгоритм De-embedding, используется алгоритм *автоматического* исключения.

Пример. На рис. 3.12 показана моделируемая структура. Если схема CIRCUIT будет включена как подсхема в другую интегрвльную СВЧ схему, то мы должны обязательно исключить неоднородности и погрешности, которые вносит в расчет неоднородность порта. Тогда нужно максимально удалить от схемы неоднородности, и выбрать длины опорных линий как можно большими. Если вы проектируете схему так, что порт состоит из линии, которая заканчивается конечной стенкой, как часто имеет место для микрополосковых линий, то не нужно использовать исключение (deembedding), потому что **EMSight** моделирует схему, которую вы фактически сформировали.

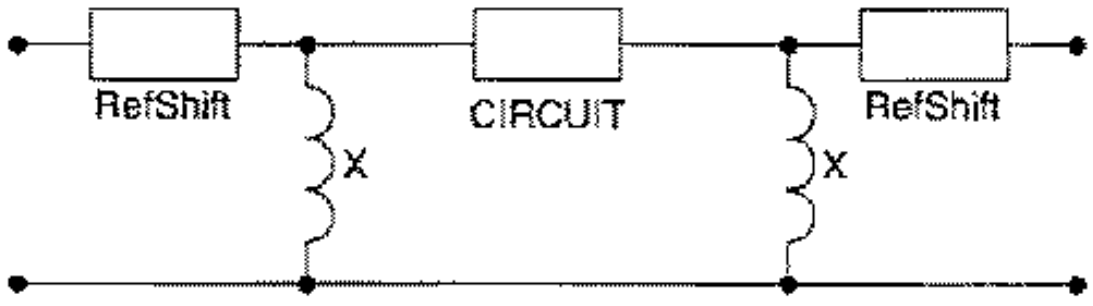


Рис. 3 12. Исключение (de-embedding) схемы, моделируемой **EMSight**

Однако можно моделировать малый сегмент большой схемы. Пусть в схеме на рис. 3.12 имеется портовая емкость из-за присоединения к стенке открытого конца линии. Процесс исключения удвляет это дополнительное реактивное сопротивление и согласует линию передачи так, как будто бы линия и корпус простирались снаружи до бесконечности.

При исключении нужно выбрать оптимальное положение опорной плоскости. По умолчанию сдвиг опорной плоскости нулевой, что означает, что результирующие данные измеряются точно по боковой стенке. Если сдвиг опорной плоскости отрицателен, то данные измеряются внутри корпуса, в действительности вычитая длину из схемы. Если сдвиг опорной плоскости положителен, то данные измеряются снаружи корпуса, прибавляя длину к схеме.

Блок в центре рисунка, помеченный как CIRCUIT, содержит начвльные результаты моделирования EMSight. Реактивное сопротивление X (показанное как индуктивность) компенсирует емкость граничной стенки, а также учитывает наличие других реактивных сопротивлений (величина X может быть отрицательной и частотно зависимой).

Линии RefShift, расположенные снаружи, перемещают опорные плоскости в корректное место. Так как линии RefShift также помогают удалять неоднородности на границе, их длины обычно не нулевые, даже если опорный сдвиг, установленный для порта, нулевой. Полное сопротивление линий RefShift равно полному сопротивлению портовой линии, тогда так только фаза смещается этими линиями. Модуль коэффициента отражения не меняется.

Параметры для исключения вычисляются до полного анализа схемы. EMSight делает это автоматически, анализируя две линии различных длин на каждой частоте для каждого используемого порта.

Заметим: Deembedding требует дополнительного режима анализа линии в начвле расчета, так что расчет, использующий deembedding, может быть длительным.

Это особенно важно, когда линии в точках портов широки, так как широкая линия моделируется поперек корпуса. Однако анализ линии всегда симметричен, и может быть симметричен в двух плоскостях, если портовые линии помещены точно в середине корпуса. EMSight также запоминает результаты анализа линии, так что если корпус и портовые линии не изменены, будут использоваться предыдущие данные.

Теория исключения

Если учитывается длина однородной линии передачи (структура добавляется или удаляется от порта), S-матрица модифицированной n-портовой структуры может быть рассчитана, используя следующую зависимость:

$$[S] = \left[e^{\gamma l}\right][S_0]\left[e^{\gamma l}\right], \tag{3.22}$$

где: $[S_0]$ – матрица исходной структуры; $\left[e^{\gamma l}\right]$ — диагональная матрица со следующими элементами:

$$\left[e^{\gamma l}\right] = \begin{bmatrix} e^{\gamma_1 l_1} & 0 & . & . & 0 \\ 0 & e^{\gamma_2 l_2} & . & . & 0 \\ . & . & . & . & 0 \\ . & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\gamma_n l_n} \end{bmatrix}; \tag{3.23}$$

$\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i$ — комплексная постоянная распространения со стороны i-порта;

α_i — постоянная затухания волны порта i;

β_i — постоянная распространения, связанная с однородной линией передачи в порте i;

l_i — длина однородной линии передачи, которая была добавлена или удвлена от структуры в порте i.

Положительная величина l_i указывает, что длина линии передачи была удалена от структуры. Величина l_i для основного вида колебаний каждого порта автоматически рассчитывается двумерным решающим устройством.

Затухающие колебания и S-параметры

В структурах, содержащих только распространяющиеся типы волн (моды), выполнение закона сохранения мощности подразумевает, что

$$\sum_{j=1}^{n} \left|S_{ij}\right|^2 \le 1. \tag{3.24}$$

Однако в структурах, содержащих реактивные (не распространяющиеся) типы волн, эта зависимость не обязательно выполнится. С этим случаем встречаются пользователи MWO и делают неправильный вывод об ошибках работы программы, однако это не так. Нулевая постоянная распространения β этих мод свидетельствует о нвличие реактивной мощности этой моды при вычислении S-параметров и это увеличивает кажущуюся мощность структуры. Нужно рассмотреть S-параметры для затухающих колебаний, чтобы представить напряженность поля, связанную с этими модами на портах.

3.9. Численное решение матрицы моментов

Чтобы определить неизвестные амплитуды базисных функций, используемых для аппроксимации плотности тока на проводниках, необходимо решить матричное уравнение. Матрица, которая должна быть решена, называется матрицей моментов. Она квадратная матрица с одной строкой и одной колонкой для каждой базисной функции, созданной в процессе разбиения на ячейки. Каждый ее элемент описывает связь между базисными функциями. Например, элемент матрицы моментов в первой строке и во втором столбце представляет связь между первой и второй базисными функциями.

Обычно вычисление элементов матрицы моментов занимает большую часть времени в методе моментов. В **EMSight** используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), чтобы обеспечить быстрый и эффективный метод для вычисления элементов матрицы моментов. Алгоритм БПФ вычисляет элементы матрицы моментов двумя шагами.

Первый шаг — генерирование таблиц моментов, не зависящих от фактических проводников, которые дискретизироввлись во время процесса разбиения на элементы. Таблицы моментов зависят от размера корпуса, числа разделов сетки, определенных для корпуса, характеристик диэлектрических слоев, их толщины, граничных условий в верхнем и нижнем сечениях корпуса, и частот анализа.

Второй шаг — вычисление элементов матрицы моментов, используя таблицы моментов. Элементы матрицы моментов могут быть быстро вычислены из таблиц моментов после того, как они были сгенерированы. Например, матрица моментов, которая соответствует связи между двумя примитивными базисными функциями, может быть вычислена посредством суммирования четырех элементов из таблиц матрицы моментов. Для не примитивных базисных функций (т. е. базисных функций элементов, по площади больших чем (1 × 1) ячейки) элементы матрицы моментов вычисляются суммированием элементов связи примитивных базисных функций. Базисные функции, которые покрывают очень большое количество примитивных ячеек, могут требовать больших вычислительных затрат, чтобы вычислить матрицу моментов. Это будет наиболее значимо, когда удачное разбиение сетки используется относительно габаритов проводника. Если шаг Fill Moment Matrix (заполнение матрицы моментов) занимает большое время, как показывает индикатор хода работы **EMSight** (рис. 3.13), то это объясняется особенностями генерирования таблиц моментов, когда используется алгоритм БПФ.

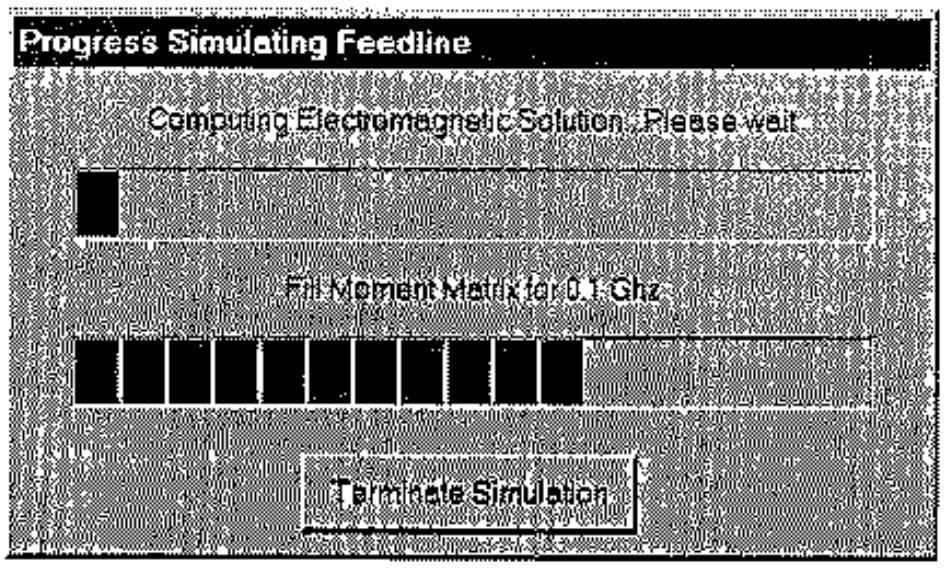


Рис. 3.13. В процессе расчета матрицы моментов дается сообщение о ходе расчета, например, «Электромагнитный расчет... Ждите», «Заполнение матрицы моментов на частоте 0.1 ГГц»

Обычно основанные на БПФ программы работают наиболее эффективно, когда число разделов сеткн 2 в целой степени. В **EMSight** используется БПФ, основанное на смешанной системе исчисления, что является эффективным, когда число разбиений 2 в какой-то степени или произведение малых простых чисел. Например, если используются 100 разбиений, то алгоритм будет все еще очень быстрым, потому что $100 = 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 5$, где 2 и 5 — малые простые числа.

Поскольку таблицы моментов зависят только от корпуса и расположения подложек, они могут быть сохранены и использованы для следуюших многократных этапов решения задачи, в которой тот же корпус и структура подложек (и те же самые частоты анализа). **EMSight** использует алгоритм, который автоматически сохраняет эти таблицы в кэш-памяти компьютера для последующего использования. Для многих задач (например, анализ микрополосковых неоднородностей) генерирование таблиц моментов отнимает наибольшее время в процессе решения. Для таких задач многократное использование предварительно сохраненных таблиц моментов может существенно уменьшить время решения. Когда используется решающее устройство FFS (быстрое частотное свипирование), время генерирования таблицы моментов может быть очень большим, так что использование кэшируемых таблиц моментов с FFS решающим устройством обеспечивает значительное уменьшение времени моделирования.

Решение матрицы моментов

Поскольку матрицы моментов могут быть очень большие, только одна матрица моментов находится в RAM в данный момент времени. Размер задачи, которая может быть рещена EMSIGHT — ограничивается физическим RAM, доступным для сохранения матрицы моментов. EMSIGHT станет работать на порядок медленнее, если матрица моментов не помещается в RAM и требует виртуальной памяти на жестком диске. Объем памяти, требуемый для хранения матрицы моментов отображен в диалоговом окне Information от меню View. Далее, если оценка требований RAM решает, что каждый не имеет достаточно RAM, чтобы рещить текущую матрицу, перед решением обязательно отображается диалоговое окио Information.

Матрица моментов является и симметричной и плотной. Симметричная в смысле, что элементы — зеркальные изображения друг друга относительно диагонали матрицы ($Z_{mn} = Z_{nm}$). Плотная в смысле, что очень немногие элементы матрицы нулевые. EMSight может хранить матрицу моментов как полную матрицу (сохраняя все элементы) или как симметричная матрица (где только половина элементов сохранена). Поскольку число неизвестных величин становится большим, требуемый RAM (ЗУ) для плотного матричного памяти пропорционально числу неизвестных величин в квадрате (память $= K_m N^2$), где K_m является постоянной. Метод хранения действует только на постоянную K_m, но не на зависимость N^2. Использование симметрии матрицы позволит решать задачу с приблизительно большим количество в 1,4 раз неизвестных. Далее, матрица комплексная, если смоделированная система не без потерь. Использования комплексного числа вдвое больше хранение как вещественное число, так аналогично число неизвестных величин, для которых можно решить, могут быть увеличены на приблизительно в 1,4 раз, если система без потерь.

Метод хранения определен опциями в Matrix Solver. Решающее устройство Full Direct хранит полную матрицу, в то время как решающее устройство Symmetric Direct Solvers и все рещающие устройства Iterative Solvers хранят только поло-

вину матрицы. Более того, интерактивное решающее устройство Iterative Solvers требует большую память, которая зависит от выбранного решающего устройства и фактических элементов матрицы.

Прямое решение матрицы

Решающие устройства Direct Solvers, имеющиеся в EMSIGHT включают методы хранения моментов Full (полное заполнение) и Symmetric (симметричное заполнение). По умолчанию задается прямое решающее устройство, которое пытается выбирать оптимальное решение, на основании структуры EMSIGHT и доступной RAM компьютера. При этом или решающие устройства Full или Symmetric выбрано. Решающее устройство Full хранит полную матрицу, тогда как решающее устройство Symmetric хранит только половину матрицы. Разность между этими двумя методами лежит в фактическом требуемом времени решении. Как часто происходит в природе, мы должны выбирать между одним и другим. Так обстоит дело и с прямым решающим устройством. Алгоритм обычно решает матрицу, используя полную память, существенно быстрее, чем используя симметричную память. Как правило, для комплексной матрицы, мы получаем ускорение в четыре раза, в то время как для двойных матриц — в два раза.

Изучение плотности алгоритмов прямого решающего устройства показывает, что требуемое число шагов решения, и таким образом требуемое время решения, пропорционально кубу неизвестных величин (время = $K_i N^3$), где K_i постоянная. При изменении алгоритма, мы влияем только на K_i, а не на N^3. Таким образом, когда размер задачи увеличивается, время, необходимое на решение матричного уравнения, доминирует в методе моментов ЕМ.

Итерационное решение матрицы моментов

Как следует из названия метода, итерационные матричные решающие устройства ищут вектор решения матричного уравнения $A\ x = rhs$ итерационно. Итерационные методы решения матричных уравнений уменьшают время моделирования на порядок, но они более квпризны при использовании, чем прямые решающие устройства. Фактически, пока компьютер имеет достаточно RAM, прямые рещающие устройства не требуют никакого вмешательства пользователя. Однако если это необходимо можно пойти на значительное уменьшение времени решения, используя итерационные решающие устройства. Рекомендуется в первую очередь использовать прямые решающие устройства перед попыткой использования итерационных решающих устройств. Приведем список проблем решения матричных уравнений итерационных методом:

- итерационные методы не гарантируют сходимость к правильному решению;
- время решения для итерационного решающего устройства увеличиваются линейно с увеличением числа правых частей, или в терминах ЕМ, числа портов;
- итерационные методы сходятся на заданном допуске и затем останавливаются — это обычно не связано с машинной точностью;
- не имеется точного способа сообщить заранее требуемую RAM, время расчета, будет ли процесс сходиться, пока вы не сделаете попытку этого;
- итерационные решающие устройства выгодны только для очень большого количества неизвестных величин;
- если правильно выбрать параметры расчета, время решения может быть минуты, вместо часов для некоторых задач.

Цель итерационного решающего устройства состоит в том, чтобы найти вектор решения x, который решает следующее матричное уравнение

$$Ax = rhs. \tag{3.25}$$

Решающее устройство делает первую оценку решения вектора *x*. Затем используется итерационный метод, чтобы определить аппроксимацию для решения, основанного на предыдущей оценке и информации, полученной из матрицы. Этот процесс продолжается, пока не выполнены критерии сходимости, обычно рассчитывая ошибку в правой части. Эти итерационные методы очень похожи на методы оптимизации для *N* переменных, и при этом встречаются те же самые проблемы, например сходимость.

Чтобы преодолеть эти проблемы, используется метод *предварительного условия*. Он включает умножение правой и левой части матричного уравнения на матрицу *P*, называемой *предварительным условием*.

$$(PA)x = (P\,rhs). \tag{3.26}$$

Это умножение на *P* с обеих сторон не изменяет решение вектора *x*. Если вектор является решением одного уравнения, то оно будет также решением другого. Однако это умножение может изменить скорость сходимости итерационного процесса. Рассмотрим случай, когда это предварительное условие равно обратной матрице $A(P = A^{-1})$. В этом случае предыдущее уравнение упрощается, чтобы дать нам точное решение для *x*.

$$(A^{-1}A)x = (A^{-1}rhs). \tag{3.27}$$

Очевидно, если мы сумели определить обратную матрицу *A*, тогда мы не должны использовать итерационный метод. Более того этот процесс, как вышеупомянутый, требует $K_i N^3$ времени и $K_m N^2$ памяти RAM. Однако можно видеть, что, когда матрица *P* полагается равной матрице, обратной *A*, проблема становится проще и таким образом процесс сходится быстро, используя итерационные методы. Это было подтверждено экспериментально.

Так как требуется время, пропорциональное $K_i N^3$ и память, пропорциональная $K_m N^2$, чтобы решить общую плотную матрицу, много методов было разработано для уменьшения этой зависимости на один порядок *N*. Как правило, эти методы делают предположения относительно матрицы, которые не справедливы к общей матрицы. Эти методы имеют дело с некоторым видом или разреженной матрицей, где много нулей, что решает матрицу быстрее с меньшим количеством RAM. Формирование предварительного условия *P* применяет один из этих методов и достигает приблизительной инверсии *A* во времени $K_m N^2$.

Далее приведем общий краткий обзор того, как работает итерационное решающее устройство.

Выбирается начальное предположение вектора решения *x*.

Формируется приблизительная матрица *A*.

Выполняется инверсия этой приблизительной матрицы — и эта матрица называется заранее предопределенная матрица *P*.

И матрица *A*, и правая часть матричного уравнения предварительно умножаются на заранее определенную матрицу P.

Используется итерационный метод, чтобы определить аппроксимацию для решения, основанного на предыдущей оценке решения и информации, собранной

от матрицы. Как правило, эта информация получается при векторном умножении матриц $(PA)x$.

Итерационный метод продолжается, пока не выполняются критерии сходимости. Например,

$$(PA)x - (P\,rhs) < tolerance. \tag{3.28}$$

Выбор предварительных условий будет иметь сильное влияние на характеристики сходимости, использующие итерационный метод. Здесь находится компромисс.

Прямые решающие устройства будут всегда быстрее работать для мвлого числа неизвестных величин. Однако, для задач с менее некоторого числа неизвестных, итерационные рещающие устройства будут использовать прямые решающие устройства, даже если итерационное решающее устройство выбрано.

Время решения для итерационных решаюших устройств пропорционально числу требуемых решений. Это так потому, что, в отличие от прямых решающих устройств, которые эффективно инвертируют матрицу МОМ, итерационные решающие устройства определяют ток для каждого требуемого возбуждения (или в математических условиях, для каждой правой стороны «*rhs*». В случае EM-Sight число *rhs* равно числу портов. Поэтому, время, затраченное при итерации решающего устройства для ЕМ задачи, которая имеет 4 порта с 3000 неизвестными величинами, будет в 4 раза больше времени, чем с 1 портом и 3000 неизвестными величинами.

Предварительное условие формируется только однажды, независимо от числа портов (правые стороны). Поэтому, для моделирования со многими портами, лучше более предварительное условие — выбирать осторожно.

Итерационное решающее устройство — задается именем и характером итерактивного процесса. Так же, как в методе гармонического баланса, он может иметь проблемы с медленной сходимостью или несходимостью. Сходимость определена несколькими параметрами, включая предварительное условие, характер матрицы, которая будет решена, и начального предположения при решении.

В терминах ЕМ хорошо предопределенная матрица имеет значительные элементы по диагонали и величины элементов матрицы спадают, когда мы отходим от диагонали. Каждый элемент в матрице представляет связь между каждой неизвестной базисной функцией. Диагональный элемент — собственный импеданс, который всегда больше, чем взаимный импеданс и связь с любыми другими элементами. Величина каждого элемента зависит от нескольких факторов, включая интервал между двумя базисными функциями в терминах длины волны и направления базисной функции (x, y, или z направленные токи). Если величина матричных элементов не спадает быстро, когда мы двигаемся от диагонали, матрица может быть плохо обусловленной, и итерационные решающие устройства могут не решить ее, если они не имеет очень хорошее предопределение. На основании этого мы можем сделать несколько заключений.

Структуры, которые малые по сравнению с длиной волны, будут иметь большую связь между базисными функциями и элементы матрицы спадать медленнее, когда мы двигаемся от диагонали. Мы можем заключать, что режим сходимости из-за этого замедляется и требует лучшего предопределения.

Если структура — многослойная, с большим количеством базисных функций одна возле другой в z-направлении, связь — относительно высокая между этими

элементами, и величина связи падает медленнее, когда мы двигаемся от диагонали в матрице. Мы можем заключить, что режим сходимости замедляется из-за этого и требует более точного предопределения.

Чтобы точно представлять структуру, нужно разбить «по сетке» структуру (шаг сетки намного меньший чем размер моделируемой структуры), тогда большая часть базисных функций располагается рядом и мала в терминах длины волны. В этом случае, спад величин этих элементов от диагонали медленен, потому что близость большой части элементов в условиях длины волны малая. Мы можем заключать, что режим сходимости замедлен из-за этого и требует улучшенного предопределения.

По мере увеличения усилий на предопределение, требования к RAM увеличиваются, поскольку большее количество RAM необходимо, чтобы инвертировать аппроксимацию А.

Количество подготовки, используемой в интерактивном методе решения в EMSight зависима от выбора решающего устройства и характера матрицы, которая будет решена. Поскольку характер матрицы не известен априорно, точная оценка требуемого RAM, чтобы хранить предварительное условие и время, требуемое, чтобы создать его, не доступны. Оценки сделаны для диалогового окна Inforшation.

Точные временные затраты записываются в файле em_time.txt.

Создание предварительных условия предопределения происходит во время выполнения шага Factor Matrix Operation.

Итерационная часть алгоритма решения происходит в течение Solve Operation для каждого порта в файле синхронизации.

Допуск сходимости, который определяет, когда итерационное решающее устройство останавливается, может быть установлен в закладке **Solvers** диалога EM Options.

Итерационные решающие устройства, имеюшееся в EMSIGHT изменяют только величину предподготовки, которая применяется к первоначальной матрице импедансов. Доступные итерационные решающие устройства различаются следующим образом:

- итерационо большие (Размер > 0.1 Lambda) — низкая предподготовка;
- итерационно средние (Размер > 0.01 Lambda) — средняя предподготовка;
- итерационно малые (Размер < 0.01 Lambda) — высокая предподготовка;
- задаваемые итерационного — задаваемая пользователем предподготовка.

Величина Dim (размер) оценивает спад величин элементов связи от диагонали, который медленнее для структур, которые по размеру меньшие в терминах длины волны. Однако, это не единственная причина, почему матрица МОМ может быть плохо обусловленая. Фактически решающее устройство устанавливает параметры, чтобы быстро формировать предварительные условия.

3.10. Практические замечания по работе EMSight

При расчете сложных конструкций приходится встречаться с мнением, что программа **MWO** уступает в точности расчета другим известным программам проектирования СВЧ схем, например, популярной программе **Momentum Agilent**. Поэтому обратим внимание на несколько особенностей программы **MWO**, которые

требуют внимательного отношения к процессу моделирования. К таким вопросам можно отнести следующие.

1. Вопросы электромагнитного моделирования *гибридных* СВЧ схем, включающих цепи с распределенными параметрами и дискретные компоненты.
2. Вопросы, связанные с выполнением задачи исключения (de-embedding), рис. 3.14. Эти две проблемы в какой то мере связаны, т. к. решение первой задачи связано с грамотным решением второй.
3. К ним можно также присоединить вопрос об учете высших типов волн и вычислении такой характеристики, как **AllModes.**
4. Анализ конструкции в металлическом корпусе может привести к резонансным проблемам, а открывание только верхней крышки при расчете диаграммы направленности антенн — приводит к ограничению анвлиза антенн, поскольку параметры границ задаются только для верхней крышки.
5. Еще один вопрос, который требует осторожиого рассмотрения — это порты. Очевидно, что этот вопрос также связан с предыдущими, поскольку отдельные анализируемые схемы связываются с помощью внутренних портов.

Порты. В программе MWO имеется несколько типов портов. Внешние порты или порты на краю (рис. 3.14) обычно не вызывают трудностей при введении их в конструкцию.

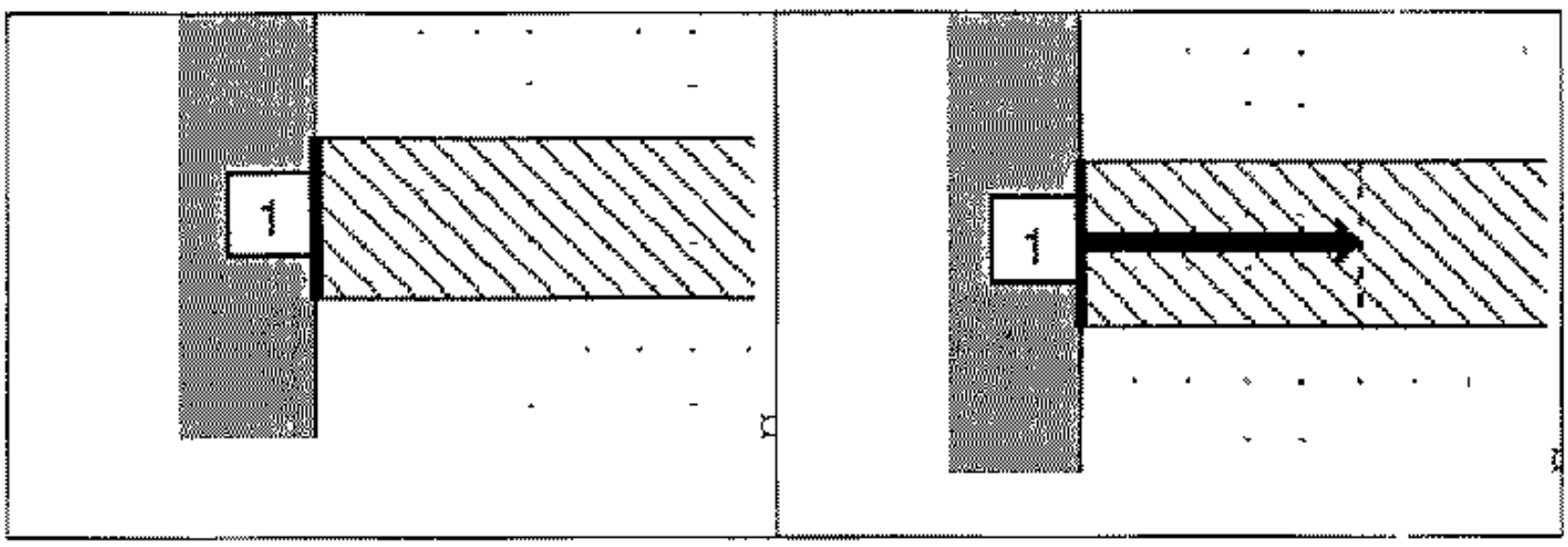


Рис 3 14. Сдвиг референсной плоскости в процессе разгерметизации

При использовании в проекте даже одного этого порта очень важным остается вопрос выбора референсных плоскостей.

В качестве примера рассмотрим схему тройника на микрополосковых линиях MTEE_test.emp (рис. 3.15).

С использованием алгоритма исключения, который заключается во введении линии от порта до сечения тройника (это осуществляется захватом и протаскиванием стрелки мышью, рис. 3.15), получаем характеристики, показанные на рис. 3.16.

Теперь отключим влгоритм разгерметизации, т. е. отведем жирные стрелки до сечения портов. Вообще, убрать метод исключения нельзя, поскольку если в диалоге Option Solver стоит опция De-embedded, должны иметься небольшие отрезкн линий (рис. 3.17), в которых рассчитывается волновое сопротивление и постоянная распространения.

Полученные характеристикн тройника (параметры S_{11}, S_{21}, S_{31}) показаны на рис. 3.18 и значительно отличаются от характеристик на рис. 3.16.

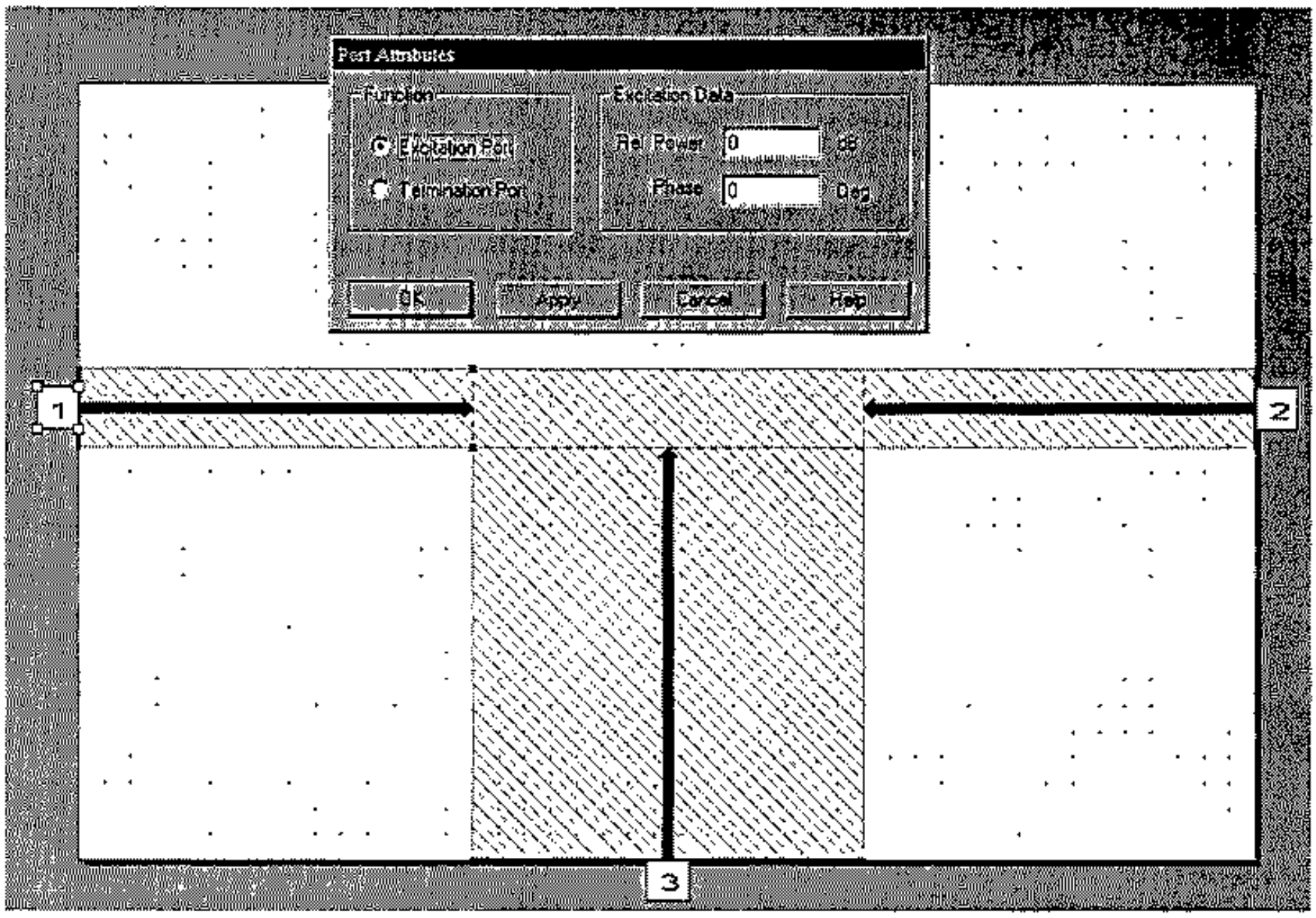


Рис. 3.15. Микрополосковый тройник и подводящие микрополосковые линии

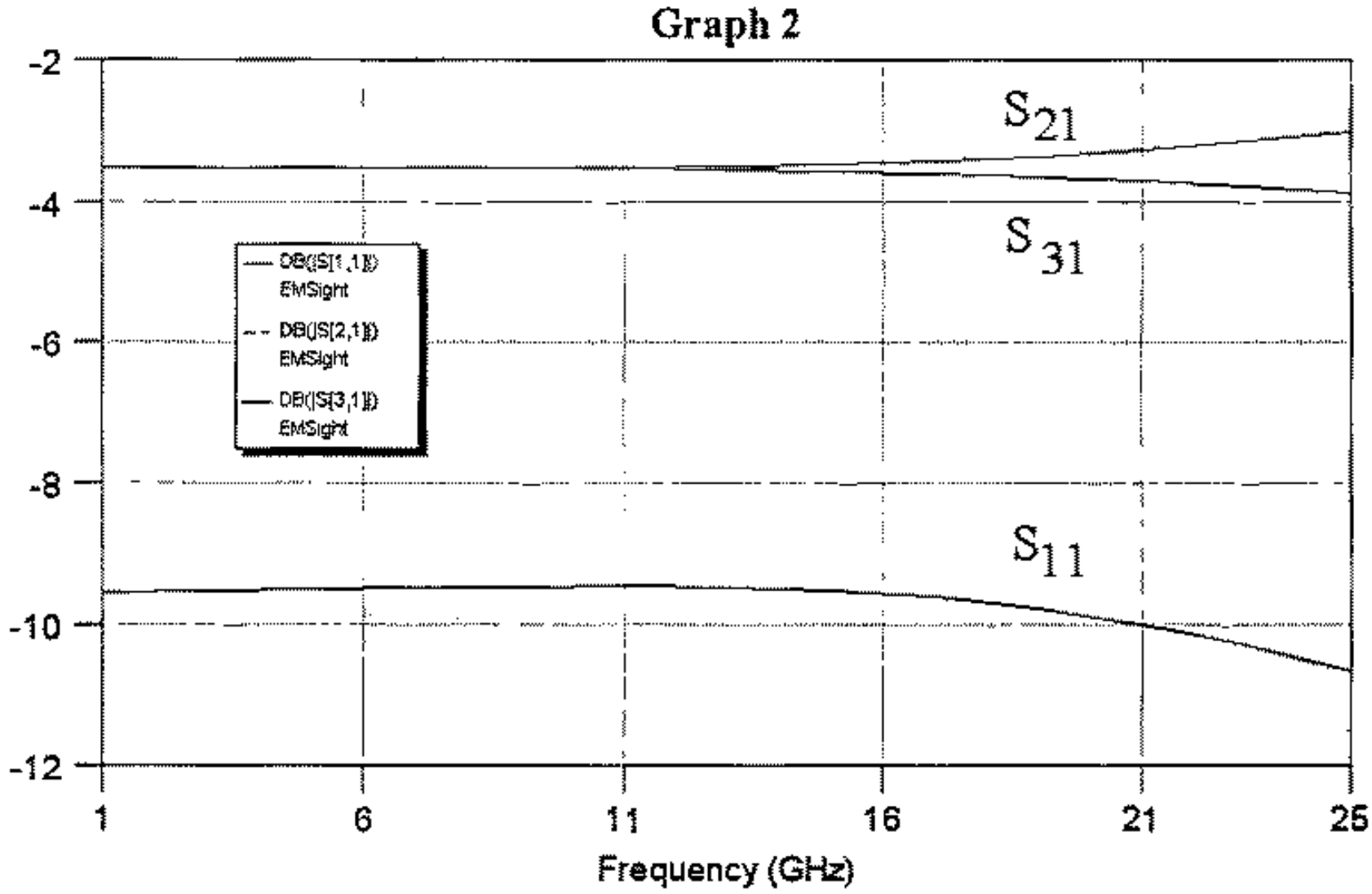


Рис. 3.16. Частотная характеристика тройника с полным исключение подводящих линий

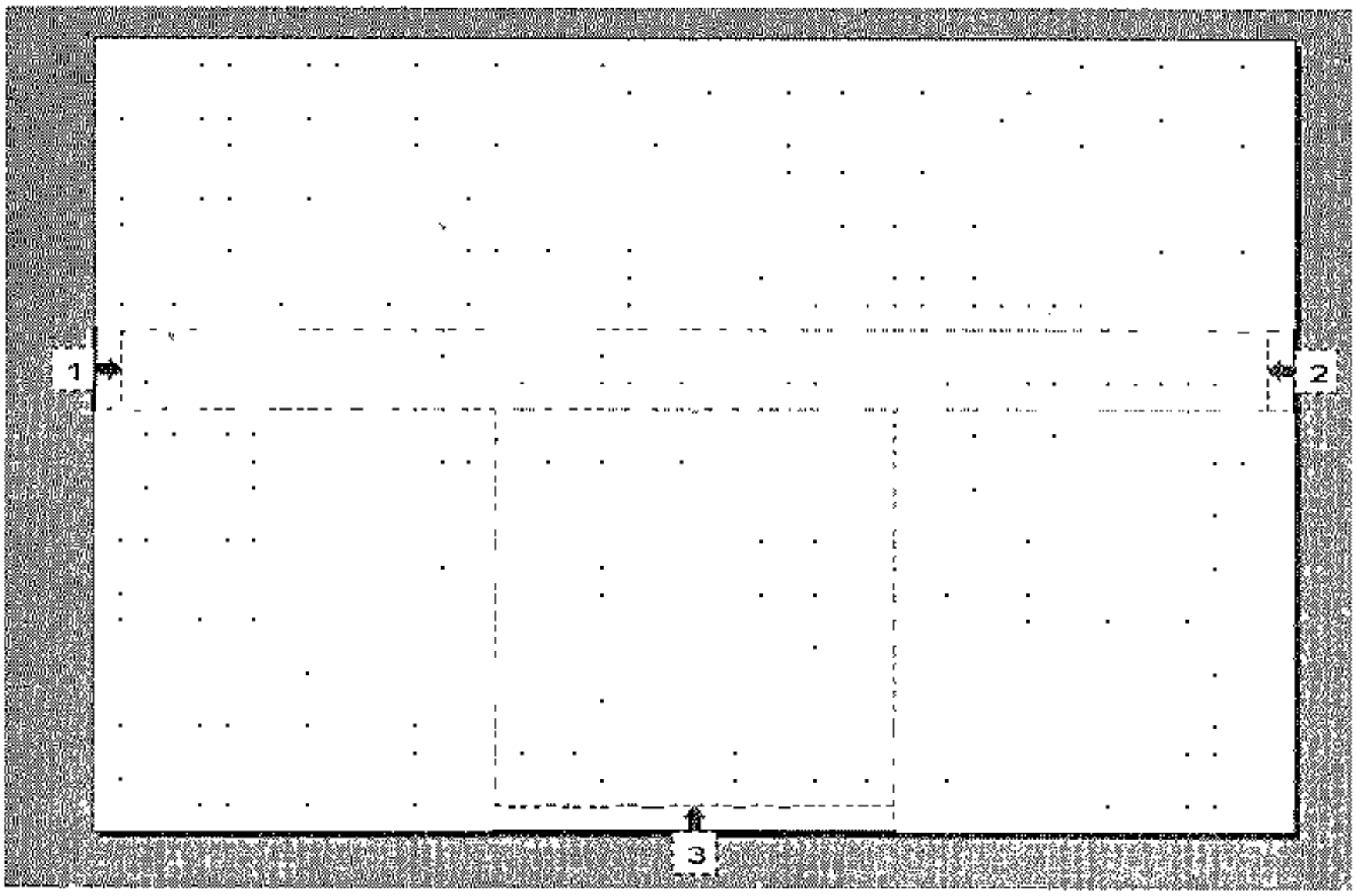


Рис. 3.17. Внесение исключаемых линий небольшой длины

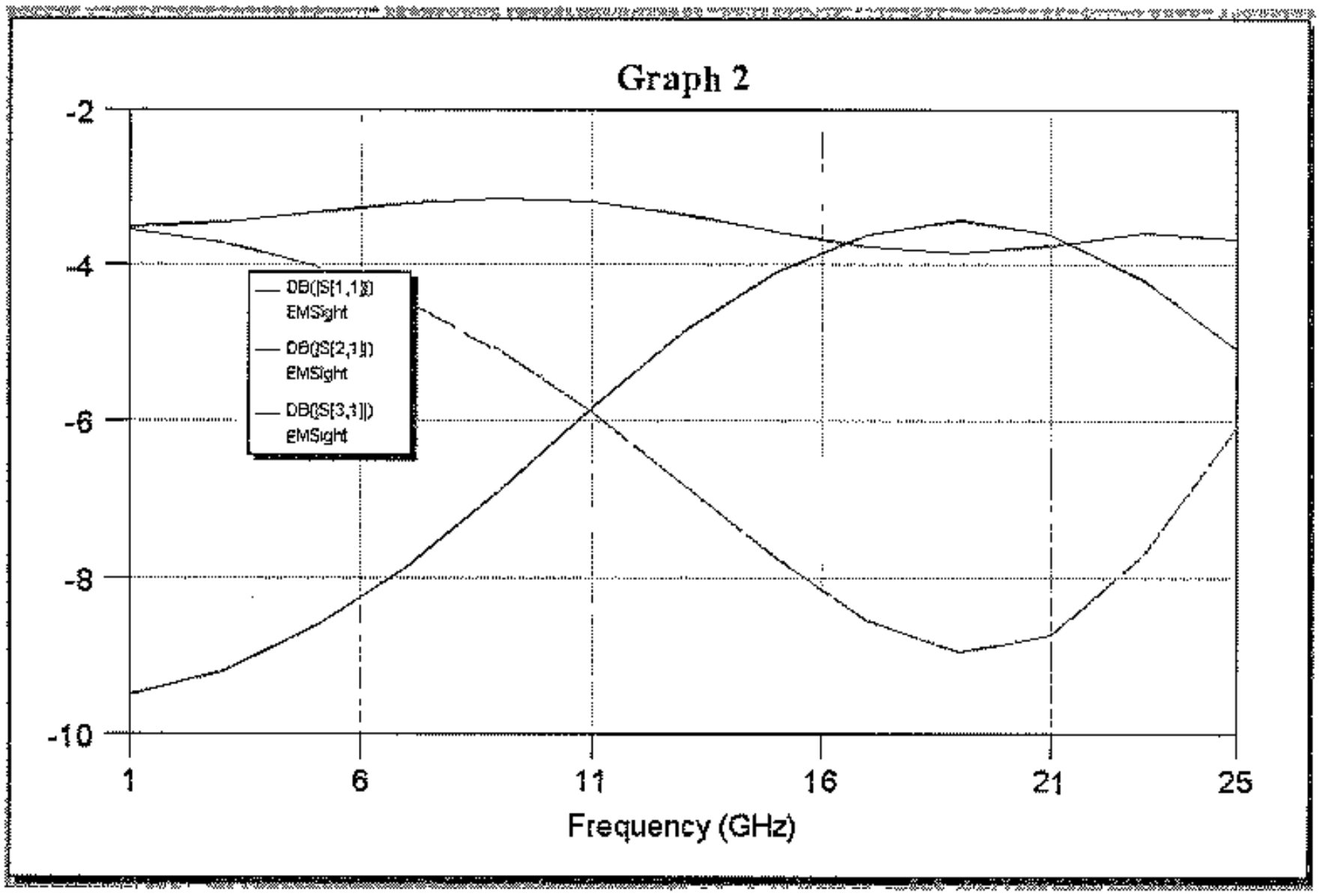


Рис. 3.18. Характеристики тройника без использования исключения

Возникает вопрос — как выбирать алгоритм исключения в данном случае? И какой длины линии исключения необходимо принять даже для такого простого случая? Ответ на этот вопрос в конкретных случаях можно дать только после серии расчетов до тех пор, пока длины исключаемых линий не влияют на результаты расчета. Это будет свидетельствовать о том, что высшие реактивные типы волн, принципиально возникающие на неоднородностях, достаточно затухли и не влияют на S-параметры по основной волне.

Перемычки-порты

Добавление портовых перемычек Via. Перемычки-порты подобны портам на краю, в которых они связаны с границей EM-корпуса. Перемычки-порты Via используются. чтобы соединить дно корпуса и EM-структуру. Эти перемычки-порты используются также для создания зонда возбуждения, как показано, например, на рис. 3.19 для плоской антенны:

Перемычка-порт создается аналогично перемычке в отверстии. Перемычка-порт создается по команде **Draw>Add Via Port**.

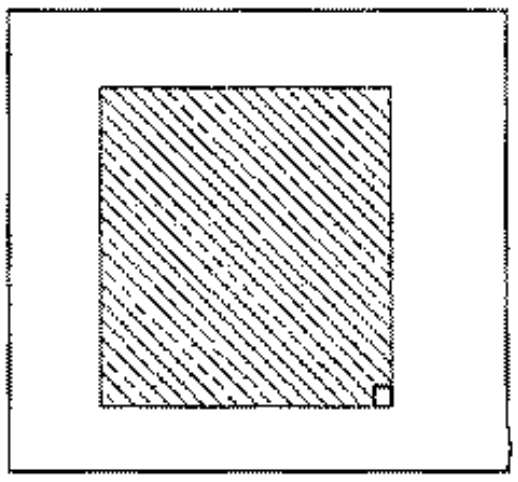


Рис. 3.19. Перемычка VIA, вид сверху с перемычкой-портом в нижней правой части

Внутренние порты. Чтобы вставить внутренний порт, выберите многоугольник, который должен быть отрицательной клеммой для внутреннего порта, а затем выберите команду **Draw>Add Internal Port** (внутренний порт «4» на рис. 3.20).

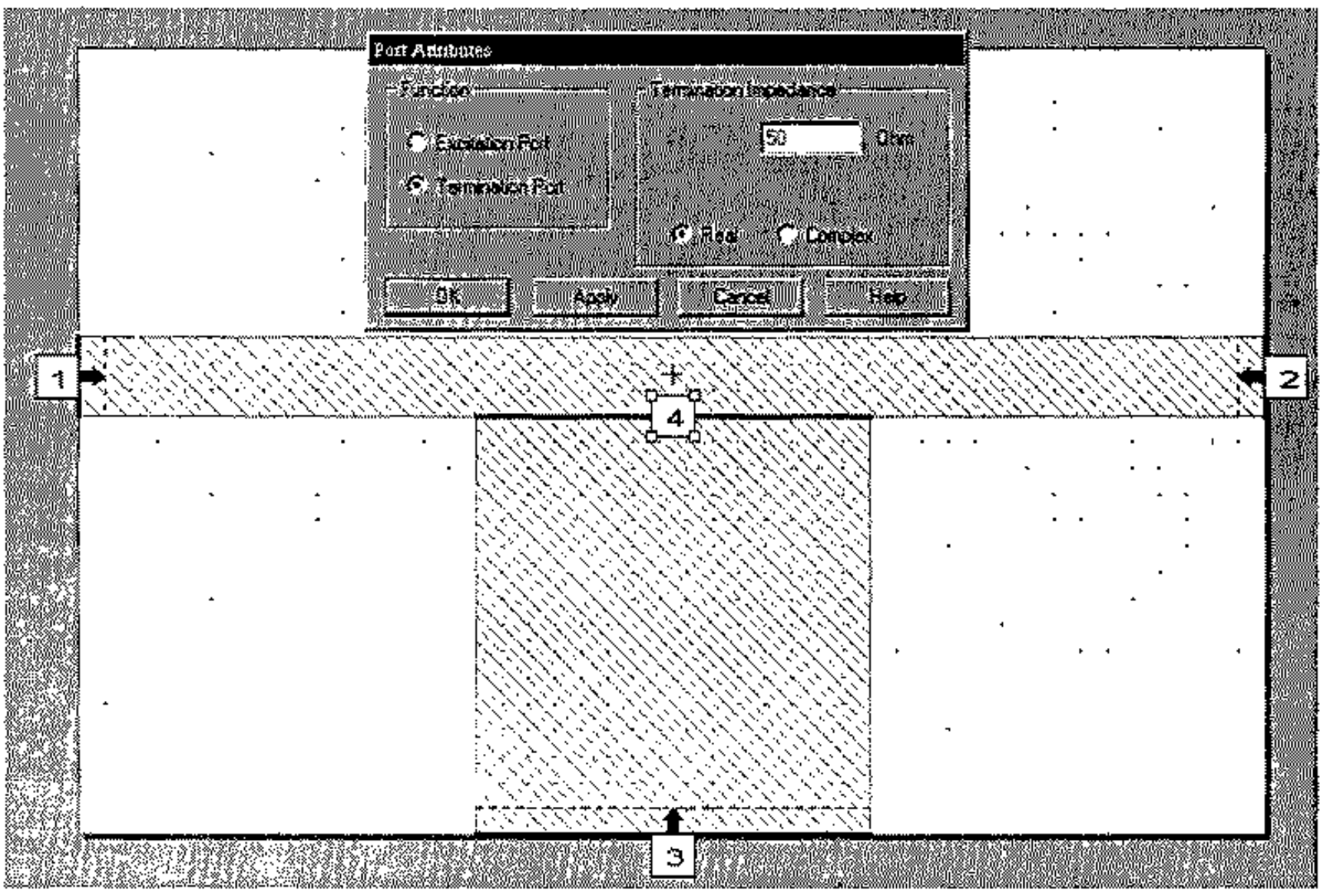


Рис. 3.20. Введение внутреннего порта «4» между двумя формами

Возникает вопрос — как воспринимать внутренний порт, если он имеет сопротивление 50 Ом, или например, оно равно 1000 Ом. В обоих этих случаях результаты расчета одинаковы (вне зависимости от величины внутреннего сопротивления) и сильно отличаются от расчета без порта, хотя металлическая форма не изменилась.

В связи с этим надо отметить, что сопротивление внутреннего порта, а также его тип (источник или нагрузка) в ЕМ структуре используется только для анимационного отображения токов и поля. Порт типа VIA не имеет волнового сопротивления, так как он представляет собой только описание точки подключения. Если необходимо выполнить моделирование ЕМ структуры с заданной внешней нагрузкой, например, рассчитать КСВН на нагрузке 50 Ом, необходимо создать схему, содержащую три элемента: два порта (для случая фильтра, например) подключенные к *подсхеме*, ссылающейся на ЕМ структуру. Величину 50 Ом надо задать в параметрах портов на схеме, после чего назначить расчет КСВН. Используя такое двухступенчатое моделирование, результаты становятся зависимые от «опорного сопротивления внутреннего порта».

Классический пример заключается в описании полевого транзистора, подключенного к микрополосковой линии (рис. 3.21). Считается, что транзистор также имеет распределенные площадки истока, стока и затвора. Пассивная часть как транзистора (рис. 3.22), так и микрополосковой структуры описаны как метвллический слой, а активные свойства транзистора описаны в виде модели, подключенной параллельно точкам, которые вводятся как внутренние порты (рис. 3.23).

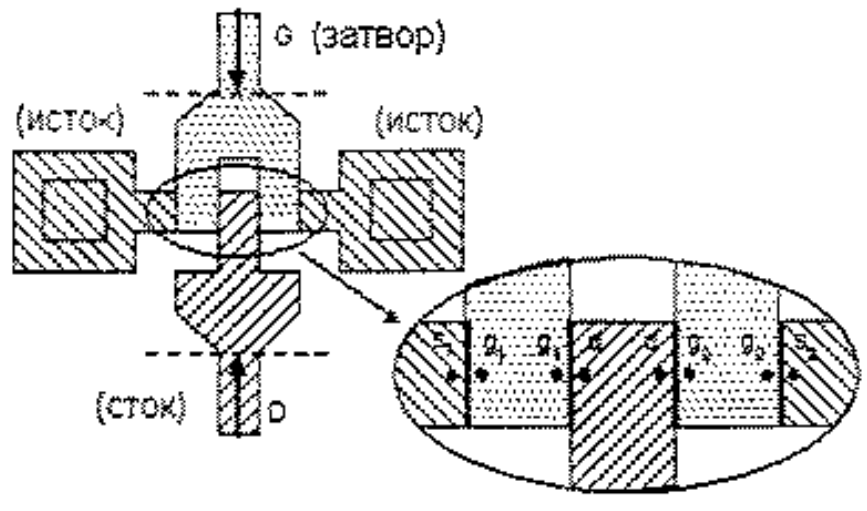


Рис. 3.21. Структура полевого транзистора, разбитого на элементы

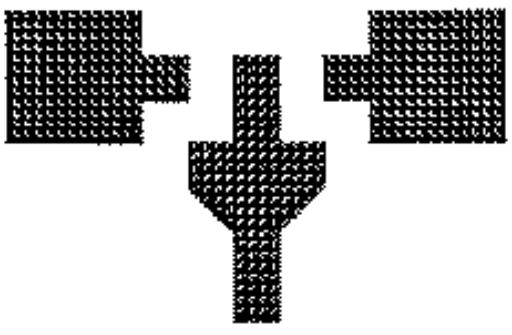


Рис. 3.22. Топология площадок, на которые монтируется полевой транзистор

Электрическая схема объединяет схему полевого транзистора и ЕМ структуру, описывающую площадки, на которых устанавливается транзистор. Таким образом, мы имеем дело с параллельным соединением пассивной части схемы, описанной в виде ЕМ структуры и активного элемента (транзистора). Определение входных сопротивлений портов транзистора как плавающего трехполюсника — это отдельная, достаточно сложная задача.

Рассмотрим пример: транзистора, включенного в микрополосковую структуру (блок схема на рис. 3.24. топология на рис. 3.25).

В данном примере электрическая схема имеется свой топологический аналог (рис. 3.25) но топология используется только для послойного и трехмерного представления. Моделируется только электрическая эквивалентная схема (рис. 3.26)

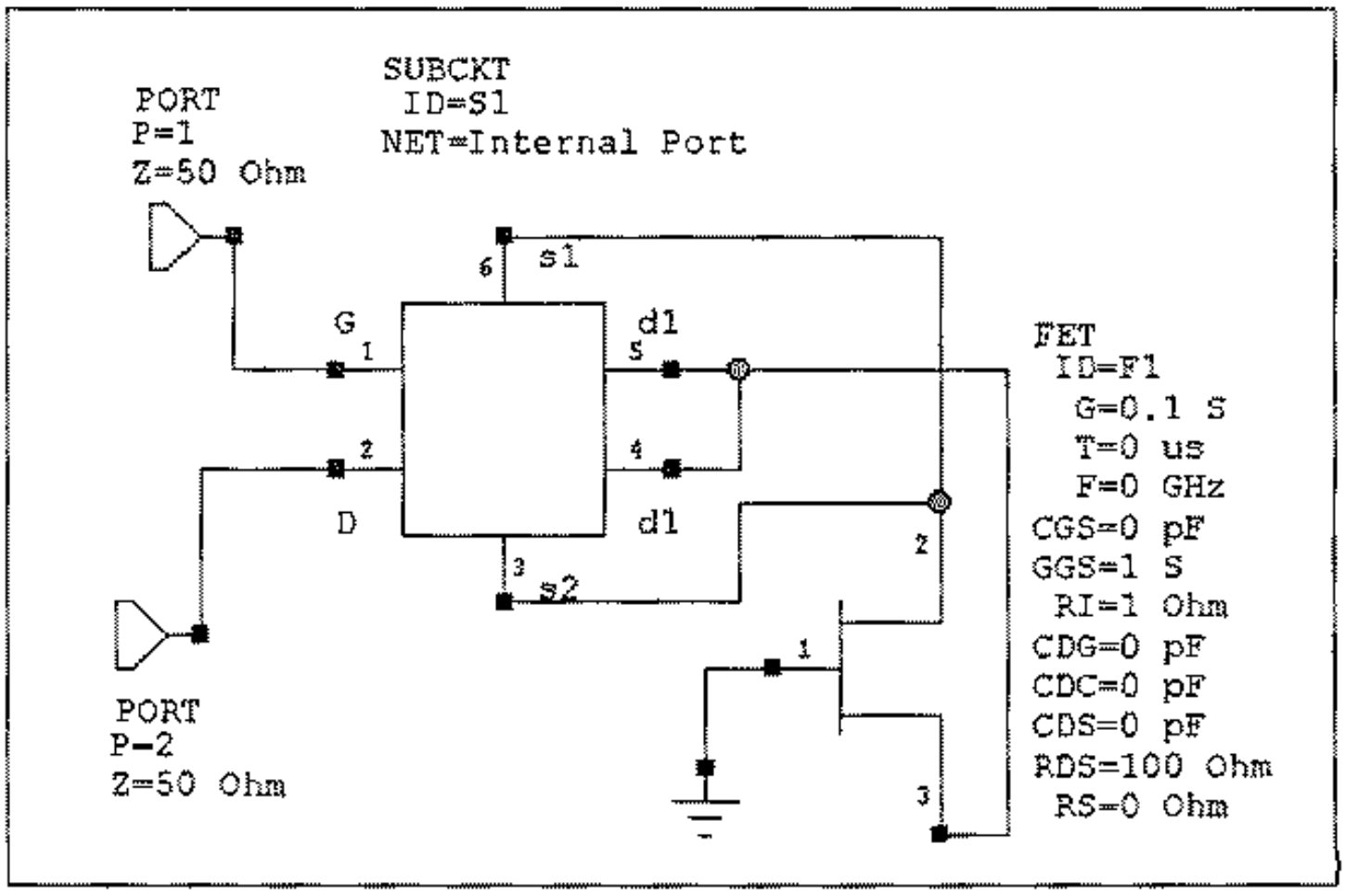


Рис. 3.23. Структурная схема объединения транзистора и пассивной части топологии

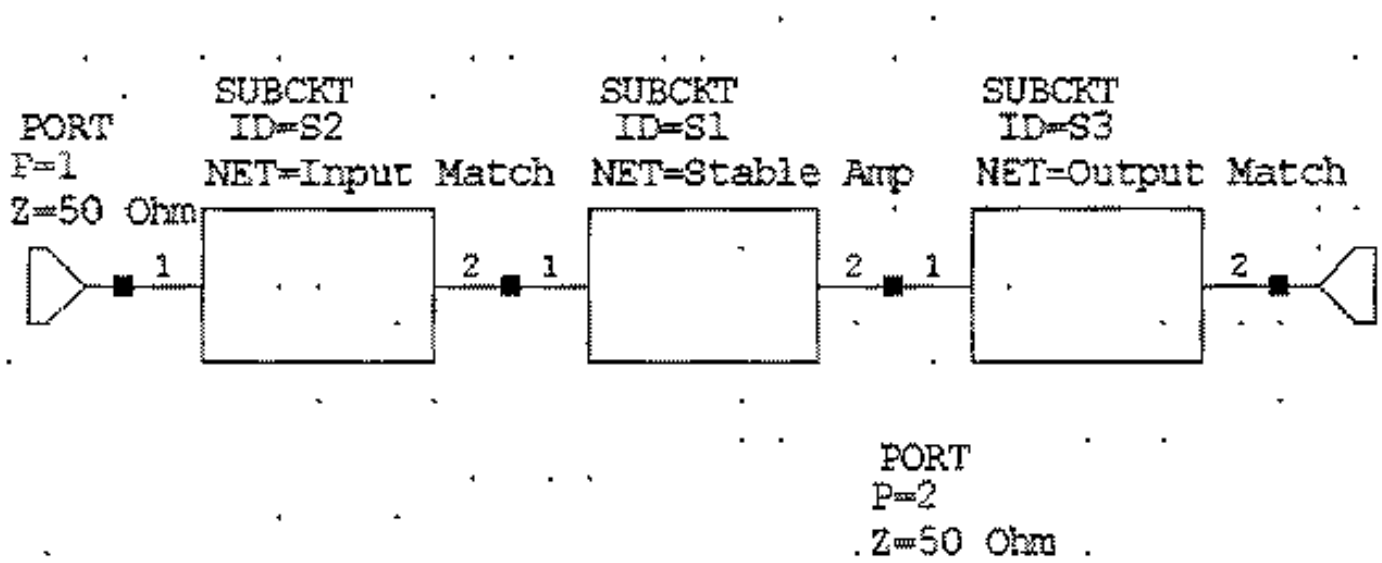


Рис. 3.24. Последовательное соединение трех блоков: входной согласующей цепи, усилительного элемента и выходной согласующей цепи

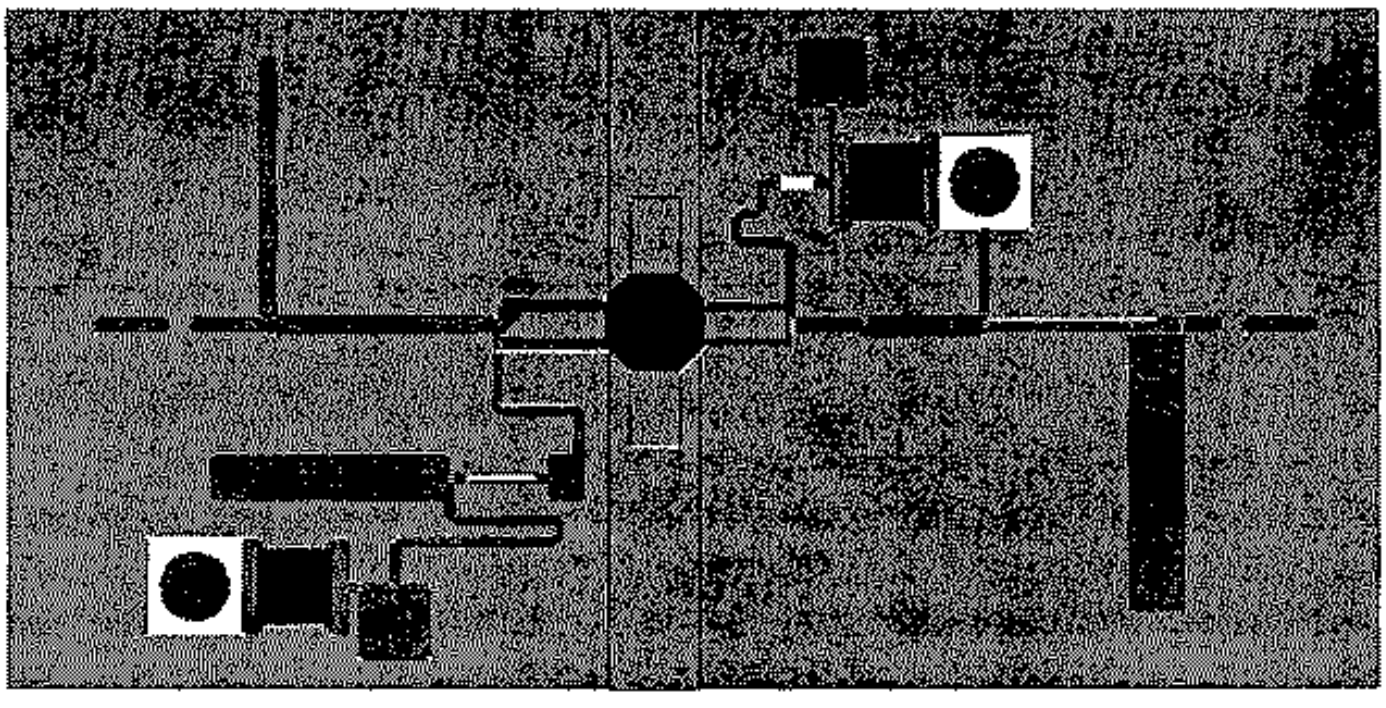


Рис. 3.25. Топология СВЧ усилителя на транзисторе

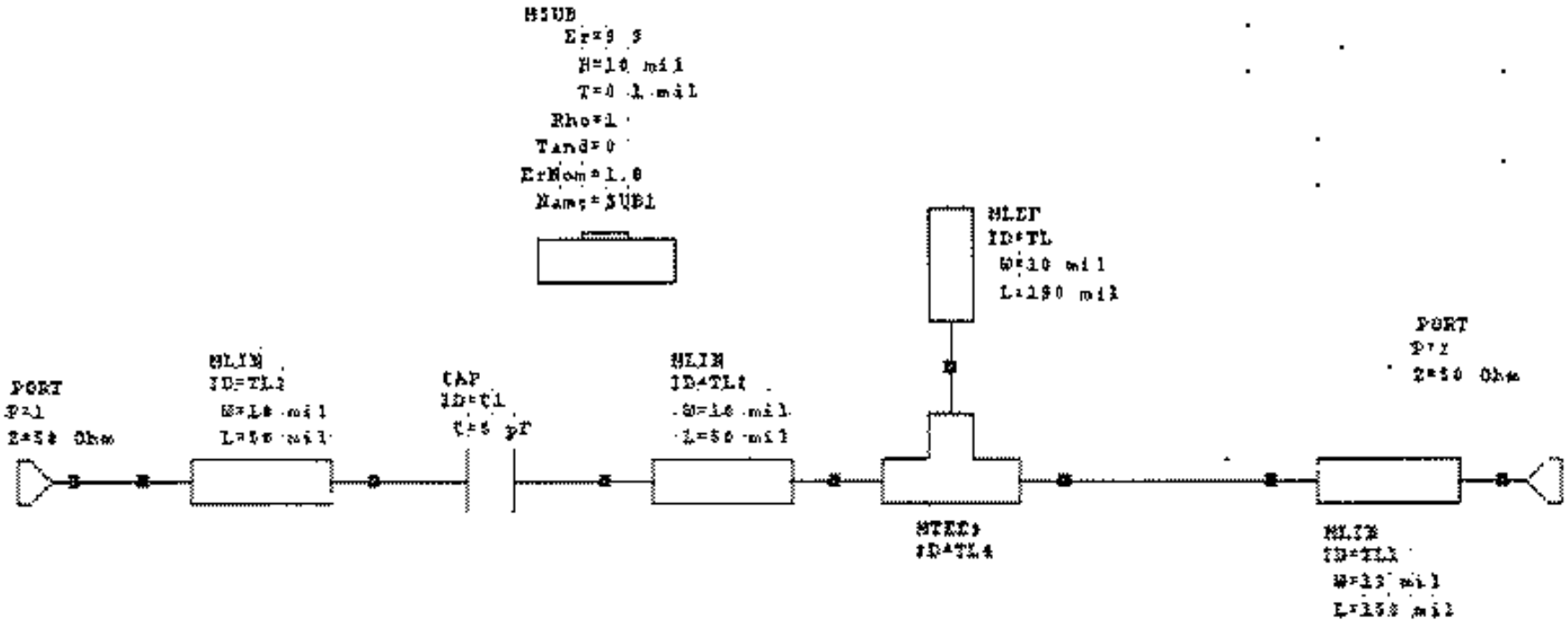


Рис. 3.26. Электрическая схема входной согласующей цепи

методом теории цепей. Электродинамическим методом моментов анализируются только блоки, описанные как **EM Structure**.

Очевидно, что состояние волн в точках включения транзистора и пассивной схемы анализируется на уровне первой моды, поскольку расчет схемы проводится методом теории цепей (рис. 3.24 для схемы входной согласующей цепи).

Теперь покажем, как решается аналогичная задача моделирования гибридной схемы с помощью программы Momentum, входящей в состав ADS Agilent, которая также решает электродинамическую задачу методом моментов. По существу, решение выполняется аналогично. Однако программа ADS не требует рисования корпуса. Поэтому в результате имеется возможность более разнообразного анализа конструкции (рис. 3.27).

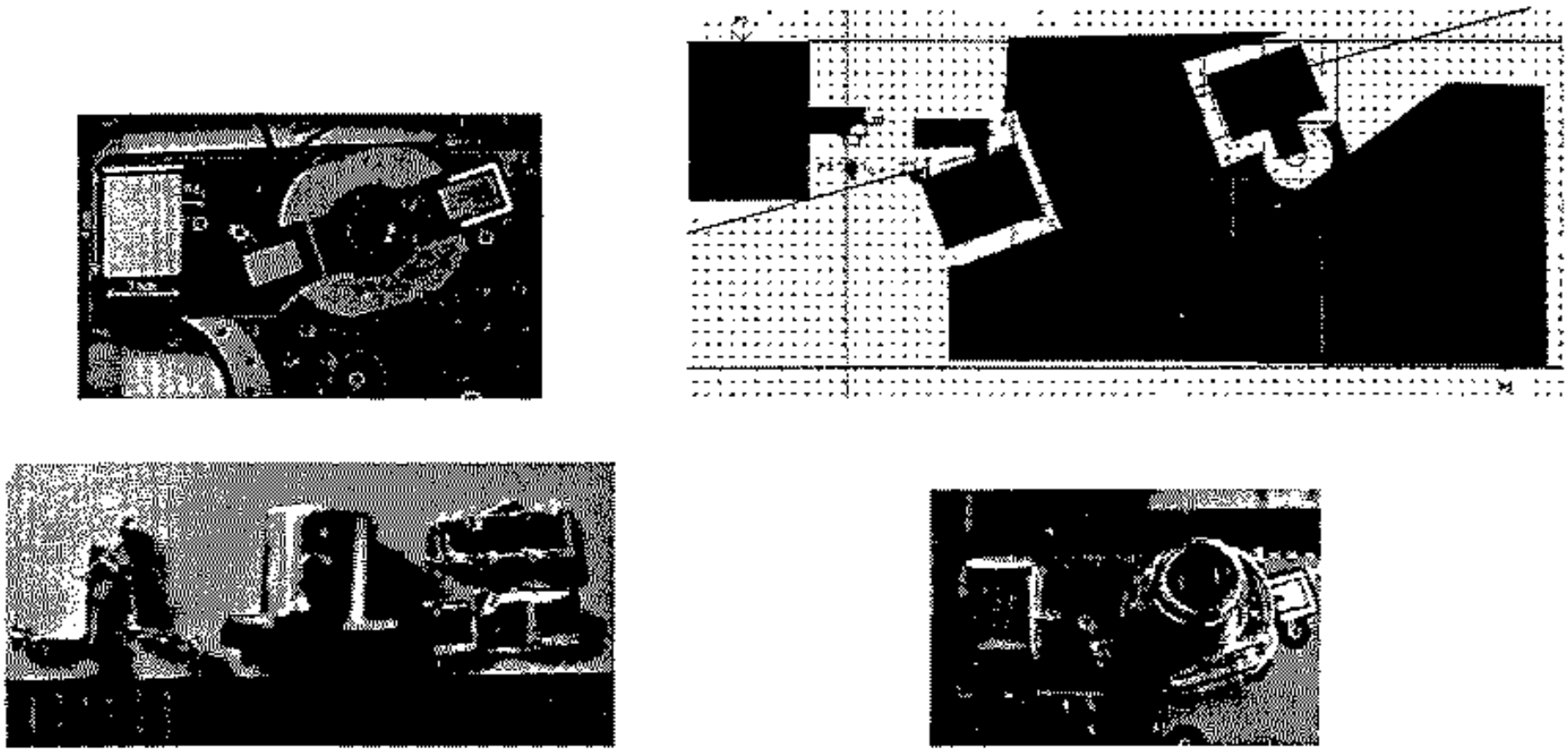


Рис. 3.27. Реальные конструкции СВЧ элементов, которые можно анализировать только электродинамическими методами

Порты в программе ADS также внутренние, но они не требуют нормализации, и воспринимаются как точечные контакты.

Итак, при решении задачи на MWO необходимо учесть, что в программе внедрены новые электродинамические методы расчета, которые требуют внимательного ввода исходных данных и влгоритмизации проектирования. К этим методам, вызывающим трудности, и приводящие к неоднозначности окончательного решения, можно отнести применения алгоритма исключения стандартов (deembedding), установки разбиения на ячейки, режимов расчета матрицы моментов, описания внутренних портов и другие.

3.11. Исключение неоднородностей

Алгоритм быстрого исключения может использоваться только в том случае, когда имеется не больше, чем один порт на стороне корпуса. Когда включается опция **Use Fast Deembed** и имеется больше, чем один порт на стороне, EMSight автоматически по умолчанию использует алгоритм исключения de-embedding. Другой недостаток алгоритма быстрого исключения связан с проблемой «половины длины волны», которая уже упоминалась. Так как алгоритм фиксированного исключения обычно использует более длинные исключаемые линии, существует вероятность того, что электрическая длина линии будет близка к кратному из половины длины волны.

3.11.1. Реализация исключения

Рассмотрим пример (рис. 3.28), чтобы пояснить работу базового алгоритма исключения, используемого **EMSight**.

Для исключения порта 1 схемы на рис. 3.28, автоматически создаются и рассчитываются два исключаемых стандарта. Более короткий стандарт будет иметь ту же самую длину как линия, приложенная к порту 1, а другой стандарт будет в два раза длиннее. На рис. 3.29 показаны два исключаемых стандарта. Для решения обоих стандартов могут использоваться одни и те же таблицы моментов, хотя требуемые таблицы моментов будут отличны от тех, которые используются для главной структуры (хотя опорная плоскость точно равна половине длины корпуса).

Различные таблицы моментов необходимы потому, что эти таблицы зависят от габаритов корпуса. Поэтому таблица моментов для более длинного стандарта содержит всю информацию, необходимую для расчета обеих стандартов.

Предположение, используемое в влгоритме исключения — то, что порты на каждом конце линии исключения удалены на расстояние, на котором они не имеют значительного взаимодействия. Для цепей типа микрополосковой линии принятое эмпирическое правило состоит в том, что порты должны быть отдалены по крайней мере на расстояние, равное удвоенной высоте подложки для пренебрежения взаимодействием между портами. Это означает, что расстояние между опорной плоскостью до края корпуса должно быть по крайней мере равно двум высотам подложки. Исключение — случай, когда опорные плоскости имеют нулевую длину. Для опорных плоскостей с нулевой длиной стандарты равны длине корпуса, так что

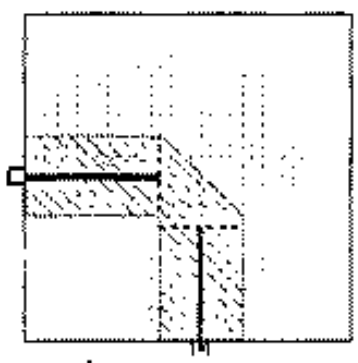


Рис. 3.28. Исходная структура — поворот полосковой линии

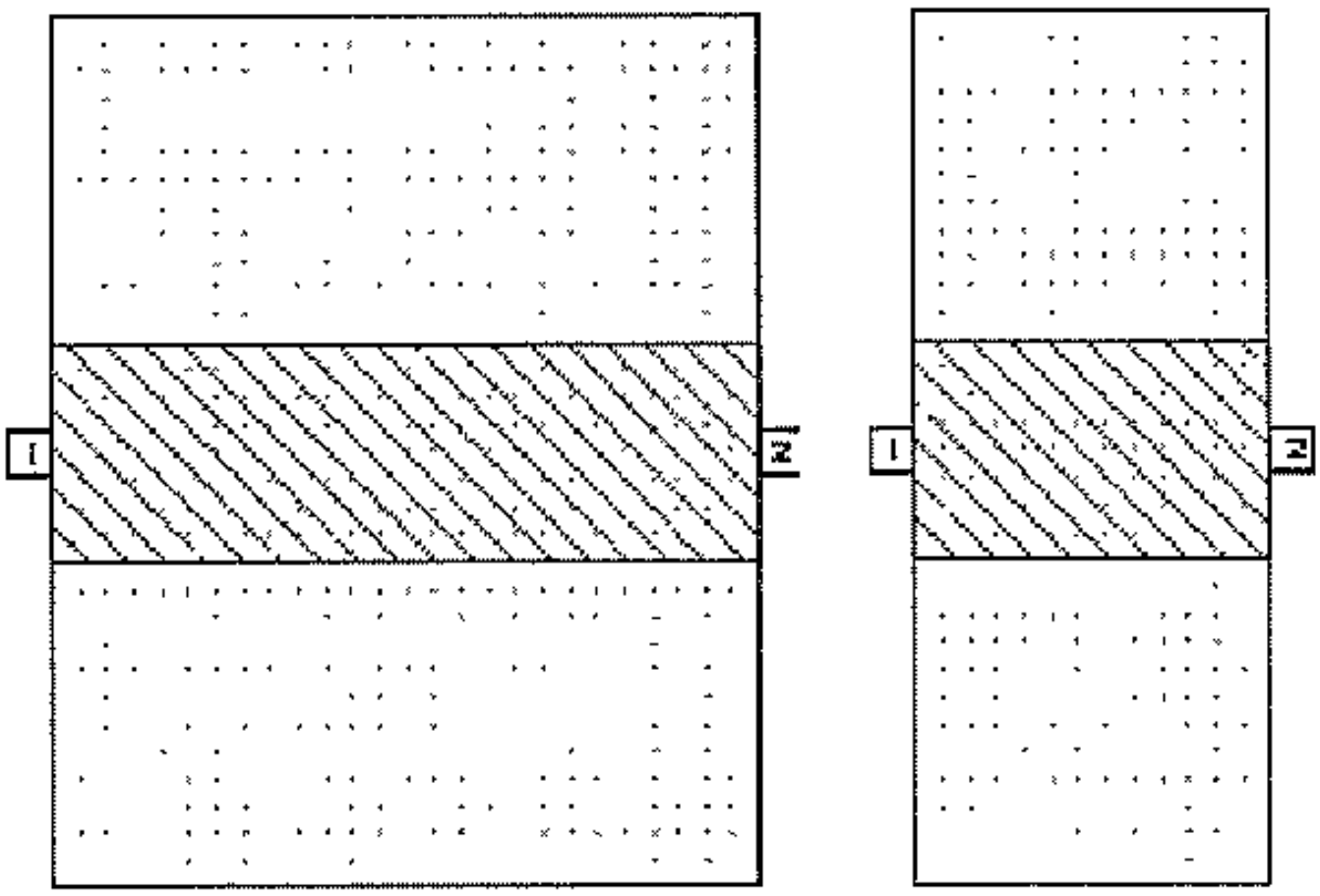


Рис. 3.29. Выделение из схемы двух однородных отрезков: стандарт 1 и 2

правило для нулевых опорных плоскостей — корпус должен иметь длину больше, по крайней мере, двух высот подложки (линии, приложенной к порту).

Другой случай, который может влиять на точность процесса исключения — тот, когда электрическая длина исключаемого стандарта кратна половине длины волны (в этом случае EMSight выдаст предупреждение).

3.11.2. Автоматическое исключение

Процесс исключения удаляет из результатов моделирования эффекты портовых неоднородностей и подводящих однородных линий. Процедура удвления иллюстрируется на рис. 3.30.

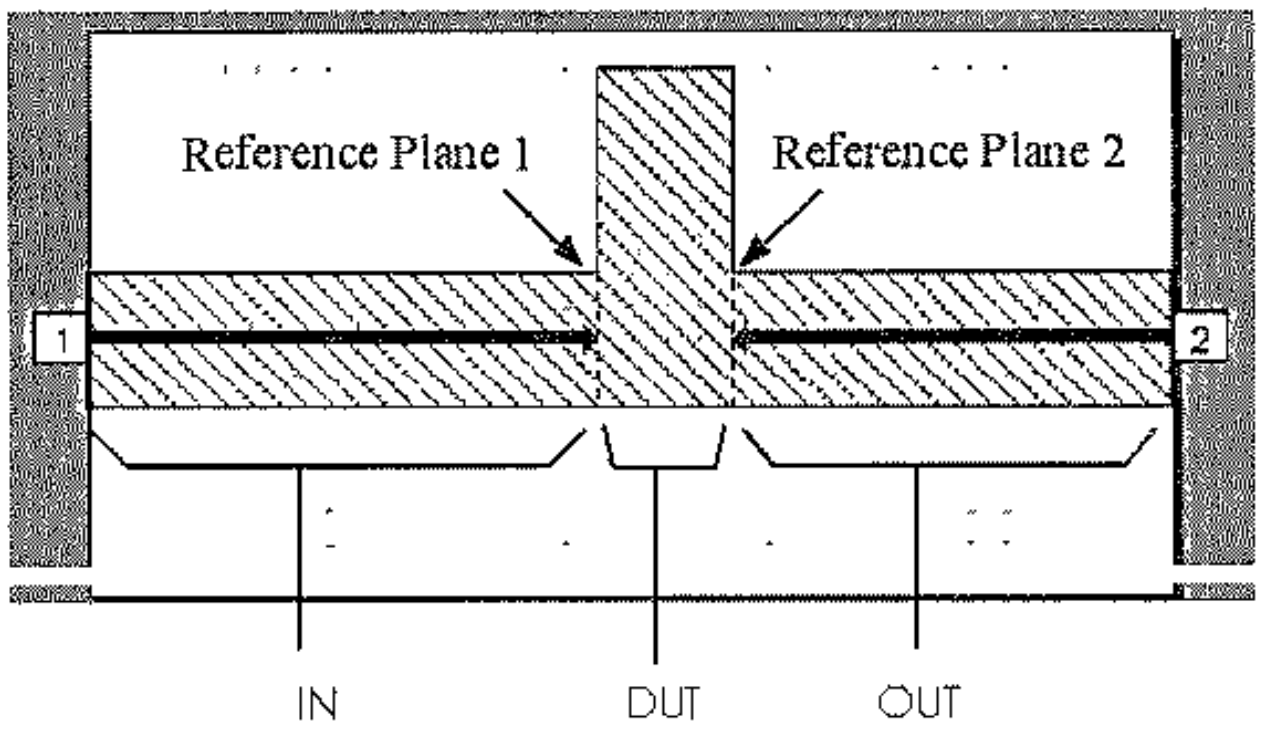


Рис. 3.30. Опорные плоскости и исключаемые линии

В результате моделирования выдаются S-параметры для всей структуры, включая портовую неоднородность и линии передачи до опорной плоскости. Результат может быть представлен тремя каскадно включенными цепями. Процедура автоматического удаления подводящих линий используется для вычисления S-параметров исследуемого прибора DUT, используя решение для всей конструкции и решения для линий (рис. 3.31).

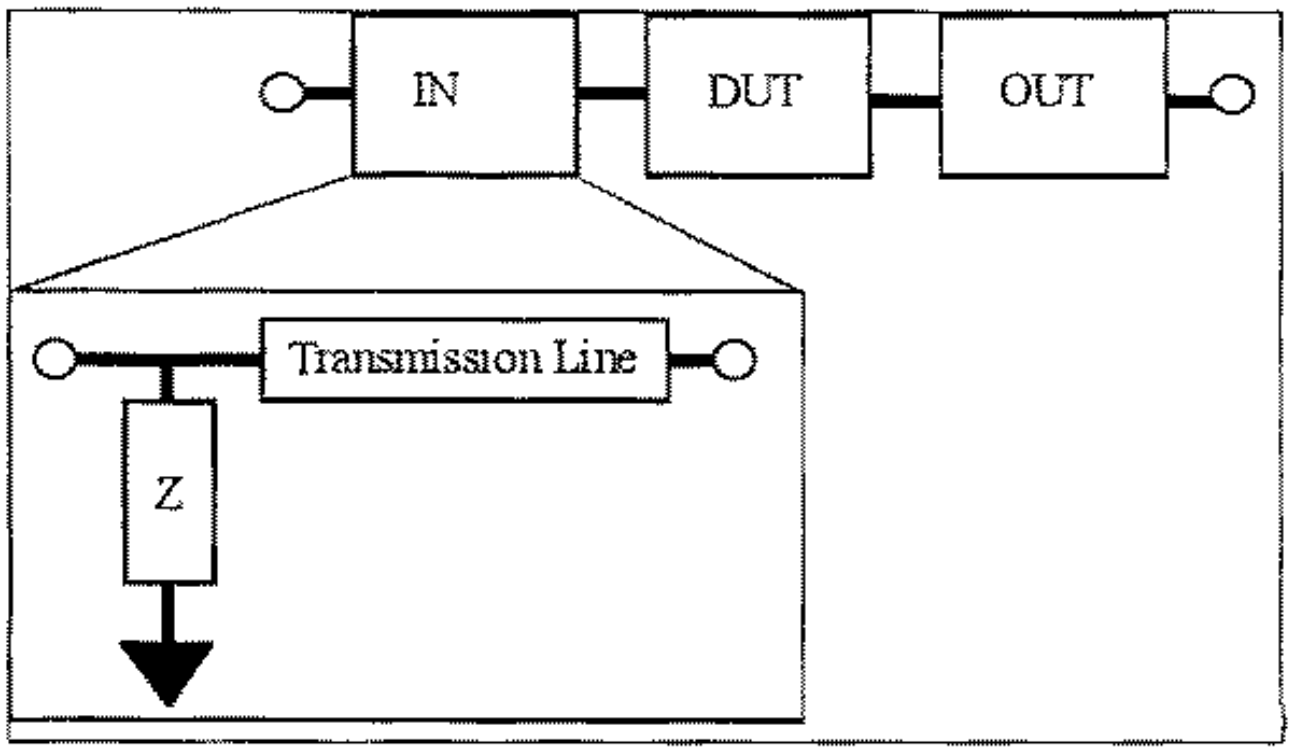


Рис. 3.31. Схема, эквивалентная исключаемому отрезку

3.11.3. Стандартный алгоритм исключения

Процедура исключения требует анализа двух отдельных «исключаемых стандартов». Стандартный метод требует полностью независимого анализа с различными по размеру корпусами. Корпус, используемый для независимого моделирования применяется в два раза длиннее линии от порта до опорной плоскости, которая должна быть исключена.

Стандартный алгоритм имеет проблемы сходимости алгоритма вычисления, когда длина опорной плоскости кратна половине длины волны. Зато стандартный алгоритм может использоваться для любого числа портов на стороне.

При использовании стандартного алгоритма исключения опорные плоскости должны быть достаточно удалены от края корпуса так, чтобы высшие типы волн, вызванные скачком ширины в районе порта, не влияли на результаты. Эмпирическое правило — опорная плоскость должна быть удалена от края приблизительно на две высоты подложки.

Моделируемая структура DUT, показанная в виде черного ящика на рис. 3.33, является частью всей структуры, для которой мы желаем получить результаты анализа. Линии передачи соединяют порты с DUT.

Когда удаление разрешено, **EMSight** последовательно выполняет следующие шаги:

1. Вычисление портовых неоднородностей.
2. Удаление из результатов анализа влияния портовых неоднородностей.
3. Сдвигает (необязательно) опорные плоскости (удаляет из результатов анализа влияние линий передачи).
4. Вычисляет параметры линии передачи Z_0 и E_{eff}.

После завершения процесса исключения **EMSight** выводит S-параметры, E_{eff} и расчетные портовые неоднородности. Сокращенное резюме используемого алгоритма de-embedding приводится в [9], а полная теория в [10].

Для примера покажем фильтр на рис. 3.32. Эта схема состоит из трех секций металлизации, составляющих фильтр, два порта и две линии передачи, соединяющие порты к фильтру. Линии длиной 29 милс удаются из расчета с помощью операции de-embedding.

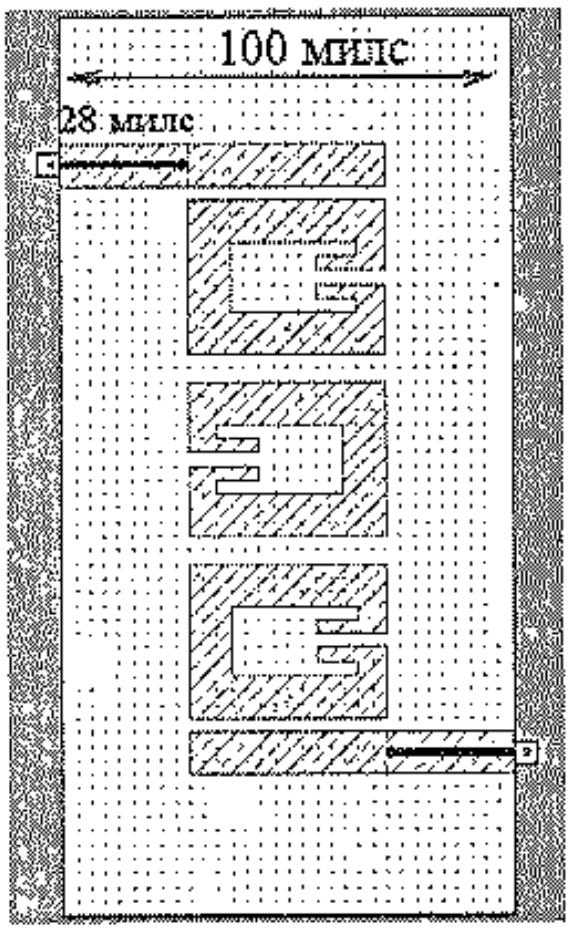


Рис. 3.32. Топология схемы фильтра, анализируемой в EMSight. Неоднородности портов и линии передачи на верхнем левом и нижнем правом удаляются из результатов EM анализа с помощью алгоритма de-embedding

3.11.4. Использование решающего устройства быстрого частотного сканирования

Алгоритм FFS предназначен для сокращения вычислительных затрат при расчете частотных характеристик. Основная идея его применения состоит в том, что если процесс расчета сходится устойчиво, то ход любой из характеристик должен быть плавным в частотном диапазоне. Поэтому количество частотных точек расчета можно значительно сократить, а промежуточные результаты найти с помощью интерполяции.

При использовании FFS выполняется анализ на одной частоте или на нескольких частотах, а затем функция частотной характеристики аппроксимируется. Чтобы ее вычислить как отношение двух полиномов, **EMSight** находит решения для токов на проводниках и также производные токов. Чтобы вычислять токи, **EMSight** должен создать и решить матрицу моментов. Необходимая при этом матрица производных токов вычисляется по тому же алгоритму, что и матрица моментов.

Частота, на которой вычисляются ток и его производные, называется «точка разложения». Рациональная функция, найденная решающим устройством FFS, описывает непрерывную частотную характеристику анализируемой структуры. Рациональная функция будет точной аппроксимацией истинной характеристики то-

лько в ограниченном диапазоне частот около точки разложения. Полоса частот, в которой частотная характеристика является аппроксимацией верного решения, называется «ширина диапазона» решения. **EMSight** автоматически рассчитывает ширину диапазона вычисленной характеристики и использует эти данные для ограничения диапазона требуемых частотных характеристик.

Вообще, оценка ширины диапазона частот несколько консервативна (недооценка ширины диапазона), хотя для некоторых случаев частотная характеристика в границах полосы частот может иметь значительную погрешность. Если важно знать частотную характеристику точно в нижней части частотного диапазона, вычисленном решающим устройством FFS, то рекомендуется найти решение в одной точке. Также в отклике FFS можно получить неправильный резонанс, если выполнять анализ с нереальными числами. Характеристики, которые имеют очень острые резонансы, должны быть проверены, используя решение «от точки к точке» вблизи резонанса. Если необходимо решение для более широкой полосы, чем может быть найдено на основе решения на единственной частоте, то нужно использовать большее количество точек разложения.

3.11.5. Создание производных матриц моментов

Производные матрицы моментов вычисляются почти тем же способом, которым вычислена основная матрица моментов. И матрица моментов и производные матрицы моментов сгенерированы из таблиц моментов, и того же самого базового FFT алгоритма, используемого для вычисления обоих типов таблиц. Для нормальной матрицы моментов, таблицы моментов генерируются быстрым преобразованием Фурье (БПФ) функций Грина в спектральной области. Вычисление таблиц моментов, используемых, чтобы найти производные матрицы моментов требует подобного алгоритма БПФ, который использует частотные производные функций Грина в спектральной области. EMSight может вычислять производные функций Грина до двенадцатого порядка. Максимальный порядок дифференцирования может быть установлен к 12, 8 или 4 в EMSight. Вычисление производных функций Грина экспоненциально увеличивает время, поскольку порядок производных увеличивается. Уменьшение максимального порядка дифференцирования может по существу уменьшить время решения, хотя вычисленное решение будет вообще для более узкой ширины диапазона (для очень простых задач, дополнительная информация о производных значительно не увеличивает ширину полосы пропускания). Выбор максимального порядка дифференцирования проводится в соответствии с компромиссом между временем решения и шириной полосы.

3.11.6. Решение для производных тока

Чтобы вычислять производные токов, матрица моментов только должна быть разложена на множители один раз (то же самое касается решения «от точки к точке»). Дополнительные вычисления, требуемые для расчета производных тока пропорционально матрично-векторным умножениям с производными матрицы моментов. Время решения, требуемое для решения матрицы моментов, пропорционально N^3 (вычисление, пропорционально кубу числа неизвестных) в то время как матрично-векторные умножение — N^2. Чтобы вычислить производные тока до 4-го порядка, 10 умножений матрицы на вектор требуются для каждого порта на структуре (схема четырехполюсника потребовала бы, чтобы 20 матрично-вектор-

ных умножений вычислили производные четвертого порядка). Чтобы вычислить производные 8-го порядка, требуется 36 матричных векторных умножений на порт, а чтобы вычислять производные 12-го порядка, требуется 78 матрично-векторных умножений на порт.

Фактически матрично-векторные умножения — относительно быстрые и вообще то не требуют больших затрат от общего времени решения. Генерирование матриц, используемых при таких вычислениях, может занять относительно большое время. Впрочем, решающее устройство «от точки к точке» отбросит матрицу моментов в одной частотной точке прежде, чем оно сгенерирует матрицу моментов во второй частотной точке, так что только одна матрица находится в памяти в одно время. В решающем устройстве FFS требуется вычисление не только матрицы моментов, но также и производных матрицы моментов. Алгоритм FFS рекурсивно вычисляет производные тока, использующие производные матрицы моментов таким способом, которым все производные матрицы должны многократно использоваться прежде, чем любая из них может быть отброшена из памяти. Так как производные матрицы моментов — матрицы того же самого размера, как и матрица моментов, условие, что все эти матрицы сохраняются в памяти, могут значительно ограничивать размер задачи.

3.11.7. Алгоритм исключения, совмещенный с FFS

Стандартный алгоритм исключения

Алгоритм расчета FFS очень похож на алгоритм расчета «от точки к точке». Разница состоит в том, что алгоритм исключения должен также вычислить производные решения для исключаемых стандартов, наряду с нормальным решением. Как было упомянуто ранее, стандартный алгоритм расчета должен создать таблицы моментов для решений стандартов. Создание таблиц моментов для FFS решающего устройства требует намного больше времени, так что алгоритм исключения стандартов может быть относительно медленным, когда используется с опцией FFS. Когда имеются больше чем один порт на стороне, то алгоритм исключения стандартов будет всегда использоваться для стороны исключения.

Алгоритм быстрого исключения

Преимущество использования алгоритма быстрого исключения состоит в том, что исключаемые стандарты могут быть вычислены, используя те же самые таблицы моментов как главной структуры. Это значительное преимущество при использовании решающего устройства FFS, так как генерирование таблицы моментов занимает намного больше время в FFS решающем устройстве. Недостатки алгоритма быстрого исключения — те же самые и для решающего устройства FFS и для решающего устройства «от точки к точке».

3.12. Уменьшение времени решения

Вообще, время решения будет зависеть от трех шагов в процессе решения (четырех для FFS). **Первый шаг** — формирование таблиц моментов, **второй шаг** — фактическое создание матрицы моментов, и **третий шаг** — решение матрицы мо-

ментов. Для решающего устройства FFS, производные вычисления могут потреблять значительную часть полного времени решения.

3.12.1. Создание таблицы моментов

Для малых задач наибольшее время занимает создание таблицы моментов, в то время как для больших задач основное время решения обычно занимает решение матрицы. Чтобы ускорить процесс решения (особенно для небольших задач), **EMSight** использует алгоритм кэширования, который допускает многократное использование таблиц моментов от одной задачи к следующей. Если таблица моментов для решаемой задачи не найдена в кэше, **EMSight** автоматически создает ее. Когда **EMSight** способен использовать таблицу моментов из кэша, виртуально никакое время не нужно, чтобы загрузить и инициализировать таблицу. Количество времени, потраченное на создание таблиц моментов, будет зависеть от отдельной факторизации как перечислено ниже:

Число делений корпуса

Число разделений (то есть число точек сетки в направлении X или Y) влияет на время вычисления таблицы моментов. Создание таблицы моментов выполняется двумя шагами. На первом шаге вычисляются функции Грина в спектральной области, необходимые чтобы создать таблицы, на втором шаге вычисляются таблицы из функций Грина, используя алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Вычисление функций Грина обычно занимает большее количество времени, и количество времени, требуемое, чтобы выполнить этот шаг, будет пропорционально площади корпуса в частях ячейки. Например, корпус, который использует сетку с 8 разделами в направлении X и 8 разделами в направлении Y, будет занимать в 4 раза больше времени вычисления функции Грина чем при разделении корпуса на 4 в направлении X и 4 в направлении Y.

Алгоритм БПФ, используемый во втором шаге наиболее эффективен, когда число разделов — число в степени 2, и он также отиосительно быстрый, когда число разделов — произведение малых простых чисел (то есть 2*2*5*5*3 = 300). Для корпусов с большим количеством разделов, или для случая, когда число разделов не кратно малым простым числам, алгоритм БПФ может требовать значительное время. В частности если вы выбираете большое простое число для числа разделов, то алгоритм БПФ будет относительно медленным.

Число диэлектрических слоев

Число диэлектрических слоев влияет на время вычисления функций Грина в спектральной области на первом шаге при создании таблиц моментов. Чем большее количество слоев, тем дольше вычисляются функции Грина. Число слоев не будет влиять на время, требуемое для БПФ.

Число металлических слоев и слоев с перемычками (Via)

Для структуры, которая имеет один проводящий слой, будут созданы три таблицы моментов. Таблицы используются, чтобы вычислить связи всех ячеек ***x* to *x***, ***y* to *y***, и ***x* to *y***. Если имеются перемычки, то таблицы создаются для связей всех эле-

ментарных ячеек *x* to *z*, *y* to *z*, и *z* to *z*. Если имеются несколько металлических слоев, то создаются таблицы, чтобы вычислить все комбинации связей *x*, *y* и *z* для всех слоев. Таблицы моментов вычисляются только для слоев, где имеются проводники или перемычки. Чем большее количество слоев, которые имеют проводники и перемычки, тем большее количество таблиц должно быть вычислено. Так как таблицы вычисляются для всех комбинаций связей, время, требуемое, чтобы вычислить все таблицы моментов увеличится в квадрате от числа проводящих слоев.

Диэлектрик с потерями

Если все слои в корпусе — без потерь, то используется вычисление с реальными числами и будет значительная экономия времени. Если хотя бы один слой имеет потери (ненулевой тангенс угла потерь или объемная проводимость), то будет требоваться комплексная математика, чтобы вычислить таблицы моментов. Если один из слоев имеет потери, то не имеется никаких соображений в создании других слоев без потерь.

Границы с потерями

Если границы для верхней и нижней крышки корпуса установлены как не идеальные электрические проводники (PEC), то эти границы — с потерями и требуют комплексной математики в вычислении таблиц моментов. Если границы с потерями, нет никакого преимущества создания всех уровней диэлектрика без потерь.

3.12.2. Заполнение матрицы моментов

Создание матрицы моментов зависит от всех источников, использующих данные, вычисленные из таблиц моментов. Запись матрицы моментов, которая соответствует связи между двумя частными базисными функциями, может быть вычислена, суммируя в итоге четыре значения по всем связям из таблиц матрицы моментов. Для не примитивных базисных функций (то есть базисных функций, размеры которых больше, чем одна ячейка на две ячейки) элементы матрицы моментов вычисляются, суммируя все вклады в связи из примитивных базисных функций, которые используются, чтобы создать большие (не примитивные) базисные функции. Базисные функции, которые покрывают очень большое количество примитивных ячеек, могут потребовать очень больших затрат, чтобы вычислить элементы матрицы моментов. Это будет наиболее заметно, когда неудачная сетка используется относительно размеров проводника. Если шаг «Заполнение матрицы моментов» потребляет большое количество времени что видно на индикаторе хода работы **EMSight**.

3.12.3. Метод решения «от точки к точке»

В режиме «от точки к точке» вычисляются отдельные решения на каждой частоте, которая определена в частотном диапазоне. Каждая частотная точка трактуется как отдельная задача и время решения линейно растет с числом частотных точек (рис. 3.33). Если новые точки добавлены к частотному диапазону после моделирования, то только новые частотные точки требуют моделирования.

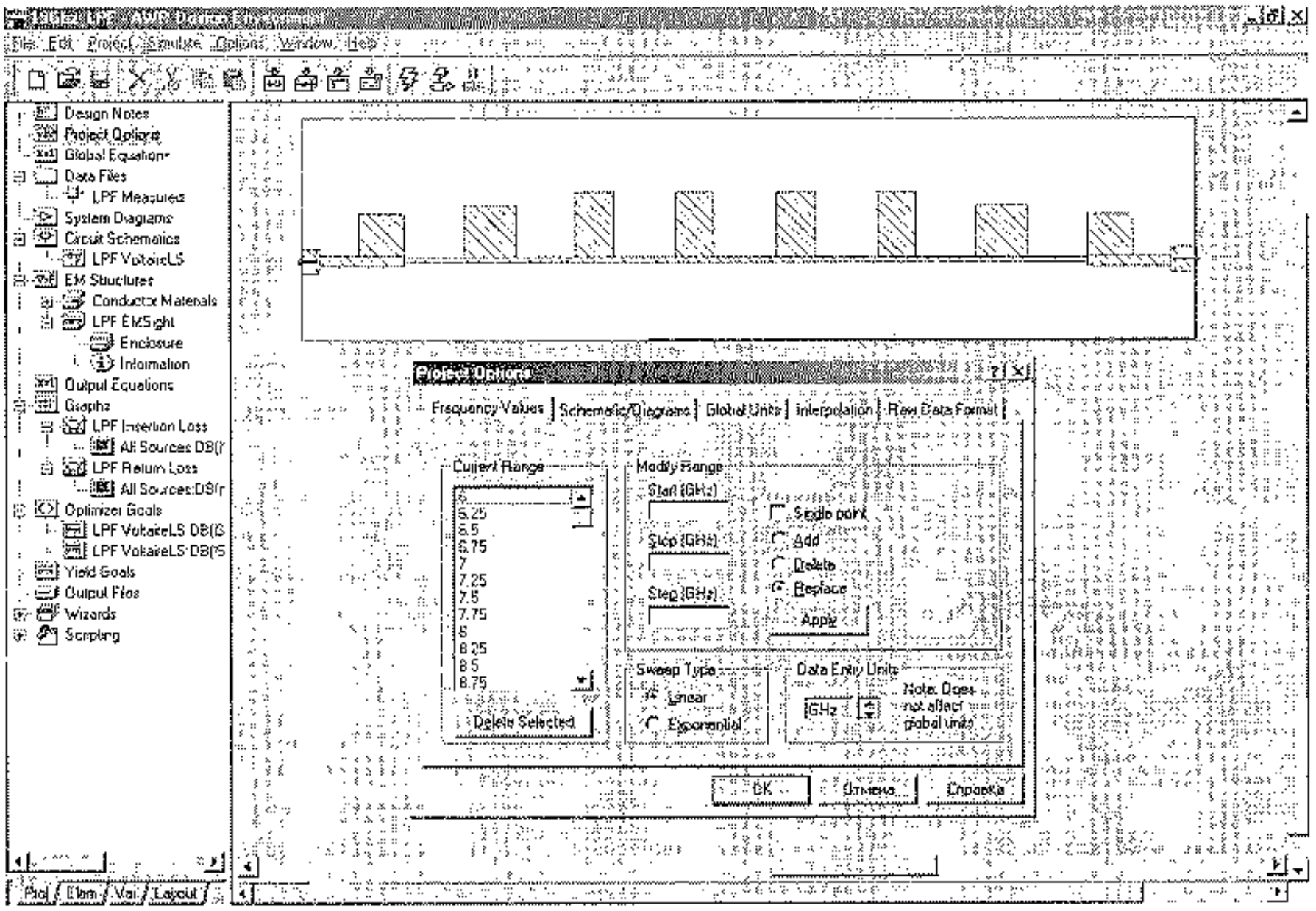


Рис. 3.33. Анализ фильтра методом от точки к точке

Другое решающее устройство **EMSight** — это FFS, которое вычисляет решение, описывающее непрерывный массив частотных точек.

Имеются две причины преимущества использования метода FFS перед методом «от точки к точке»:

- первая — скорость. Для многих задач FFS значительно быстрее чем «от точки к точке». Для решающего устройства FFS, первоначальное создание таблицы моментов может быть намного медленнее, но алгоритм кэширования делает этот шаг только для первого моделирования. Если вы делаете отдельные моделирования с той же самой структурой корпуса (то есть, теми же самыми габаритами, разделами, слоями, характеристиками слоя, и т. д.) и в том же частотном диапазоне, то решающее устройство FFS может быть значительно быстрее;
- второе преимущество FFS — он полезен при обнаружении острых резонансов в частотной характеристике. С решающим устройством «от точки к точке» очень просто пропустить острый резонанс в частотной характеристике, если резонанс не приближается достаточно близко к одной из заданных частотных точек, используемых для моделирования. FFS легко обнаруживает острые резонансы на частотной характеристике, которые иначе могли быть пропущены (рис. 3.34).

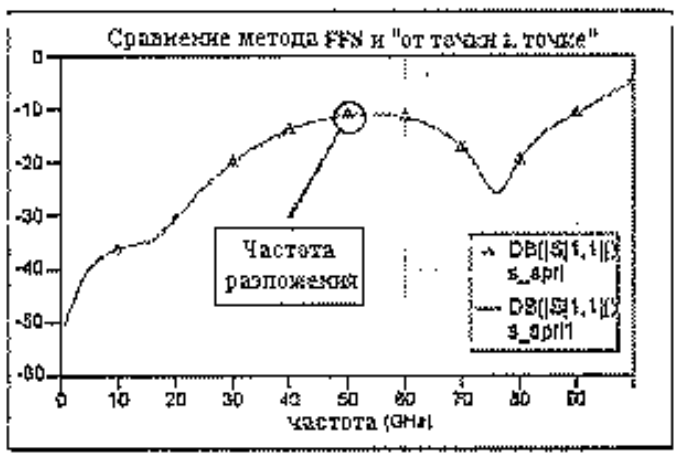


Рис. 3 34. Сравнение метода FFS с методом «от точки к точке»

3.12.4. Уменьшение времени решения в методе «от точки к точке»

Для решающего устройства «от точки к точке» создание таблицы моментов и решение матрицы моментов занимает основную часть времени решения. Фактически создание матрицы моментов из таблиц моментов — обычно относительно быстрое, хотя для некоторых задач этот шаг может быть длительным. Если таблицы моментов загружены из кэша, то шаг генерирования таблицы моментов не вносит значительный вклад в полное время решения, и время решения матрицы моментов становится единственным значимым. Если задача очень мала (то есть делитель на ячейки не создает очень много неизвестных базисных функций, то другая факторизация погребует значительную часть времени решения, хотя полное время решения будет очень небольшое. Так как время генерации таблицы моментов растет в квадрате от числа неизвестных, а время решения матриц растет в кубе, время решения матрицы будет всегда доминировать для очень больших задач, в то время как генерирование таблицы моментов будет дольше, чем решение матрицы для малых задач.

Время решения растет линейно с числом частотных точек, и желательно использовать не больше частотных точек, чем необходимо для решения задачи с решающим устройством «от точки к точке». Обработка в **EMSight** может интерполировать точки частотной характеристики между дискретными точками, использующими интерполяцию рациональной функции. Чтобы использовать интерполяцию рациональной функции, включайте режим сглаживания данных расчета в опции Measurement.

3.12.5. Уменьшение времени решения при использоаании FFS

Чтобы минимизировать время решения в этом случае, максимальный порядок дифференцирования должен быть установлен к минимуму, который обеспечивает достаточно широкую ширину диапазона, чтобы перекрыть интересуемый частотный диапазон. Также, в зависимости от задачи, возможно быстрее вычислить решением FFS с двумя точками и более низким максимальным порядком дифференцирования, чем используя FFS с одной точкой и максимальным порядком дифференцирования.

Так как генерирование таблицы моментов — относительно медленный шаг в методе FFS, очень желательно иметь таблицы моментов, загруженные из кэша.

Когда выполняется алгоритм исключения с решающим устройством FFS (рис. 3.35), фиксированное исключение обычно будет обеспечивать значительное вычислительное преимущество над нормальным исключением, потому что фиксированная разгерметизация использует ту же самую таблицу моментов, как и главная структура. Если используется обычное исключение, или если имеются больше чем один порт на стороне, в процессе разгерметизации создается новая таблица моментов. Далее, так как длина исключаемого стандарта определена длиной опорной плоскости, новая таблица моментов должна быть сгенерирована каждый раз, когда опорная плоскость изменена. Процесс вычисления для решения исключаемых стандартов применяет таблицу моментов, кэширующую так, что использование значения по умолчанию алгоритма разгерметизации только замедлит первое решение (если длины опорной плоскости не изменены).

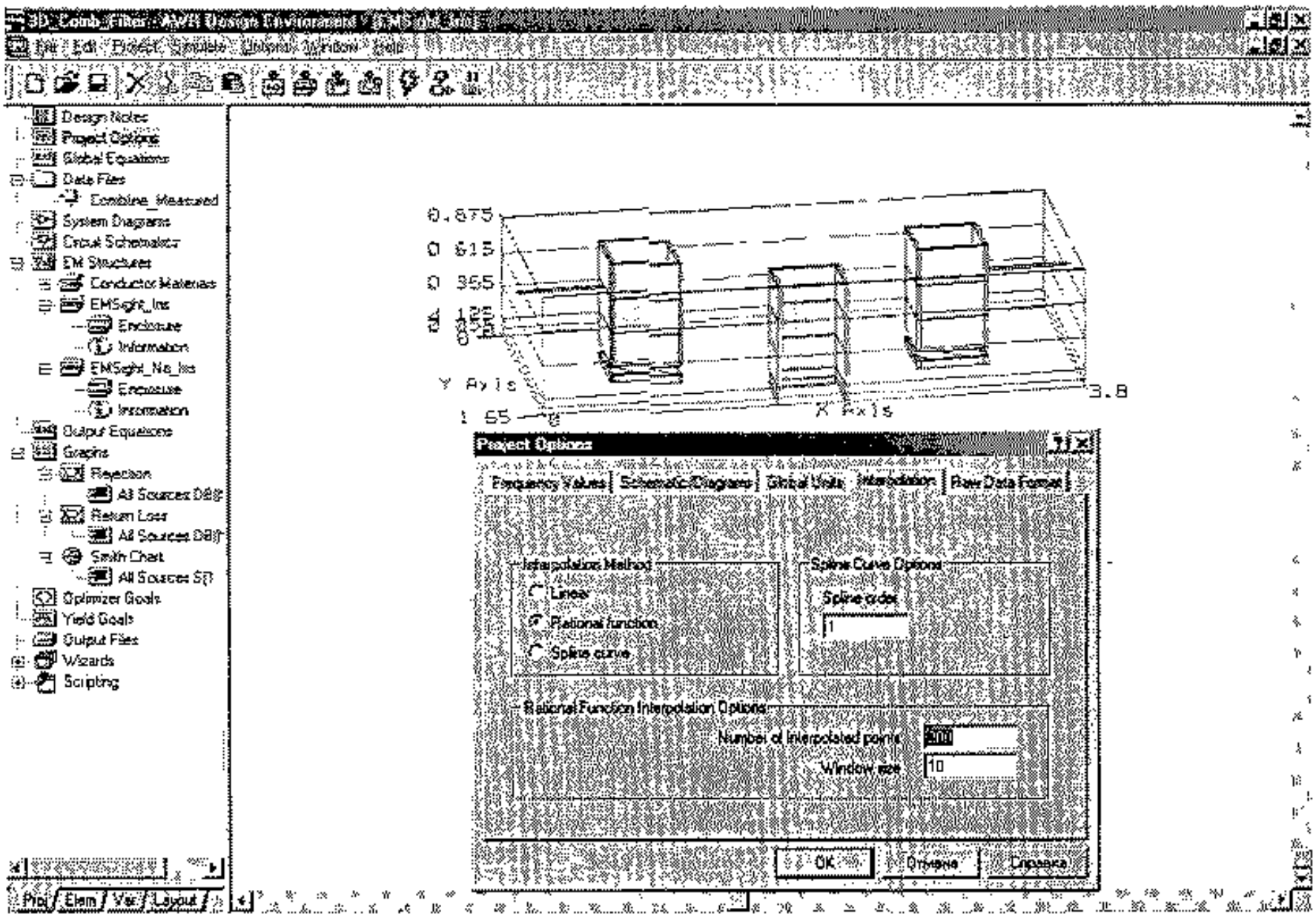


Рис. 3.35. Комбинированный фильтр при анализе которого рекомендуется применять методы FFS

Решающее устройство FFS будет работать значительно быстрее, когда имеется достаточная память ОЗУ, чтобы кэшировать все производные матрицы моментов, используемые для FFS. Решение для кратных точек разложения с более низким порядком дифференцирования не будет требовать так много материальной памяти, потому что только производные матрицы в одной точке частоты должны быть в памяти в одном времени (рис. 3.36). Когда не имеется достаточной памяти, чтобы сохранить все производные матрицы моментов, то производные матрицы вычисляются неявно, каждый раз требуется матрично-векторное умножение. Количество времени, требуемое, чтобы сделать матрично-векторное умножение будет относительно таким же, как время, требуемое, чтобы сгенерировать матрицу моментов из таблиц моментов. Матрично-векторные умножение выполняются во время шага «Вычисление производных токов», обозначенный в диалоге прогресса. Те же самые предложения для ускорения создания матрицы моментов относятся к минимизации вычисления производных токов (особенно, когда матрицы производных не хранятся в памяти). Время, требуемое для «вычисления производных токов» будет увеличиваться линейно с числом портов в структуре.

Требуемая память на частоту (общая, таблицы, заполнение, решение, вывод), Время моделирования (общее, таблицы, заполнение, решение, вывод, расчет поля). Рекомендации для анвлиза — текст, вводимый пользователем, минимум рекомендуемого КЭШа.

Требуемые ресурсы:

- число элементов разбиения 916 элементов;
- общее время решения на частоту 8.5 минут;

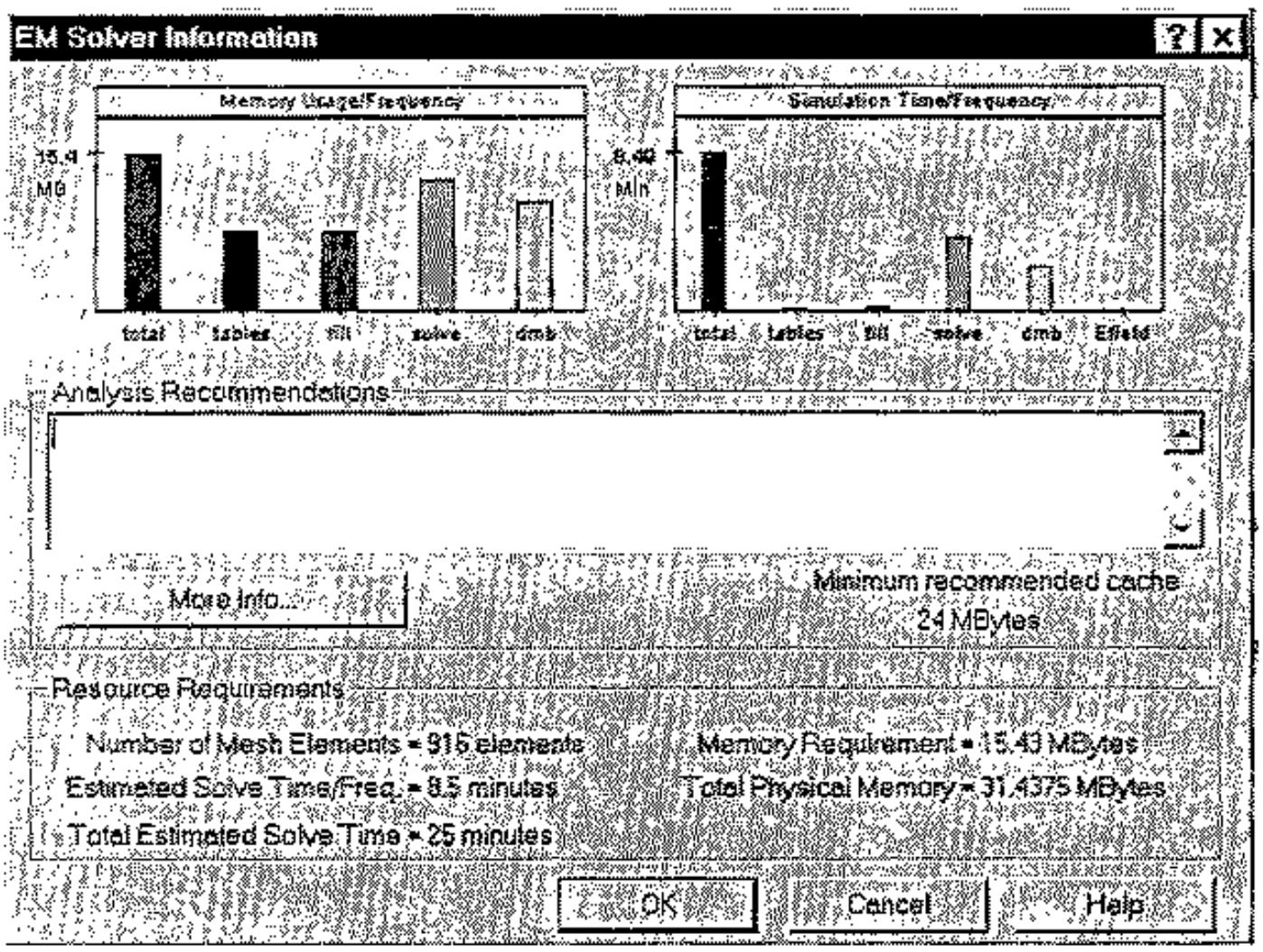


Рис. 3.36. Диалог, предоставляющий данные о временных затратах расчета

- общее время решения 25 минут;
- требуемая память 15,43 МБ;
- общая физическая память 31,4375 МБ.

3.12.6. Эффективное использование решающего устройства FFS

При использовании решающего устройства FFS нужно рассмотреть потребность отдельной факторизации. Один из этих моментов — число частотных точек, используемых в разложении. Вообще рекомендуется использовать только одну частотную точку. если решение, найденное с одной точкой не перекрывает достаточную широкую ширину диапазона. Если более широкая полоса необходима, то может быть добавлено большее количество точек. **EMSight** использует частоты, точно установленные в опции Frequency для точек разложения, когда применяется решающее устройство FFS.

При переключении решения «от точки к точке» к решению FFS, важно изменить частотный диапазон так, чтобы частотный диапазон теперь указал точки разложения. **EMSight** разрешает, чтобы частотные диапазоны были установлены разные и для проекта и для структур EM (по умолчанию структура EM использует частотный диапазон проекта). Эффективный метод для использования FFS — это установить набор точек разложения, используя частотный диапазон EM структуры, а затем использовать частотный диапазон проекта, чтобы управлять частотами, для последующей обработки (когда характеристика рассчитывается или в частотном диапазоне проекта, или в частотном диапазоне структуры EM).

Сначала решающее устройство FFS выбирает начальную точку разложения (принято использовать начальную частотную точку). Вообще, рекомендуется выбрать частоту разложения в центре интересуемой частотной полосы. FFS вычис-

ляет полюсы и ноли рациональной функции, которая используется, чтобы экстраполировать отклик. Ширина диапазона аппроксимации будет зависеть от относительной локализации вычисленных полюсов и полей в точке разложения. В частности если вы случайно выбираете точку разложения, которая совпадает с полюсом, то FFS решающее устройство не будет способно предсказать очень широкую ширину диапазона из-за трудностей расчета. После решения для структуры, использующей алгоритм FFS, ширина диапазона решения очень узка, то может быть, что точка разложения расположена слишком близко к полюсу характеристики, и другая точка разложения должна быть выбрана. Если имеются острые резонансы в характеристике, то самое лучшее — не иметь точку разложения близко к резонансу.

3.13. Ключевые моменты проектирования

3.13.1. Толстые проводники

EMSight моделирует проводники как бесконечно тонкие *x* и *y* направленные токи. Для многих структур, типа микрополосковых, это предположение не вносит значительной погрешности к решению. Для структур, которые имеют зазоры между проводниками, сравнимые с толщиной проводника, предположение, что проводники бесконечно тонки, становится менее справедливой. Это часто имеет место в структурах интегральных схем, где проводники относительно толсты. Метод, используемый для моделирования более толстых проводников состоит в создании двух проводников одинаковой ширины один над другим на различных уровнях. Так как токи на толстом проводнике будут на поверхности, двойная аппроксимация дает подобный результат. Использование этого метода для моделирования двух связанных линий показывается ниже.

Важно, что потенциал на двух проводниках, используемых, чтобы моделировать толстый проводник был равным, так что для соединения проводников вместе должны использоваться перемычки. Хотя нет необходимости закорачивать проводники по всей длине, рекомендуется, чтобы проводники закорачивались на концах или углах проводников и на расстоянии не большем, чем 8-я часть длины волны. Почему не рекомендуется использовать перемычки для целой площадки — потому, что перемычки не используют переменный размер ячейки. Однако применение большого количества перемычек сильно увеличивает размер задачи.

Для задачи, показанной на рис. 3.37, перемычки ставятся по всему краю линии, где связь встречается, но это не увеличивает точность, потому что перемычки могут моделировать только z-направленный ток, в то время как фактический ток, текущий в таком местоположении был бы в направлении, параллельном к линиям (x или y).

Когда исключается проводник, используя метод, обсужденный выше, необходимо специальное рассмотрение. Алгоритм исключения всегда полагает, что проводники бесконечно тонки, и в настоящее время не имеется никакого метода для алгоритма исключения стандартов, которые находятся на двух проводящих уровнях при моделировании толстой линии. По этой причине рекомендуется, чтобы длина линии передачи до опорной плоскости была смоделирована на одном слое как показано на рис. 3.37. Также, важно не продлевать дополнительный проводящий слой до самого края слоя, где порт размещен. Если вы продвигаете проводник полно-

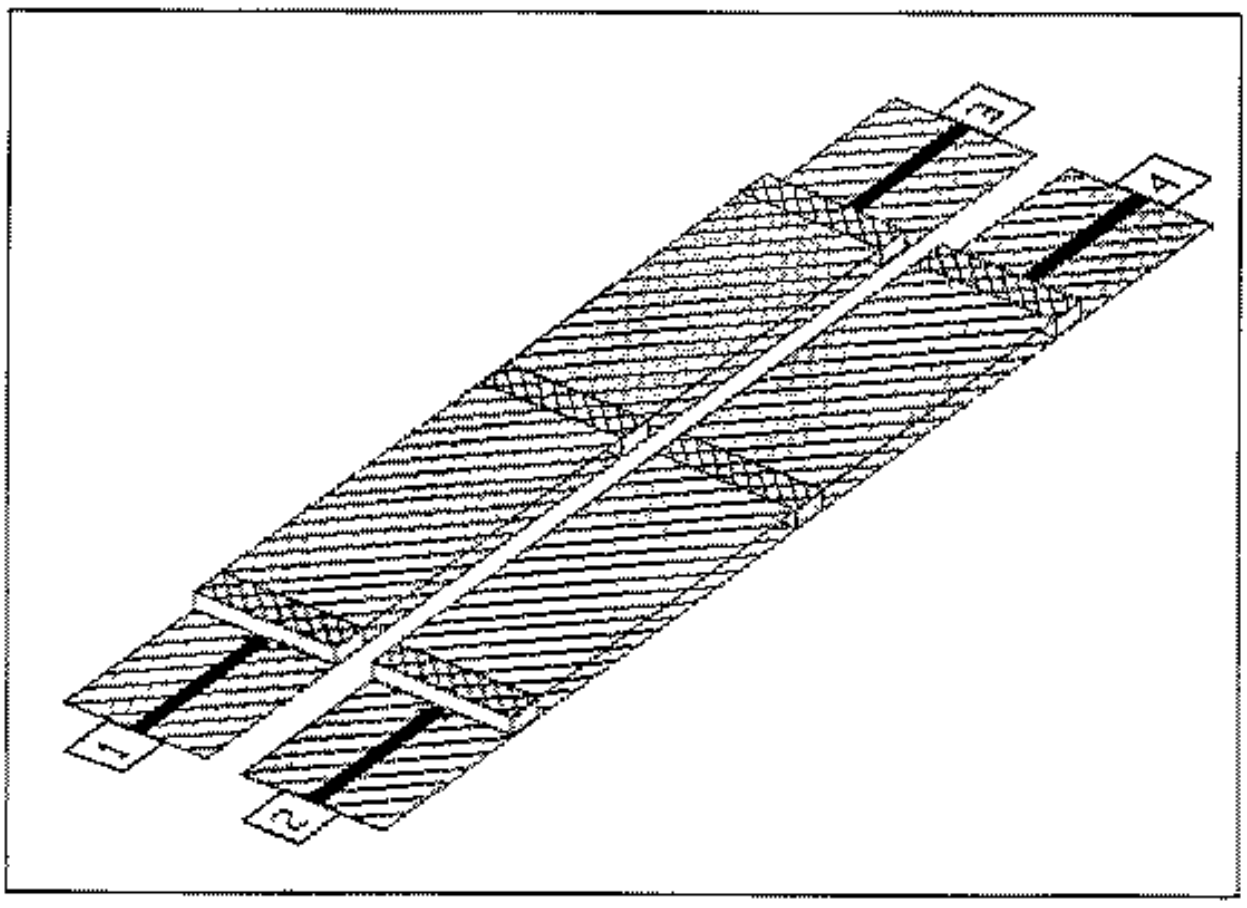


Рис. 3.37. Две связанные линии и исключаемые отрезки

стью на край, то для того, чтобы проводник закоротить на краю. Также, по той же самой причине, перемычка не должна быть размешена справа в портовом крае. Порт, показанный на рис. 3.38, закорачивается к краю, а надо делать, как справа.

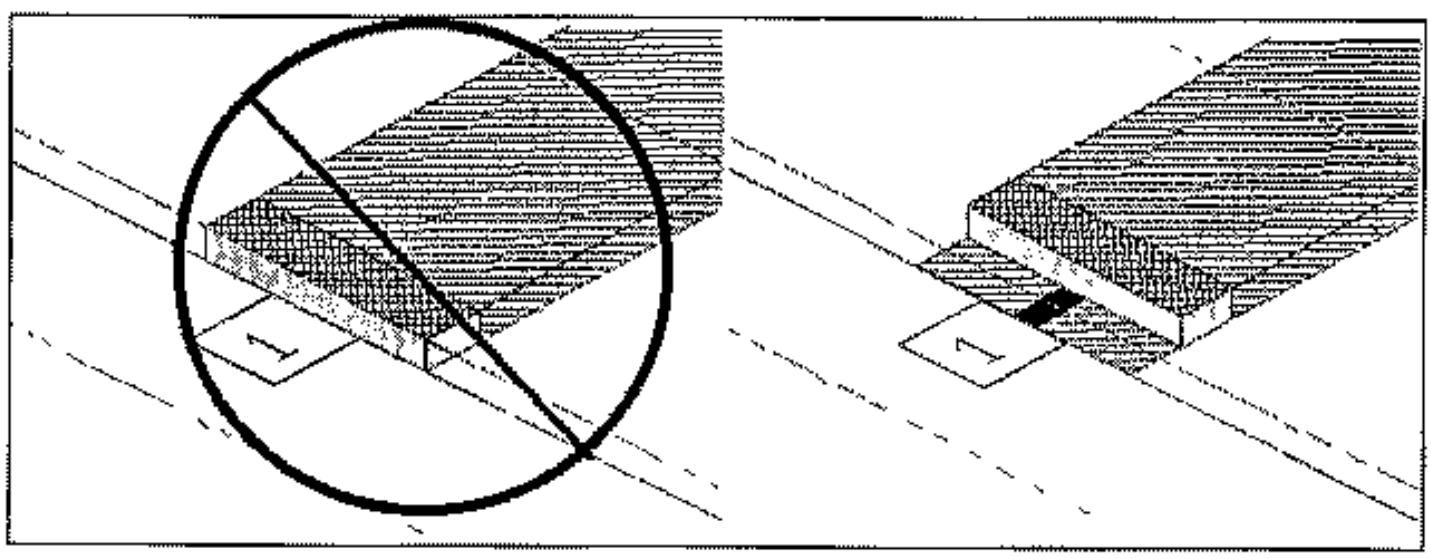


Рис. 3.38. Неправильное и правильное включение внешнего порта

3.13.2. Компланарный волновод

Компланарный волновод может быть смоделирован EMSight как показано на рис. 3.39. Только четные типы волн компланарного волновода могут быть возбуждены портами. Нечетный тип волн компланарного волновода будет короткозамкнутый в порте. Автоматическое исключение может исключать только отрезки линий, рассчитанные для четных типов волн.

Вообще рекомеидуется, чтобы моделируемая топология использоваяа полоску проводящего материала как показано в верхнем рисунке вместо того, чтобы расширить проводник полностью на весь слой до края корпуса как показано в нижнем рисунке. Причина в том, что большая величина проводящей поверхности на нижнем графике может привести к большим затратам памяти и времени решения.

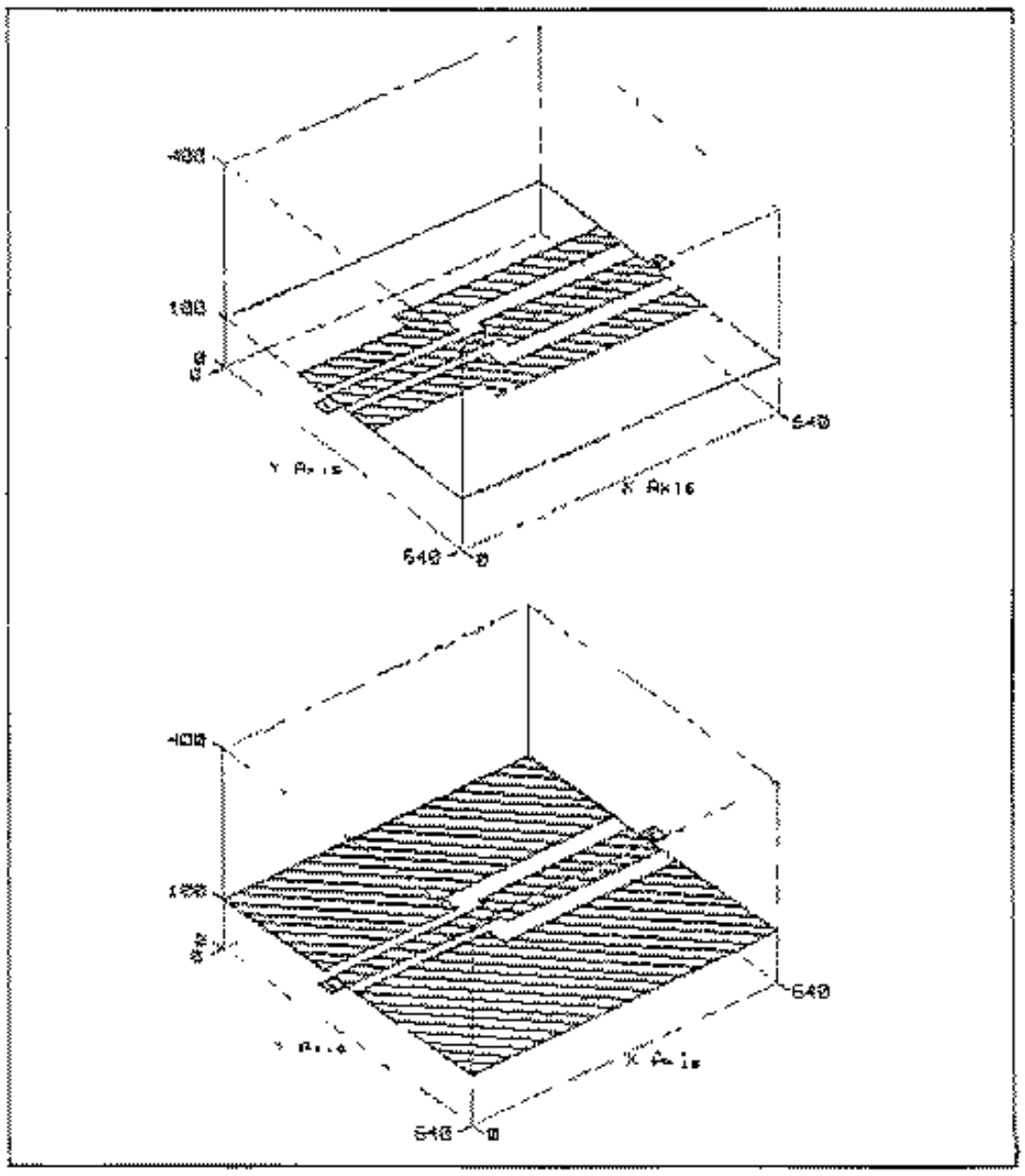


Рис. 3.39. Компланарный волновод. Большая площадь проводящей поверхности внизу нецелесообразна

3.13.3. Моделирование перемычек

Токи в вертикальных перемычках V1A представляются колонками токов в направлении оси *Z*, без *x* или *y* составляющих, как поквзано на рис. 3.40.

Перемычки всегда полагаются идеальными электрическими проводниками (потери V1A не моделируются в перемычке для данной версии **EMSight**), так что ток на площади перемычки (рис. 3.40) — это бесконечно тонкие токи на поверхности (рис. 3.41). Эмпирические результаты показали, что моделирование перемычек как непрерывное однородное поперечное сечение тока дает хорошую аппроксимацию, когда перемычка является электрически малой.

Каждая перемычка идет от верхнего диэлектрического слоя к нижнему диэлектрическому слою. Ток в перемычке моделируется как непрерывный ток в z направлении. Обычно перемычкн применяются, чтобы соединить проводники на различных слоях (рис. 3.42), а также для соединения проводящих плоскостей к заземляющей плоскости. Два типичных использования перемычек показывается на рисунке выше.

Предположение, что ток является непрерывным в z направлении будет справедливо, когда высота через мала относительно длины волны. Если размер слоя — не кратен длине волны, то непрерывный ток точно не будет моделировать истинный синусоидальный характер тока. Если перемычка, которая должна быть смоделирована — не кратна относительно длины волны, то она может быть смоделирована точнее, деля перемычку на отдельные более короткие перемычки, как по-

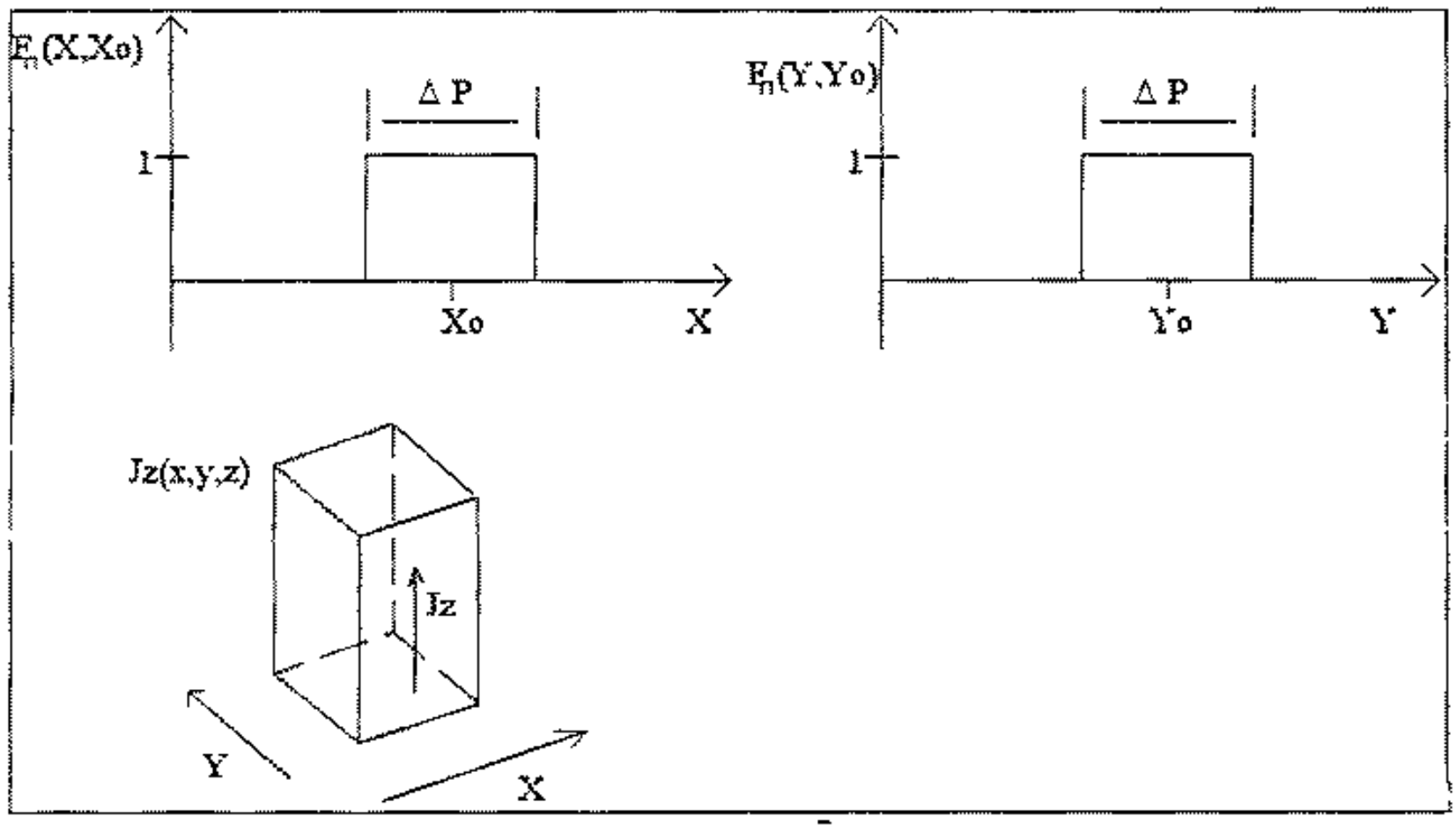


Рис. 3.40. Распределение тока в перемычке по координатам

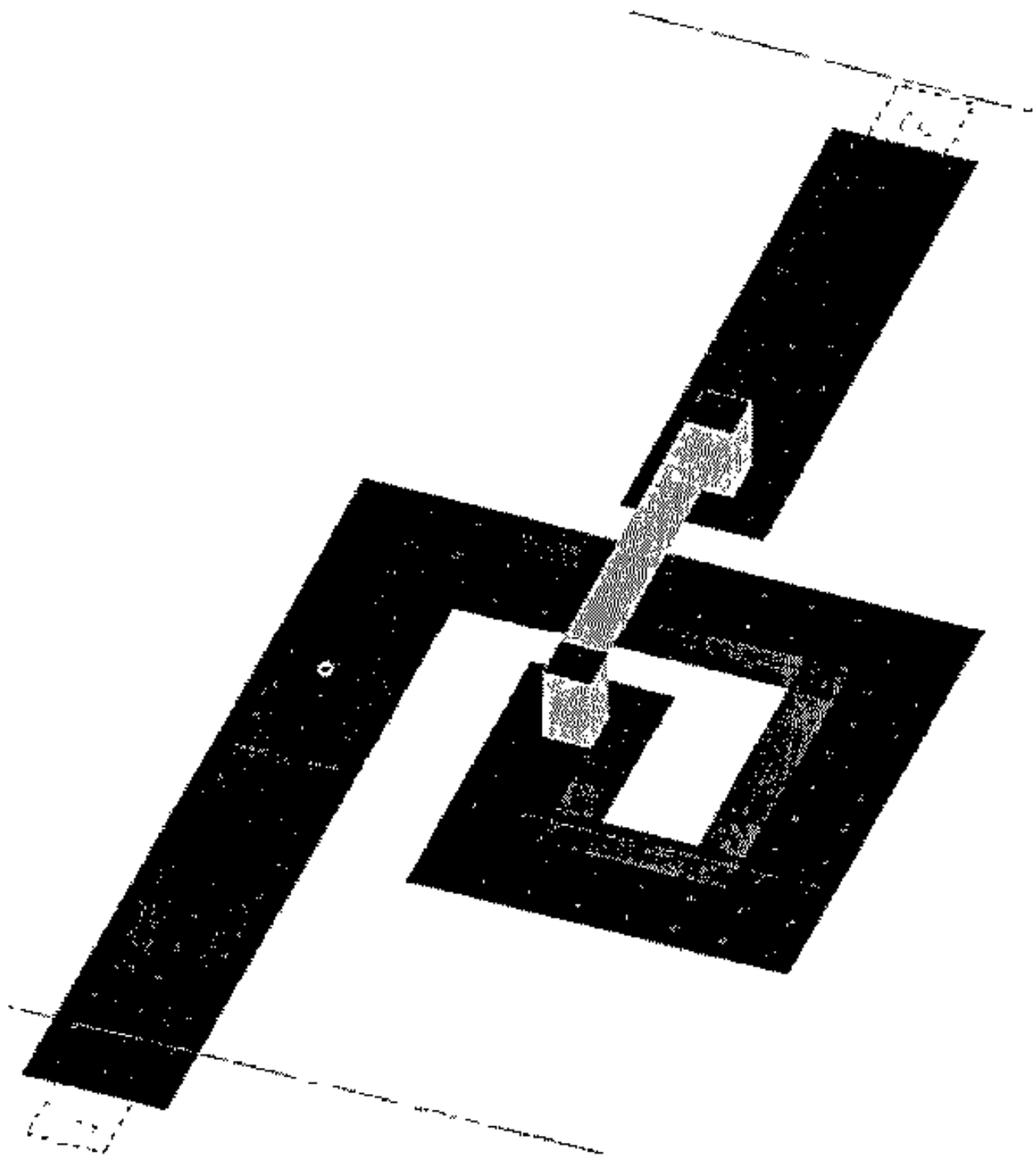


Рис. 3.41. Плотности распределения тока в металлических формах, включая вертикальные перемычки

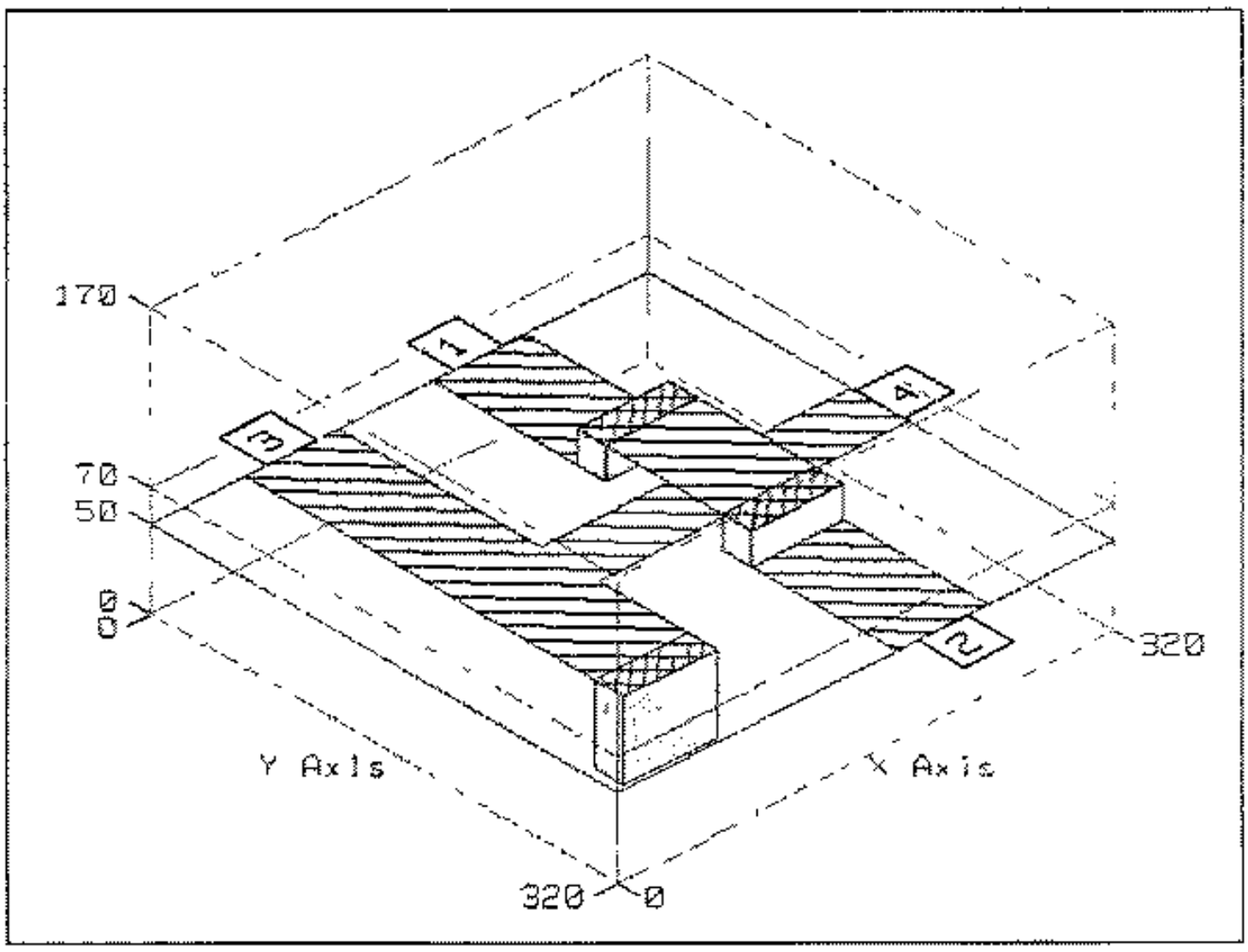


Рис. 3.42. Расположение перемычек в конкретной структуре

казано ниже. На этом рисунке длинная перемычка разделена на две более короткие. Расщепление перемычки на более короткие перемычки требует, чтобы диэлектрические слои были также разделены. Чтобы разделить диэлектрический слой, создайте два слоя с теми же самыми реквизитами, которые имеют суммарную высоту (рис. 3.43). Если перемычка имеет длину, больше чем десятая часть от длины волны, то перемычка должна быть разделена на несколько перемычек.

Другое важное предположение, используемое с перемычками — то, что в перемычке имеется только z-направленный ток. Все x и y составляющие токов считаются нулевыми в перемычке. Для типичного использования перемычки (межсо-

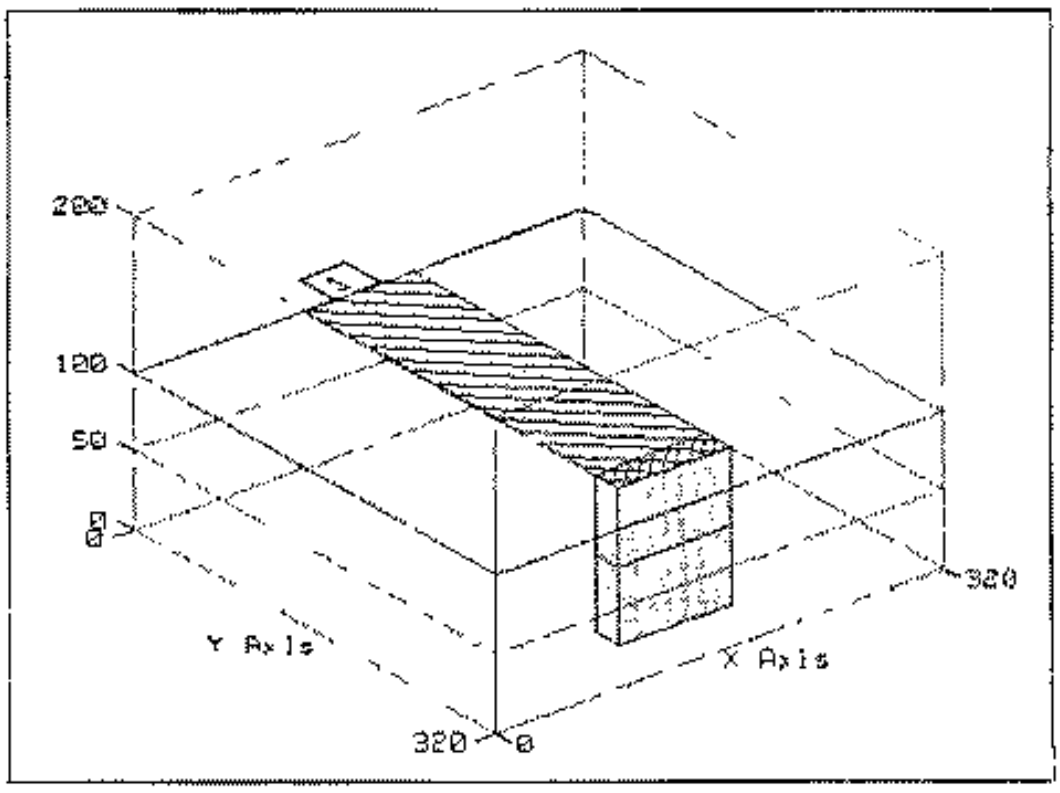


Рис. 3.43 Разделение перемычки на две

единение проводников на различных уровнях и соединении проводников с земляным основанием), это предположение не приводит к значительной погрешности. Если перемычка используется, чтобы моделировать трехмерную структуру, где точное решение имеет значительные x или y токи через грани плоскости, то результаты будут давать погрешности. Например, использование длинной перемычки, чтобы представить боковые границы экранированного проводника не корректно, потому что точное решение будет иметь x и y токи на боковых стенках. Рис. 3.44 показывает недопустимое использование перемычек.

Когда перемычка строится так, что она перекрывает большое количество ячеек, лучше моделировать перемычку созданием четырех сторон и оставлять пустой центр, поскольку истинный ток будет весь находиться вне ячеек в любом случае. Это показывается на рис. 3.45, где левая перемычка предпочтительнее перемычки

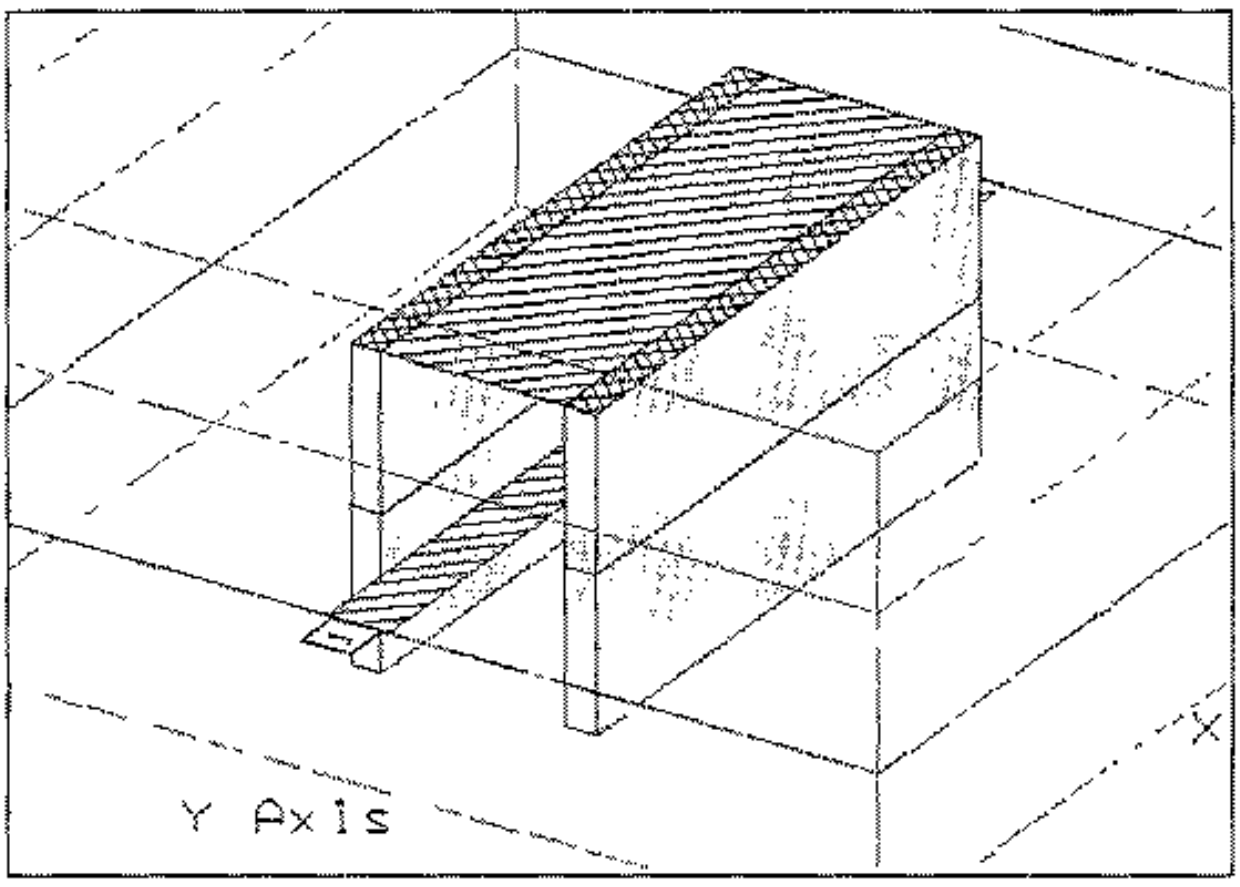


Рис. 3.44. Недопустимое использование перемычек

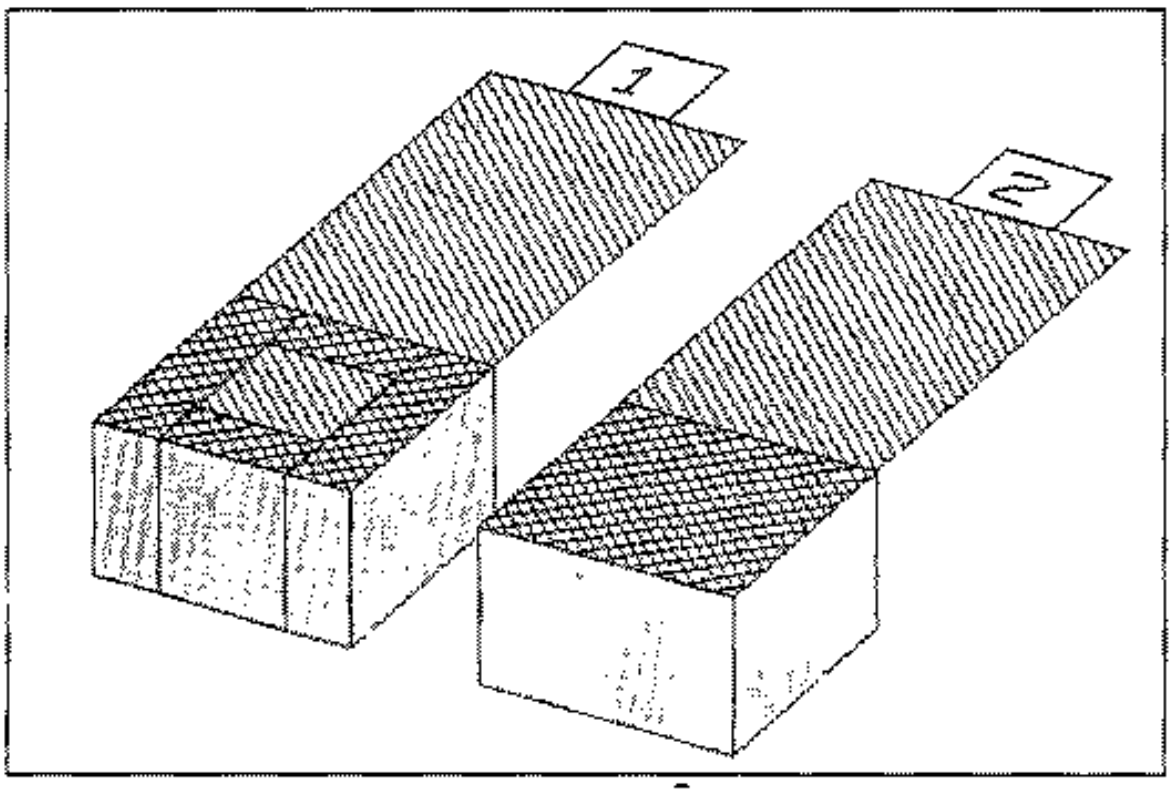


Рис. 3.45. Примеры моделирование перемычек

справа. Обе дают почти идентичные результаты, но перемычка слева моделируется немного быстрее и требует меньшее количество памяти.

Для примера, показанного на рис. 3.45, разница будет незначительная, но для намного большей перемычки разница может быть существенной. **EMSight** будет моделировать большую перемычку по принципу, как перемычку слева.

3.13.4. Уход от резонансов

Имеются два типа резонансов в конструкции. Первый — резонанс в фактической схеме. Например, однородная линия передачи, которая имеет длину, равную половине длины волны, будет резонансной. Когда на одном конце короткое замыкание, полуволновая линия преобразует КЗ на дальнем конце к КЗ на стороне, где приложено напряжение. В случае, когда все проводники — идсальные электрические проводники, это должно приводить к решению с бесконечным током (это — результат того, что полуволновая линия является резонансной на частоте моделирования). Часто этот тип резонанса вызывает проблему, с которой сталкиваются, когда вычисляются параметры исключаемой линии в алгоритме разгерметизации, и это — причина, почему трудно точно сдвинуть опорные плоскости, длиной в половину длины волны.

Другой тип резонанса — резонанс корпуса. Поскольку **EMSight** анализирует задачу внутри проводящего прямоугольного корпуса, можно выбрать частоту анализа, которая близка к одной из резонансных частот корпуса. Для электрически малых структур, это — обычно не проблема, потому что резонансные частоты, обычно, намного выше, чем частота анализа. Для электрически больших структур, более вероятно, что собственный резонанс корпуса попадет в полосу анализируемых частот. Если используются диэлектрические слои с потерями, или если используется граница с потерями для верхней и нижней крышки корпуса, то резонанс корпуса обычно обнаруживается. Проблема резонанса корпуса будет наиболее серьезна, когда не имеется потерь в каком то одном слое, границе или проводнике. В случае задачи полностью без потерь, анализ на частоте резонатора дает решение с бесконечными величинами. Реально полученные характеристики не будут бесконечны, но они, возможно, будут неточными. Один из способов избежать резонансные проблемы состоит в том, чтобы использовать диэлектрик с потерями, чтобы демпфировать резонанс или установить верхнюю и нижнюю крышки как границы с потерями. Тогда небольшое изменение размера корпуса изменит резонансную частоту, так что резонанса можно часто избежать, изменяя толщину одного из слоев (например, верхнего воздушного слоя в задаче фильтра на линии с подвешенной подложкой (рис. 3.46).

Потенциальные резонансные проблемы могут также быть обнаружены **EMSight**. При решении с помощью **EMSight** резонансы различных типов волн могут обнаружиться в диапазоне частот несколько более широком, чем диапазон частот анализа.

При исследовании резонансных частот рекомендуется выполнить небольшое изменение структуры, например изменить размер подложки на входе фильтра рис. 3.46. В результате ЧХ (рис. 3.47) изменяется.

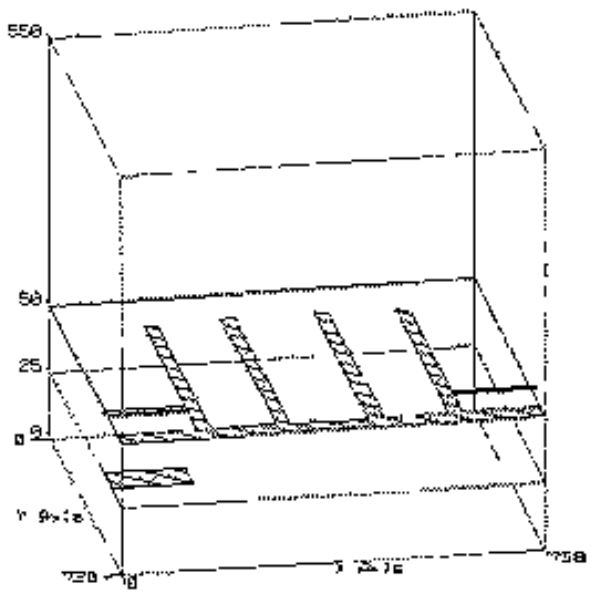


Рис 3.46. 3D-вид фильтра на линии с подвешенной подложкой

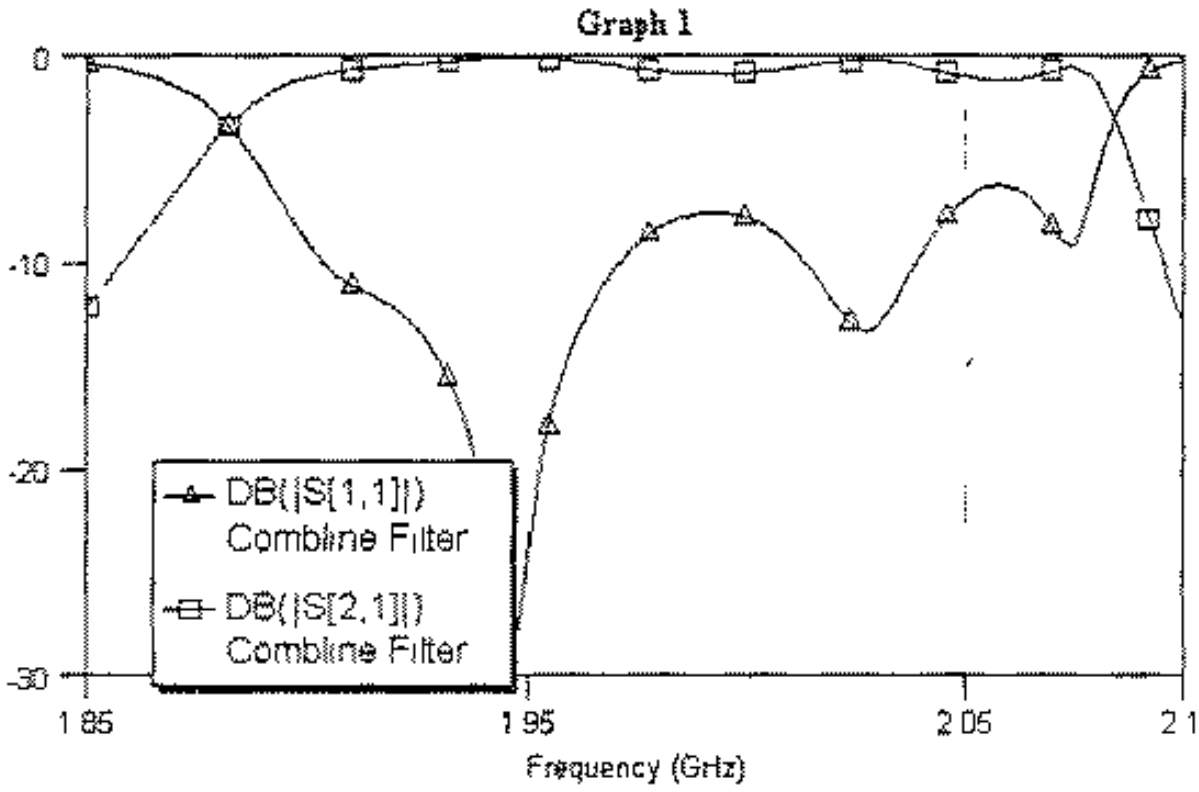


Рис. 3 47. Частотная характеристика фильтра рис. 3.46.

3.13.5. Моделирование потерь

Потери могут легко учитываться **EMSight**, хотя это может значительно увеличить время анализа. Если проводники имеют потери, или когда используются диэлектрик с потерями или граница с потерями, то таблицы моментов вычисляются, используя комплексную математику, что значительно длительнее, чем вычисления реальных чисел.

Диэлектрические потери могут быть смоделированы, используя ненулевую величину тангенса угла потерь или устанавливая поверхностную проводимость металлических форм. Параметры диэлектрических слоев устанавливаются в диалоге **Substrate Information** на странице **Dielectric Layers**. Величина тангенса угла потерь частотно зависима, хотя можно считать, что она меняется незначительно в широкой полосе частот. Объемная проводимость может использоваться, чтобы моделировать потери проводников.

Иногда в производстве СВЧ схем поглощающий материал помещается в верхнюю крышку корпуса. Она может быть смоделирована в **EMSight**, прибавляя диэлектрический слой в верхнем диэлектрике, который имеет ту же самую толщину и свойства, как поглощающий материал.

3.13.6. Границы с потерями

Имеются три различных типа границ с потерями, которые могут быть определены для верхней и нижней границы корпуса:

Specify Material — точное определение материала границ

Использование этой опции позволят описать материал так же, как определены другие проводящие материалы. Этот тип границ используется наиболее часто, чтобы моделировать эффект фактической материальной границы, типа верхней крышки, которая — не является идеальным электрическим проводником. Материальные реквизиты могут также быть установлены, чтобы смоделировать эффект открытой границы или с потерями поглотителя.

Approximate Open — открытый (разомкнутый — 377 Ом)

Использование этой опции эквивалентно описание границы как материала, который имеет удельное сопротивление постоянному току 377 Ом. что равно волновому сопротивлению свободного пространства. При моделировании открытой границы, верхняя крышка должна быть достаточно далеко удалена от топологии, так, чтобы любое поле, излучаемое из схемы, не взаимодействовало с границей. Использование границы 377 Ом соответствует приближению к свободному пространству, что должно обеспечить достаточную точность для большинства задач. Эта опция используется при анализе типичной структуры антенны.

В методе, который используется, чтобы просмотреть излучение антенны, в структуру добавляется проводник с очень высоким удельным сопротивлением, например 10000 Ом/квадрат, на слое выше антенны. Этот слой с высоким удельным сопротивлением не будет значительно влиять на решение, а скорее он действует как «чувствительный» слой. Распределение излучения может быть получено, рассматривая графики анимации поля на чувствительном слое. При использовании чувствительного слоя, он должен быть на первом слое ниже верхней границы, и верхняя граница должна быть задана как открытая (т. е. установлена на 377 Ом).

Бесконечный волновод

Режим бесконечного волновода будет моделировать верхний (или нижний) слой как бесконечно длинный волновод, использующий тот же самый диэлектрик как верхний (или нижний) слой. Граница бесконечного волновода может использоваться, например, чтобы моделировать микрополосково-волноводный переход.

3.13.7. Потери в проводниках

Задание этого параметра нужно, чтобы моделировать потери, связанные с резистивной проводящей тонкой пленкой. Потери проводника моделируются следующими двумя параметрами:

Низкочастотное сопротивление

Низкочастотное сопротивление определяет DC сопротивление плоского проводника (в омах/квадрат). DC сопротивление — сопротивление проводника, принимающего однородное распределение тока в сечении проводника.

Высокочастотный коэффициент потерь

Коэффициент высокочастотных потерь определяет потери на частотах, где толщина проводника значительно более толстая, чем глубина поверхностного слоя. Так как потери, связанные с глубинными эффектами поверхностного слоя (скин-слоя) пропорциональны квадратному корню частоты, коэффициент глубинных потерь поверхностного слоя умножается на квадратный корень частоты, чтобы задать величину в омах/квадрат, которая используется для вычислений потерь.

3.13.8. Анимация тока и визуализация E-поля

EMSight обеспечивает и качественную и количественную информацию при анализе ЕМ структур. В то время как характеристики и графики больше служат для определения количественных характеристик, анимация тока и визуализации E-поля могут обеспечить наибольшее понимание распространения поля в структуре.

Анимация может выполняться как функция времени (свипируется фаза) или частоты (свипируется частота). Чтобы выбрать режим анимации (рис. 3.48), выберите команду **Animate > Animate Settings**.

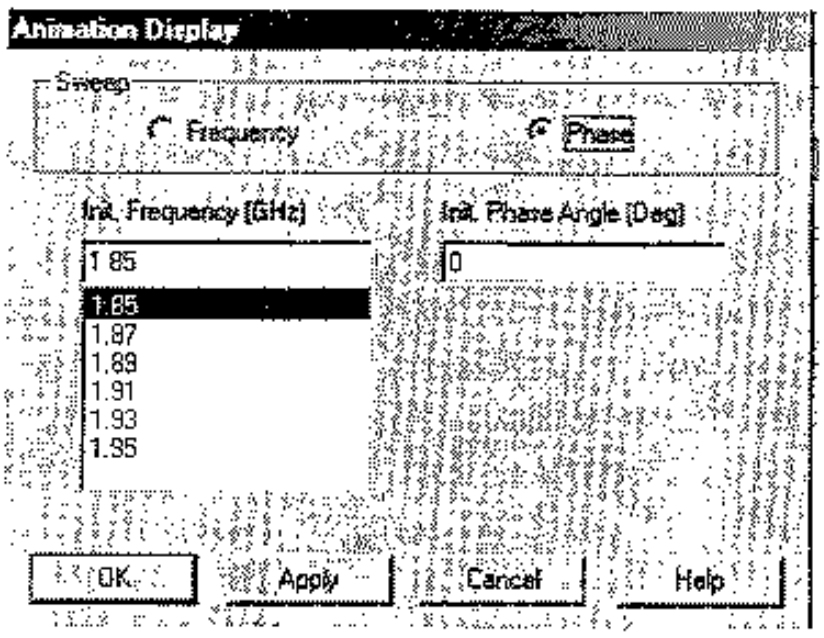


Рис. 3.48. Установки анимации: По изменению фазы на частоте 1.85 ГГц

Анимация тока

Распределение тока, найденное во время решения электродинамической задачи, может просматриваться в 2-х или трехмерном представлении. Графический показ распределения тока обеспечивает визуализацию векторного распределения тока. Чтобы указать направление тока используются стрелки, в то время как цвет, а также размер стрелки используются, чтобы указать величину. Светлые цвета (желтый) представляют более высокие величины, в то время как более темные цвета (синий / черный) используются для меньшей величины тока.

Просмотр распределения тока

Чтобы просматривать распределение тока в 2-х или трехмерном виде, выберите **Animate > Show Current** из меню после завершения решения.

Анимация распределения тока

Чтобы анимировать распределение тока в 2-х или трехмерном просмотре, выберите команду **Animate > Animate Play**. Когда анимация стартует, создается набор рамок вывода (этот шаг проявляется в более медленной анимации), а затем циклически выводит рамки с видом распределения тока. Число выводных рамок, используемых для анимации может быть установлено в странице **Current View** в диалоге Options (рис. 3.49).

Приостановка анимации

Чтобы приостановить анимацию, и просмотреть одну картину распределения тока, выберите **Animate > Animate Pause** из меню.

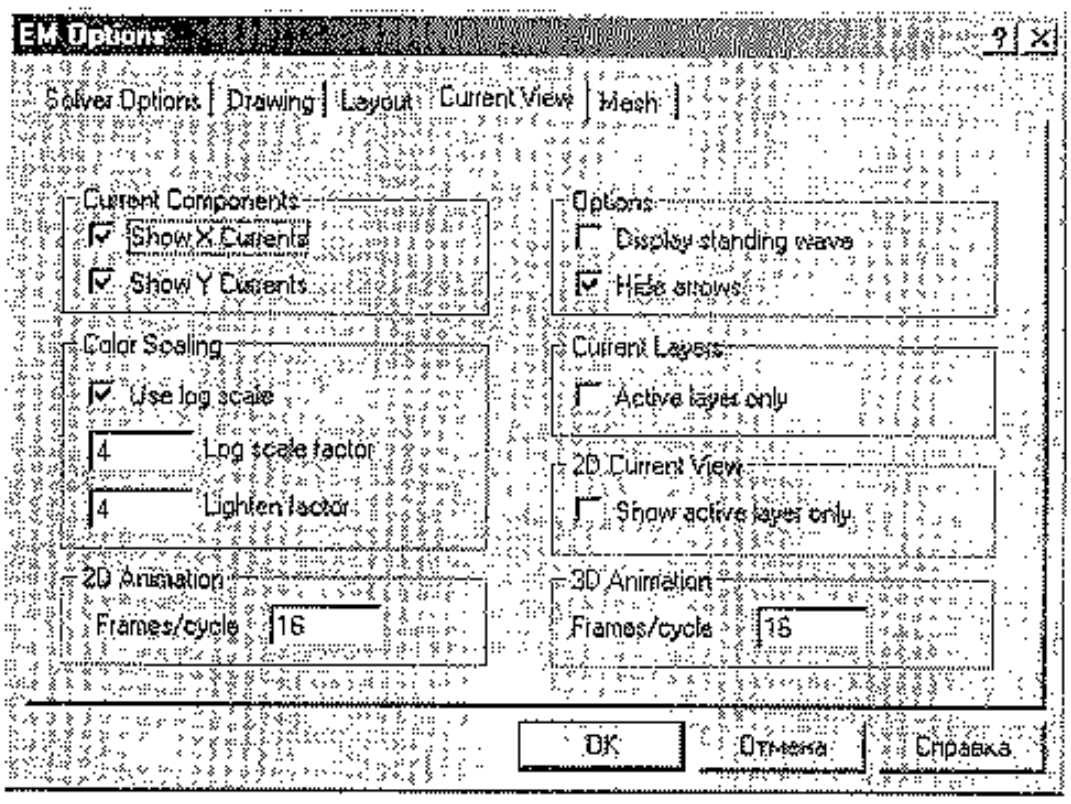


Рис. 3.49. Диалог установки параметров анимации

Остановка анимации

Чтобы остановить анимацию выберите **Animate > Animate Stop.**

Выбор частоты анимации

Когда больше чем одна частотная точка заданы при решении EM задачи, сначала должна быть выбрана частота, используемая для анимации. Выбирать частоту анимации можно из меню **Animate > Animate Settings**. Диалог **Animation Disply** задает частоту анимации из списка. Начальное состояние фазы может также быть установлено в диалоге (рис. 3.49). Начальное состояние фазы определяет фазу возбуждения, которая используется для показа тока при просмотре его распределения командой **Animate > Show Current.**

Нагрузки и возбуждения

EMSight позволяет пользователю точно определить модуль и фазу возбуждения на порту. Распределения тока, которые являются результатом различных режимов работы, можно сделать видимым, точно определяя относительные фазы различных портов.

Порт может быть или портом возбуждения или нагрузки. Для портов нагрузки, пользователь может специфицировать полное сопротивление нагрузки. Спецификация нагрузок и возбуждения влияет только на анимацию, а не на расчет S-параметров (S-параметры — линейные параметры, не зависящие от возбуждения). Решение, которое применяется, чтобы вычислить S-параметры, использует короткозамкнутые нагрузки. Решение для токов при короткозамкнутых схемах является стоячая волна. Чтобы увидеть, как токи текут через структуру (рис. 3.53), необходимо получить решение структуры с нагрузками. **EMSight** вычисляет решение для тока с нагрузками в дополнительном шаге после того, как S-параметры уже были определены.

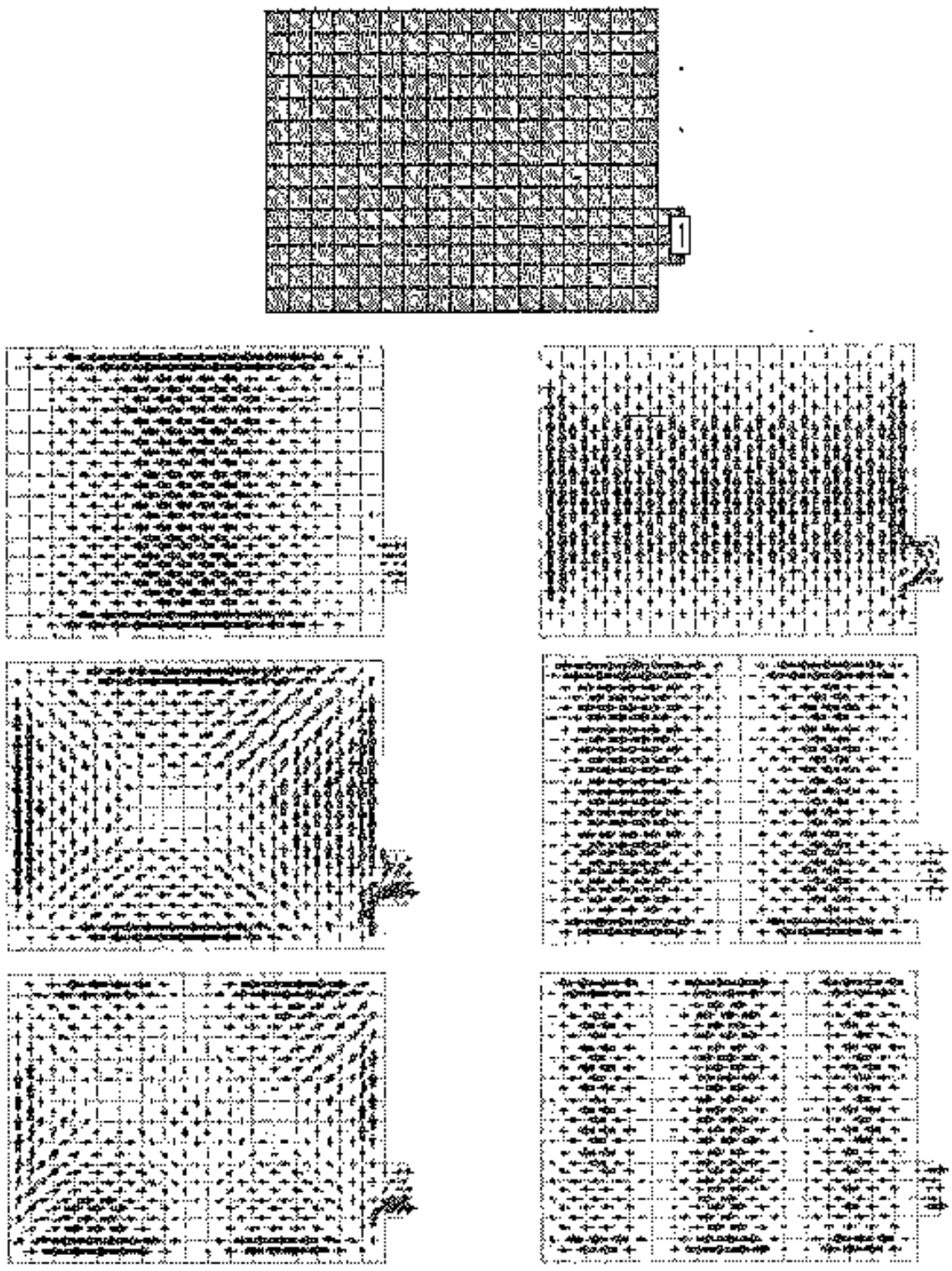


Рис. 3.50. Анимация тока на металлической форме

Визуализация E-поля

Тангенциальное электрическое поле (E-поле) может также быть рассчитано в дополнение к распределениям тока. Анимации E-поля могут просматриваться и в 2-мерном или трехмерном представлении. Графический показ E-поля обеспечивает визуализацию тангенциального E-поля в любой XY плоскости. Стрелки используются, чтобы указать направление поля, в то время как цвет (и размер стрелки) используется, чтобы указать величину напряжения. Светлые цвета (желтый / зеленый) представляют более высокую величину, в то время как более темные цвета (синий / черный) — для меньшей величины.

В отличие от анимации тока, анимация E-поля увеличивает время моделирования. Чтобы ускорить расчет характеристик моделируемого устройства, расчет E-поля для всех уровней по умолчанию отключен.

Анализ и вывод вида E-поля

Выберите из меню **Animate** команду **E-Field Settings.** Диалоговое окно E-Field Computation позволяет выбрать слои, на которых вы хотите вычислять E-поле (рис. 3.51). После выбора необходимо заново проанализировать структуру рис. 3.52.

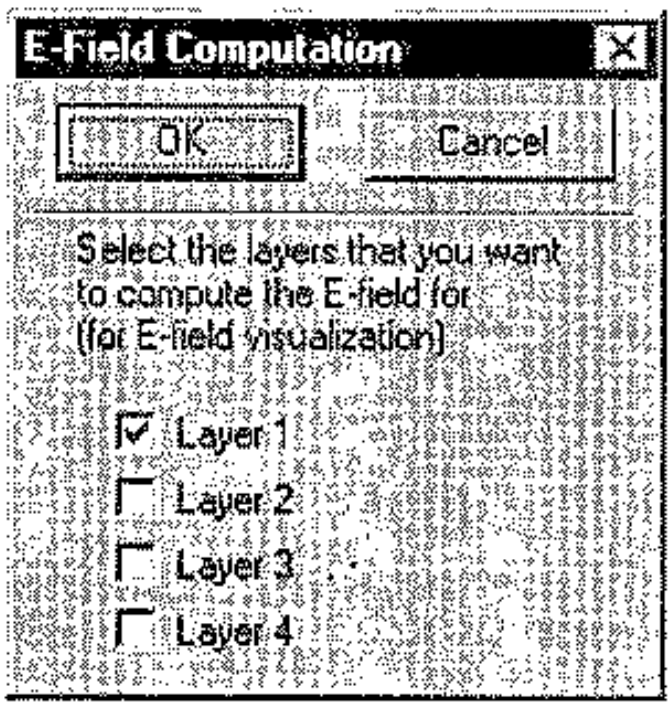


Рис. 3,51. Диалог задания вычисления электромагнитного поля в объеме

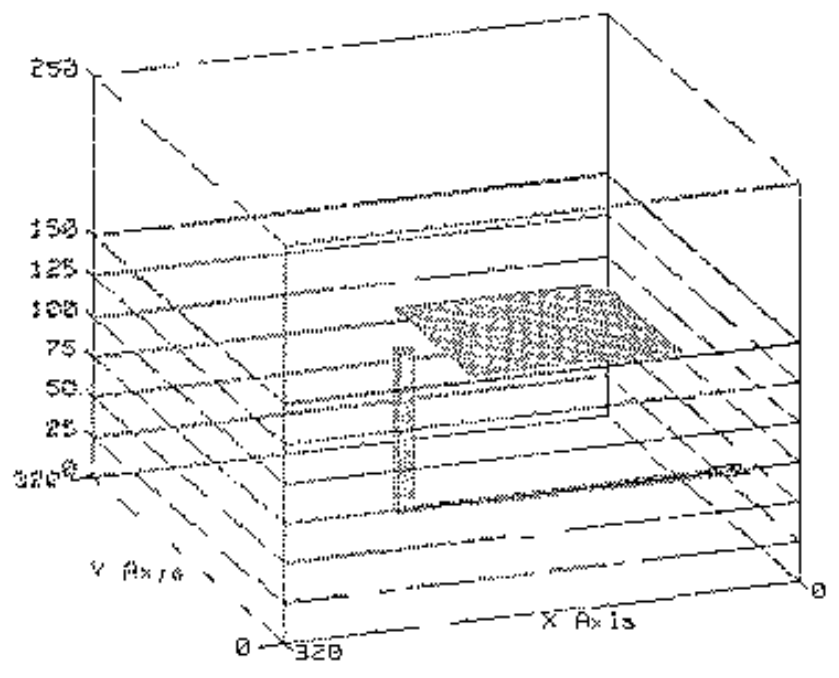


Рис. 3 52. Конструкция резонатора, возбуждаемого вертикальной перемычкой

Чтобы показать результаты, активизируются команды и кнопки, используемые при просмотре токов:

Show > Current
Animate > Stop
Animate > Pause
Animate > Play

3.13.9. Рекомендации для ускорения моделирования

1. Сначала выполните анализ в нескольких частотных точках. Используйте несколько тестовых частот, чтобы видеть, установлена ли схема правильно, перед заданием расчета в частотном диапазоне. Дополнительные частотные точки могут быть добавлены позже, добавляя их к ранее рассчитанным частотным точкам.
2. Затраты времени на EMSIGHT моделирование растут по экспоненте с увеличением размера. Всякий раз, когда возможно, разбивайте электрически большие структуры на меньшие и выполняйте отдельное моделирование. Затем объедините структуры EM на уровне схемы.
3. Всегда перед моделированием используйте справку **View > Information**, чтобы видеть, сколько оперативной памяти требуется для данного моделирования и оцените время моделирования.
4. Экспериментируйте с решающим устройством, сеткой, и параметрами ячейки. Снова, используя **View > Information** можете изменять сетку без нового моделирования структуры. Измените параметры, и просмотрите число ячеек, требования на RAM и оцените время для каждого моделирования (рис. 3.56).
5. Первоначально используйте крупную сетку. Пробуйте ограничить число ячеек < 3000. Это удобно обычно выполнить, изменяя размер сетки и—или ячейки. Неопытные пользователи обычно выбирают очень частую сетку.
6. Никогда не моделируйте с малой RAM в компьютере. Он будет использовать виртуальную память на диске — это приводит к длительному времени моделирования. Имеет смысл поставить на компьютер RAM 128—256 MB, если **EMSight** должна будет решать большие задачи.

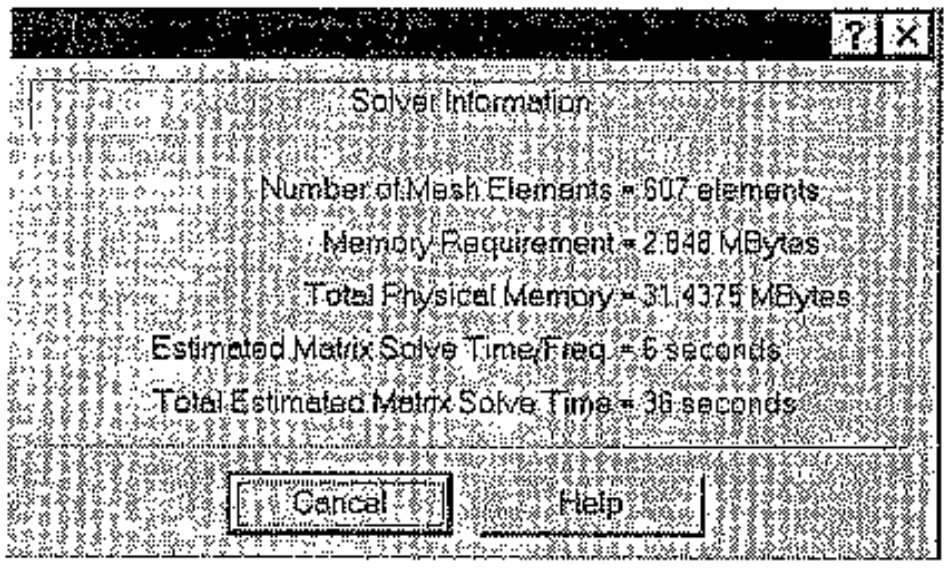


Рис. 3.53. Информация о расчете схемы: число автономных блоков, требуемая память, общая физическая память, время решения одной матрицы и общее требуемое время решения: число автономных блоков 607, требуемая память 2,848 Мб; общая физическая память 314375 Мб; скорость решения матрицы на частоте 6 сек/частоту; общее время расчета матрицы 36 сек.

7. Устанавливайте параметры ячейки по разному для разных многоугольников. Это может быть выполнено, выбирая многоугольник и затем заменяя опцию ячейки правым щелчком. Обычно большинство элементов может быть разбито на крупные ячейки. Более критические многоугольники могут вручную быть разбиты на нормальные или более плотные ячейки.
8. Моделирование ускоряется с использованием диэлектриков без потерь и идеальных проводников. Это благоприятно будет воздействовать на время расчета частотной характеристики и снизит требования на RAM.
9. Можно использовать сетки различного разряжения для осей X и Y. Для многих структур, подобных ответвителям Ланге, может использоваться различная густота сети в X и Y направлениях. Используйте возможность неравномерного разбиения.
10. Нарастите вычислительные возможности вашего компьютера до Пентиум IV. В настоящее время существуют и методы параллельного включения процессоров для увеличении мощности и скорости вычисления компьютеров.
11. Поставьте **EMSight** на компьютер с несколькими процессорами. EMSight — программа с разветвлением и параллелизацией процесса расчета, что может эффективно использовать преимущество работы на двух или даже четырех компьютерах, работающих под Windows NT.

Глава 4
Характеристики электромагнитного поля

Для ЕМ структур рассчитываются характеристики электромагнитного поля. Расчет всех характеристик для трехмерной структуры требует выполнения полного электромагнитного (ЕМ) анализа. Однако перед ЕМ-анализом можно рассчитать волны типа **TE_Mode, TM_Mode** для использования информации о резонансных типах волн в этой трехмерной структуре с целью последующего выбора рабочего диапазона частот (характеристика **AllModes** выводится на рис. 4.1).

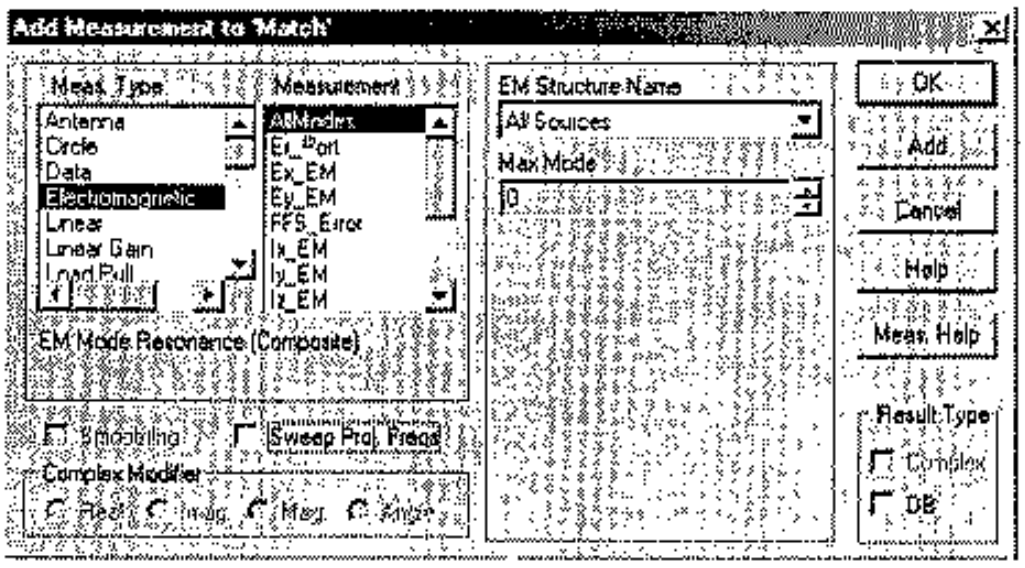


Рис. 4.1. Окно вывода выходных КМ характеристик

Другие характеристики, приведенные в табл. 4.1, рассчитываются на различных этапах анализа электромагнитной структуры.

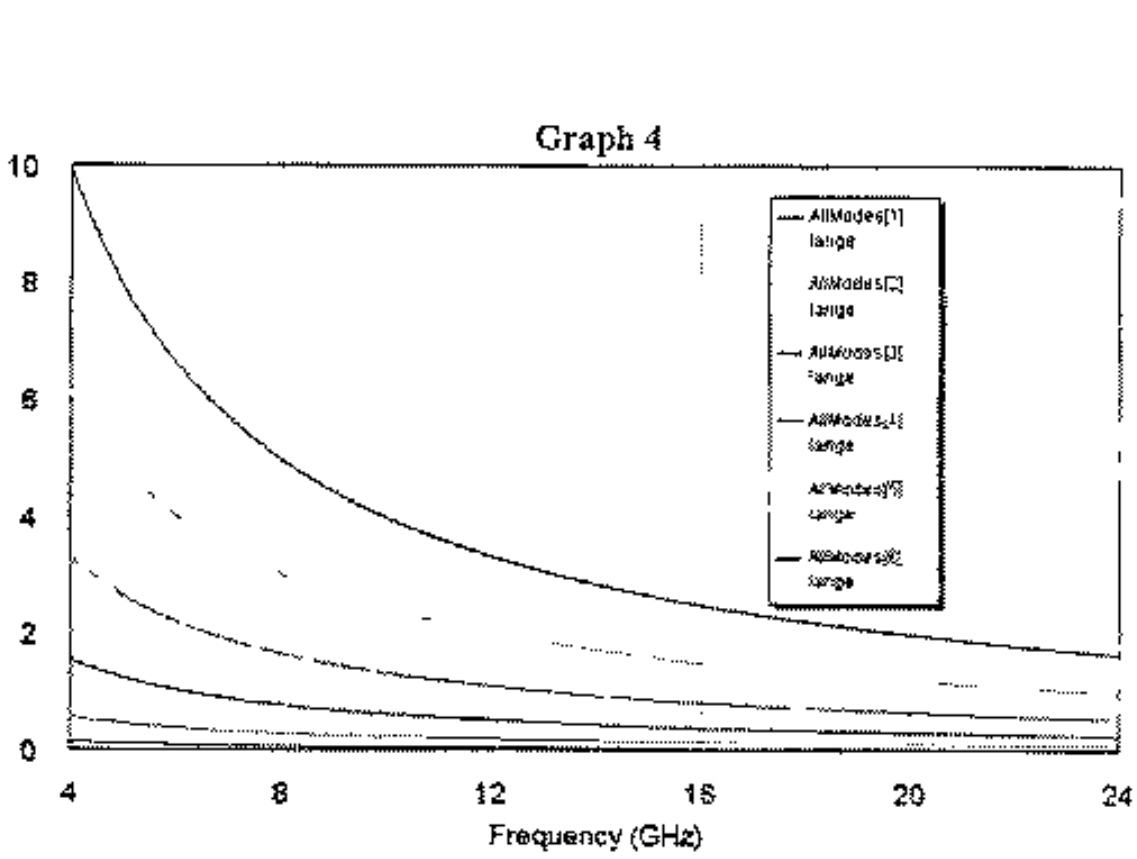
Таблица 4.1. Электродинамические характеристики рассчитываемые MWO

AllModes	Расчет всех типов волн, которые могут существовать в анализируемой ЕМ структуре
E r_Port	Эффективная диэлектрическая проницаемость линии со стороны порта
FFS_Error	Ошибка сходимости процесса моделирования
Ex_EM	Плотность электрического поля по оси x
Ex_EM	Плотность электрического поля по оси y
K_Port	Постоянная распространения линии со стороны порта
Ix_EM	Плотность тока по оси x
Iy_EM	Плотность тока по оси y
Iz_EM	Плотность тока по оси z
Poles_S	Полюсы S-параметров
TE_Mode	Моды (типы волн) электрических компонент ЕМ поля
TM_Mode	Моды (типы волн) магнитных состаяяющих поля
Zeros_S	Нули S-параметров
Zin Port	Входной импеданс со стороны порта

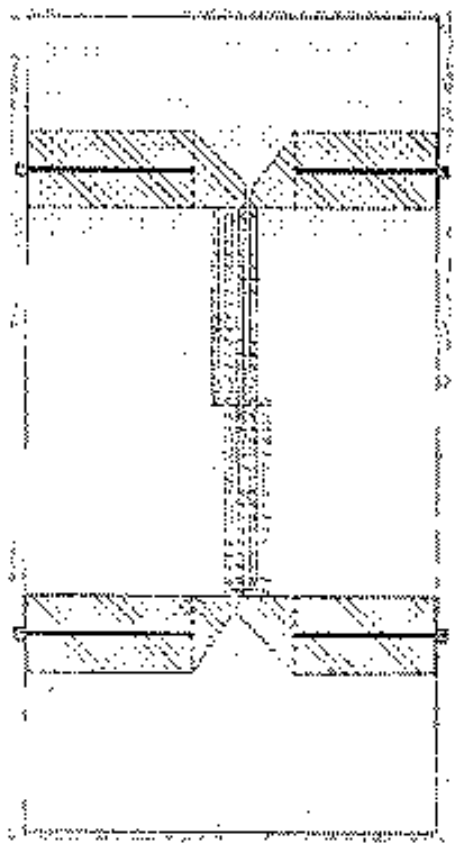
Рассмотрим эти характеристики.

4.1. Резонансные типы волн

Характеристика **AllModes** — это сумма всех возможных магнитных **TM_MODE [m, n]** и электрических **TE_MODE [m, nj** типов волн, где все суммируемые моды имеют параметры *m* и *n*, меньшие или равные параметру **Max Mode,** который был установлен во время задания рассчитываемых характеристик (рис. 4.2). Характеристика AllModes используется, чтобы определить все резонансы в корпусе, без исследования возможных резонансов отдельных типов волн.



Увеличивая значение параметра *Max Mode* (можно до 99), получаем все большее количество мод в корпусе, в диапазоне частот



Топология анализируемого моста Ланге

Рис. 4.2. Характеристики AllMode моста Ланге

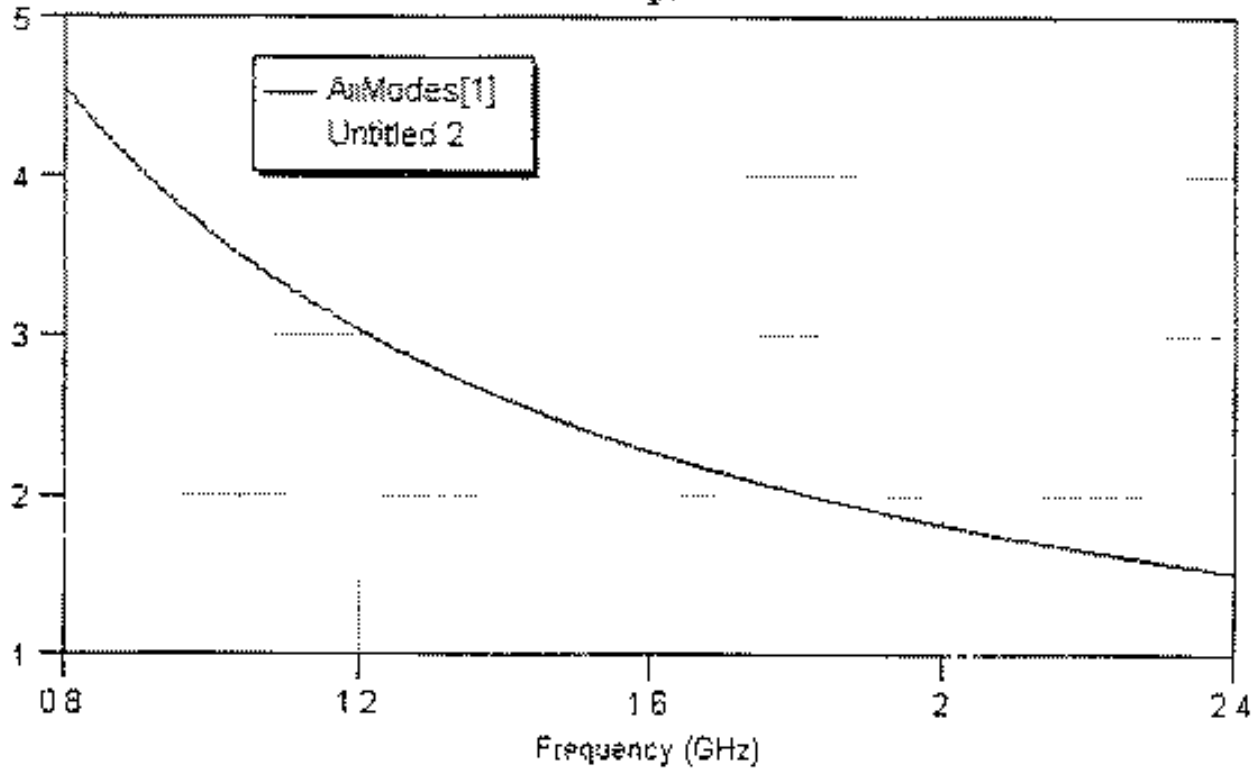


Рис. 4.3. Зависимость количества собственных типов волн отрезка линии в диапазоне частот возбуждения. График показывает, что на частотах 0,9 ГГц для этой линии существует 4 типа волн, начиная с 1,2 ГГц только 3 типа волн, начиная 1,8 ГГц 2 типа волн

Параметры характеристик (устанавливаемые в правой части окна на рис. 4.1):
P1 — имя EM-структуры (структура с 1-1000 портами);
P2 — максимальное количество типов волн (целое число от 0 до 99).

Эти характеристики дают при расчете реальные величины. Они показывают, сколько типов волн (по оси *Y*) может возникнуть в корпусе на данной частоте (рис. 4.3). Частота откладывается на графике по оси *X*.

4.2. Относительная диэлектрическая постоянная линии

Характеристика **Er_Port** есть относительная диэлектрическая постоянная отрезка линии со стороны порта. При расчете **Er_Port** должен быть определен номер порта. При этом возможен сдвиг фазовых плоскостей (De-embedding) для исключения влияния неоднородности на результаты расчета. Если режим исключения невозможен, то при расчете относительной диэлектрической постоянной появится сообщение об ошибке. Расчет **Er_Port** возможен только для одного порта на стороне структуры. Если имеются больше, чем один порт на одной стороне конструкции, то при попытке расчета диэлектрической постоянной появится сообщение об ошибке.

Параметры характеристик (устанавливаемые в правой части окна рис. 4.1):
P1 — имя EM-структуры (с 1—1000 портами);
P2 — число портов (от 1 до 1000).

Этот расчет дает в результате комплексное число, которое может быть показано разными способами: как две реальные величины (модуль, угол), как реальная или мнимая составляющая. Реальная величина может быть показана в дБ, выбирая опцию dB. Ось *X* для этого расчета — частота. Эта характеристика может быть показана на диаграмме Смита, на полярной диаграмме или в таблице. Модуль, угол, реальную или мнимую составляющие могут быть показаны также в декартовых координатах.

4.3. Погрешность быстрой частотной развертки

Эта характеристика **FFS_ERROR** дает оценку точности решающего устройства FFS в экстраполируемой полосе частот. При этом важно заметить, что **FFS_ERROR** — только оценка погрешности, а не абсолютная погрешность. **EMSight** обычно оценивает погрешность с запасом, хотя иногда она будет несколько выше, чем ее оценка (обычно на границах полосы частот). **EMSight** автоматически использует погрешность FFS для усечения частотной характеристики в диапазоне частот, где оценка погрешности предсказывает, что она выше порога. Расчет **FFS_ERROR** должен использоваться только с FFS решающим устройством. Если характеристика **FFS_ERROR** используется не в режиме FFS, то результаты будут бессмысленными. Эта характеристика дает реальную величину. Ось *X* для нее — частота.

4.4. Вектор электрического поля

Характеристика Ex_EM и Ey_EM это составляющие вектора электрического поля по оси *x* и по оси *y*, в единицах Вольт/м по поперечному сечению структуры ЕМ на указанном слое и частоте. Вертикальное поперечное сечение может быть определено как фиксированная координата, определенная в единицах ячеек. Эта характеристика квантует направленное по координатам Е-поле, и рассчитывает ЕМ анимацию в данном сечении. Заметим, что значения характеристики будут зависеть от свойств ЕМ портов, включая амплитуду возбуждения, фазу и значения оконечной нагрузки. Для расчета необходимо установить в диалоге следующие параметры

EM Data Source	Имя ЕМ-структуры	1 —1000 портов
Frequency Index	(индекс частоты)	От 1 до № частоты
Layer Number	Номер слоя	От 1 до № слоя
Cross Sectional Direction	Сечение среза	Координата X или Y
Dist from Origin to Cut	Расстояние от начала координат	От 0 до № ячейки

Эта характеристика есть комплексная величина. Комплексная характеристика может быть отображена как реальное значение, определяя величину, угол, реальный или мнимую составляющую в диалоговом окне Measurement. Ось X для этой характеристики находится в единицах длины.

Эта характеристика может быть отображена на полярной диаграмме или таблице. Модуль, угол, реальный или мнимые составляющие может также быть отображена на прямоугольном графике.

Начало координат для ЕМ моделирующего устройства зафиксировано в верхнем левом углу когда просматривается составляющие тока в двух координатах. Положительное направление X — направо от начала координат, и положительное направление Y — ниже начала координат

Фаза возбуждения быть изменена от 0° до 360°, что является диапазоном фазовых значений, необходимых для ЕМ анимации.

4.5. Постоянная распространения со стороны порта

Постоянная распространения со стороны порта **K_Port** — это постоянная распространения отрезка линии передачи, подключенной к порту. Когда требуется расчет **K_Port,** должен быть определен номер порта. Постоянная распространения рассчитывается для выполнения процедуры исключения неоднородности. Если алгоритм исключения невозможен, при расчете полного сопротивления порта выдается сообщение об ошибках. Расчет **K_Port** выполняется только для порта на одной стороне. Если имеются больше, чем один порт на стороне, то при расчете полного сопротивления будет выдано сообщение об ошибках.

Параметры расчета:

P1 — имя ЕМ-структуры (структура с 1—1000 портами):

P2 — номер порта (целое число от 1 до 1000).

Этот расчет дает в результате комплексную величину, которая может быть показана разными способами: как две реальные величины (модуль, угол), как реальная или мнимая составляющая. Реальная величина может быть показана в дБ, выбирая опцию dB (рис. 4.4). Ось x для этого расчета — частота.

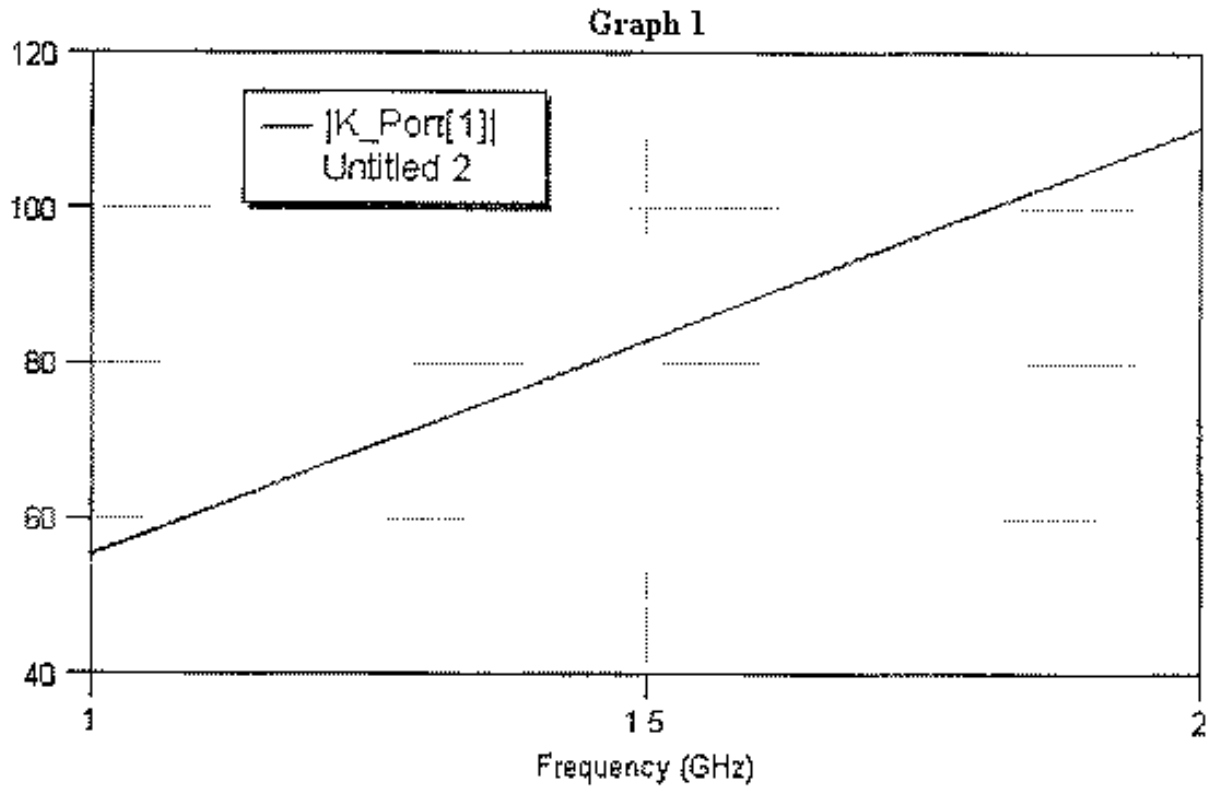


Рис. 4.4. Постоянная распространения линии, присоединенной к порту 2. Изменение фазы на единицу длины почти линейно меняется с ростом частоты

4.6. Плотность тока на металлических формах

Характеристики *Ix_EM* и *Iy_EM* — это плотности тока (А/м) по координатам x и y в сечении структуры ЕМ на указанном слое и частоте. Вертикальное поперечное сечение может быть определено как постоянный размер x или y, определенный в единицах ячейки. Эта характеристика квантует ток, направленный по координате x в данном сечении. Заметим, что плотность тока будет зависеть от амплитуды возбуждения, фазы и значения нагрузок.

Установки в диалоге Measurement:

EM Data Sourse	Имя ЕМ-структуры	от 1 до 1000 портов
Freq. Index	Индекс частоты	№ ЕМ частот
Layer Number (номер слоя)	Целое число	№ ЕМ слоев
Cross section	Сечение среза	Фиксированная X-координата или фиксированная Y-координата
Dist from Origin to Cut	Расстояние от начала координат до сечения	№ ЕМ ячейки

Эта характеристика — комплексная, и может быть отображена как реальное значение, задавая модуль плотности тока, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоговом окне Measurement. Ось X для этой характеристики находится в единицах длины.

Эта характеристика может быть отображена на полярной диаграмме или в таблице. Модуль, угол, реальный или мнимые составляющие тока можно также вывести на прямоугольный график.

Начало координат зафиксировано в верхнем левом углу на двумерном графике. Положительное направление X — направо от начала координат, и положительное направление Y — ниже начала координат.

Полоса прокрутки, имеющаяся внизу графика позволяет изменять фазу возбуждения от 0° до 360°.

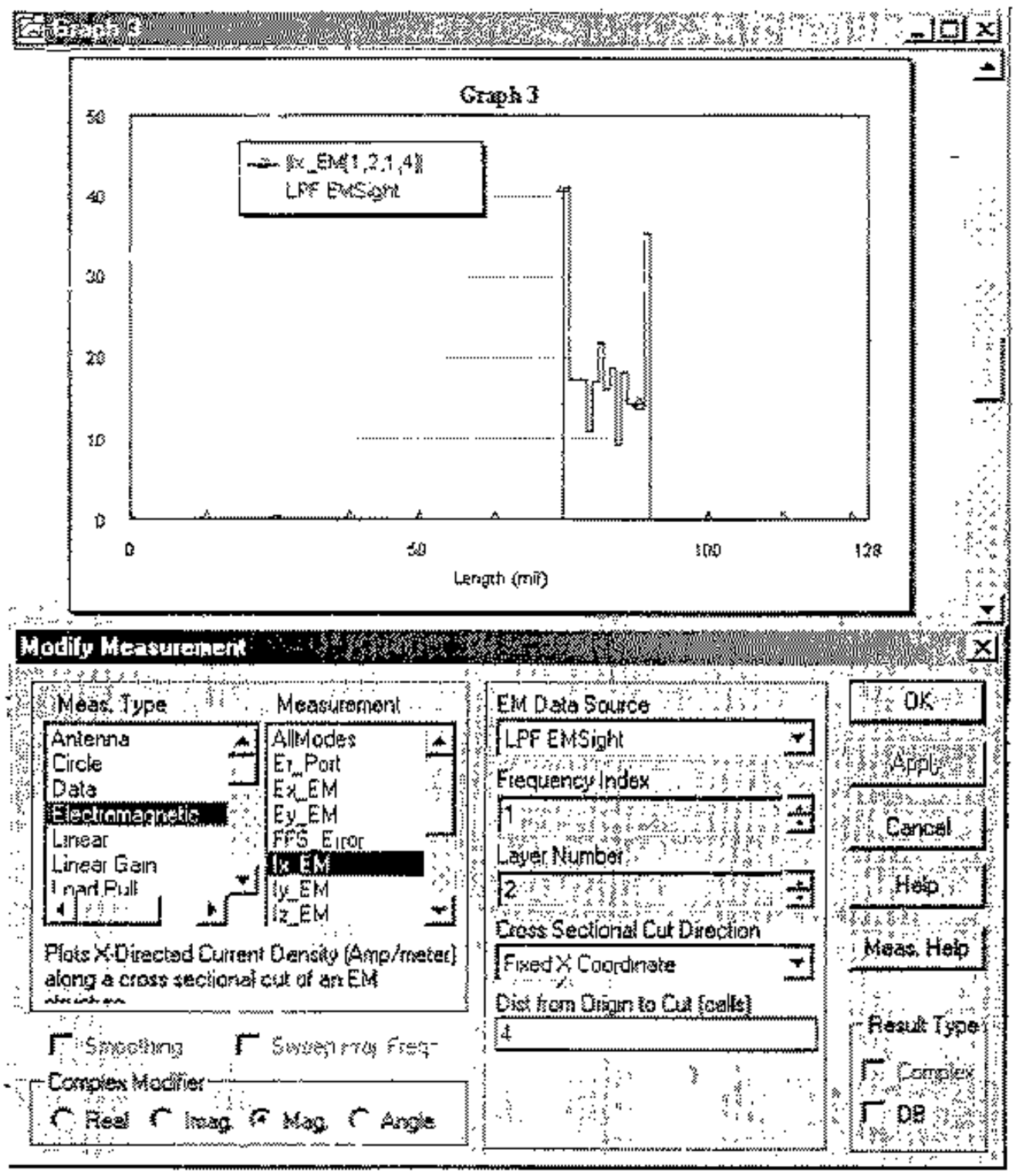


Рис. 4.5. Диалог вывода плотности тока для фильтра

4.7. Плотность тока в Z-направлении

Характеристика Iz_EM это составляющая по оси Z плотности тока, выраженная в А/м по поперечному сечению структуры EM на указанном слое и частоте. Вертикальное поперечное сечение может быть задано как постоянный размер x или y, в единицах ячеек. Это измерение квантует ток по этому сечению. Заметим, что значения характеристики будет зависеть от амплитуды возбуждения, фазы и значения конечных нагрузок.

Для расчета характеристики нужно установить следующие параметры:

EM Data Sourse Freq Index Layer Number Cross section Dist from Origin to Cut	Имя структуры (индекс частоты анализа) (номер слоя, на котором рассчитывается ток) Сечение среза (расстояние от начала координат до сечения)	(от 1 до 1000 портов) от 1 до № EM частоты от 1 до № EM слоя Фиксированная X-координата или фиксированная Y-координата От 0 до № EM ячейки

Эта характеристика есть комплексная величина, и может быть отображена как модуль, угол, реальная или мнимая составляющая в диалоговом окне Measurement. Ось X для этого измерения находится в единицах длины.

Эта характеристика может быть отображена на полярной диаграмме или в таблице. Начало координат находится в верхнем левом углу на двумерном графике. Положительное направление X идет направо от начала координат, и положительное направление Y — ниже от начала координат.

Полоса прокрутки, доступная внизу диаграммы, позволяет изменять фазу возбуждения от ноля до 360°.

4.8. Полюсы и нули S-параметров

Полюсы S-параметров **Pole_S** рассчитываются, только когда включен режим FFS. Хотя полюсы (частоты, на которых модули S-параметров равны бесконечности) для S-параметров пассивных устройств, например, S_{11}, S_{12} те же самые, рассчитываются все полюсы, так как, например, полюс S_{12} может быть отменен нулем в S_{11}.

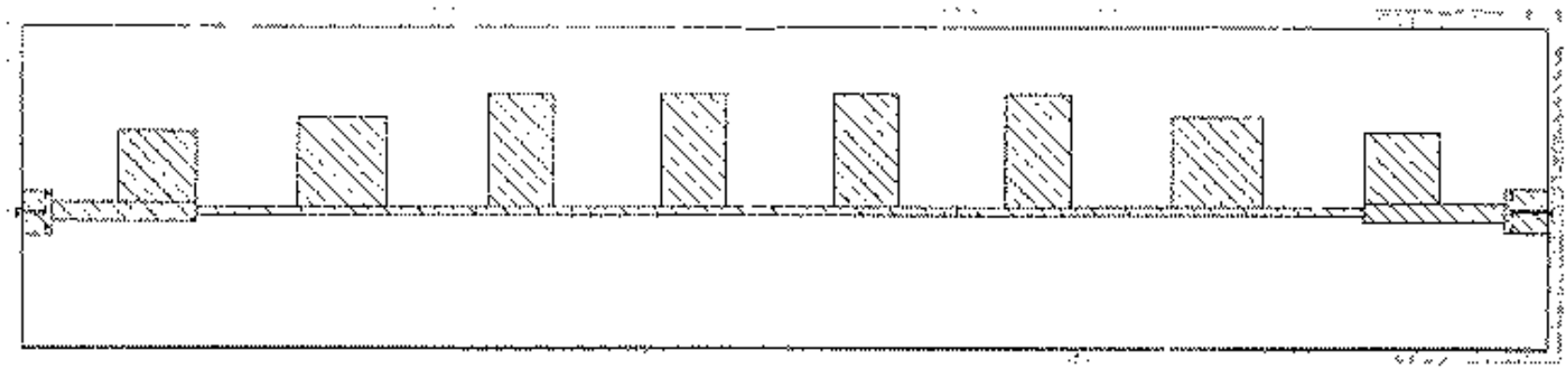
Очень полезно изобразить полюсы на полярной диаграмме. Для того, чтобы показать полюсы, установите стиль линии в режим «none» и выберите символ для полюса (например символ «x»). Характеристика **Pole_S** рассчитывается только решающим устройством FFS, при расчете без использования FFS выводится сообщение об ошибке.

Параметры для расчета:
P1 — имя EM-структуры (структура с 1-1000 портами),
P2 — индекс входного порта (целое число от 1 до 1000);
P3 — индекс выходного порта (целое число от 1 до 1000).

Этот расчет дает в результате комплексную величину, которая может быть выведена на график разными способами: как две реальные величины (модуль, угол), как реальная или мнимая составляющая. Модуль может быть показан в дБ, выбирая опцию dB). Ось *X* для этого расчета — частота. Полюсы могут также быть показаны на диаграмме Смита, в полярных координатах или в таблице.

Нули S-параметров **Zero_S** находятся с помощью метода FFS. Конкретный S-параметр определяется по окончании расчета (например, могут быть определены S_{11} или S_{12}).

Полезно изобразить нули на полярной диаграмме. Для показа рассчитанных нулей, установите стиль линии как «none» и выберите символ, например «o». Ха-



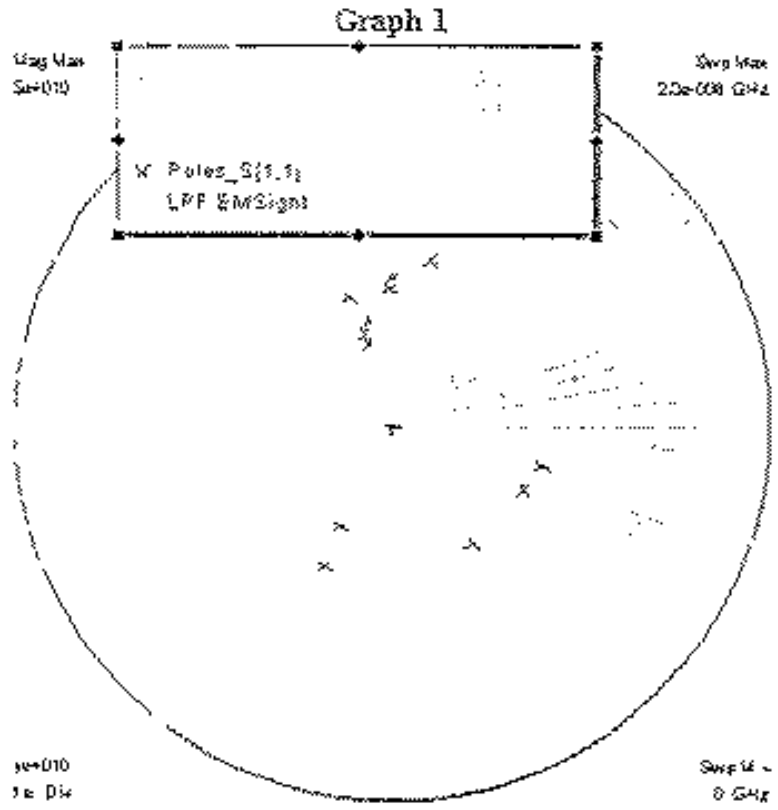


Рис 4 6 Полюсы параметра S_{11} микрополоскового фильтра

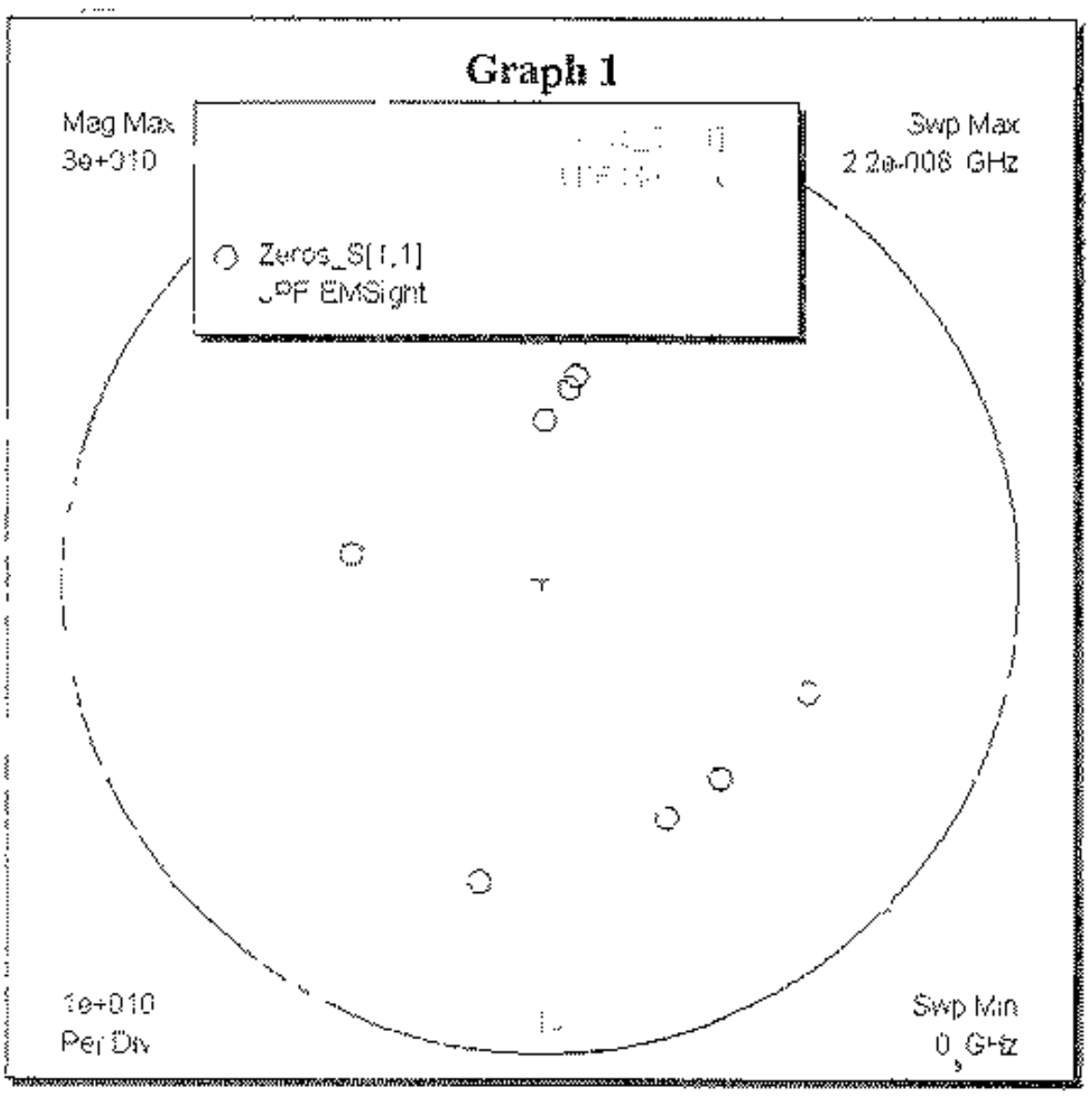


Рис 4 7. Нули параметра S_{11} фильтра с частотой среза 19 ГГц

рактеристика **Zero_S** должна использоваться только с FFS решающим устройством. Если ее расчет задан без выбора опции FFS, появится сообщение об ошибке.

Параметры для расчета:
P1 — имя EM-структуры (подсхема с 1—1000 портами);
P2 — индекс входного порта (целое число от 1 до 1000);
P3 — индекс выходного порта (целое число от 1 до 1000).

Zeros_S — комплексные величины, они могут быть показаны на диаграмме Смита, в полярных координатах или в таблице. Модуль, угол, действительные или мнимые составляющие могут также быть показаны на графиках в декартовых координатах. Ось X для этой характеристики — частота. Сглаживание не выполняется для данного расчета. Эта характеристика всегда рассчитывается на частотах, точно установленных в документе.

4.9. Резонансы волн типа TE и TM

Характеристика **TE_MODE** используется, чтобы определить, имеется ли резонанс волн типа TE в полосе частот, в которой выполняется анализ. Расчет **TE_MODE** автоматически охватывает диапазон частот несколько больший, чем частотный диапазон, установленный для EM-анализа. Индекс для TE типов волн должен быть установлен, когда расчет выполнен (то есть, выбраны индексы волны типа *n* и *m)*. Характеристика моды определена как

$$TE_MODE[n,m] = \frac{1}{\overline{Z}_{TE_{1,1}} + \overline{Z}_{TE_{1,n}}}, \qquad (4.1)$$

где $\overline{Z}_{TE_{1,1}}$ — полные сопротивления для TE типов волн, наблюдаемые из точки сверху диэлектрической пачки. Рассмотрение сверху — это направление, установленное линией передачи. Корпус будет резонировать, когда импеданс сверху и обратный ему импеданс снизу равны. В этом случае рассчитанная характеристика будет равна бесконечности.

Параметры для расчета:
P1 — имя EM-структуры (с 1...1000 портами);
P2 — индекс волны типа N (целое число от 0 до 99);
P3 — индекс волны типа M (целое число от 0 до 99).

Эти характеристики — действительные. При их расчете по оси *X* откладывается частота.

Расчет резонансов волн типа TM (расчет **TM_MODE**) используется, чтобы определить, имеется ли резонанс волн типа TM в полосе частот, в которой выполняется анализ. Расчет **TM_MODE** автоматически охватывает частотный диапазон несколько больший, чем частотный диапазон, точно установленный для EM анализа. Индексы типа волн для TM волн должен быть установлены по окончании расчета (т. е. заданы индексы N и M). Характеристики типа волн определены так:

$$TE_MODE[n,m] = \frac{1}{\overline{Z}_{TM_{1,1}} + \overline{Z}_{TM_{1,n}}}, \qquad (4.2)$$

где $\overline{Z}_{TM_{1,1}}$ — полные сопротивления TM-волн, распространяемые в диэлектрике. Просмотр сверху корпуса соответствует направлению линии передачи. Корпус бу-

дет резонировать, когда равны нулю полное сопротивление и величина, ему обратная, т. е. проводимость.

Параметры для расчета:
P1 — имя EM-структуры (структура с 1—1000 портами);
P2 — индекс волны типа N (целое число от 1 до 99);
P3 — индекс волны типа M (целое число от 1 до 99).

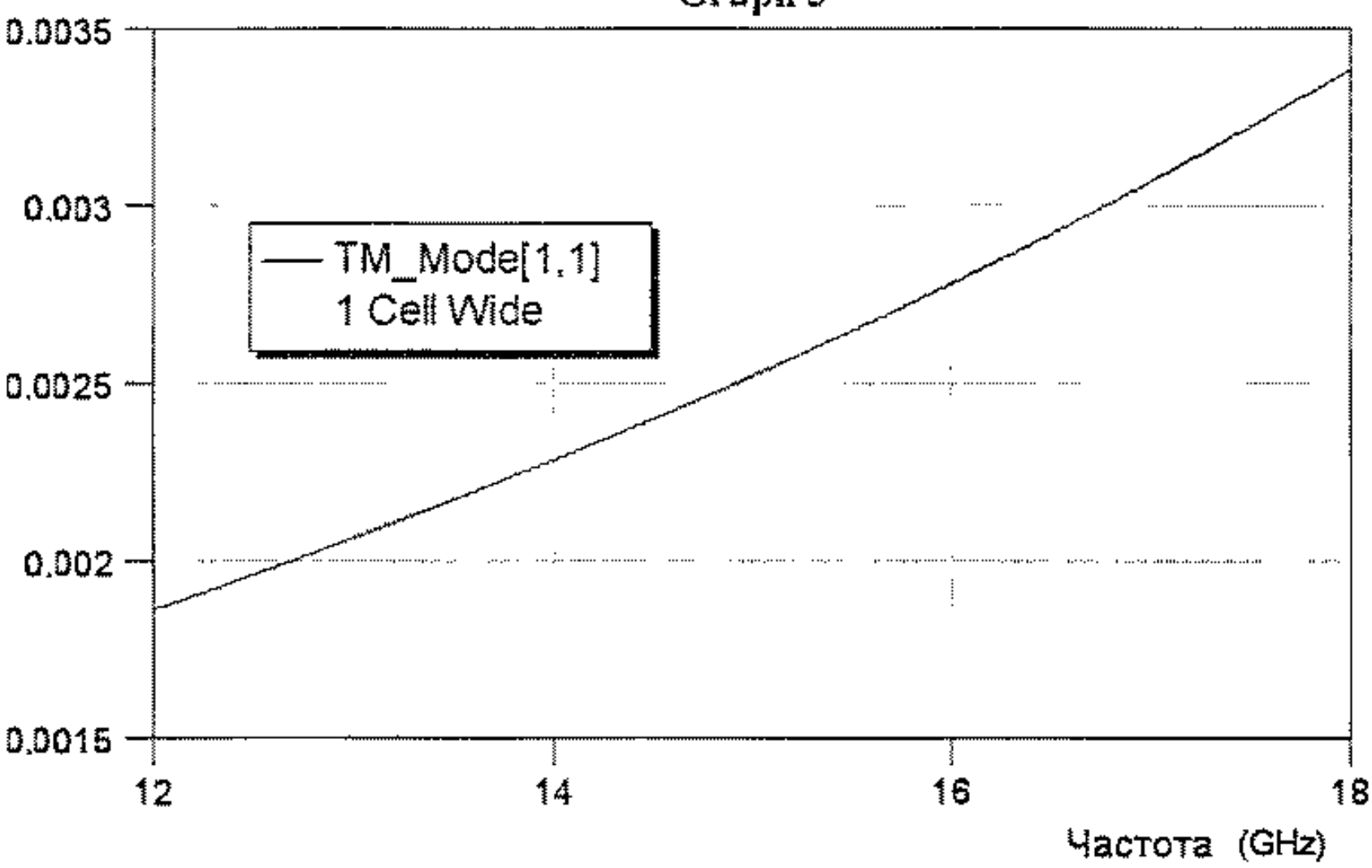


Рис. 4.8. Характеристика волны TM_MODE [1,1]

Эти характеристики — действительные числа. При их расчете по оси *X* откладывается частота, как показано на рис. 4.5.

4.9. Импедансы портов

Zin_Port — это характеристическое сопротивление отрезка линии передачи, подключенной к данному порту. Для расчета **Zin_Port** должен быть задан номер порта. Режим исключения (de-embedding) выполняется после расчета портовых полных сопротивлений. Если исключение не выполняется, то расчет полного портового сопротивления выдаст сообщение об ошибке. Комплексное сопротивление в сечении порта равно

$$Z_{port} = \frac{V}{I}, \tag{4.3}$$

где V — потенциал проводника порта, I — ток, втекающий в порт. Характеристика **Zin_Port** справедлива только для одного порта на стороне. Если имеется больше, чем один порт на стороне, то расчет останавливается и выдается сообщение об ошибке.

Параметры для расчета:
P1 — имя EM-структуры (структура с 1 — 1000 портами);
P2 — индекс входного порта (целое число от 1 до 1000).

Импеданс порта — комплексное число, оно может быть показано на диаграмме Смита, в полярных координатах или в таблице.

Можно вывести на прямоугольный график реальную, мнимую часть, модуль и угол импеданса порта. Ось X для этого расчета — частота.

Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие может также быть показаны на прямоугольном графике. Пример входного сопротивления реального СВЧ фильтра показан на рис. 4.6.

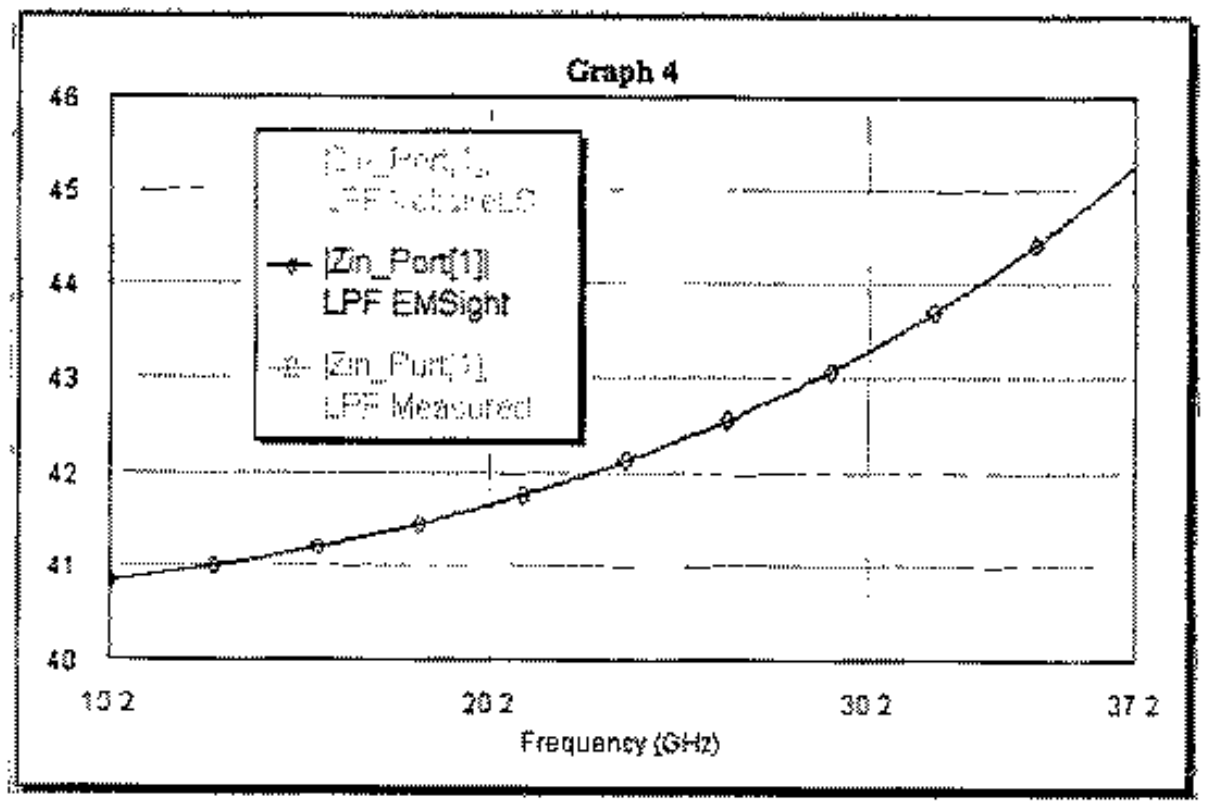


Рис. 4.9. Частотная зависимость модуля входного сопротивления фильтра

4.10. Характеристики излучения антенн

Программа **EMSight** рассчитывает диаграммы направленности (ДН) антенн в дальней зоне излучения. В режиме расчета интегральных схем **EMSight** помещает идеальный электрический проводник (PEC) на верхней и нижней границах корпуса. Так как боковые стенки всегда идеальные, структура полностью закрыта идеальным проводником, и никакое излучение во вне невозможно.

Чтобы обеспечить излучение в бесконечность, мы должны смоделировать верхнюю поверхность как разомкнутую или открытую границу. Если верхняя поверхность корпуса имеет граничное условие как открытый корпус, то тангенциальная составляющая электрического поля сверху корпуса (тангенциальное поле на границе поглощения) может использоваться, чтобы вычислить ДН в дальней зоне излучения. Процесс вычислений состоит из двух шагов. Первый шаг — вычисление тангенциальной составляющей электрического поля. Этот шаг выполняется, используя условие открытой границы, устанавливаемое в диалоговом окне **Substrate Information** (рис. 4.10).

Первый возможный тип границы — резистивная граница. Может использоваться резистивный материал 377 Ом на квадрат, чтобы обеспечить аппроксимацию на границе свободного пространства. Приближение величины 377 Ом состоит в

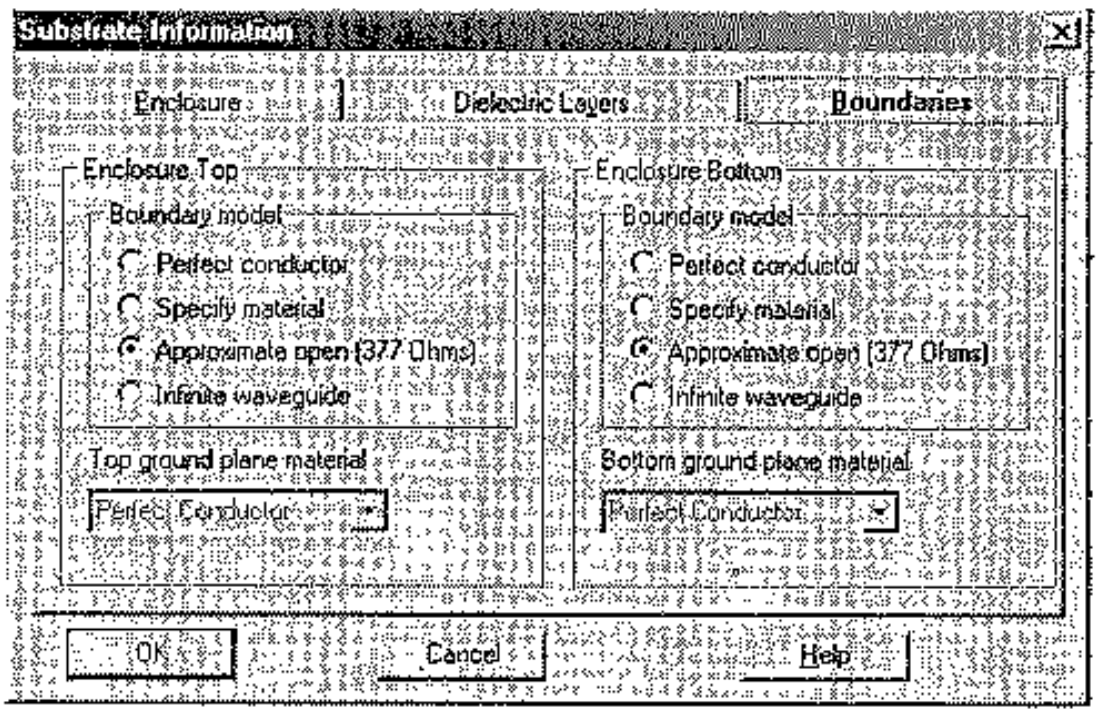


Рис. 4.10. Задание граничных условий для планарной спиральной антенны

том, что эта величина определяется только для нормального направления и без присутствия боковых стенок. Однако на практике использование граничного условия 377 Ом для общего случая дает приемлемые результаты.

Второй возможный способ задания граничных условий — это граничное условие, которое бы имело место, если бы боковые стенки простирались до бесконечности. Это условие эквивалентно бесконечно длинному волноводу. Приближение этого условия — присутствие боковых стенок.

Для получения точной ДН важно то, что вычисленное тангенциальное поле E в верхнем сечении корпуса очень близко к полю E, распространяющемуся в свободном пространстве. Бесконечная нагрузка волновода обеспечивает приемлемое приближение для тангенциального E поля, пока граница не слишком далека от излучателя. Тангенциальное поле E, вдали от элемента излучения, будет всегда похоже на поле основных типов волн волновода, когда расстояние между вершиной корпуса и излучателем увеличивается. Когда излучатель расположен достаточно далеко, будет получена ДН открытого прямоугольного волновода при использовании бесконечной нагрузки. Пример выбора рассчитываемых характеристик антенны приведен на рис. 4.11. Условные обозначения, принятые в графе **Measurement** диалогового окна выбора рассчитываемых характеристик антенны, поясняются в табл. 4.2.

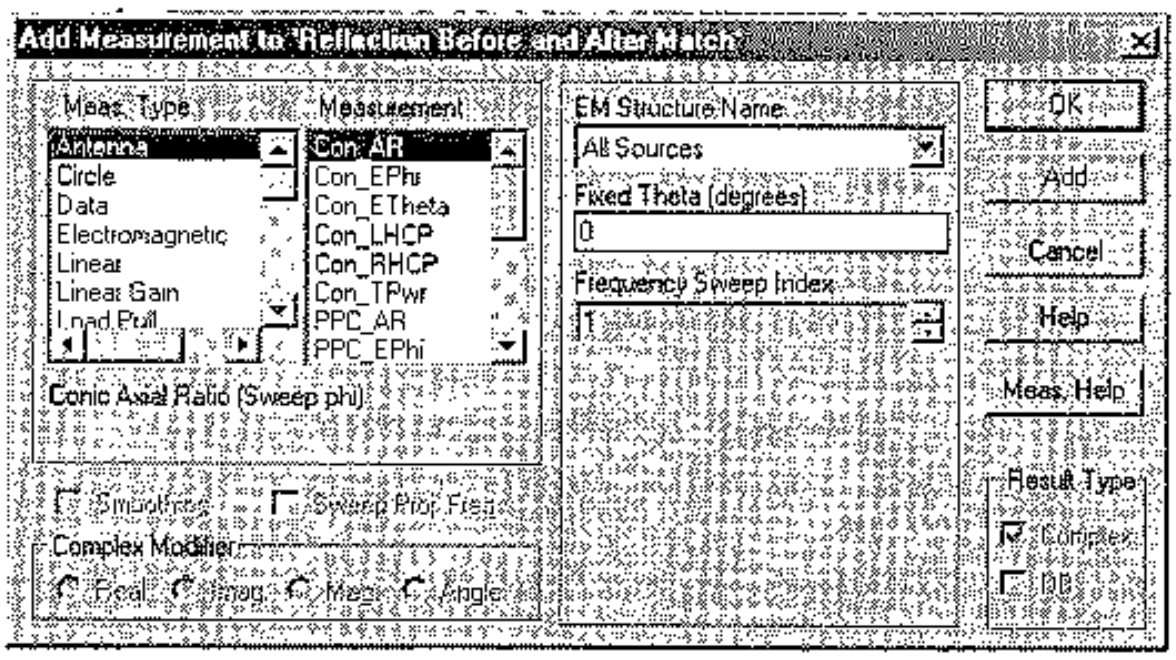


Рис. 4.11. Выбор рассчитываемых характеристик антенны

Таблица 4.2. Рассчитываемые характеристики антенны

Con_AR	Коническое осевое отношение (при изменении ϕ)
Con_EPhi	Диаграмма направленности антенны по составляющей поля E-Phi (при изменении угла ϕ)
Con_ETheta	Диаграмма направленности по составляющей поля E-Theta (при изменении угла ϕ).
Con_LHCP	Коническое сечение ДН антенны с левой круговой поляризацией (при изменении угла ϕ)
Con_RHCP	Коническое сечение ДН антенны с правой круговой поляризацией (при изменении угла ϕ)
Con_TPwr	Общая излучаемая мощность (изменение угла ϕ)
PPC_AR	Осевое отношение в азимутальной плоскости(при изменении θ)
PPC_EPhi	Диаграмма направленности E-Phi в азимутальной плоскости (при изменении θ)
PPC_ETheta	Диаграмма направленности E-Theta в азимутальной плоскости (при изменении θ);
PPC_LHCP	Левосторонняя круговая поляризация
PPC_RHCP	Правосторонняя круговая поляризация (при изменении θ);
PPC_TPwr	Общая излучаемая мощность (при изменении угла θ);
SF_AR	Осевое отношение (в полосе частот);
SF_EPhi	Диаграмма направленности составляющей поля E-Phi (в полосе частот);
SF_ETheta	Диаграмма направленности составляющей поля E-Theta (в полосе частот);
SF_LHCP	Частотная зависимость левосторонней круговой поляризации;
SF_RHCP	Частотная зависимость правосторонней круговой поляризации;
SF_TPwr	Общая излучаемая мощность (в полосе частот);

Второй этап решения включает определение ДН из тангенциального E поля. При использовании теоремы эквивалентности и условий отражения можно сформулировать задачу нахождения функции излучения как листа магнитного потока, который лежит близко к половине идеально проводящей плоскости. Из этого листа можно получить ДН в дальней зоне. Отметим, что задача, используемая для нахождения магнитных потоков, не совсем эквивалентна задаче, используемой, для вычисления поля излучения. По этой причине трудно получить абеолютные значения излучаемых полей, и все характеристики излучения дают неточное значение абсолютной излучаемой мощности. Вообще, это неважно, так как обычно наибольший интерес представляет нормированная ДН. При расчете ДН она автоматически нормируется.

Плоская антенна, конструкция которой состоит из 2-х слоев, показана на рис. 4.12.

Для антенн с идеальными проводниками излучаемая мошность будет в точности равняться полной мощности структуры (это можно легко доказать с помощью *S*-параметров). Если нужно вычислить омические или диэлектрические потери антенны, рекомендуется решить две задачи.

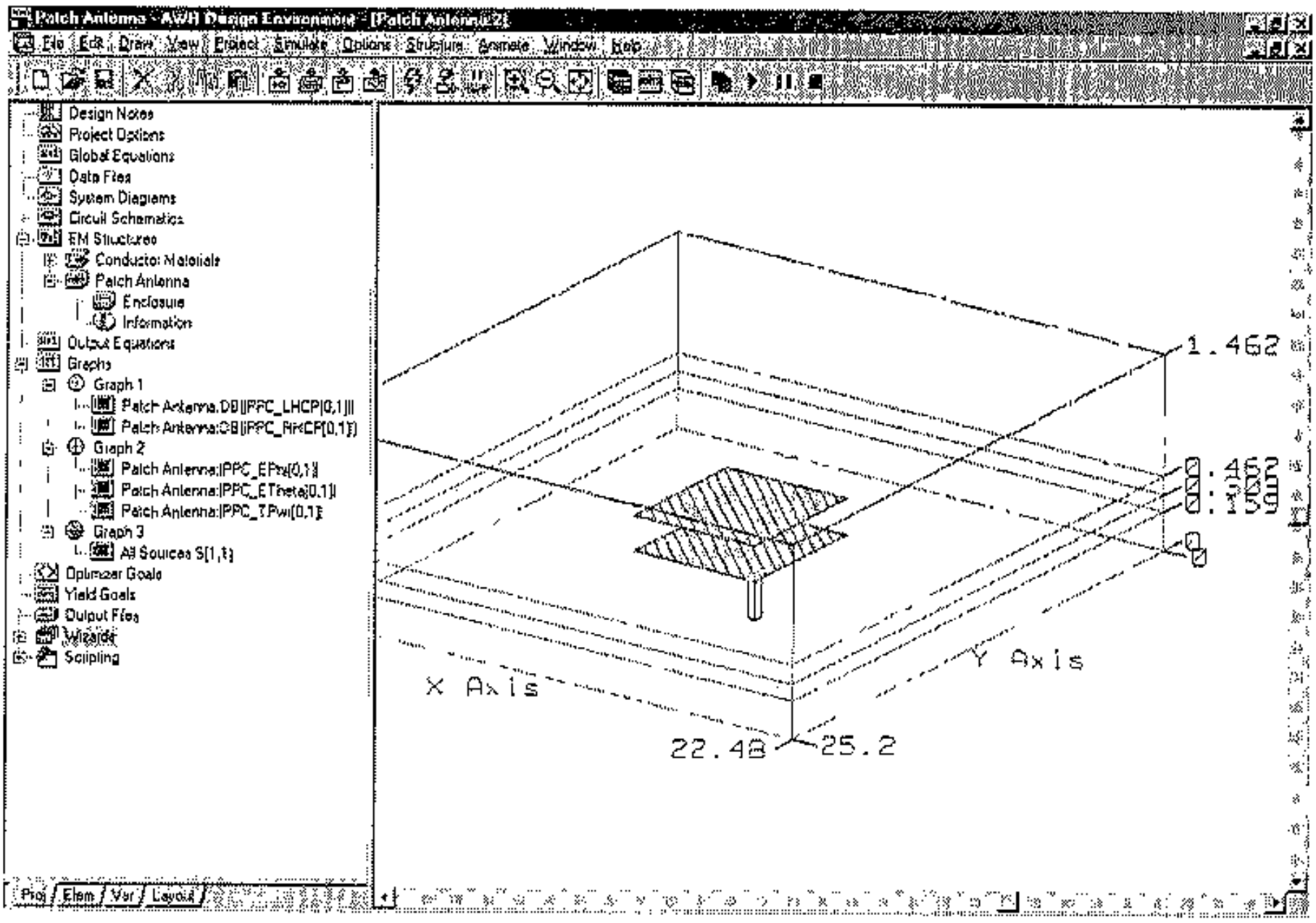


Рис. 4.12. Микрополосковая антенна

В одной из задач должен использоваться PEC излучатель (без диэлектрических потерь), а также проводник и/или диэлектрик с потерями, которые используются в реальных антеннах. Разница излучаемых мощностей в этих двух случаях может использоваться для вычисления омических или диэлектрических потерь в антенне. Система координат для плоской антенны показана на рис. 4.13, а для спиральной антенны на рис. 4.14. Могут быть рассчитаны два типа характеристик.

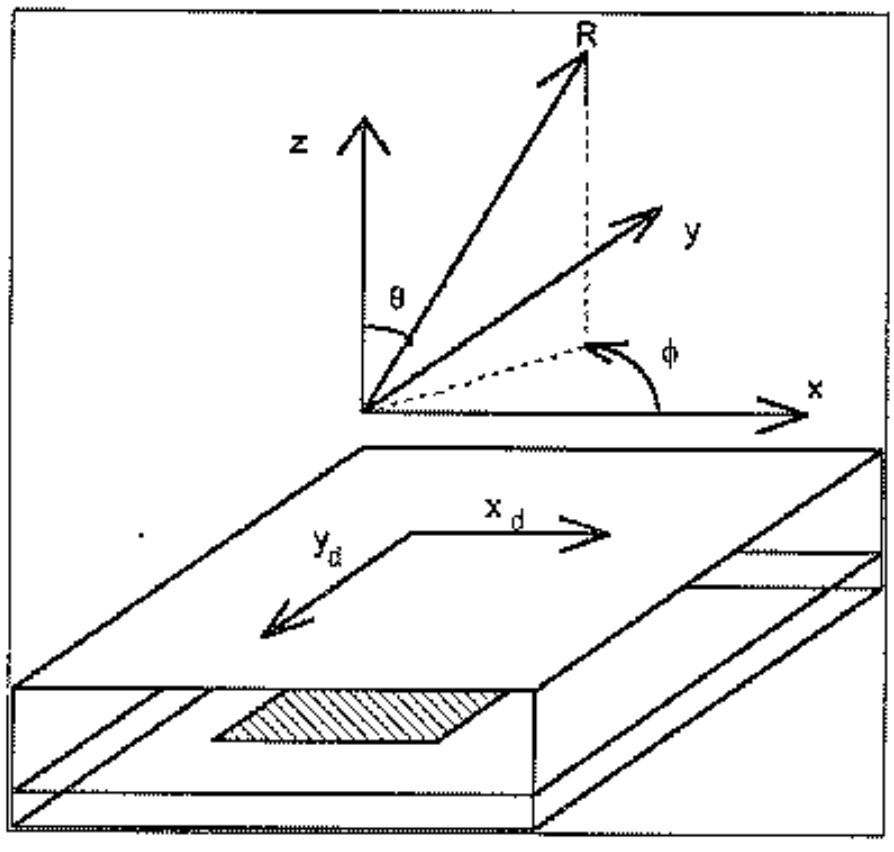


Рис. 4.13. Координаты при расчете диаграммы направленности антенны

Первая позволяет выбрать величину ϕ и затем найти угломестную ДН как функцию θ. Второй подход предполагает выбор величины θ и затем нахождение ДН как функции ϕ (азимутальная диаграмма направленности в коническом сечении).

Правила анализа антенн

Поскольку **EMSight** рассчитывает поля внутри металлического бокса, необходимо сделать несколько предположений, учитываемых при вычислении функции излучения. Одно из них состоит в том, что боковые стенки корпуса расположены достаточно далеко и что они не имеют значительного влияния на электрическое поле на границах корпуса. Всегда желательно просмотреть электрическое поле на верхней границе корпуса после анализа антенны. Это позволяет быстро проверить справедливость высказанного предположения. Если величина электрического поля вблизи стенок корпуса очень мала, то высказанное предположение справедливо. Если же электрическое поле на ближней грани относительно велико, то поля взаимодействуют с боковыми стенками, и это предположение не имеет силы.

Пример плоской спиральной антенны показан на рис. 4.14.

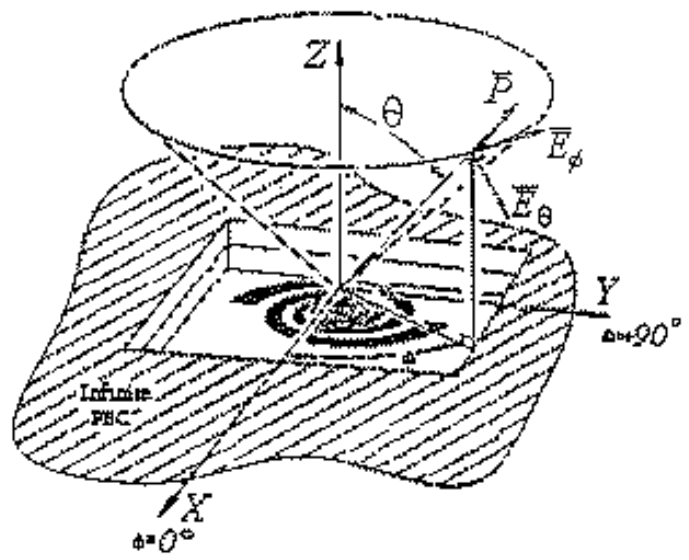


Рис. 4.14. Спираяьная антенна и составляющие поля в даяьней зоне

4.10.1. Коническое осевое отношение (при изменении ϕ): Con_AR

Эта характеристика есть осевое отношение для конического сечения. Значения частоты и угла θ зафиксированы, а угол ϕ изменяется от $-180°$ до $180°$.

Параметры:

имя EM структуры: структура или подсхема с 1—1000 портами;

фиксированный угол θ (градусы): (от $-90°$ до $90°$);

индекс частоты: целое число от 1 до 1000.

Эта характеристика возвращает комплексное значение, которое представляет осевое отношение по срезу конического сечения. Хотя осевое отношение — реальное число, она возвращается как комплексное значение, чтобы быть совместимой с другими антенными характеристиками. Осевое отношение определено как абсолютное значение суммы правой круговой поляризации (RHCP) E-поля и левой круговой поляризации (LHCP) E-поля, разделенное на разность этих же величин.

$$AR = \left| E_{RHCP} + E_{LHCP} \Big/ E_{RHCP} - E_{LHCP} \right|. \tag{4.4}$$

Это комплексная характеристика может быть выведена на таблицу. Величина может быть отображена на ДН антенны, прямоугольной сетке или таблице. Угол, реальный, или мнимые составляющие может также быть отображен на прямоугольном графике или в таблице.

Сглаживание не позволяется для этой характеристики, в расчете используются только заданные частоты.

4.10.2. Диаграмма направленности касательной компоненты поля E-Phi (при изменении ϕ): Con_EPhi

Эта характеристика есть диаграмма направленности по коническому срезу или при изменении ϕ, и она рассчитывается при фиксировании значения частоты и θ, и при изменении ϕ от −180° до 180° или — π до π в радианах.

Параметры расчета:
имя ЕМ структуры: подсхема от 1 до1000 портов;
фиксированный угол θ (в градусах): значение от 0° до 90°;
индекс частоты: целое число от 1 до 1000.

Эта характеристика есть комплексное значение, которое представляет нормированное излучение поля в дальней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормализован к $\sqrt{P_{cp}}$, где P_{cp} — суммарная мощность излучения (всех поляризаций) в верхнем полушарии, разделенная на 4π:

$$P_{cp} = \frac{1}{8\pi}\,\mathrm{Re}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2}(E_\theta H_\phi^* - E_\phi H_\theta^*)\sin\theta\; d\theta d\phi, \tag{4.5}$$

$$result = \frac{E_\phi(\theta,\phi)}{\sqrt{240\pi P_{cp}}}\Big|_{\theta=const,\,-180°\le\phi\le180°}. \tag{4.6}$$

Эта характеристика не учитывает влияние рассогласования или резистивных потерь. Результат — пропорционален диаграмме направленности (ДН) в указанном направлении, так что $|result|^2$ является часть области в этом конкретном направлении. Это позволяет моделировать антенные решетки этих элементов, непосредственно суммируя комплексные результаты нескольких элементов. Важно, что фазовый центр этой характеристики зафиксирован в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге выбора характеристики. Это значение может также быть отображено в дБ, выбирая опцию «DB» (в диалоговом окне Add/Modify Measurement), и в этом случае будет выведено 20 log (|result|). В данном разделе большинство характеристик будут относиться к директорной антенне, изображенной на рис. 4.15.

Комплексная характеристика **Con_EPhi** может быть отображена в таблице. Модуль может быть отображен на антенной диаграмме (рис. 4.16), прямоугольном графике или таблице. Угол, реальная или мнимая составляющие могут также быть отображены на прямоугольном графике или таблице.

Во время расчета P_{cp} может быть выведено предупреждение, что очень длительное вычисление происходит на указанной частоте. Тогда будет показано сообщение «Increased Accuracy Required: dAngle=value (требуется увеличенная точность)». Это сообщение предупреждает, что средняя мощность несколько раз пересчитывается с увеличенной точностью, и угловой шаг, используемый в численном интегрировании, уменьшен наполовину (рис. 4.17).

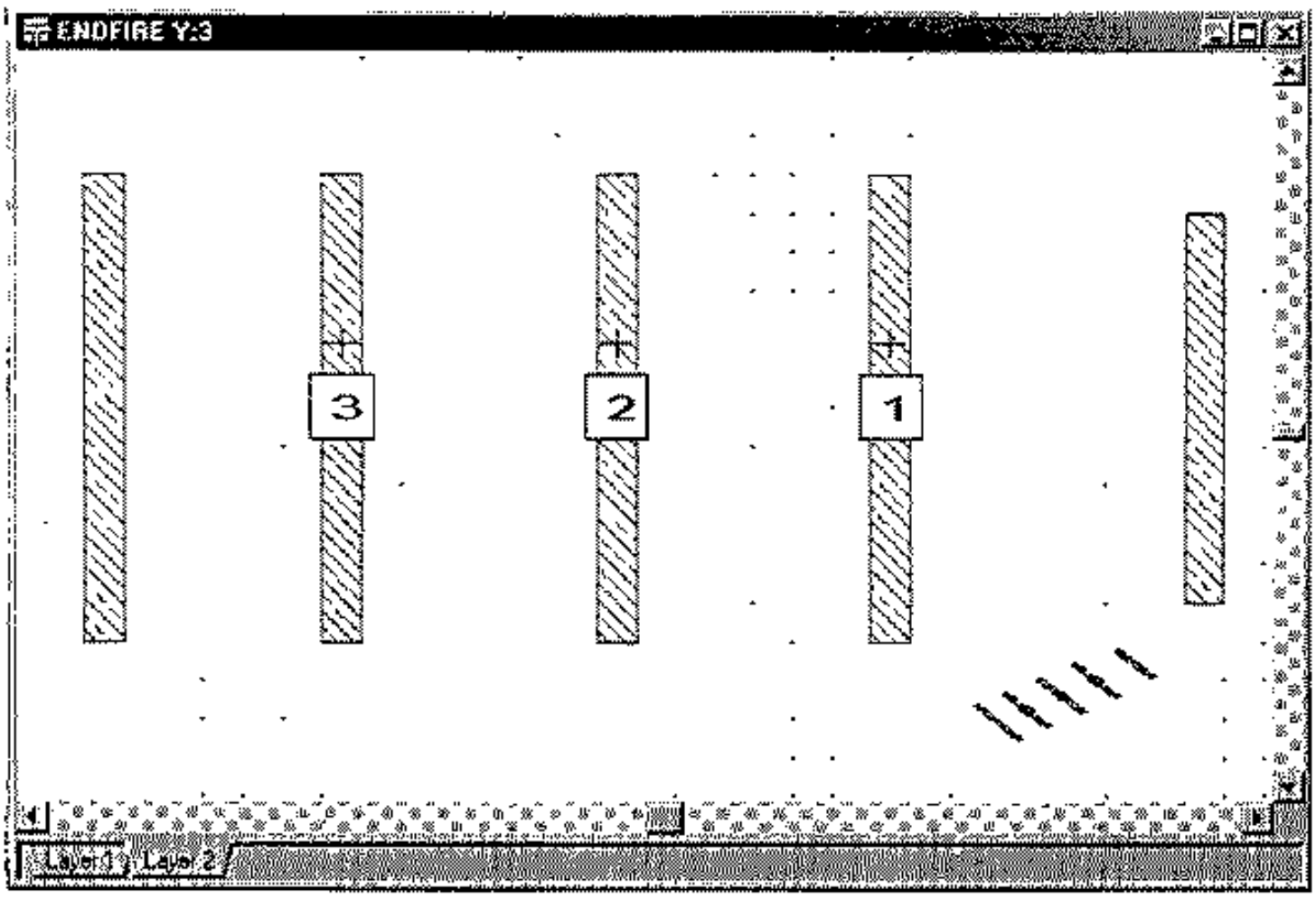


Рис. 4.15. Микрополосковая директорная антенна с тремя источниками возбуждения

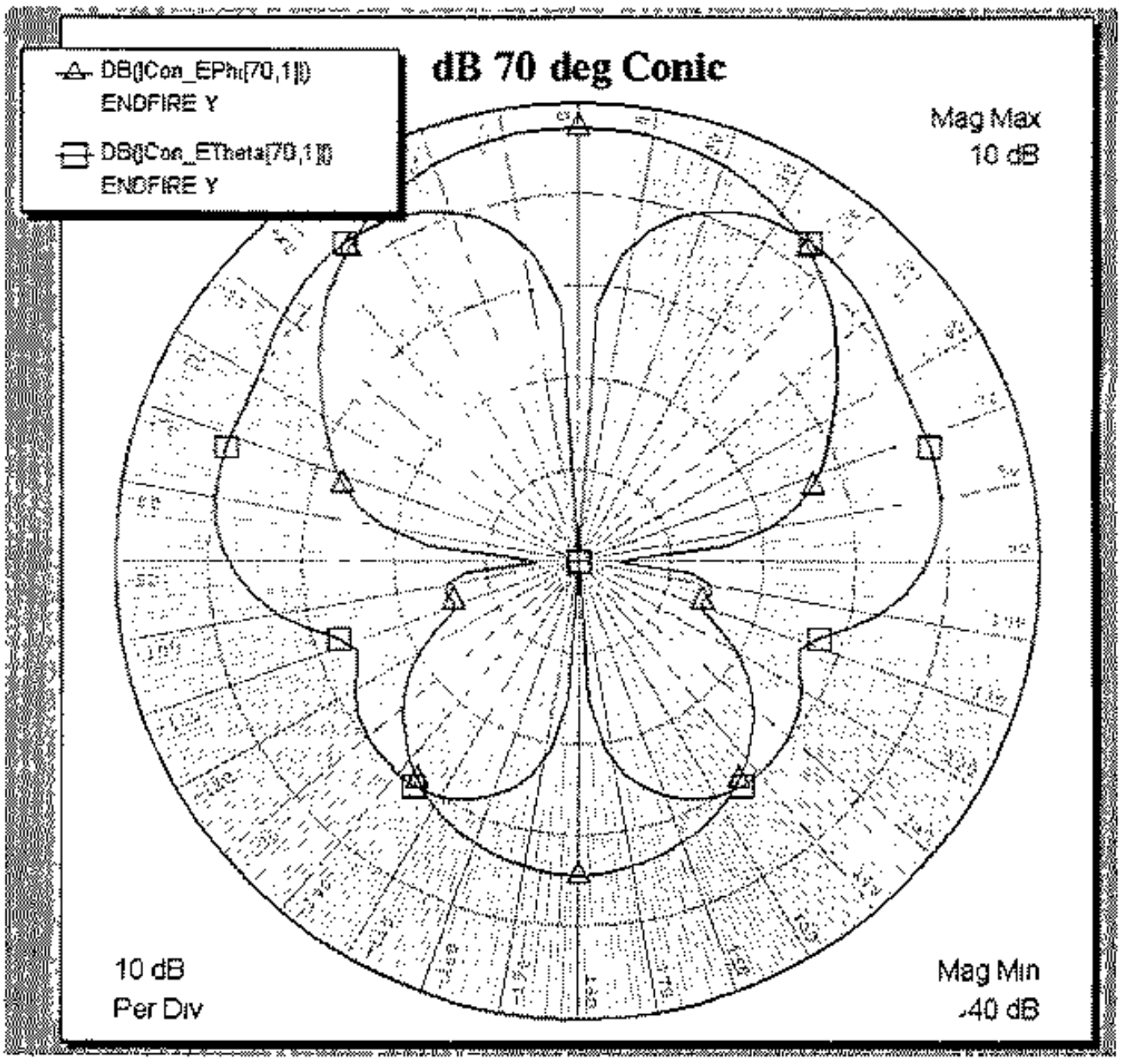


Рис. 4.16. Диаграмма направленности, рассчитанная по компоненте Eϕ для антенны рис. 4.15 на частоте 4.9 ГГц

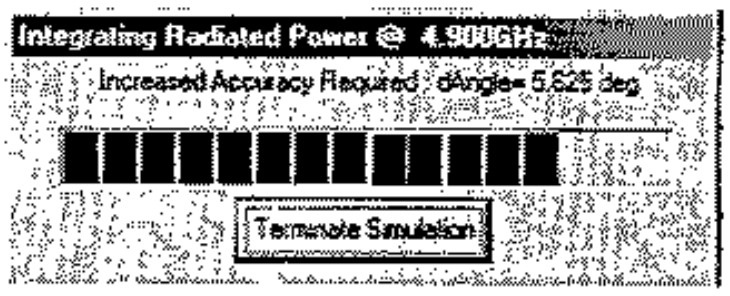


Рис. 4.17. Прогресс расчета общей излучаемой мощности антенны

4.10.3. Диаграмма направленности E-теты (при изменении Phi): Con_ETheta

Эта характеристика также называется азимутальная ДН или ДН, зависимая от угла ϕ, поля в дальней зоне E_θ, и рассчитывается при фиксированном значении частоты и θ, и при изменении ϕ от $-180°$ до $180°$ или $-\pi$ до π в радианах.

Для того чтобы задать расчет характеристики Con_ETheta, необходимо установить:

P1: Имя EM структуры — подсхема от 1 до 1000 портов;

P2: Фиксированный угол θ (градусы) — от 0° до 90°;

P3: Индекс частоты — целое число от 1 до 1000.

Эта характеристика является комплексной и представляет нормированное излучение поля в дальней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормализован к $\sqrt{P_{cp}}$ от суммарной мощности (формула 4.5) в верхнем полушарии:

$$result = \frac{E_\theta(\theta,\phi)}{\sqrt{240\pi P_{cp}}}\Big|_{\theta=const,\,-180°\le\phi\le180°}. \qquad (4.7)$$

Расчет не учитывает рассогласование и резистивные потери антенны, так что величина $|result|^2$ является направленностью антенны в конкретном направлении. Это позволяет создавать антенные решетки этих элементов, непосредственно прибавляя комплексные результаты множественных элементов. Важно, что фазовый центр зафиксирован в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоговом окне Add/Modify Measurement. Для анализируемой антенны рис. 4.15, характеристика **Con_Etheta** приведена на рис. 4.16.

4.10.4. Левая круговая поляризация (изменение угла Phi): Con_LHCP

Эта характеристика также известна как азимутальная диаграмма направленности с левой круговой поляризацией, и рассчитывается на фиксированной частоте и θ, и при изменении ϕ от $-180°$ до $180°$. **Con_LHCP** — линейная комбинация E_θ и E_ϕ:

$$LHCP(\theta,\phi) = \frac{E_\theta - jE_\phi}{\sqrt{2}}. \qquad (4.8)$$

Для расчета характеристики необходимо задать:
имя EM структуры; подсхема от 1 до1000 портов;
фиксированный угол θ (градусы): от 0° до 90°;
индекс частоты: целое число от 1 до 1000.

Эта характеристика возвращает комплексное значение, которое представляет нормированное поле излучения в дальней зоне в указанном направлении и поляризации.

$$result = \frac{LHCP(\theta,\phi)}{\sqrt{240\pi P_{ep}}}\Big|_{\theta=const,\,-180°\le\phi\le180°} \tag{4.9}$$

Этот расчет не учитывает рассогласования или резистивных потерь, а величина $|result|^2$ является частичной направленностью в этом конкретном направлении. Это позволяет создавать антенные решетки этих элементов, просто прибавляя комплексные результаты нескольких элементов. Важно, что фазовый центр зафиксирован в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, определяя величину, угол, реальный или мнимую составляющую в диалоге измерения. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию «dB».

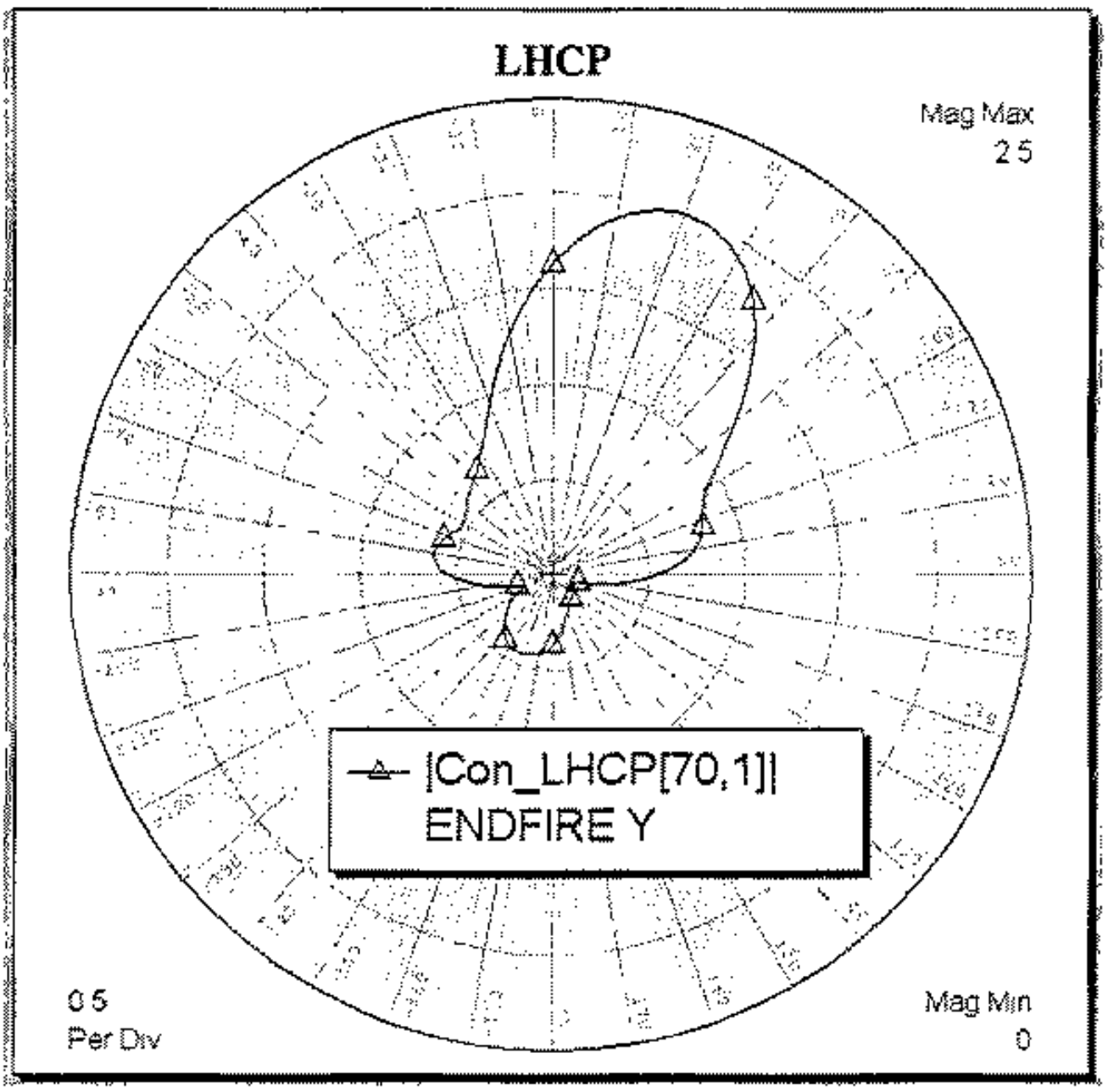


Рис. 4.18. Азимутальная диаграмма направленности параметра LHCP антенны рис. 4.15

4.10.5. Правостороннаяя круговая поляризвция (при изменении Phi): Con_RHCP

Эта характеристика — азимутальный срез трехмерной диаграммы направленности, рассчитанный при изменении угла азимута ϕ с правосторонней круговой поляризацией. Эта характеристика рассчитывается для фиксированного значения частоты и при изменении ϕ от -180° до 180° или $-\pi$ до π в радианах. Круговая поляризация RHCP — это линейная комбинация составляющих поля E_θ и E_ϕ:

$$LHCP(\theta,\phi) = \frac{E_\theta + jE_\phi}{\sqrt{2}}. \qquad (4.10)$$

Для расчета характеристики необходимо задать:
имя EM структуры: подсхема от 1 до1000 портов;
фиксированный угол ϕ: ревльное значение от 0° до 90°;
индекс частоты: целое число от 1 до 1000.

Эта характеристика является комплексным значением, которое представляет нормированную радиацию поля в дальней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормирован к интегральной мощности (4.5):

$$result = \frac{RHCP(\theta,\phi)}{\sqrt{240\pi P_{cp}}}\Big|_{\theta=const,\,-180^\circ\le\phi\le180^\circ}. \qquad (4.11)$$

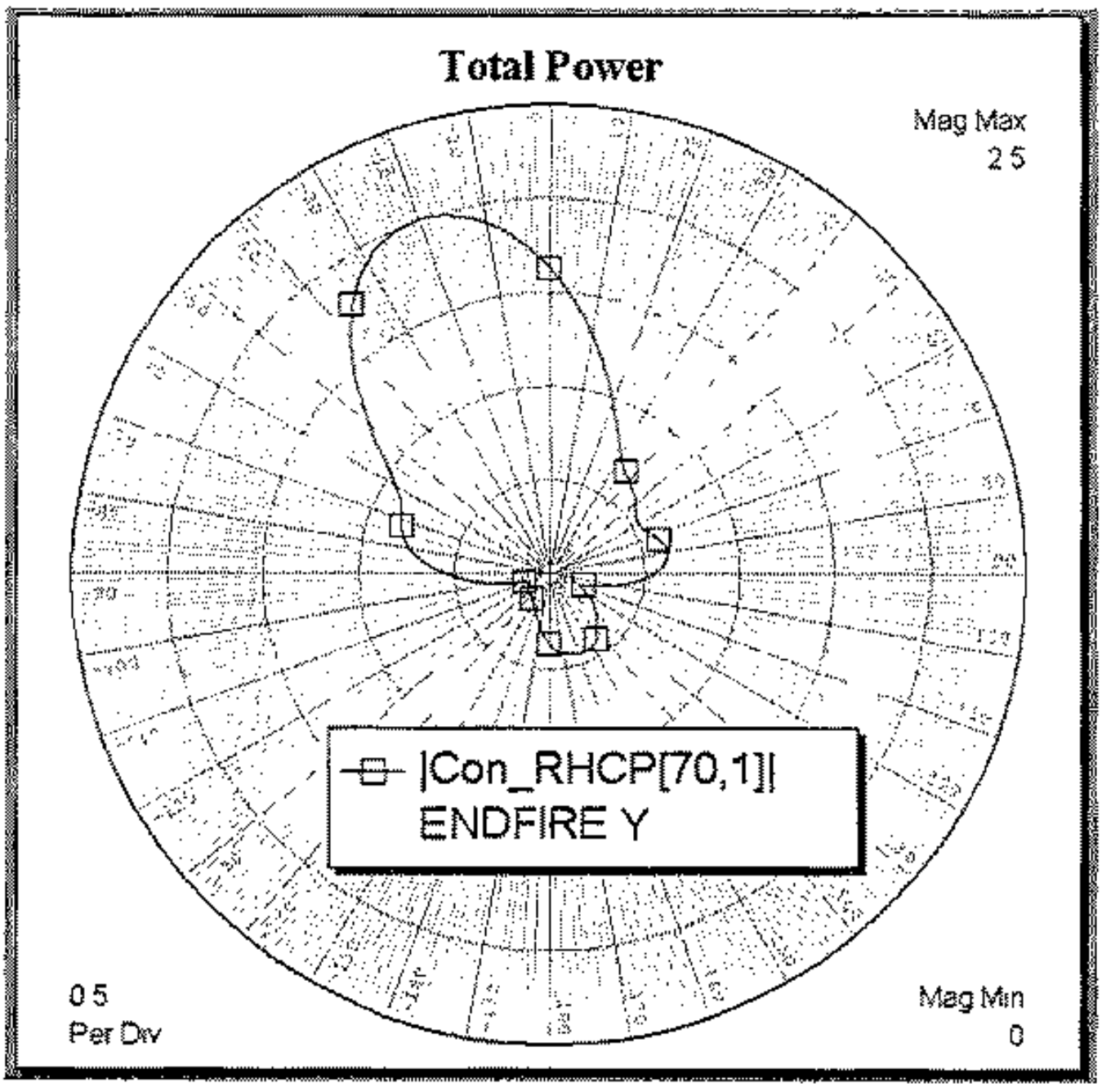


Рис. 4.19. Азимутальная диаграмма направленности поля с правосторонней круговой поляризацией

Характеристика (рис. 4.19) не отражает влияние рассогласования или резистивных потерь. Результат — эквивалент волновой переменной в указанном направлении, так, что $|result|^2$ является частичной направленностью в этом направлении. Это позволяет создавать антенные решетки этих элементов, непосредственно прибавляя комплексные результаты нескольких элементов. Важно, что фазовый центр зафиксирован в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, определяя модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальное значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию 'dB'. Независимая ось для этого измерения находится в угловых единицах.

Это комплексная характеристика может быть отображена в таблице.

4.10.6. Полная мощность излучения (при изменении ϕ): Con_TPwr

Это азимутальная диаграмма направленности по коническому срезу или при изменении ϕ, рассчитывает полную мощность во всех направлениях, фиксируя значения частоты и θ при изменении ϕ от $-180°$ до $180°$ или от $-\pi$ до π (в радианах). Полная мощность определена как сумма мощности, содержащейся в комбинации E_θ и E_ϕ:

$$TPwr = \frac{1}{240\pi}\left(|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2\right). \tag{4.12}$$

Для расчета характеристики необходимо задать:
имя EM структуры: подсхема от 1 до 1000 портов;
фиксированный угол θ (градусы): реальное значение от $-90°$ до $90°$;
индекс частоты: целое число от 1 до 1000.

Эта характеристика (рис. 4.20) возвращает комплексное значение, которое представляет нормированное излучение поля в дальней зоне в указанном направлении для всех поляризаций. Этот результат нормализован к суммарной мощности (4.5):

$$result = \sqrt{\frac{TPwr(\theta,\phi)}{P_{cp}}}. \tag{4.13}$$

Величина $|result|^2$ есть направленность в конкретном направлении. Результат может быть отображен как ревльное значение, задавая модуль, или вещественную составляющую в диалоге измерения. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию «dB», которая показывает 20 log ($|result|$).

Величина или вещественная составляющая могут также быть отображены на антенном чертеже, прямоугольном графике или таблице.

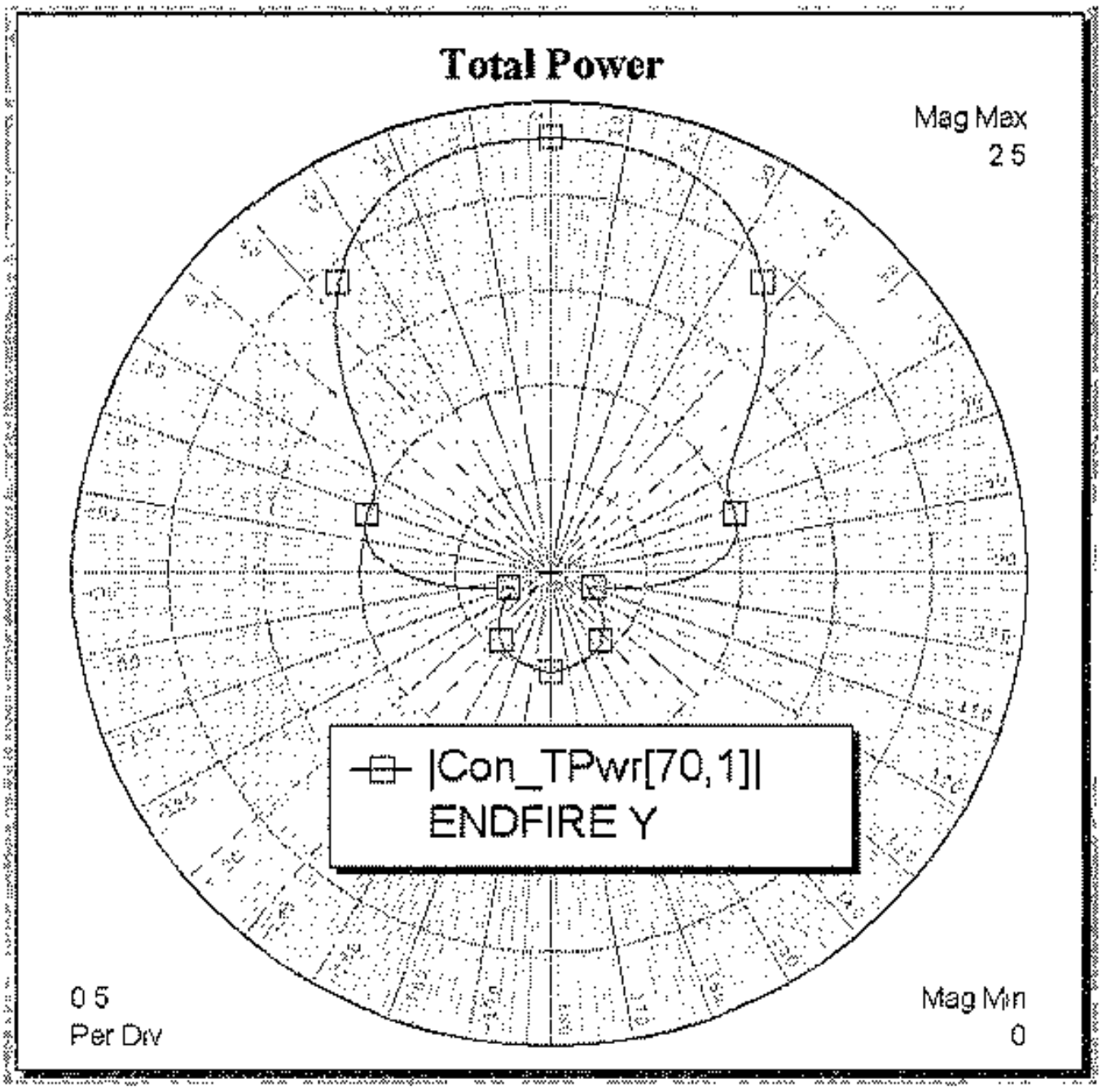


Рис. 4.20. Азимутальная диаграмма направленности полной мощности

4.10.7. PPC осевое отношение (изменение угла Тета): PPC_AR

Эта характеристика есть срез диаграммы направленности по вертикальному сечению. Значения частоты и ϕ зафиксированы (рис. 4.21), а угол θ изменяется от -90° до 90° или от $-\pi/2$ до $\pi/2$ (в радианах).

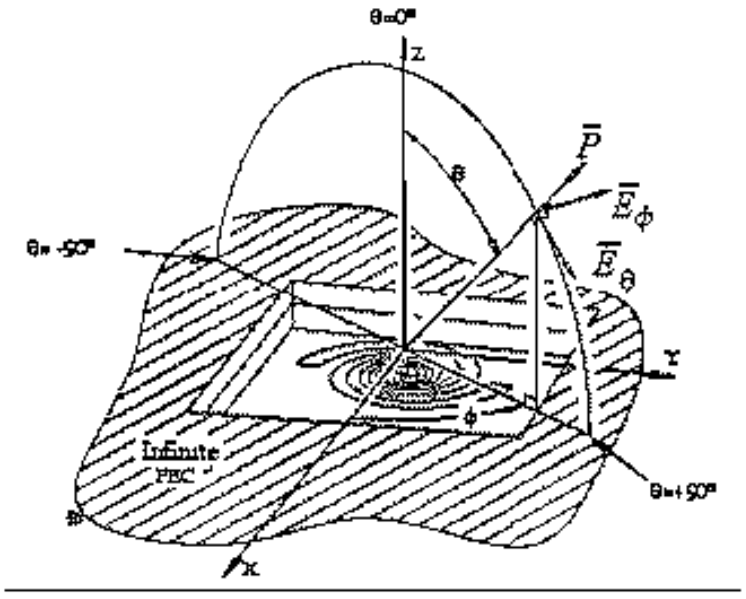


Рис. 4.21. Схема расчета угломестной диаграммы направленности антенны

Для расчета характеристики необходимо задать:

имя ЕМ структуры: подсхема от 1 до1000 портов;

фиксированный угол ϕ (градусы): реальное значение От -90° до 90°;

индекс изменения частоты: целое число От 1 до 1000.

Эта характеристика возвращает комплексное значение, которое представляет осевое отношение по разрезанной плоскости симметрии. Хотя осевое отношение — реальная величина, оно рассчитывается как комплексное значение, чтобы остаться совместимым с

другими характеристиками антенн. Осевое отношение определено как абсолютное значение суммы E-поля правой круговой поляризации (RHCP) и E-поля левой круговой поляризации (LHCP), разделенные разностью.

Это комплексная характеристика может быть отображена в таблице. Модуль может быть отображен на диаграмме направленности, прямоугольном графике или таблице. Угол, реальный, или мнимые составляющие могут также быть отображены на прямоугольном графике или таблице.

Осевое отношение рассчитано как

$$AR = \left| E_{RHCP} + E_{LHCP} \Big/ E_{RHCP} - E_{LHCP} \right|. \tag{4.14}$$

Сглаживание не позволяется для этого расчета. Эта характеристика всегда использует частоты, заданные в проекте.

4.10.8. Угломестная диаграмма направленности E-Phi (при изменении Тета): PPC_EPhi

Эта характеристика (рис. 4.22) определяется как срез по горизонтальной плоскости или развертке по углу θ, поляризованный по E_ϕ. Эта характеристика устанавливает значения частоты и Phi при изменении θ от −90° до 90° или $-\pi/2$ до $\pi/2$ в радианах.

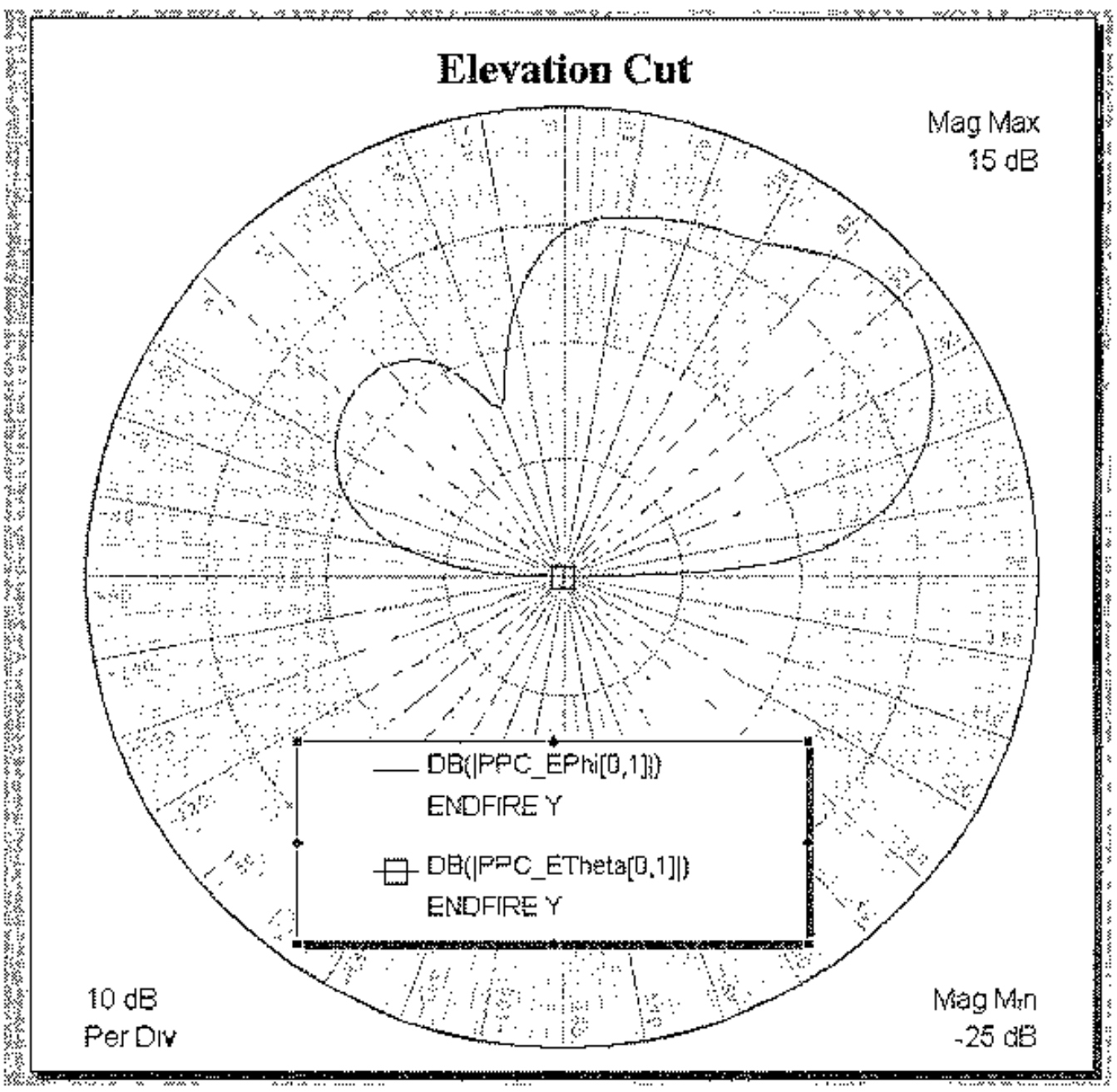


Рис. 4.22. Угломестная диаграмма направленности антенны рис. 4.15

Задание на расчет характеристики PPC_EPhi:
имя EM структуры: подсхема 1 to1000 порты;
фиксированные ϕ (градусы): реальное значение от −90° до 90°;
индекс частоты: целое число от 1 до 1000.

Эта характеристика возвращает комплексное значение, которое представляет нормированное излучение поля в дальней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормирован к интегральной мощности (4.5):

$$result = \frac{E_\theta(0,\phi)}{\sqrt{240\pi P_{cp}}}\Big|_{\phi=const,\,-90°\le\phi\le90°} \qquad (4.15)$$

Эта характеристика не учитывает рассогласование или резистивные потери. Результат — эквивалент волновой переменной в указанном направлении, такой, что |result|² является частичной направленностью в этом конкретном направлении. Это позволяет создавать антенные решетки этих элементов, просто суммируя комплексные результаты нескольких элементов. Важно, что фазовый центр измерения зафиксирован в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, определяя модуль, угол, реальную или мнимую составляющую. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию «dB». Независимая ось для этого измерения находится в угловых единицах.

Это комплексная характеристика может быть отображена в таблице. Модуль, угол, реальная или мнимая составляющие может также быть отображена на диаграмме направленности, прямоугольном графике или таблице.

4.10.9. Диаграмма направленности E-теты (развертка Тета): PPC_ETheta

Эта характеристику можно назвать срезом горизонтальной плоскости трехмерной диаграммы направленности или ДН при изменении 0, поляризованной по E_θ. Эта характеристика фиксирует значение частоты и ϕ и изменяет θ от −90° до 90° или — π/2 до π/2 в радианах.

Для расчета характеристики необходимо задать:
имя EM структуры: подсхема от 1 до1000;
фиксированные ϕ (градусы): реальное значение от −90 до 90;
индекс частоты: целое число от 1 до 1000.

Эта характеристика возвращает комплексное значение, которое представляет нормированное поле излучения в дальней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормирован к интегрированной мощности (на всех поляризации) в верхнем полушарии, разделенном 4π:

$$result = \frac{E_\theta(\theta,\phi)}{\sqrt{240\pi P_{cp}}}\Big|_{\phi=const,\,-90°\le\phi\le90°} \qquad (4.16)$$

Характеристика не отражает влияние рассогласования или резистивных потерь. Результат — эквивалент волновой переменной в указанном направлении, такой, что |result|² яаляется частичной направленностью в этом направлении. Это позволяет создавать антенные решетки этих элементов, просто суммируя комплексные результаты нескольких элементов. Важно, что фазовый центр зафиксиро-

ван в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, определяя величину, угол, реальный или мнимую составляющую в диалоге измерения. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию «dB», которая показывает 20 log (|result|). Пример расчета угломестной диаграммы направленности показан на рис. 4.22.

4.10.10. Левосторонняя круговая поляризация (изменение Тета): PPC_LHCP

Эта характеристика (рис. 4.23) является диаграммой направленности по срезу горизонтальной плоскости при левосторонней поляризации или при развертке угла θ при фиксировании значения частоты и ϕ и изменении θ от $-90°$ до $90°$ или $-\pi/2$ до $\pi/2$ в радианах. Левосторонняя круговая поляризация — линейная комбинация E_θ и E_ϕ.

Для расчета характеристики необходимо задать:
имя EM структуры: подсхема 1 to1000 порты;
фиксированный угол ϕ (градусы): от $-90°$ до $90°$;
индекс частоты: от 1 до 1000.

Эта характеристика есть комплексное значение, которое представляет нормированное поле излучения в дальней зоне в указанном направлении и поляриза-

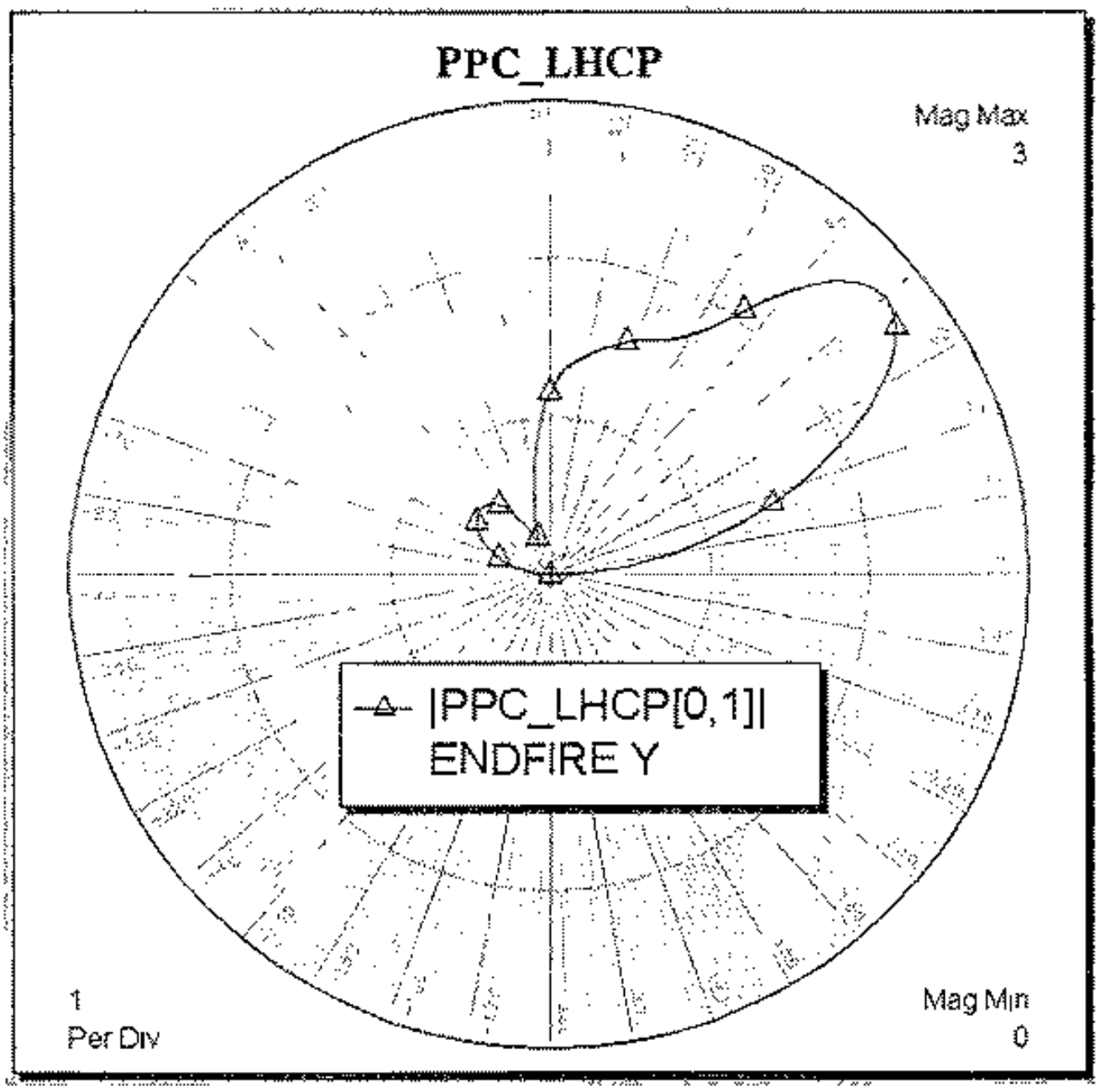


Рис. 4.23. Угломестная диаграмма направленности левосторонней поляризации антенны

ции. Этот результат, нормированный к интегральной мощности (4.5), рассчитывается по формуле:

$$result = \frac{LHCP(\theta,\phi)}{\sqrt{240\pi P_{cp}}}\Big|_{\phi=const,-90^\circ\le\phi\le90^\circ} \tag{4.17}$$

Эта величина не отражает влияние рассогласования или резистивных потерь. Результат — эквивалент волновой переменной в указанном направлении, такой, что $|result|^2$ является частичной направленностью в этом конкретном направлении. Это позволяет создавать антенные решетки этих элементов, непосредственно прибавляя комплексные результаты нескольких элементов. Важно, что фазовый центр измерения зафиксирован в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, определяя величину, угол, реальный или мнимую составляющую в диалоге измерения.

Эта комплексная характеристика может быть отображена в таблице. Модуль может быть отображен на антенном чертеже, прямоугольной сетке или таблице. Угол, реальный или мнимые составляющие может также быть отображен на прямоугольном графике или таблице.

4.10.11. Правостороння круговая поляризация (развертка по θ): PPC_RHCP

Также известная как срез плоскости симметрии или при угле θ ДН в правосторонней круговой поляризации, это измерение устанавливает значения частоты и Phi при перемещении θ от −90° до 90° или $-\pi/2$ до $\pi/2$ в радианах. ДН с правосторонней круговой поляризацией — это линейная комбинация E_θ и E_ϕ как определено ниже.

Для расчета характеристики необходимо задать:
имя EM структуры: подсхема от 1 до1000 портов;
фиксированные ϕ (градусы): реальное значение от −90° до 90°;
индекс частоты: целое число от 1 до 1000.

Это измерение возвращает комплексное значение, которое представляет нормированную радиацию поля в дальней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормирован к интегральной мощности (на всех поляризации) в верхнем полушарии, разделенном:

$$result = \frac{RHCP(\theta,\phi)}{\sqrt{240\pi P_{cp}}}\Big|_{\phi=const,-90^\circ\le\phi\le90^\circ} \tag{4.18}$$

Эта величина не отражает влияние рассогласования или резистивных потерь. Результат — эквивалент волновой переменной в указанном направлении, так, что $|result|^2$ является частичной направленностью в этом конкретном направлении. Это позволяет создавать антенные решетки этих элементов, непосредственно прибавляя комплексные результаты множественных элементов. Важно, фазовый центр измерения зафиксирован в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, определяя величину, угол, реальный или мнимую составляющую в диалоге измерения. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию «dB»

Для антенны рис. 4.15 диаграмма направленности PPC_RHCP совпадает с диаграммой направленности PPC_LHCP и соответствует рис. 4.23.

Эта комплексная характеристика может быть отображена в таблице. Модуль может быть отображен на антенном чертеже, прямоугольной сетке или в таблице. Угол, реальная или мнимая составляющие могут также быть отображены на прямоугольном графике или в таблице.

4.10.12. Полная мощность излучения (рвзвертка по Тета): PPC_TPwr

Эта характеристика известна как азимутальная диаграмма направленности или ДН при изменении θ. Эта характеристика рассчитывает полную мощность на всех поляризации, и устанавливает значения частоты и ϕ при изменении θ от −90° до 90° или $-\pi/2$ до $\pi/2$ в радианах. Полная мощность определена как сумма мощности, линейная комбинация E_θ и E_ϕ как определено ниже:

$$TPwr = \frac{1}{240\pi}\left(|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2\right). \tag{4.19}$$

Для расчета характеристики необходимо задать:
имя ЕМ структуры: подсхема от 1 до1000 портов;
фиксированные ϕ (градусы): реальное значение от −90° до 90°;
индекс частоты: целое число от 1 до 1000.

Этот расчет дает комплексное значение, которое представляет нормированное поле излучения в дальней зоне. Этот результат нормирован к суммарной мощности (4.5):

$$result = \sqrt{\frac{TPwr(\theta,\phi)}{P_{cp}}}\Big|_{\phi=const,\,-90°\le\phi\le90°}. \tag{4.20}$$

Эта характеристика не отражает влияние рассогласования или резистивных потерь. Результат — эквивалент волновой переменной в указанном направлении, чтобы сохранить совместимость с другими антенными характеристиками, хотя измерение вполне реально. Это обеспечивает, чтобы |result|^2 был направленность в этом направлении. Результат может быть отображен как реальное значение, определяя величину, или вещественную составляющую в диалоговом окне Modify Measurement. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая флажок DB, который показывает 20 log (|result|). Независимая ось для этой характеристики находится в угловых единицах.

Для антенны рис. 4.15 диаграмма направленности PPC_TPwr совпадает с диаграммой направленности PPC_LHCP и соответствует рис. 4.23.

4.10.13. Осевое отношение (развертка по частоте): SF_AR

Этот расчет дает частотную зависимость осевого отношения. Значения θ и ϕ зафиксированы, в то время как частота изменяется.

Для расчета характеристики необходимо задать:
имя ЕМ структуры: подсхема 1 to1000 порты;
θ (градусы): от 0° до 90°;
ϕ (градусы): от −180° до 180°.

Этот расчет дает комплексное значение в диапазоне частот, которое представляет осевое отношение относительно частоты при фиксированном θ и фиксированного ϕ. Хотя осевое отношение — реальное значение, это возвращено как комплексное значение, чтобы остаться совместимым с другими характеристиками антенны. Осевое отношение определено как абсолютное значение суммы правой круговой поляризации (RHCP) E-области и левая круговая поляризация (LHCP) E-области, разделенные разностью (формула 4).

Это комплексная характеристика может быть отображено на таблице. Модуль (рис. 4.24), угол, реальная, или мнимая составляющие могут также быть отображены на прямоугольном графике или в таблице.

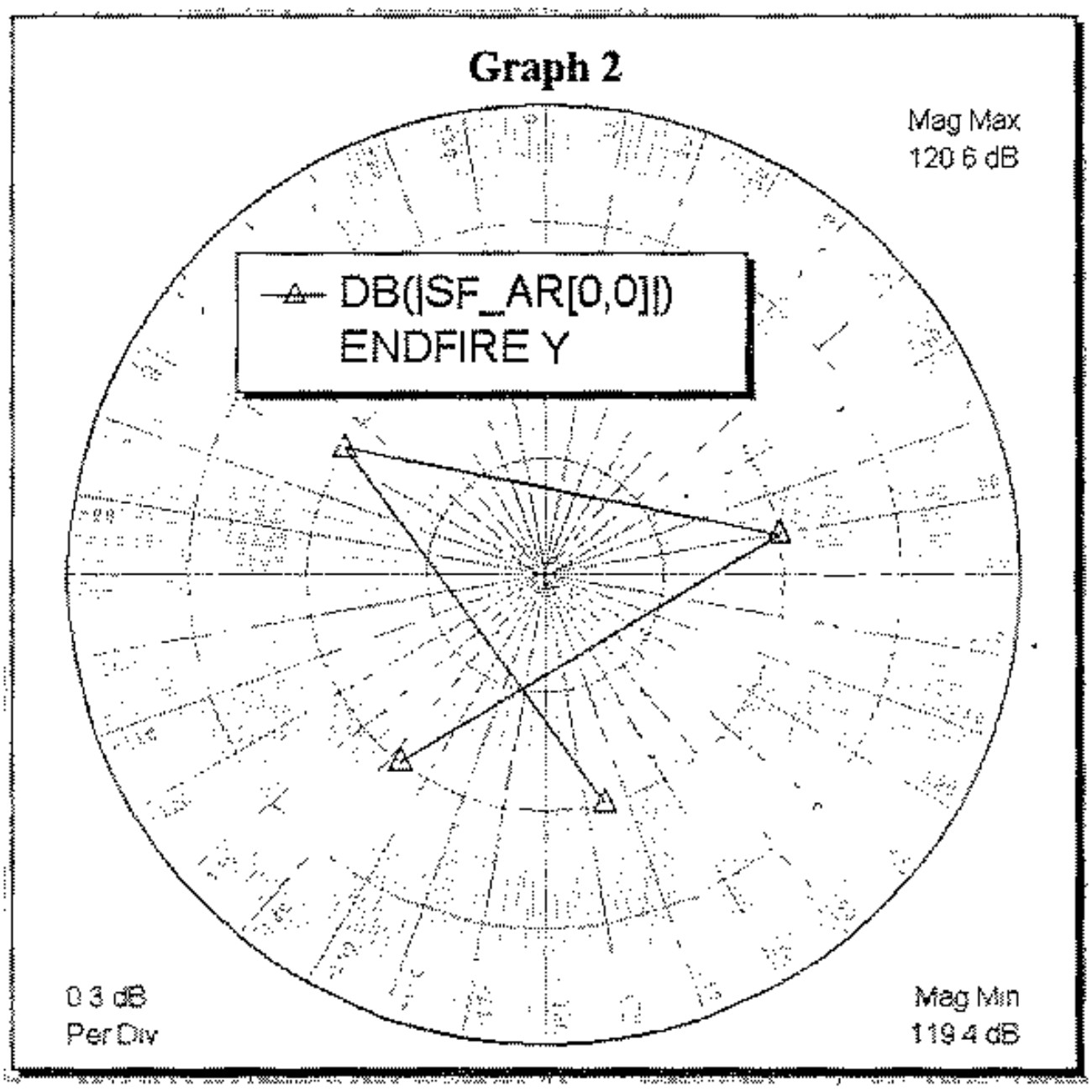


Рис. 4.24. Осевое отношение антенны рис. 4.12 в четырех частотных точках в диапазоне 4.5.. 5 ГГц

Сглаживание не позволяется для этого измерения. Этот расчет использует частоты, указанные в проекте.

4.10.14. Составляющая поля E-Phi (в полосе частот): SF_EPhi

Этот расчет дает составляющую электрического поля в полярной системе координат в диапазоне частот и при фиксированном значении углов θ и ϕ .

Для расчета характеристики необходимо задать:
имя EM структуры: подсхема от 1 до1000 портов;
θ (градусы): от 0° до 90°;
ϕ (градусы): от −180° до 180°.

Этот расчет возвращает комплексное значение, которое представляет нормированное излучаемое поле в дальней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормализован к интегральной мощности, рассчитанной по формуле (4.5):

$$result(F) = \frac{E_\varphi(\theta, \phi, F)}{\sqrt{240\pi P_{cp}(F)}}\Big|_{\theta=const, \phi=const} \qquad (4.21)$$

где F — частота.

Этот расчет не отражает влияние рассогласования или резистивных потерь. Результат — эквивалентная волновая переменная в указанном направлении, так что $|result|^2$ является направленностью в этом конкретном направлении. Это позволяет создавать антенные решетки этих элементов, непосредственно прибавляя комплексные результаты нескольких элементов. Важно, что фазовый центр характеристики находится в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию «dB», которая показывает 20 log (|result|). Независимая ось для этого измерения находится в частотных единицах (рис. 4.25).

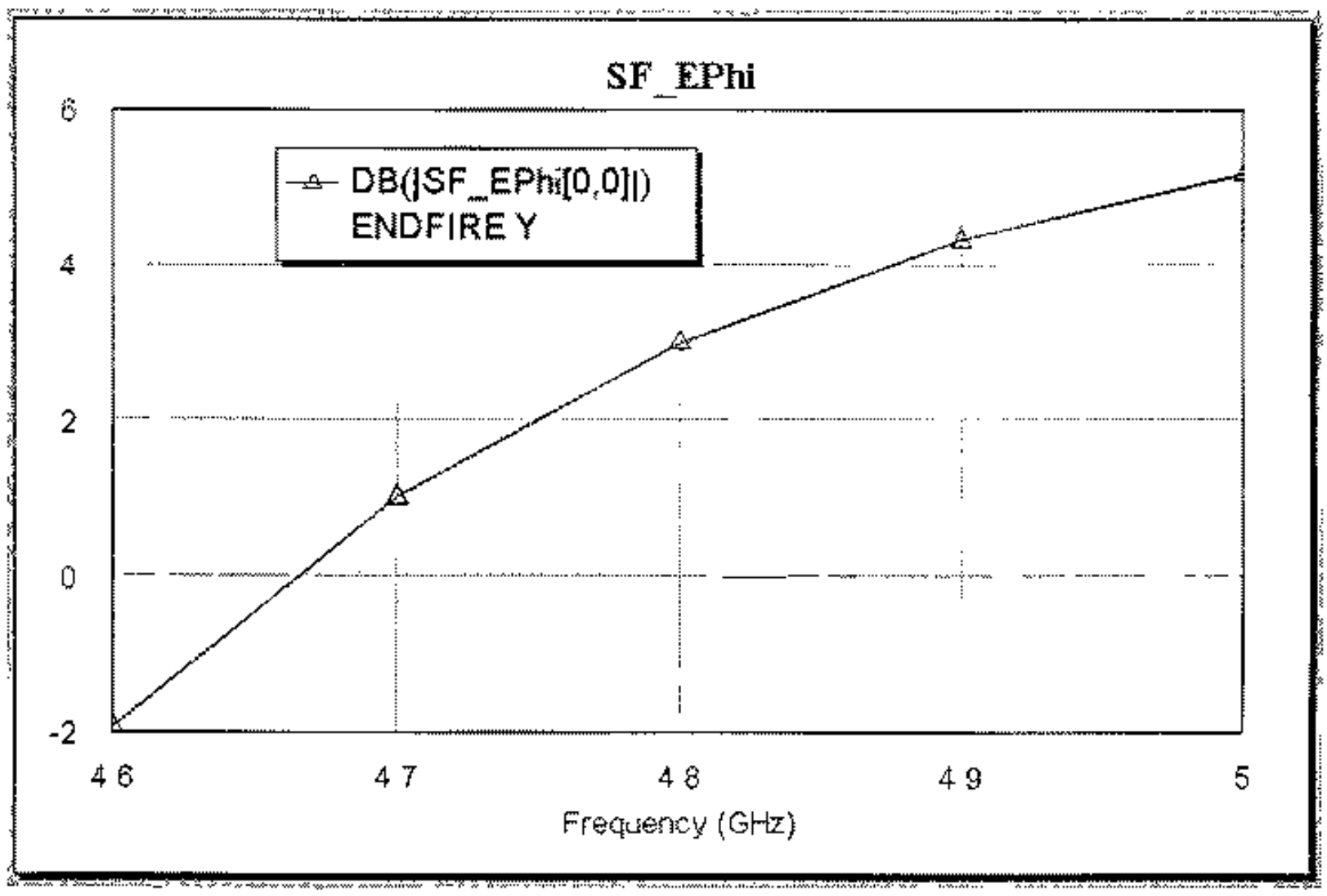


Рис. 4.25.Частотная зависимость модуля составляющей электрического поля в дальней зоне

Это комплексная характеристика может быть выведена в таблицу. Модуль, угол, реальный или мнимые составляющие может также быть отображена на прямоугольном графике или таблице.

4.10.15. E-тета составляющая поля (развертка по частоте): SF_ETheta

Эта характеристика (рис. 4.26) есть частотная характеристика составляющей дальнего поля, поляризованной по E_θ. Этот расчет выполняется при фиксированном значении θ и ϕ и при изменении частоты.

Для расчета характеристики необходимо задать:
P1: Имя EM структуры: структура от 1 до1000 портов;
P2: θ (градусы): от 0° до 90°;
P3: ϕ (градусы): от −180° до 180°.

Характеристика возвращает комплексное значение, которое представляет нормированное поле излучения в дальней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормирован к интегральной мощности (на всех поляризации) в верхнем полушарии, разделенном на 4π:

$$result(F) = \frac{E_\theta(\theta, \phi, F)}{\sqrt{240\pi P_{cp}(F)}}\Big|_{\theta=const,\phi=const}, \tag{4.22}$$

где F — частота.

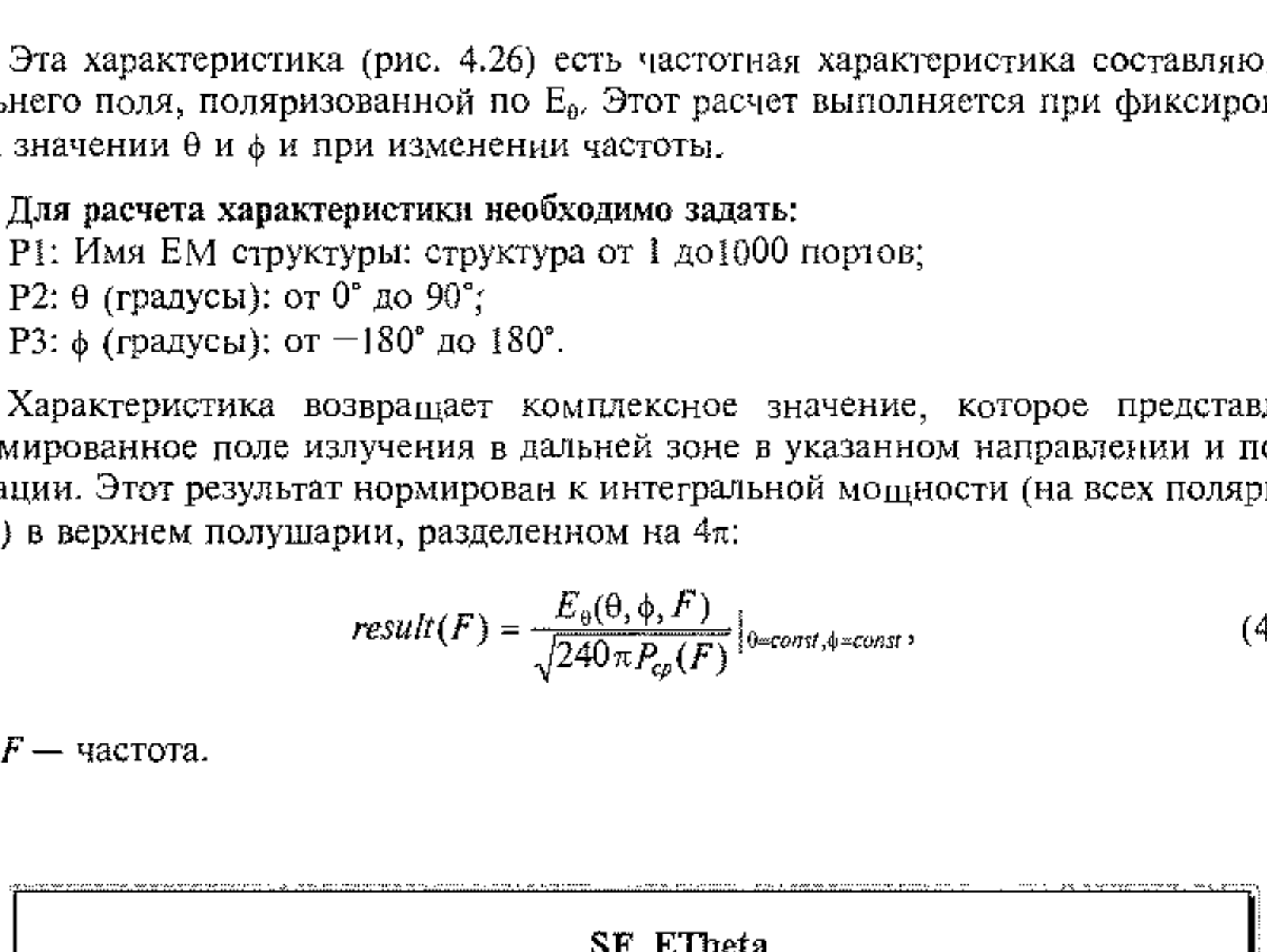


Рис. 4.26. Частотная зависимость модуля электрического поля в даяьнеи зоне

Эта характеристика не отражает влияние рассогласования или резистивных потерь. Величина $|result|^2$ является направленностью в конкретном направлении. Это позволяет создавать антенные решетки этих элементов, суммируя комплексные результаты нескольких элементов.

Эта комплексная характеристика может быть отображена в таблице. Модуль, угол, реальный или мнимые составляющие может также быть отображены на прямоугольном графике или таблице.

Сглаживание (т. е. процесс интерполяции к частной характеристике рис. 4.26) не позволяется для этого расчета. Этот расчет всегда выполняется на частотах, указанных в проекте.

4.10.16. E-левая круговая поляризация (развертка по частоте): SF_LHCP

Эта характеристика есть частотная характеристика составляющей поля с левой круговой поляризацией. Эта характеристика фиксирует значения θ и ϕ при изменении частоты. Эта характеристика — линейная комбинация E_θ и E_ϕ:

$$LHCP(\theta,\phi) = \frac{E_\theta - jE_\phi}{\sqrt{2}}, \tag{4.23}$$

Для расчета необходимо задать:
P1: Имя EM структуры; подсхема от 1 до 1000 портов;
P2: θ (градусы): реальное значение от 0° до 90°;
P3: ϕ (градусы): реальное значение от −180° до 180°.

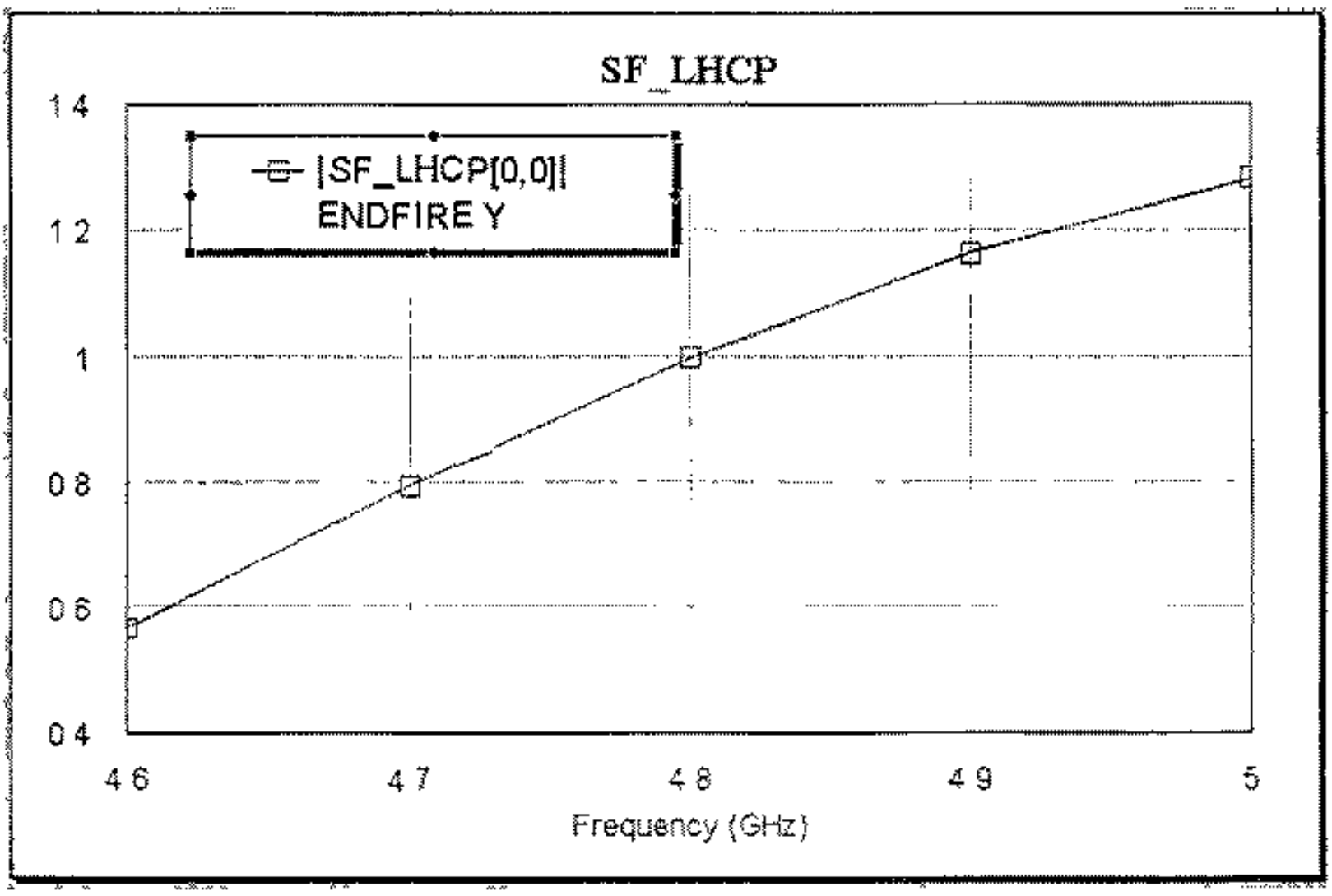


Рис. 4.27. Частотная характеристика нормированного поля в дальней зоне

Эта характеристика есть комплексное число, которое представляет нормированное излучение поля в двльней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормализован к суммарной мощности (4.5)

$$result(F) = \frac{LHCP(\theta,\phi,F)}{\sqrt{240\pi P_{cp}(F)}}\Big|_{\theta=const,\phi=const}, \tag{4.24}$$

где F — частота.

Этот расчет не учитывает рассогласования или резистивные потери. Полученный результат эквивалентен волновая переменная в указанном направлении, так что $|result|^2$ является частичной направленностью в этом конкретном направлении. Это позволяет моделировать антенные решетки этих элементов, просто суммируя комплексные характеристики нескольких элементов. Важно, что фазовый центр характеристики находится в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, определяя величину, угол, реальный или мнимую составляющую в диалоге Measurement. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию «dB». Ось x для этого расчета находится в частотных единицах (рис. 4.27).

4.10.17. E-правая круговая поляризация (развертка по частоте): SF_RHCP

SF_RHCP это частотная характеристика правосторонней круговой поляризации, рассчитываемая при фиксированных значениях θ и ϕ и при изменении частоты. **SF_RHCP** — линейная комбинация E_θ и E_ϕ:

$$RHCP(\theta,\phi) = \frac{E_\theta + jE_\phi}{\sqrt{2}}. \tag{4.25}$$

Для расчета характеристики необходимо выбрать:

P1: Имя EM структуры: подсхема от1 до1000 портов;

P2: θ (градусы): от 0° до 90°;

P3: ϕ (градусы): от −180° до 180°.

Этот расчет возвращает комплексное значение, которое представляет нормированное излучение поля в дальней зоне в указанном направлении и поляризации. Этот результат нормализован к интегральной мощности (4.5)

$$result(F) = \frac{RHCP(\theta,\phi,F)}{\sqrt{240\pi P_{cp}(F)}}\Big|_{\theta=const,\phi=const}, \tag{4.26}$$

где F — частота.

Расчет не учитывает рассогласование или резистивные потери в антенне. Величина $|result|^2$ является частичной направленностью в конкретном направлении. Это позволяет создавать диаграммы направленности излучения антенной решетки элементов, непосредственно прибавляя комплексные результаты нескольких элементов. Важно, что фазовый центр измерения зафиксирован в центре верхней поверхности корпуса. Результат может быть отображен как реальное значение, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге Measurement. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию «dB», которая

показывает 20 log (|result|). Независимая ось для этой характеристики в частотных единицах.

Для антенны рис. 4.15 частотная характеристика **SF_RHCP** совпадает с частотной характеристикой **SF_LHCP** (рис. 4.27)

4.10.18. Полная мощность излучения (в полосе частот): SF_TPwr

Это частотная характеристика полной мощности на всех поляризации, при фиксированных значениях ϕ и θ и при изменении частоты. Полная мощность определена как сумма мошности, содержащейся в E_θ и E_ϕ:

$$TPwr = \frac{1}{240\pi}\left(|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2\right). \tag{4.27}$$

Для расчета необходимо установить параметры:
имя EM структуры: от 1 до1000 портов;
θ (градусы): от 0° до 90°;
ϕ (градусы): от −180° до 180°.

Программа нормвлизует (4.35) к интегральной мощности (4.5) в верхнем полушарии, и рассчитывает характеристику

$$result(F) = \sqrt{\frac{TPwr(\theta,\phi,F)}{P_{cp}(F)}}\Big|_{\varphi=const,\,-90^\circ\le\phi\le90^\circ}, \tag{4.28}$$

где F — частота.

Расчитанная характеристика не учитывает рассогласование или резистивные потери. Результат — эквивалентная волновая переменная в указанном направлении. Для сохранения совместимости с другими антенными характеристиками это число остается комплексным. Величина $|result|^2$ — направленность в указанном направлении. Результат может быть отображен как реальное значение, определяя величину, или вещественную составляющую в диалоге Measurement. Это значение может также быть отображено в dB, выбирая опцию «dB», которая показывает 20 log (|result|). Независимая ось для этой характеристики находится в частотных единицах. Для антенны рис. 4.15 частотная характеристика для **SF_TPwr** совпадает с рис. 4.27.

Глава 5
Линейный схемотехнический анализ

Графическое представление электрической схемы в MWO создается в окне **Schematics.** Для расчета характеристик линейных цепей предназначена программа **Voltaire XL.** С помощью этой программы можно рассчитать малосигнальный коэффициент усиления, коэффициент шума, условия сопряженного согласования, *S*-параметры, устойчивость и др. (пример схемы, подготовленной для моделирования, приведен на рис. 5.1).

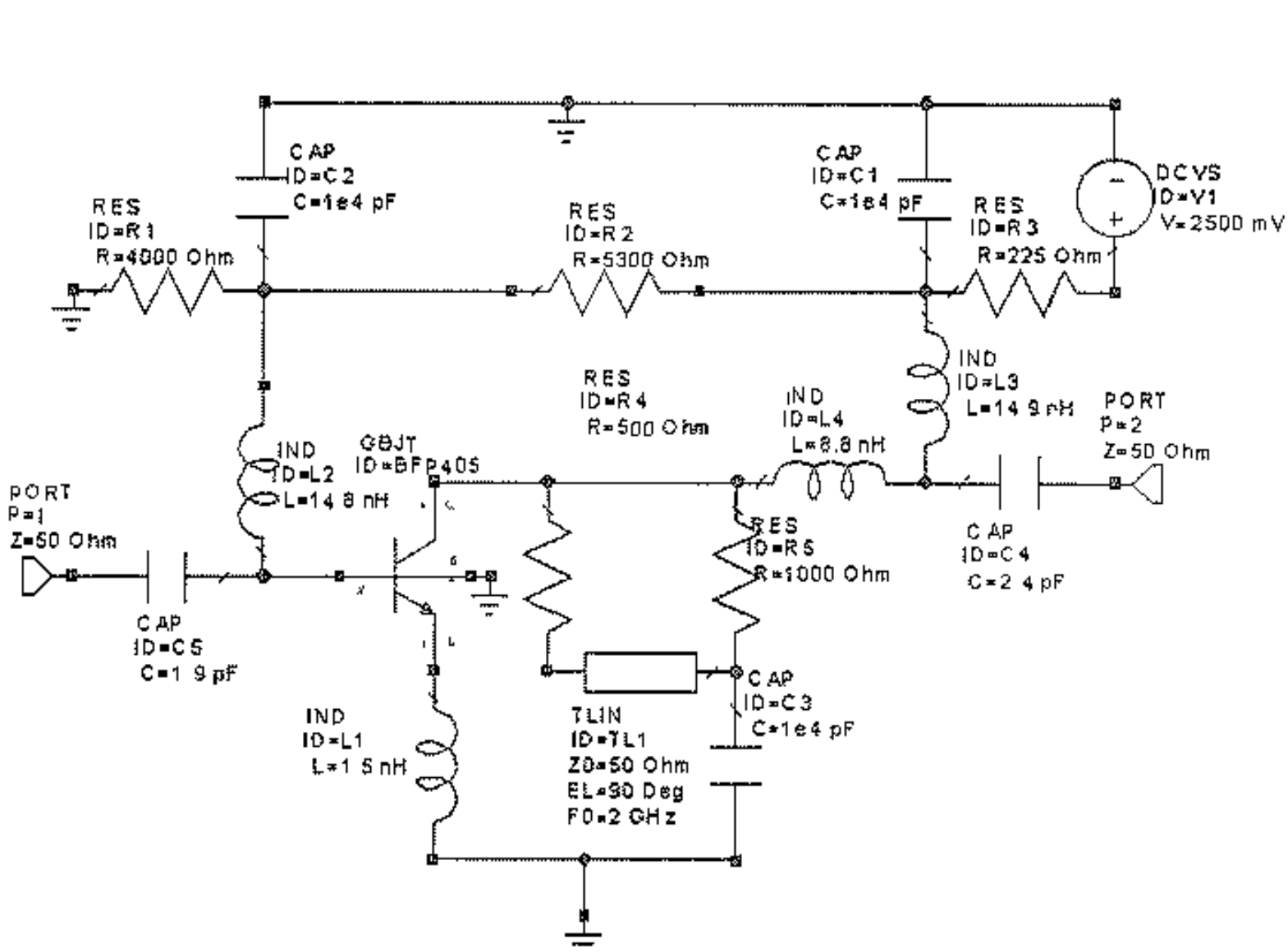


Рис. 5.1. Схема однокаскадного усилителя на ПТ

Программа**Voltaire XL** в зависимости от запрашиваемой характеристики схемы и от того, содержит ли она нелинейные элементы, автоматически вызывает нужный метод моделирования.

5.1. Составление и решение схемы

Когда требуется рассчитать линейную характеристику нелинейной схемы, **Voltaire XL** сначала рассчитывает параметры в так называемой «рабочей точке» по постоянному току, затем нелинейные компоненты схемы линеаризируются относительно найденной «рабочей точки» и затем рассчитывается требуемая линейная характеристика. Программа позволяет рассчитать любой линейный параметр, как

для линейных, так и для нелинейных цепей. При выполнении линейного анализа нелинейной схемы все источники гармонического сигнала устанавливаются равными нулю, и в схеме остаются только источники постоянного тока (DC).

Впрочем, расчет нелинейных характеристик не требует, чтобы схема содержала нелинейные элементы. Любую нелинейную характеристику можно рассчитать и для линеиной схемы. Когда запрашивается расчет нелинейных характеристик для схемы без нелинейных элементов, программа выбирает наиболее эффективный линейный анализ. Одно очень полезное использование этой возможности — подключение к линейной схеме источников сигнала. Например, если на входе линейной схемы действует источник импульсного напряжения, то могут быть рассчитаны гармонические составляющие сигнала на выходе, используя нелинейные временные характеристики.

Линейная схема рассчитывается методом узловых напряжений, используя соответствующие системы уравнений. Поэтому основная работа программы, скрытая от пользователя, заключается в составлении систем уравнений. В результате расчет СВЧ структур сводится к расчету токов и напряжений, которые на СВЧ в действительности не измеряются. Метод узловых напряжений (так же как и метод рядов Вольтерра, используемый для расчета нелинейных цепей) описывается в теории электрических цепей. Эти методы оперируют токами и напряжениями, чем принципиально отличаются от электродинамического метода моментов, рассмотренного ранее, и имеющего дело с многомерными токами, точнее, с электрическими полями. В пакете MWO все эти методы используются при расчете реальных устройств.

5.2. Подсхемы, порты и соединения

Подсхемы. Программа **Voltaire XL** позволяет описать конструкцию в виде иерархической схемы, используя подсхемы. Подсхема становится блоком, вложенным в другой блок (рис. 5.2). Подсхема может представлять собой любой из четырех типов блоков, перечисленных ниже.

Файлы данных. Это обычно текстовой файл *S*-параметров или данных других типов, которые содержат параметры *N*-портовой схемы в диапазоне частот. Каждый объект файла данных представлен как элемент, расположенный в группе **data file** дерева проекта. Каждый файл данных имеет свое название. Оно отображается рядом со значком файла данных в проекте. Путь файла данных приводится после названия объекта файла данных в прямоугольных скобках [ ].

Измеренные *S*-параметры включаются в схему как подсхемы. Чтобы представить файл как подсхему, он должен быть сначала добавлен к проекту как файл данных. Такие файлы автоматически указываются в списке подсхем, которые могут быть добавлены к схеме. Отметим, что файлы данных аналогичны файлам в формате Touchstone, и могут содержать и шумовые параметры.

Диапазон частот, в котором представлены данные в файле, должен быть достаточно широк, чтобы охватить всю полосу частот моделирования. Если данные измерены в более узкой полосе частот, то система будет экстраполировать данные, что может привести к неточным результатам.

Schematics (подсхемы). Подсхема может быть другой схемой проекта, имеющей свое имя. Вложения схем одна в другую позволяет создавать неограниченное

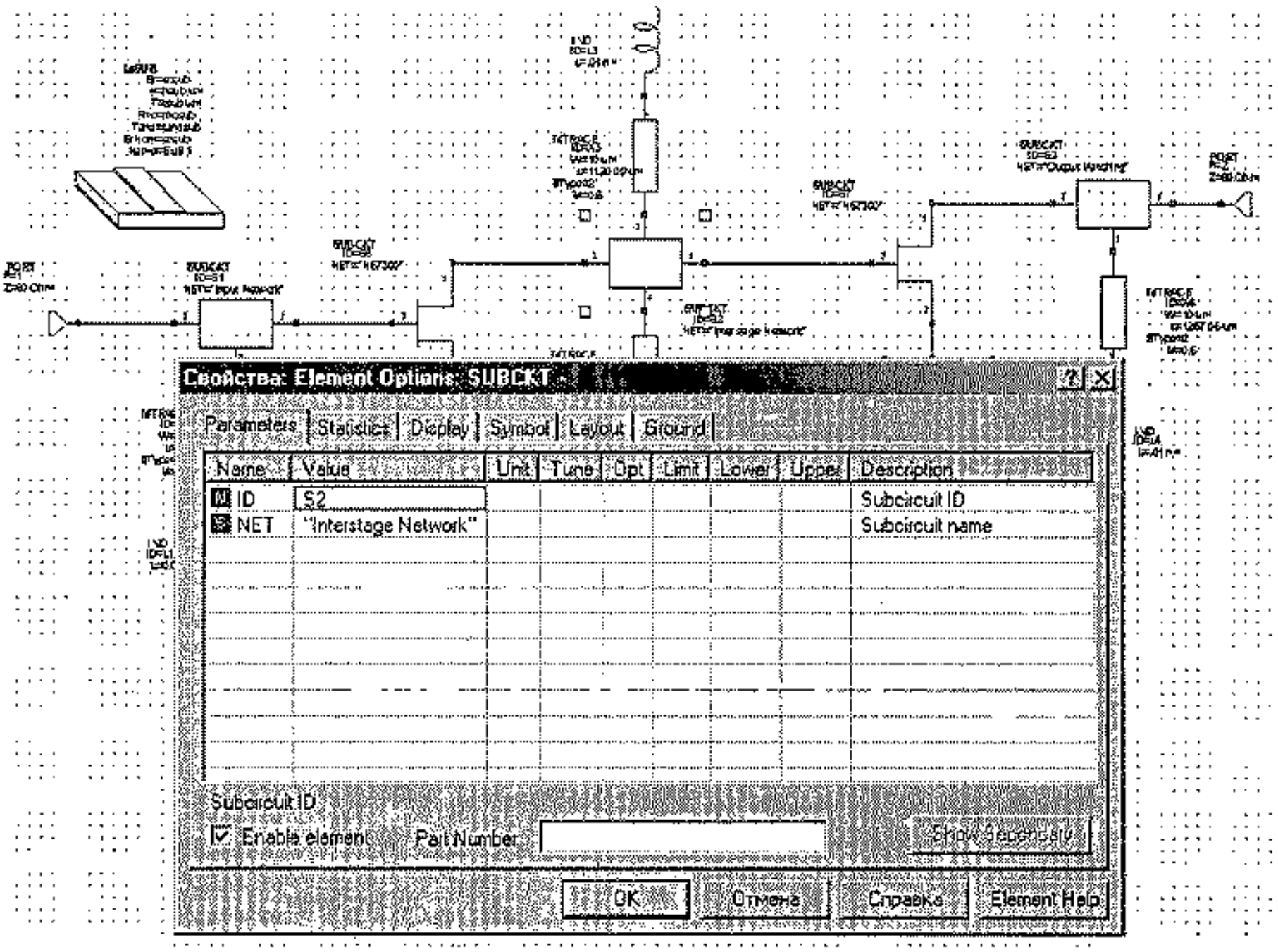


Рис. 5.2. Диалоговое окно редактирования параметров подсхемы SUBCKT

число иерархических уровней, так как любая схема может включать другие подсхемы. Единственное исключение — подсхема не может быть помещена в схему верхнего уровня, когда подсхема прямо или косвенно связана с этой схемой (что привело бы к циклическому вложению).

Netlists (списки соединений). Подсхема может быть описана также в виде текстового файла — списка соединений. Подсхемы в виде списков соединений в свою очередь могут содержать списки соединений или другие схемы (это позволяет при описании комбинировать схемные решения и списки соединений).

EM структура. Подсхема может быть получена с помощью EM-моделирования (гл. 2 и 3). Если EM-структура — часть проекта, все, что требуется, это включить EM-структуру как подсхему в схему или в список соединений. Как правило, частотный диапазон, использованный для EM-моделирования, установлен для каждой отдельной EM-структуры.

Соединения. Схема в программе Voltaire XL описана как связанный набор подсхем и отдельных схемных элементов. После того, как схема определена (описана в виде схемы или списка соединений), она может использоваться как подсхема подобно обычному элементу. Математически она представлена $N \times N$ матрицей полной проводимости, где N — число узлов схемы. Если необходимы S-параметры или другие параметры, отображающие связи между портами этой схемы, Voltaire XL выполнит требуемые преобразования.

Так как подсхема представлена матрицей полной проводимости, импедансы портов, к которым подключена подсхема, не включаются в другую подсхему. Это может эффективно использоваться, когда схема, содержащая порты, включается в другую схему как подсхема. На моделирование влияет только нагрузка порта на самом верхнем уровне иерархии. Пользователь может определять импедансы порта каждой подсхемы и оставшиеся соединения между подсхемами любым способом.

Когда подсхема вложена в другую подсхему, должны использоваться все ее узлы. Наличие «изолированного узла», хотя и допустимо, может привести к численным погрешностям.

При объединении схем внешние клеммы подсхем идентифицируются, используя элементы портов. Каждый порт имеет техническое требование на импеданс. Этот импеданс используется для вычисления *S*-параметров на верхнем уровне иерархии и ряда других смешанных характеристик. Когда подсхема используется в другой схеме, нагрузки порта подсхемы не включаются в рассмотрение.

Порты и нормированные сопротивления. По существу, большинство характеристик (коэффициенты устойчивости, импедансы, обеспечивающие сопряженное согласование, и т. п.) используют только порты 1 и 2, а все другие порты, если таковые имеются, нагружаются на нормированные импедансы. Значения нагрузок портов могут быть действительными или комплексными.

Импеданс со стороны другой схемы может также использоваться как импеданс нагрузки. Чтобы нагрузить другую схему, используйте «Network Terminated Circuit Port» по имени Port _TN. Этот элемент позволяет задать схему, которую нужно использовать как нагрузку, а также номер порта схемы, который нужно нагрузить. Не имеется ограничения на число портов, которые могут иметь нагрузки, и нет ограничений на число узлов портов для схемы, использованной как нагрузка.

Когда подсхема используется в другой схеме, нагрузки порта подсхемы не включены. Когда импедансы портов отличны от 50 Ом, то результирующие *S*-параметры будут нормированы к этим нагрузкам, не равным 50 Ом. Большинство других характеристик, которые отображаются на диаграмме Смита, автоматически будут нормированы к 50 Ом.

Работа со схемой (Schematics)

Щелчок правой кнопкой мыши на элементе **Schematics** позволяет добавить к проекту схему или схемный файла (netlist) (см. рис. 5.3).

Поясним команды меню на рис. 5.3.

New Schematic (новая схема): в результате выполнения этой команды открывается окно для создания принципиальной схема блока, входящего в проект. Одновременно создается копия файла, и она делается частью проекта. Копия файла имеет расширение имени (*.sch), а по команде New Netlists создается файл с расширением (*.ckt).

Link To Schematic (связь со схемой): обеспечивается доступ к файлу с расширением имени .sch или .ckt, но его копирование в проект не выполняется. Файл должен иметь атрибут разрешения для чтения.

Import Schematics (импорт схемы): щелчок на выбранном объекте в окне просмотра проекта или после комаиды Export из всплывающего меню выполняют импорт выбранного объекта в схему.

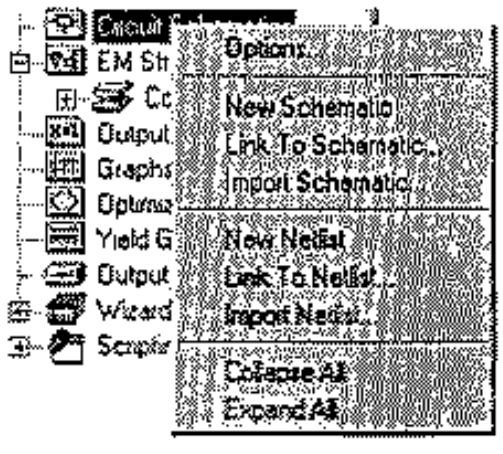


Рис. 5.3. Создание схем

Collapse All (сворачивание): по этой команде сворачиваются списки вложенных модулей всего проекта.

Expand All (разворачивание): по этой команде разворачиваются списки вложенных модулей всего проекта.

5.3. Редактирование схемы

В дереве проекта в группе Schematics имеется объект **Default Ckt Options (Заданные по умолчанию опции)**. Двойной щелчок по этому объекту открывает диалоговое окно редактирования параметров анализа схем, устанавливаемых по умолчанию при схемотехническом моделировании (см. рис. 5.4).

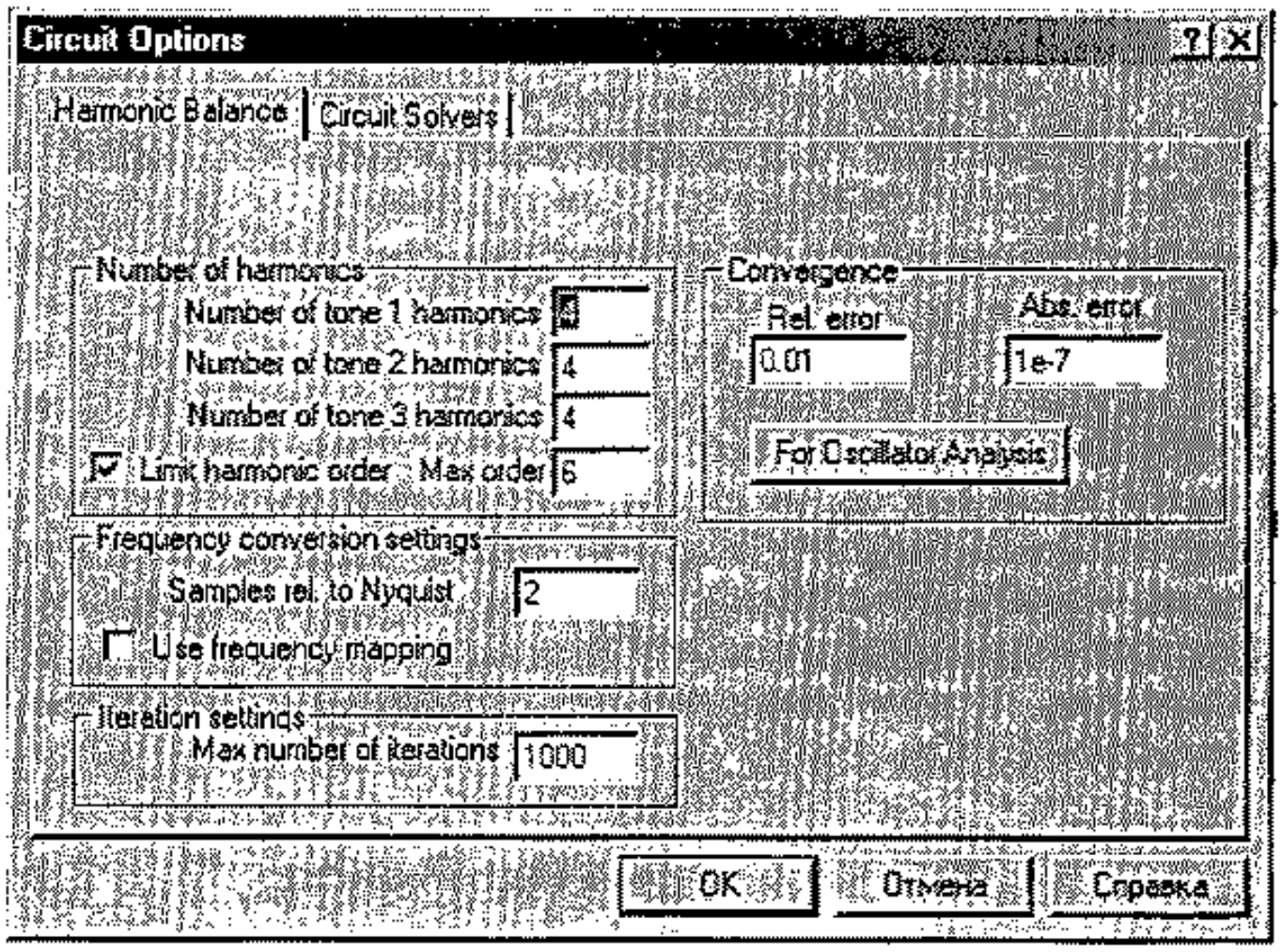


Рис. 5 4. Диалоговое окно редактирования параметров схемотехнического моделирования

Harmonic Balance (гармонический баланс). При моделировании методом гармонического баланса указывают число гармоник, задают критерий сходимости и другие параметры.

Element Display (показать элемент). Задаются принимаемые по умолчанию параметры отображения элементов.

Добавление элементов. Принципиальная схема проекта состоит из проводников, символов заземлений, портов и прочих элементов (их краткий перечень приведен в табл. 5.1). Начертания и описания элементов находятся в специальных библиотеках, которые активизируются, когда пользователь раскрывает вкладку Elements (см. рис. 5.5). В окне просмотра имеется структура каталога, содержащая все элементы, доступные для использования в схемах.

Таблица 5.1. Состав каталога элементов

Coplanar	Копланарные линии передачи
General	Компоненты на системном уровне: усилители, фильтры, ...
Interconnects	Перемычки, воздушные мосты, заземления, ...
Linear Devices	Линейные модели нелинейных приборов
Lumped Element	Дискретные элементы: резисторы, конденсаторы,...
Meters	Амперметр, вольтметр, измеритель мощности
Microstrip	Микрополосковые элементы
Nonlinear	Нелинейные элементы
Ports	Порты
Sources	Источники сигналов
Substrates	Подложки
Transmission Lines	Линии передачи
Library	Библиотеки
Data	Файлы данных
Subcircuits	Подсхемы

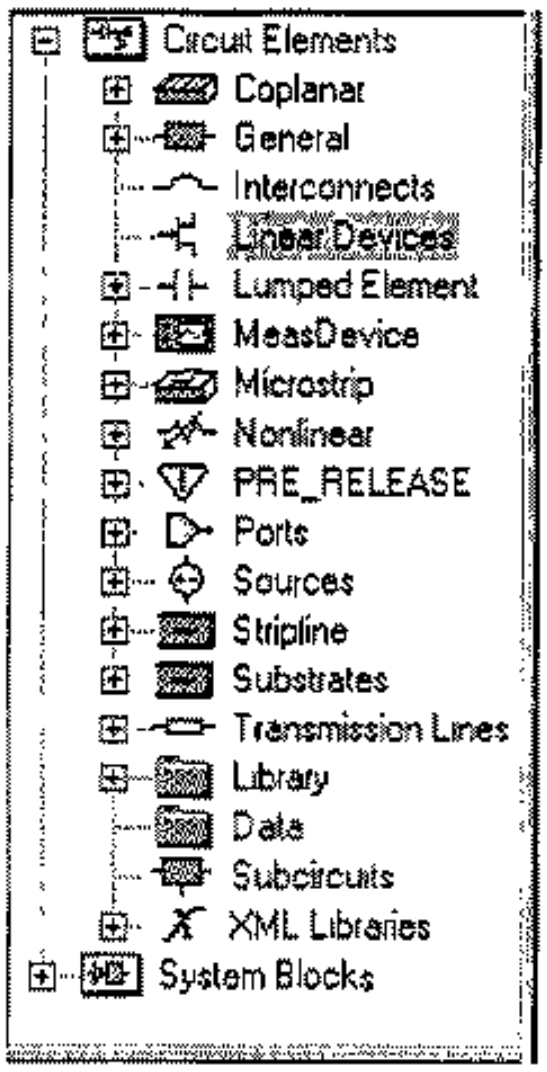


Рис 5.5. На закладке Elements помещен каталог библиотеки элементов

Двойной щелчок на элементе дерева элементов открывает список всех доступных в данной библиотеке элементов. Например, после двойного щелчка на Linear Devices, в нижнем окне отображается список, приведенный в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Модели транзисторов

BIP	Модель биполярного транзистора
HYBPI	Гибридная схема
BIPB	Биполярный транзистор с β управлением
PIN	p-i-n диод
FET	Полевой транзистор
PIN2	p-i-n диод

Подцепив курсором любой из символов этих элементов, можно с помощью мыши перенести его в поле схемы и установить в желаемом месте. Прежде, чем нажать на левую кнопку мыши при окончательной установке элемента в схеме, нажмите на правую кнопку, при этом элемент будет вращаться вокруг своей оси.

Таблица 5.3. Порты со входными сигналами

PORT_PLS	Порт с импульсным сигнвлом на входе
PORT_TRI	Порт с треугольным сигналом на входе
PORT_SAW	Порт с сигналом на входе
PORT_SQR	Порт с сигналом на входе

Порт в схему помещается непосредственно из списка элементов. Вдобавок к этому простейший односигнальный порт можно добавить из меню **Schematic**, выбрав команду **Add > Ports**. После активизации любого элемента, расположенного на схеме, и двойного щелка по нему появляется диалоговое окно редактирования параметров порта (рис. 5.6).

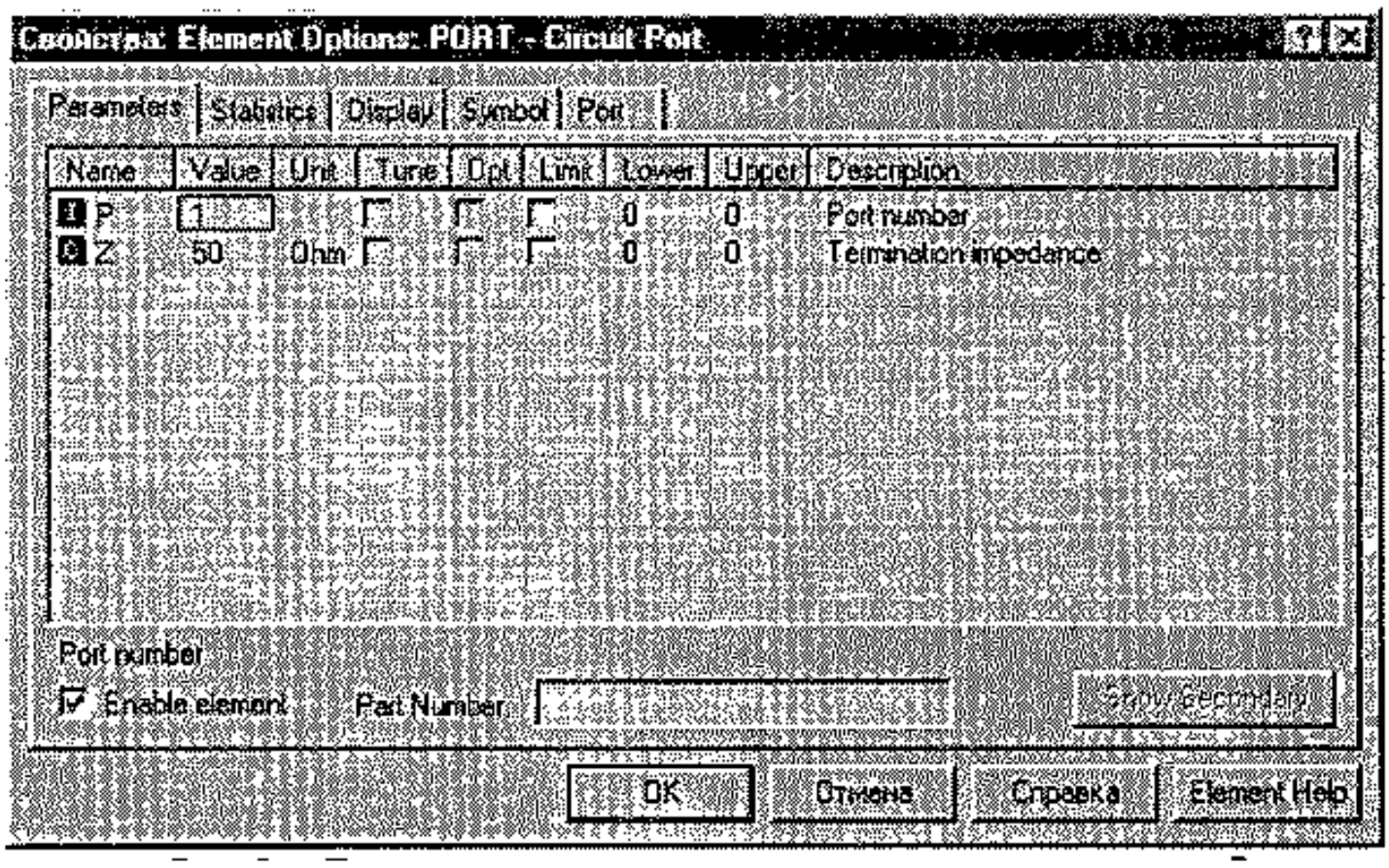


Рис. 5.6. Диалоговое окно редактирования параметров порта

Более подробную информацию об элементе можно получить, нажав на кнопку **Element Help.**

Подключение к схеме, например, импульсного сигнала выполняется с помощью порта **PORT_PLS**. В табл. 5.4 список параметров этого порта, приведенный в соответствующем диалоговом окне.

Таблица 5.4. Параметры порта с импульсным сигналом

Имя параметра	Описание	Тип параметра	Значение по умолчанию
P	номер порта	нет	1
Z	импеданс нагрузки	сопротивление	50 Ом
AMP	величина ЭДС сигнала	напряжение	0 В
TW	длительность импульса	время	0 нс
TR	длительность фронта	время	0 нс
TF	длительность заднего фронта	время	0 нс
TD	время задержки	время	0 нс

Некоторые параметры заблокированы, другие доступны для редактирования и для задания в качестве оптимизируемых параметров. Если открыть отредактированные длительности фронта как дискретные параметры, то появляются дополнительные опции, например Statistic (статистическое распределение).

Если порт установлен, его можно модифицировать. Порты редактируются как обычные элементы. Для изменения типа порта в диалоговом окне рис. 5.6 раскройте вкладку **Port** (рис. 5.7) и сделайте необходимые изменения.

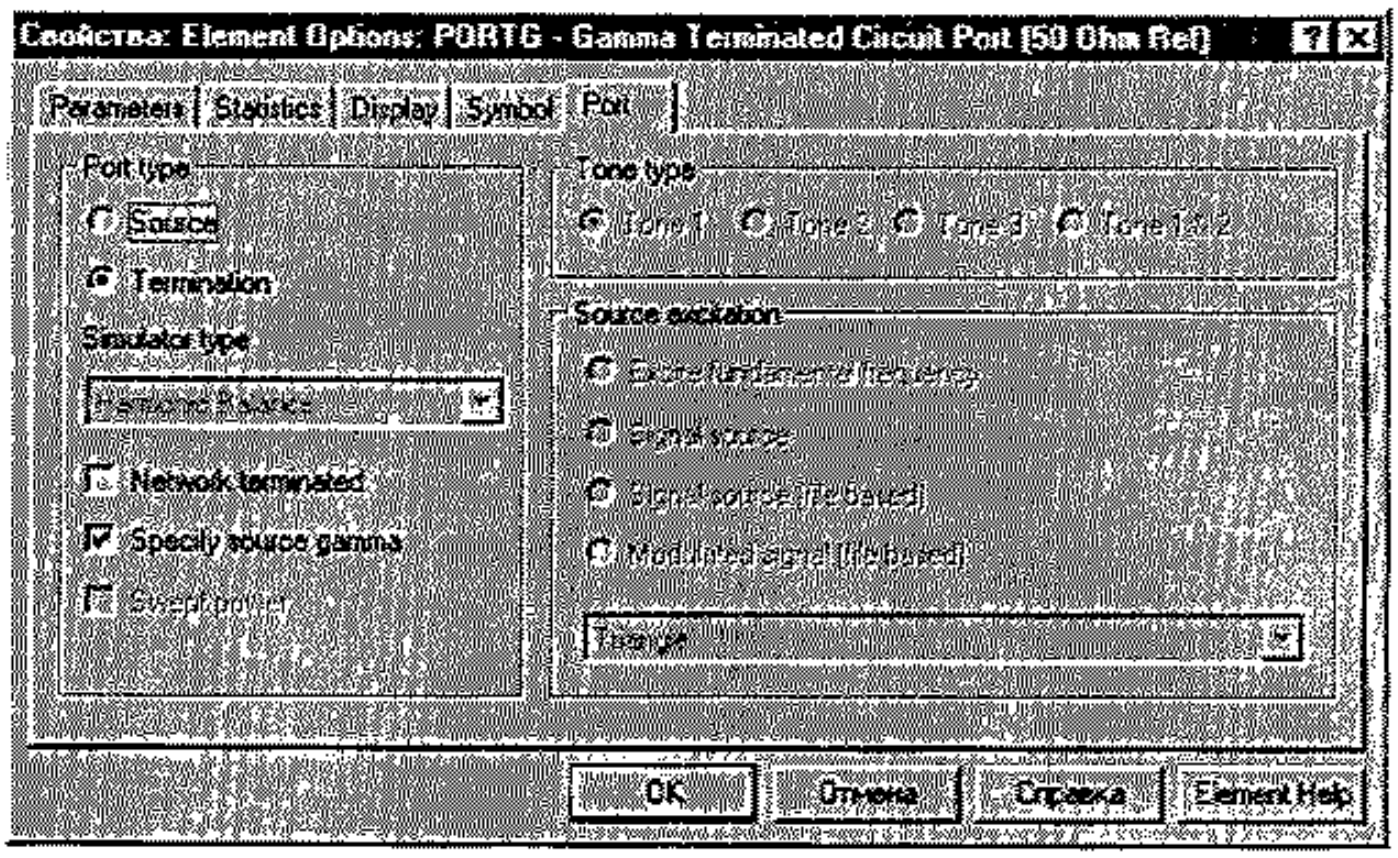


Рис. 5.7. Редактирование параметров порта

Описание элементов вкладки **Port**:
Port Type (тип порта) — источник сигнала, нагрузка;
Tone Type (тип возбуждения) — тон 1, тон 2, тон 3, тоны 1 и 2;
Network Terminated (нагрузка схемы) — должна ли быть нагружена схема;
Swept Power (свипирование мощности) — должна ли изменяться мощность;
Signal source (источник сигнала) — треугольный, прямоугольный, пилообразный.

Можно изменить и вид графического символа элемента или чертеж ее ячейки на печатной плате, указывая новое имя в списке **Symbol** (рис. 5.8).

Параметры порта можно редактировать и на самой схеме, выделяя и активизируя отдельные параметры в его описании.

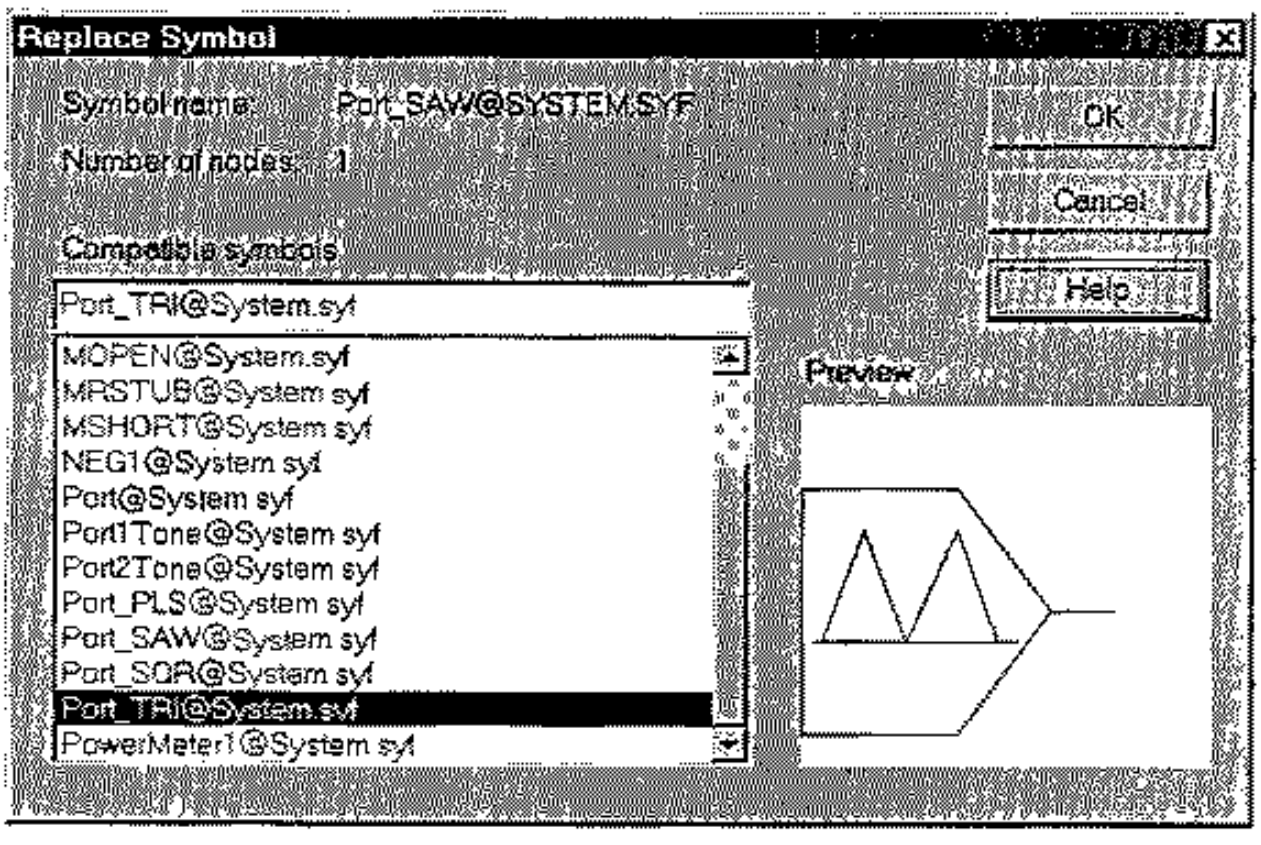


Рис. 5.8. Выбор графического символа элемента

5.4. Примеры создания и моделирования схем

5.4.1. Пример анализа фильтра на сосредоточенных элементвх

1. Создание нового проекта

В меню **File** выберите пункт **New Project** (новый проект).

2. Создание новой схемы

В меню Project выберите пункт **Add Schematic** (добавить схему) и далее в подменю выберите команду **New Schematic** (новая схема). В открывшемся диалоге **Create New Schematic** (создайте новую схему) введите название схемы.

3. Активизация просмотра элементов

Раскройте вкладку **Elem** (элементы) в нижней части окна проектов (рис. 5.9).

4. Выбор элементов схемы

В иерархическом списке Circuit Elements (элементы схем) выберите пункт **Lumped Elements** (элементы с сосредоточенными параметрами). Далее выберите пункт Capacitor (конденсатор), в результате чего в левом нижнем углу окна проекта появятся значки нескольких типов конденсаторов. Выберите значок **CAP** и, не отпуская левую киопку мыши перетащите его в окно схемы с именем **Low Pass Filter** (фильтр нижних частот).

В окне схемы элемент можно перемещать при освобожденной левой кнопке. Для фиксации элемента на схеме сделайте левой кнопкой щелчок. В результате схема примет вид рис. 5.10.

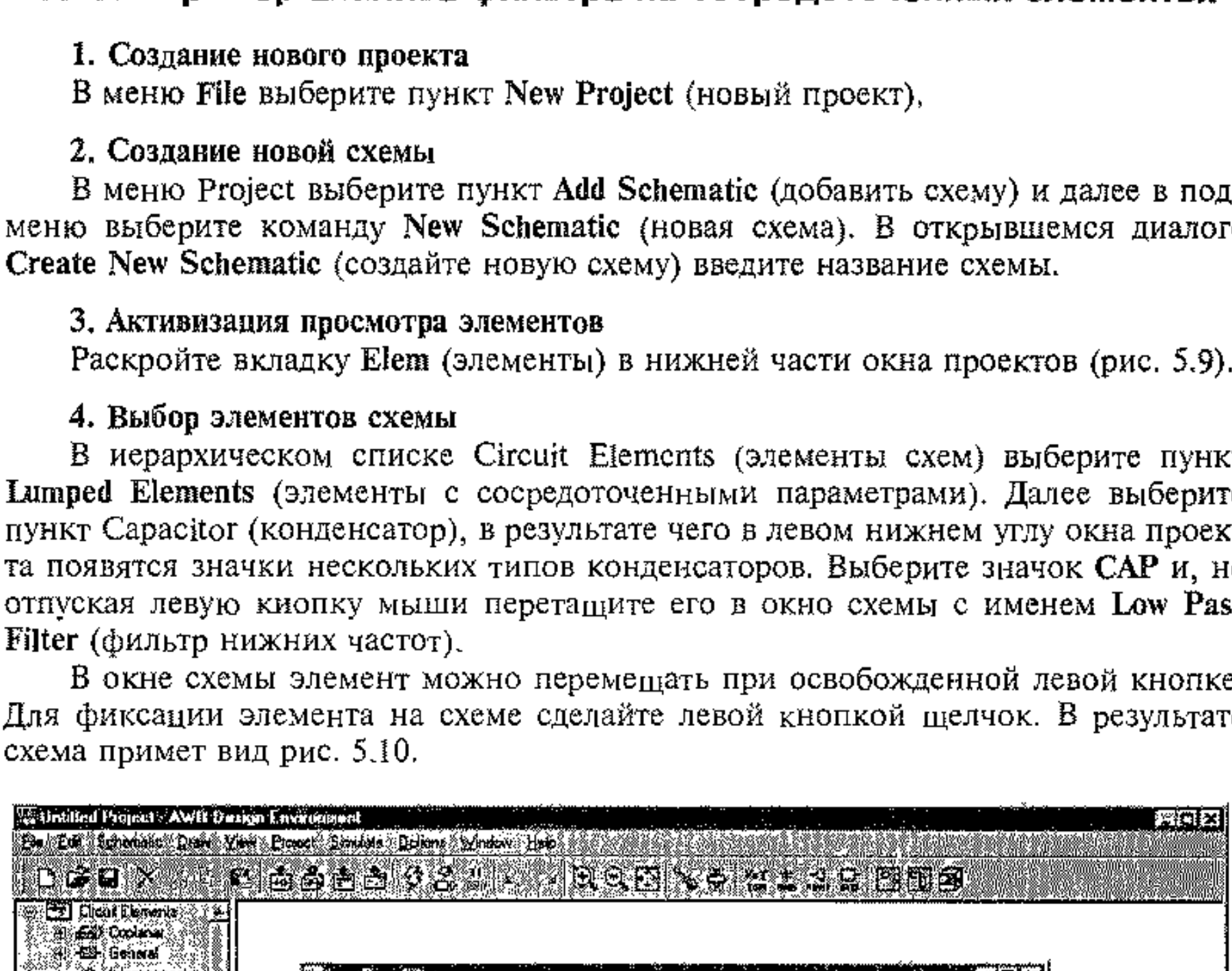


Рис. 5.9. Рабочее окно проекта

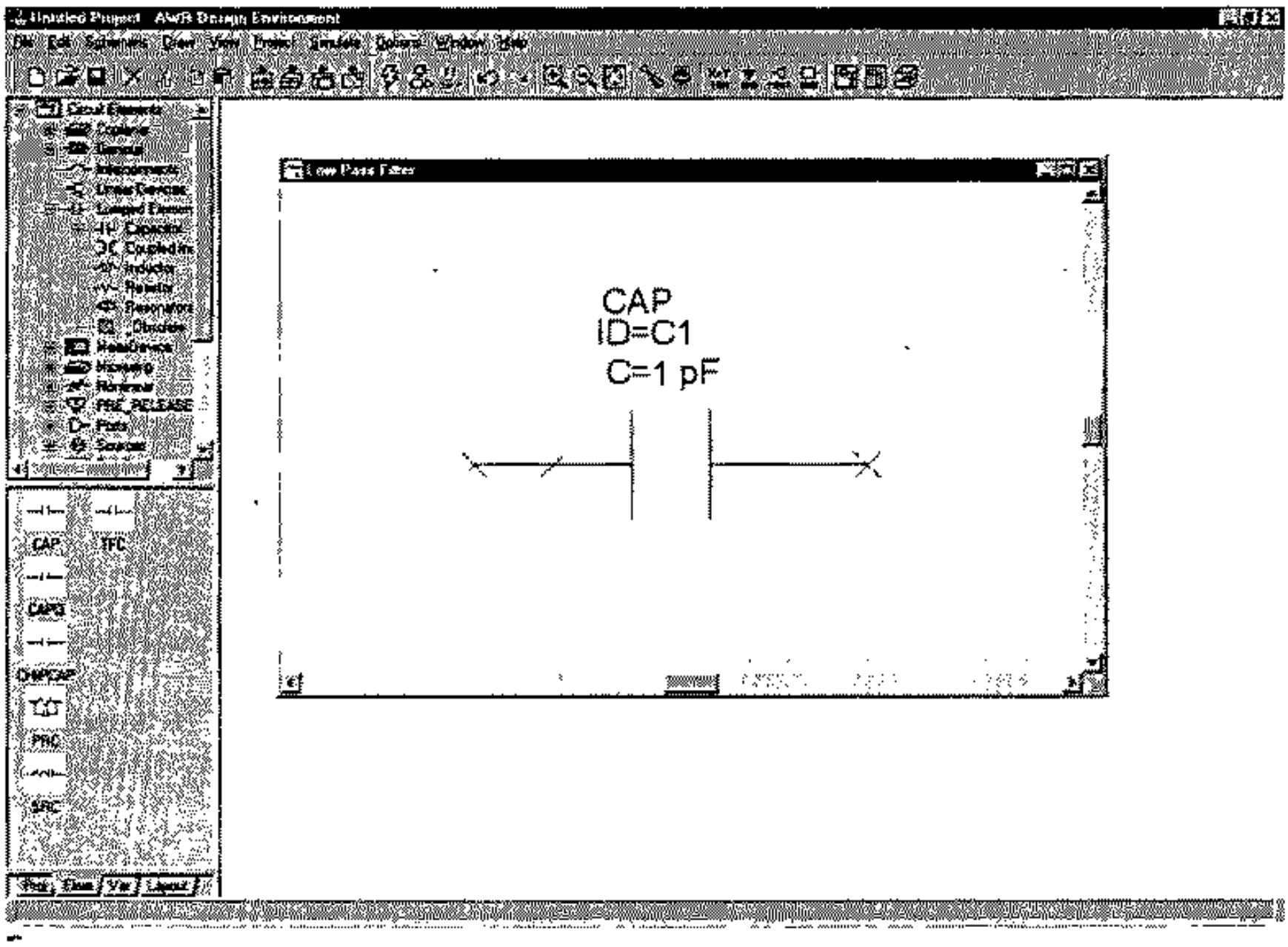


Рис. 5.10. Помещение конденсатора в поле схемы

5. Поворот элементов

В списке Circuit Elements выберите элемент Inductor и перетащнте в схему значок элемента IND Inductor (индуктивность). Сделайте щелчок правой кнопкой мыши, чтобы повернуть элемент на угол в 90°. Каждый последующий щелчок опять приведет к повороту элемента на 90°. Сориентировав элемент требуемым образом, установите его в нужное место схемы и зафиксируйте его положение щелчком левой кнопки. После этого элемент можно снова повернуть с помощью контекстного меню, вызываемого щелчком правой кнопки (рис. 5.11).

Установите индуктивность, как показано на рис. 5.12. Соединение ее с имеющим-

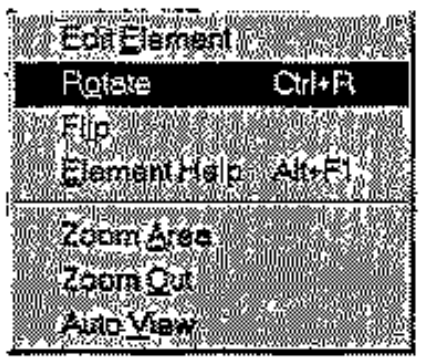


Рис. 5.11. Выплывающее меню для редактирования элемента

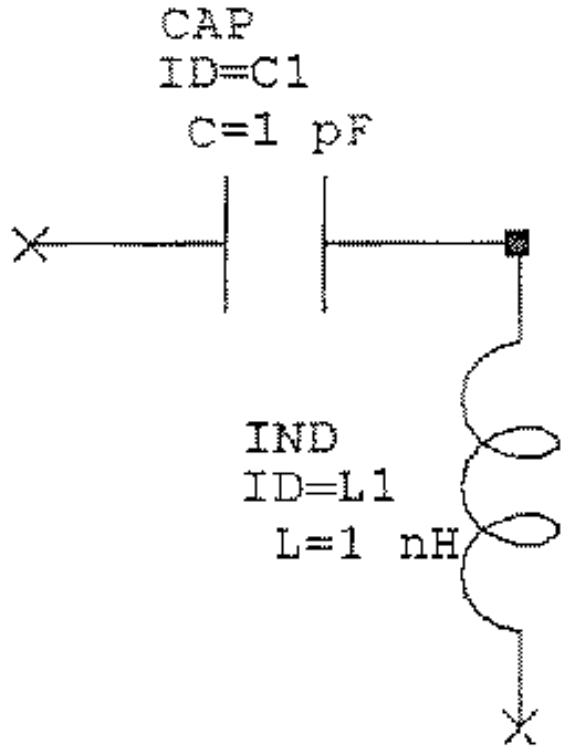


Рис. 5.12. Размещение на схеме конденсатора и индуктивности

ся на схеме конденсатором произойдет автоматически, если выводы двух компонентов касаются друг друга.

6. Копирование и вставка элементов схемы

Далее выделите два элемента, CAP и IND, обведя вокруг них пунктирный прямоугольник, при нажатой и удерживаемой левой кнопке мыши. В меню **Edit** выберите команду **Copy** (копирование). Затем в меню **Edit** выберите команду **Paste** (вставка), чтобы получить второе изображение. Установите элементы, как показано на рис. 5.13. (Можно также нажать клавиши **Ctrl+C** для копирования и **Ctrl+V** для вставки).

Далее следует добавить еще один конденсатор, чтобы схема получилась симметричной. Это можно сделать, выбрав конденсатор из закладки Elements (и перетащив его в окно схемы, действуя в соответствии с рекомендациями шага 4.

7. Соединения элементов

Теперь используйте средство трассировки, чтобы соединить выводы индуктивностей. Подведите курсор мыши на зеленый квадратик, означающий узел одной из индуктивностей. Когда курсор превратится в спиральку, произведено соединение с этим выводом. Щелкните левой клавишей мыши и протащите пунктирную линию к другому выводу. Затем следует щелкнуть курсором — знаки «X» превратятся в зеленые круги, и появится проводник, соединяющий эти выводы, как показано на рис. 5.13.

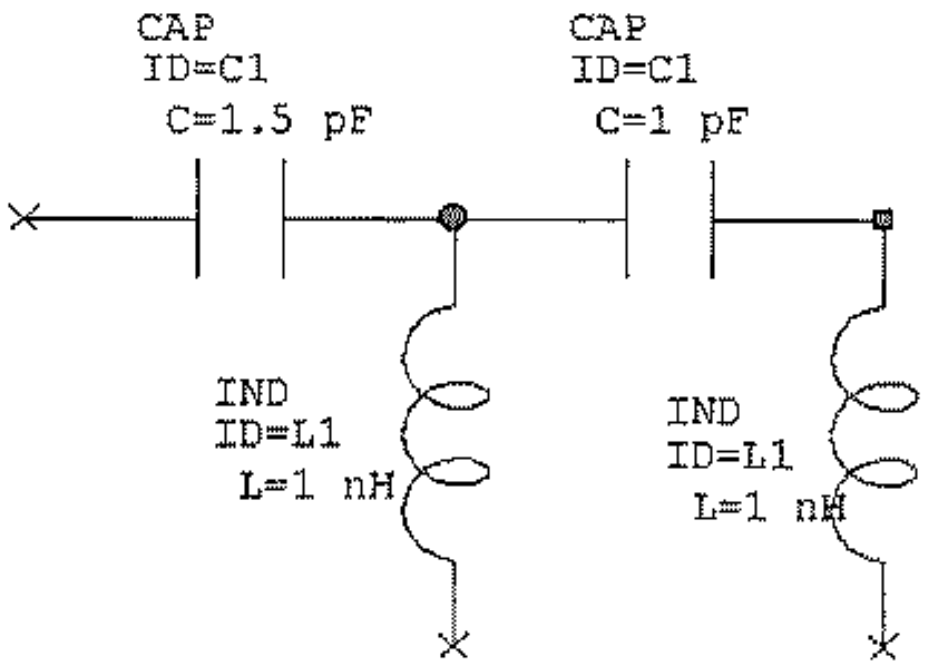


Рис. 5.13. Соединение компонентов

8. Редактирование параметров элемеитов

Величины элементов можно изменять с помощью диалогового окна Свойства, вызываемого двойным щелчком, по изображению элемента (рис. 5.14).

Список имеющихся в проекте компонентов помещен в верхний левый угол этого окна. Выберите в списке конденсатор **C** и установите значение его параметра Value (в данном случае емкость) равным 1.5 pF (пФ).

Вы можете также заменить тип компонента ID (C, L и т. п.) из числа имеющихся в схеме.

Затем выберите панель Constrained (ограничения) и установите значения нижнего предела и верхнего пределов параметров текущего компонента, в данном случае 0 pF и 3 pF. Наконец установите галочки в окошке **Tune** (ручная подстройка) и **Optimize** (оптимизация) и нажмите **OK**.

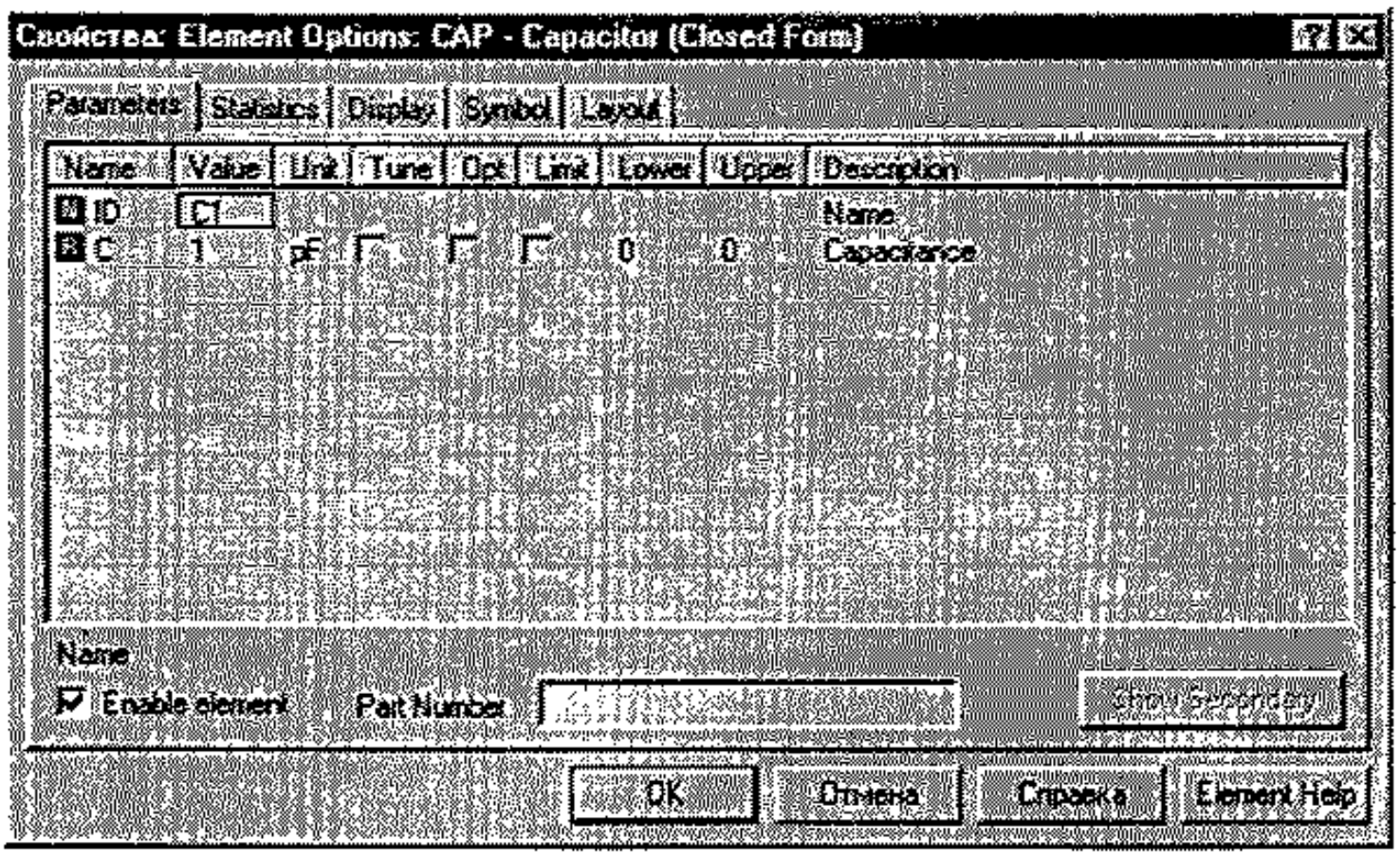


Рис. 5.14. Изменение величины элемента в диалоговом окне Свойства

9. Редактирование параметров на схеме

Для редактирования параметров компонентов схемы не обязательно вызывать диалоговое окно **Свойства**, это можно сделать прямо на схеме. Выделите не сам элемент, а его описание и сделайте двойной щелчок над параметром, который требуется изменить. Появится специальное окно редактирования с текущим значением параметра. Сделайте необходимые изменения и закройте окно простым щелчком в любом месте окна схемы.

10. Добавление заземления

Для завершения схемы фильтра нужно добавить порты и заземления. Добавьте два порта на входе и выходе, щелкнув левой клавишей на кнопке **Port** (порт), расположенной на инструментальной панели. Подобно другим элементам, они могут вращаться нажатием правой кнопки мыши. Добавьте элемент «земля». Завершите создание схемы фильтра рис. 5.15.

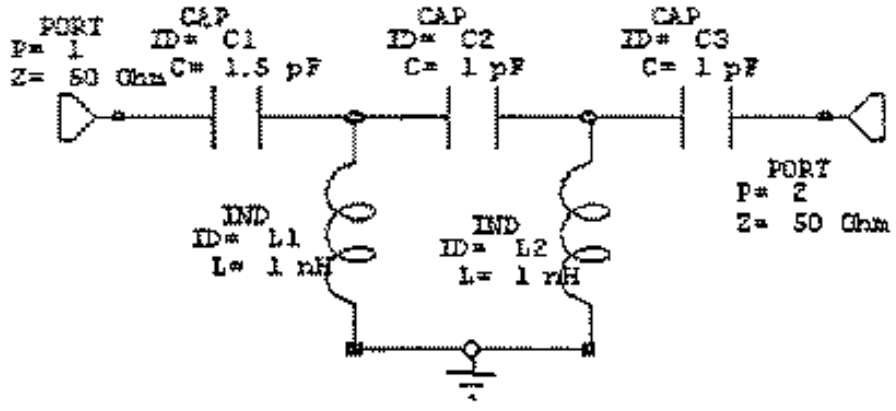


Рис. 5.15. Схема фильтра

11. Задание диапазона частот анализа

Для задания рабочего диапазона частот раскройте вкладку Project расположенную внизу основного окна. Выберите в иерархическом списке элемент **Project Options** (параметры проекта), что приведет к открытию одноименного диалогового

окна, в котором на вкладке **Frequency Values** (значения частоты) можно задать границы частотного диапазона и шаг изменения частоты (рис. 5.16).

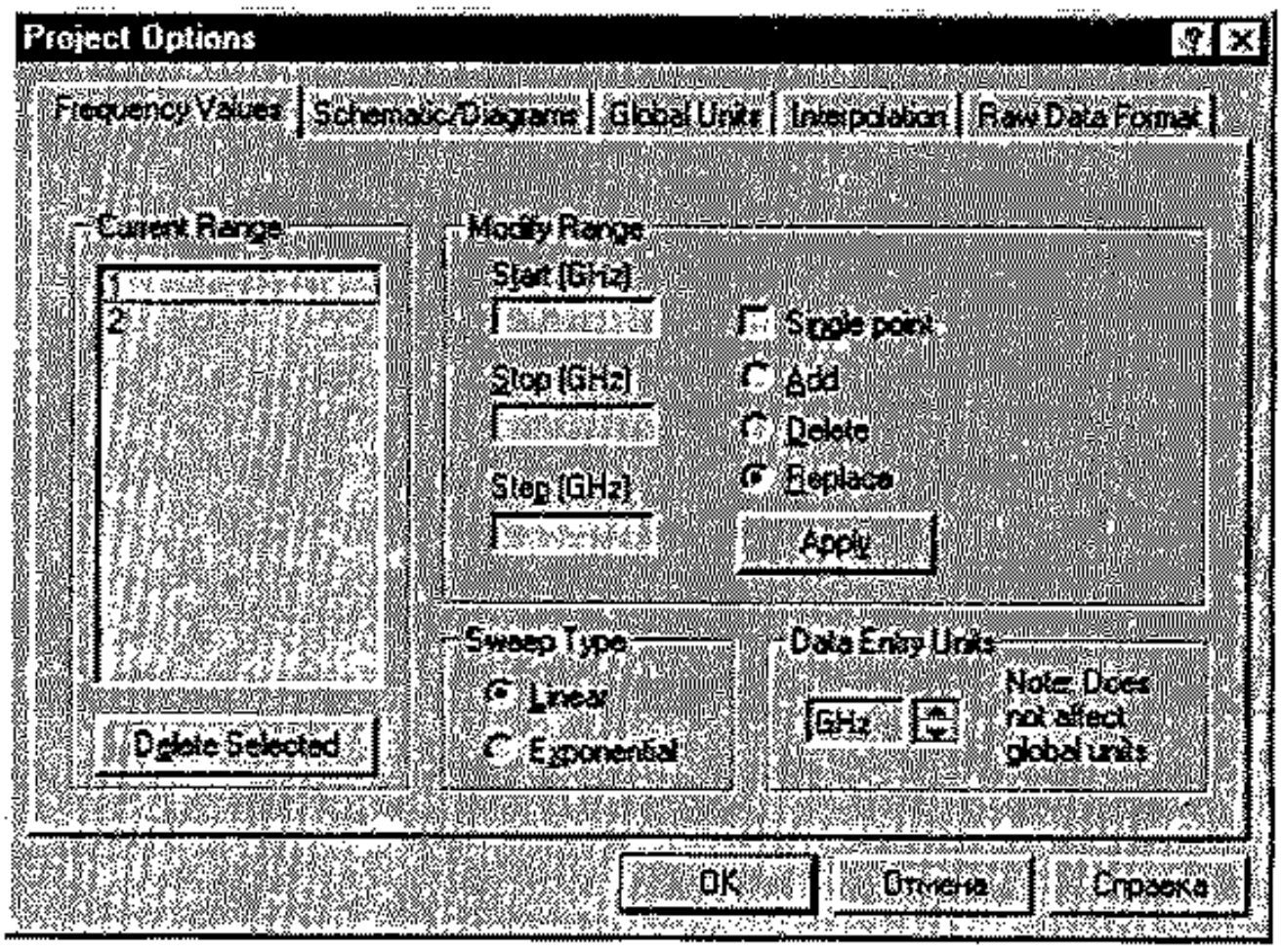


Рис. 5.16. Диалоговое окно задания диапазона частот

Введите в этом окие значения начальной частоты **Start**, конечной частоты **Stop** и величину шага **Step**. Нажмите кнопку **Apply** или **OK**.

12. Добаление графика

Для добавления в проект графика в меню **Project** выберите пункт **Add Graph** (добавить график) и в открывшемся диалоговом окие Create Graph (Создание графика) установите кнопку **Rectangular** (рис. 5.17). Для закрытия диалогового окиа нажмите кнопку **OK**.

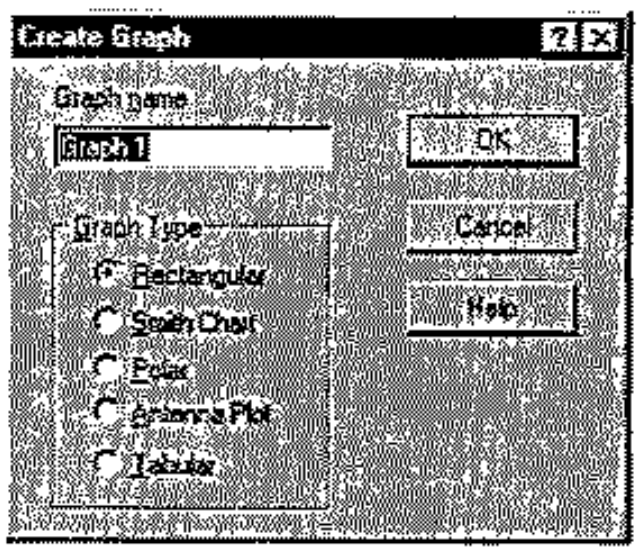


Рис. 5.17. Выбор типа графика

13. Выбор рассчитываемых величин

Задайте сначала величины, выводимые на первый график, для этого в меню **Project** создайте график **Graph 1**, а затем выберите команду **Add Measurement**. Отображаемые на графике характеристики выбираются в диалоговом окне, показанном на рис. 5.18.

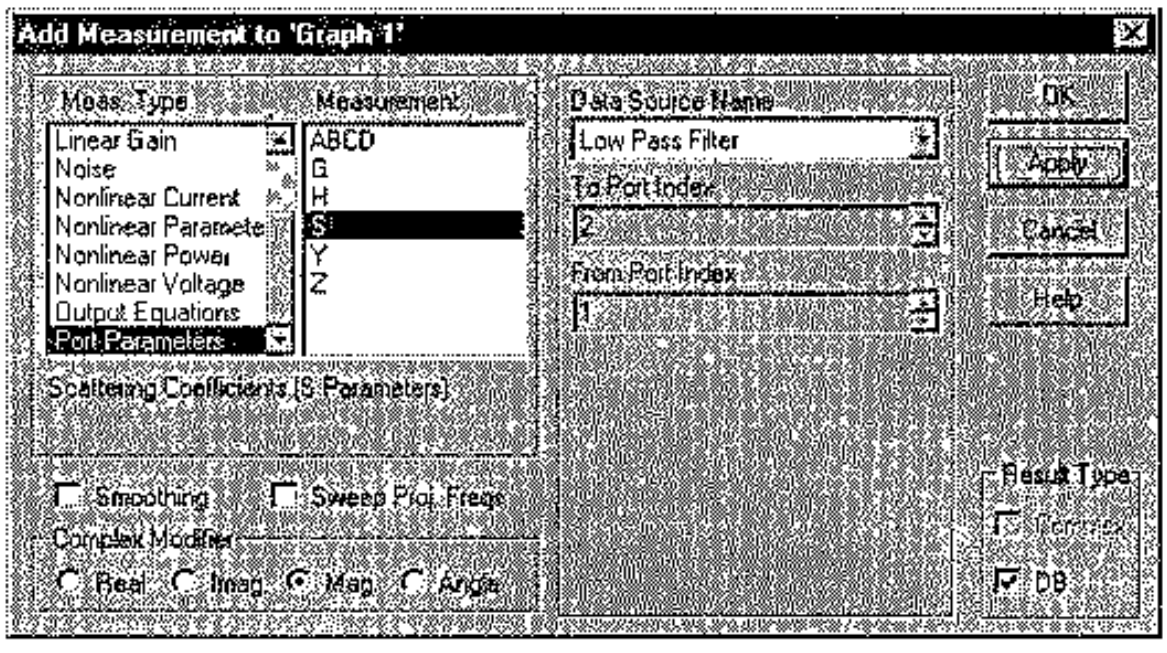


Рис. 5.18. Выбор рассчитываемых характеристик

В диалоговом окне **Add Measurement** (рис. 5.18) сделайте следующие установки:

- в списке **Meas. Type** (тип вычислений) выберите строку Port Parameters (параметры входа, выхода);
- в списке **Measurement** (расчет характеристики) выберите элемент **S** [S-параметры];
- в раскрывающемся списке **Data Source Name**, выберите элемент **Low Pass Filter** или **All Sources**;
- установите два индекса S-параметра To (From) Port Index;
- в графе **Result Type** (тип результата) установите флажок DB (дБ) и нажмите кнопку **Apply** (применить) чтобы добавить вычисление S11 (в дБ);
- нажмите **OK**.

14. Выполнение моделирования

Запустите моделирование, нажав на кнопку . По его окончании будет построен график, подобный изображенному на рис. 5.19. С помощи мыши можно передвинуть его в нужное место и изменить режим объединения точек на характеристиках и другие параметры графиков с помощью диалогового окна Grid Format Options (также можно выбрать формы маркеров, изменить стиль и цвета линий и сделать другие модификации).

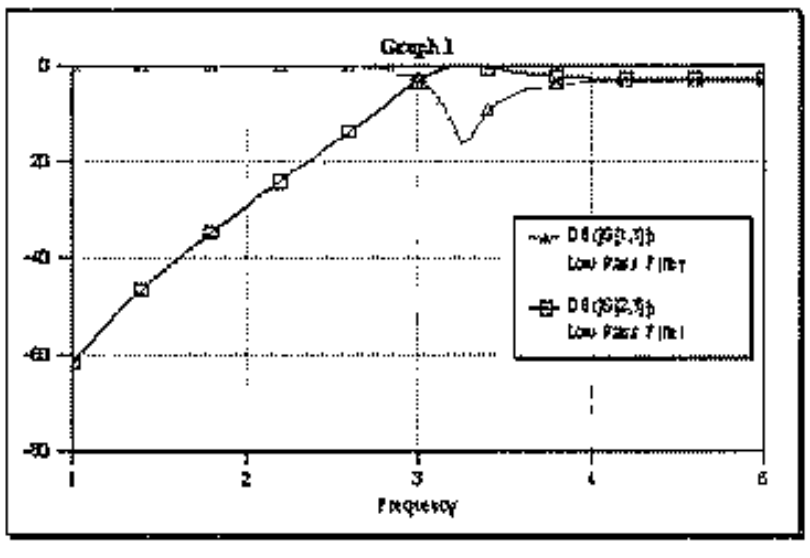


Рис. 5.19. Графики S-параметров

15. Переименование схемы

Посмотрите на характеристики фильтра — в действительности это фильтр верхних частот. Поэтому переименуйте схему. Выделите в дереве проекта схему Low Pass Filter, нажмите правую клавишу мыши и в появившемся меню выберите команду **Rename Schematic** для переименования схемы.

16. Настройка схемы

Нажмите на кнопку , в результате чего откроется диалоговое окно Variable Tuner (тюнер переменных, рис. 5.20). Тюнер переменных используется как механизм подстройки в реальном времени ранее введенных параметров (не более 10 одновременно), так что все изменения характеристик будут немедленно видны на графиках. Для работы с тюнером сначала нужно указать на подстраиваемые переменные. Для этого нажмите на кнопку , и затем щелчками курсора, изменив-

шего свою форму, укажите на подстраиваемые элементы, например L1:L, C3:C, R2:R.

Примечание: Каждый параметр элемента, выбранный для подстройки, меняет свой цвет на синий, и для его изменения создается новый движковый регулятор в окне Variable Tuner. Выбрав для подстройки в схеме фильтра на рис. 5.16 все 5 параметров, получим окно Variable Tuner, рис. 5.20.

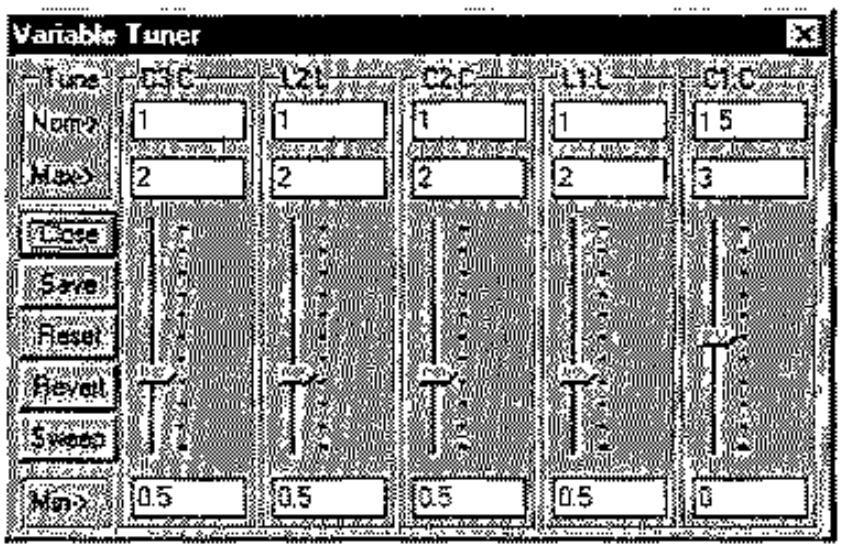


Рис. 5.20. Подстройка параметров

Попробуйте отрегулировать параметры, так чтобы получить следующий результат:

[S11] — не более минус 14 dB на частотах выше 3 ГГц;

[S21] — не менее минус 20 dB на частотах выше 2 ГГц.

17. Использование окна просмотра

Прежде, чем оптимизировать цепь, необходимо задать варьируемые параметры и ввести ограничения на их величины. Это может быть легко выполнено, выбирая на схеме символ элемента, как указано на шаге 8. Альтернативный и более быстрый путь — использование окна просмотра. Щелкните на закладке **Variables**, появятся введенные данные. Выделите пункт High Pass Filter в верхней половине окна просмотра. Оно должно быть похожим на рис. 5.21.

Кнопки «T», «O» и «C» используются для того, чтобы включить или отключить Tuning (Настройку), Optimization (Оптимизацию) и Constraints (Ограничения) параметров введенных элементов. Колонка Element (Элемент) включает идентификаторы ID введенных элементов. Нажмите на панель «T», чтобы вклю-

чить текущий элемент в тюнере переменных. Затем нажмите на панели «О» и «С» для каждого из параметров компонентов L и C.

Неизменяемыми остались только сопротивления Z. Введите верхнее ограничение 3 нГн и 3 пФ для каждого L и C элемента, соответственно.

Закройте тюнер переменных, щелкнув на крестик в его верхнем правом углу.

O	C	Element	Name	Value	Lower	Upper
☐	☐	C1	C	0.98	0	3
☐	☐	L1	L	1.55	0	3
☐	☐	C2	C	0.57	0	3
☐	☐	L2	L	1.53	0	3
☐	☐	C3	C	1.09	0	3
☐	☐	P1	Z	50	0	0
☐	☐	P2	Z	50	0	0

Рис. 5.21. Окно просмотра закладки Variables

18. Установки оптимизации схемы

После установки параметров теперь все готово для проведения оптимизации цели. Сначала в меню **Project** выберите команду **Add Opt Goal** (Добавить условия оптимизации, диалоговое окно показано на рис. 5.22).

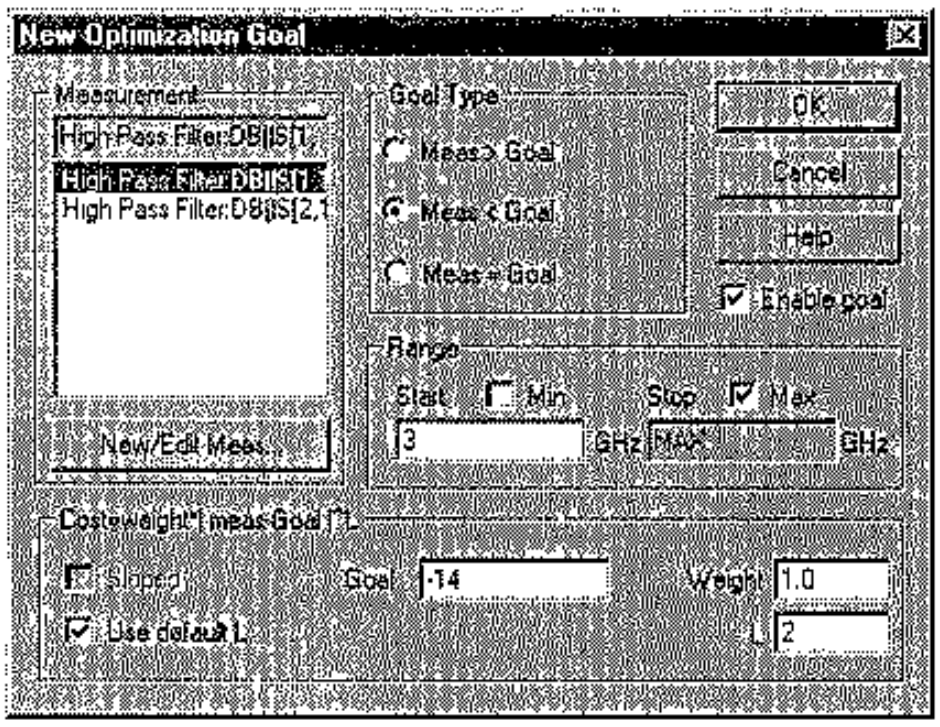


Рис. 5.22. Диалоговое окно команды **Add Optimization Goal**

Установите первую цель оптимизации, выбирая:

- **Measurement**: DB[S[1,1]] — оптимизируемая характеристика;
- **Goal Type**: Meas < Goal — критерий оптимизации;
- **Range**: 3 GHz для MAX — начальная частота в диапазоне частот, в котором должно выполниться условие оптимизации;
- **Goal** — цель оптимизации, равная в данном примере 14 дБ.

Повторите процесс оптимизации с целью добиться, чтобы S[21] < 25 дБ в диапазоне 0...2 ГГц.

19. Запуск на оптимизацию

В меню **Simulate** выберите команду **Optimize**. В открывшемся одноименном диалоговом окне установите флажок Show All Iterations (показать все итерации) и выберите любой из методов оптимизации в раскрывающемся списке Optimization Methods, рис. 5.23. Нажмите кнопку **Start** (пуск).

В дивлоговом окне будет вычерчен график функции ошибки (или Cost). Когда Cost = 0, нажмите кнопку **Stop**. На этом процесс оптимизации завершается.

На Graph 1 (график 1) переместите границы полосы частот вниз на несколько децибел. Это изменит условия оптимизации, запустите оптимизатор заново. Частотные характеристики фильтра до и после оптимизации приведены на рис. 5.24.

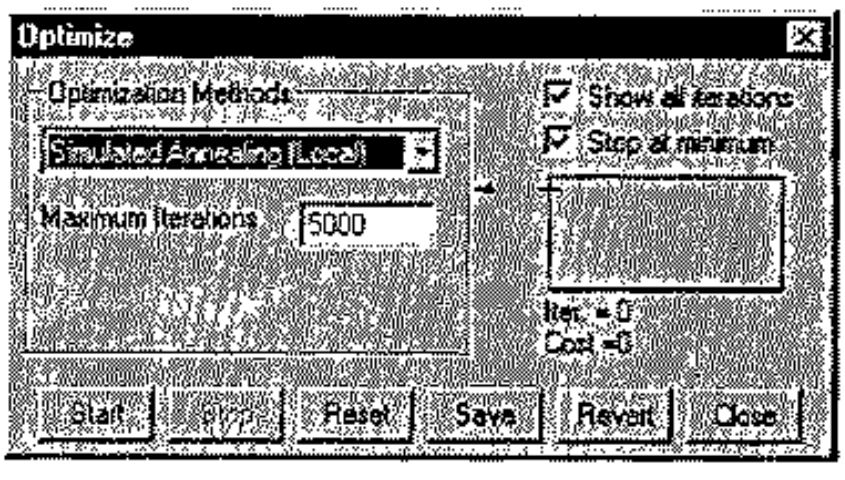
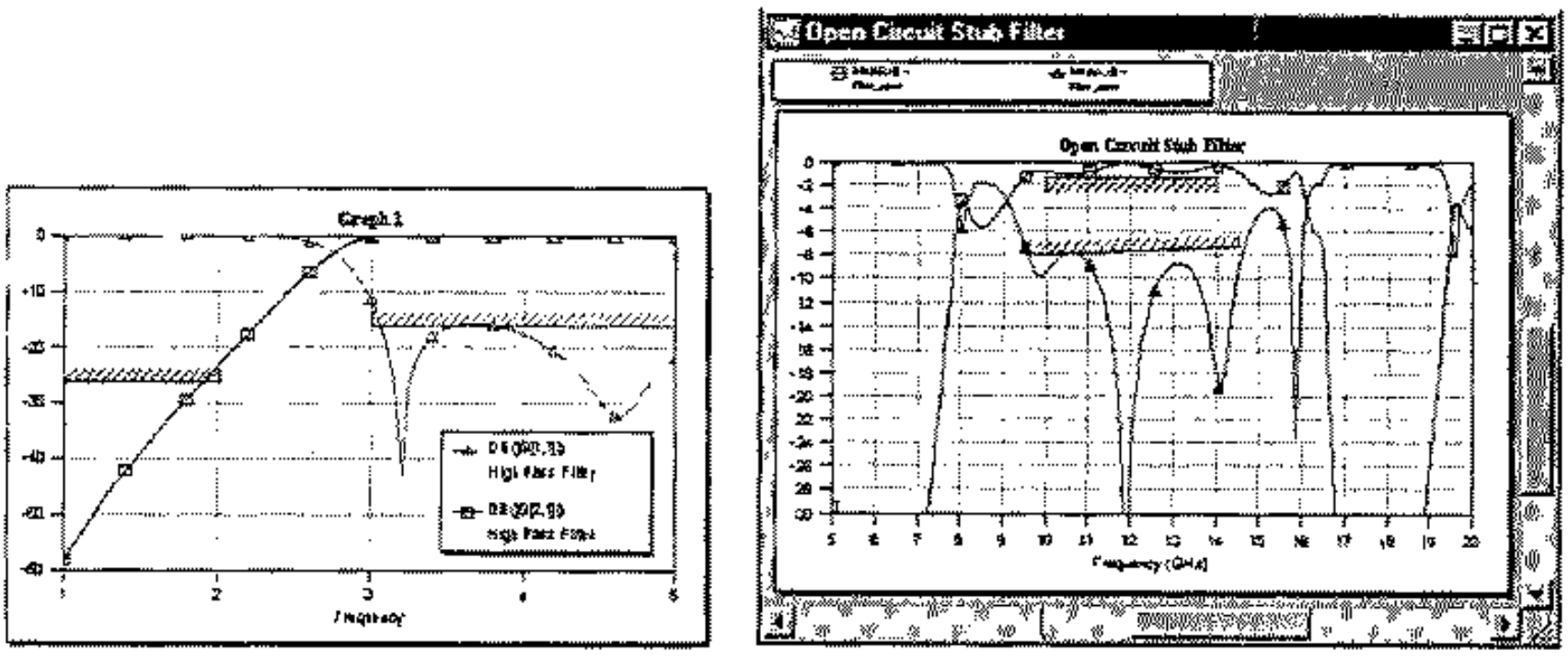


Рис. 5.23. Настройка и выполнение оптимизации



а) *б)*

Рис. 5.24. Исходные частотные характеристики фильтра

5.4.2. Усилитель, описанный в виде четырехполюсника

1. Создание нового проекта

В меню **File** выберите **New Project**, а в меню **File — Save Project As**. Введите имя нового проекта Standard Amplifier (стандартный усилитель) и нажмите **Save**.

2. Создание новой схемы

В меню **File** выберите **New Schematic** и в открывшемся диалоговом окне введите имя новой схемы Amplifier (усилитель).

3. Активизация просмотра элементов

Нажмите на закладку **Elements** в нижней части окна проекта.

4. Использование библиотечных данных

Выберите папку Data (данные) в нижней части окна просмотра элементов и нажмите на символ [+], чтобы раскрыть содержание библиотеки данных (рис. 5.25).

Примечание 1. *Для того, чтобы изменить стиль вывода элементов в этом окне, щелкните правой кнопкой мыши в нижнем окне просмотра элементов и выберите стиль Large Icons (большие иконки), Small Icons (маленькие иконки), Show Details (показ элементов в один столбец с указанием подробностей) или Show List (показ элементов в два столбца).*

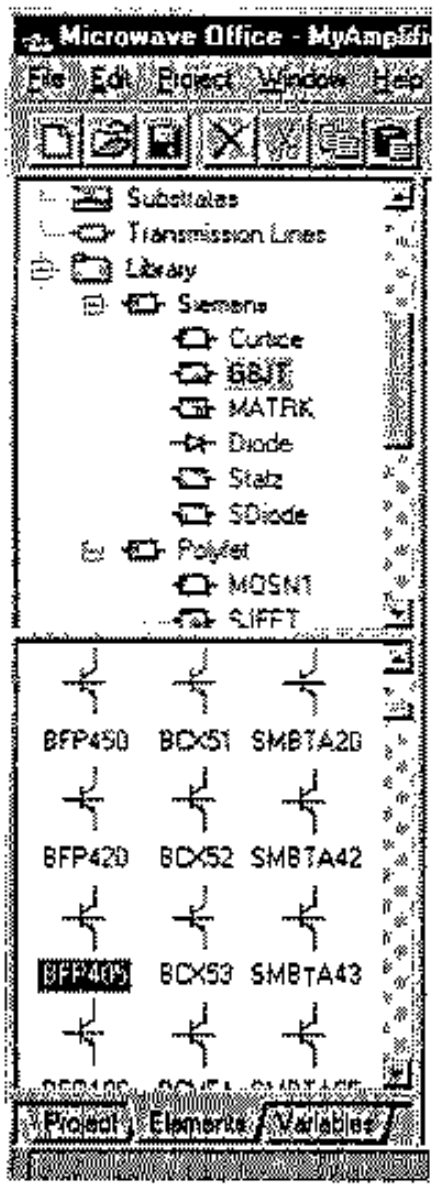


Рис. 5.25 Окно просмотра библиотек

Раскройте меню, чтобы увидеть различные компоненты в библиотеке данных.

5. Создание схемы

В каталоге **Data>Litton>MMICs** выберите усилитель LMA140A в виде четырехполюсника (рис. 5.26) и перетащите этот элемент в окно схемы.

Дополните схему двумя элементами PORT (порт), чтобы получить схему, изображенную на рис. 5.26.

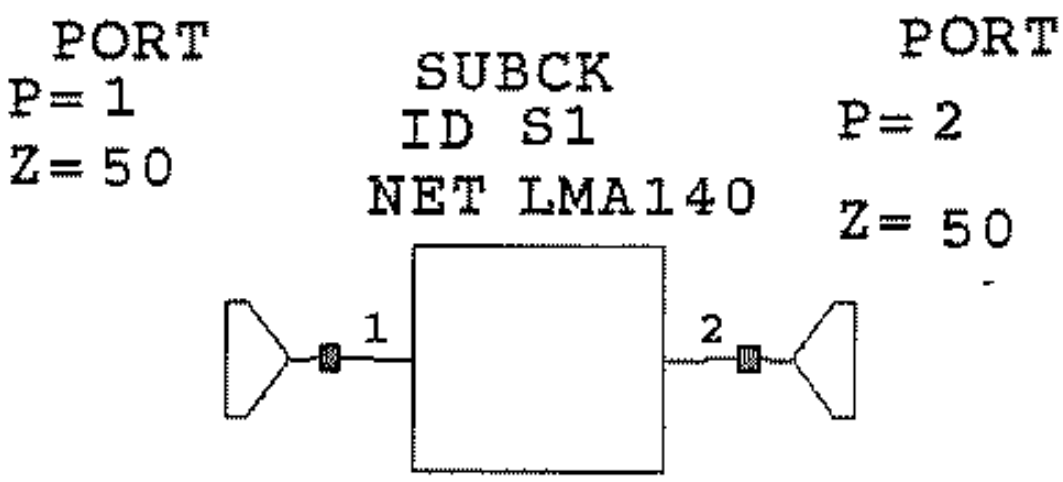


Рис. 5.26. Усилитель на основе LMA140A

6. Установка диапазона частот анализа

Для того чтобы установить диапазон частот, сначала вернитесь в основное окно проекта и дважды щелкните на Project Options. В поле ввода **Start** (начальная частота) введите 10 ГГц, в поле ввода **Stop** (конечная частота) введите 40 ГГц и в поле ввода **Step** (шаг) 5 ГГц. Установите переключатель **Replace** (заменить) и нажмите кнопку **Apply**.

7. Добавление графика

В главном меню **Project** выберите команду **Add Graph** и выберите тип графика Smith Chart (круговая диаграмма Смита).

8. Добавление результатов расчета

Определите перечень характеристик, которые должны быть построены на графике по результатам моделирования. В основном окне просмотра проекта выберите пункт Graph 1 и щелкните правой кнопкой мыши, в появившемся меню выберите команду **Add Measurement**. Альтернативный метод — в основном меню **Project** выберите команду **Add Measurement** появится дивлоговое окио, показанное на рис. 5.27.

В нем выберите следующие данные для определения параметра S_{11}:

- в раскрывающемся списке **Meas. Type** выберите **Port Parameters;**
- в списке **Measurement** выберите S-параметры;
- в раскрывающемся списке **Data Source Name** выберите All Sources;
- в раскрывающемся списке **To Port Index** установите 1;
- в раскрывающемся списке **From Port Index** установите 1;
- нажмите кнопку **Apply** и затем **OK**.

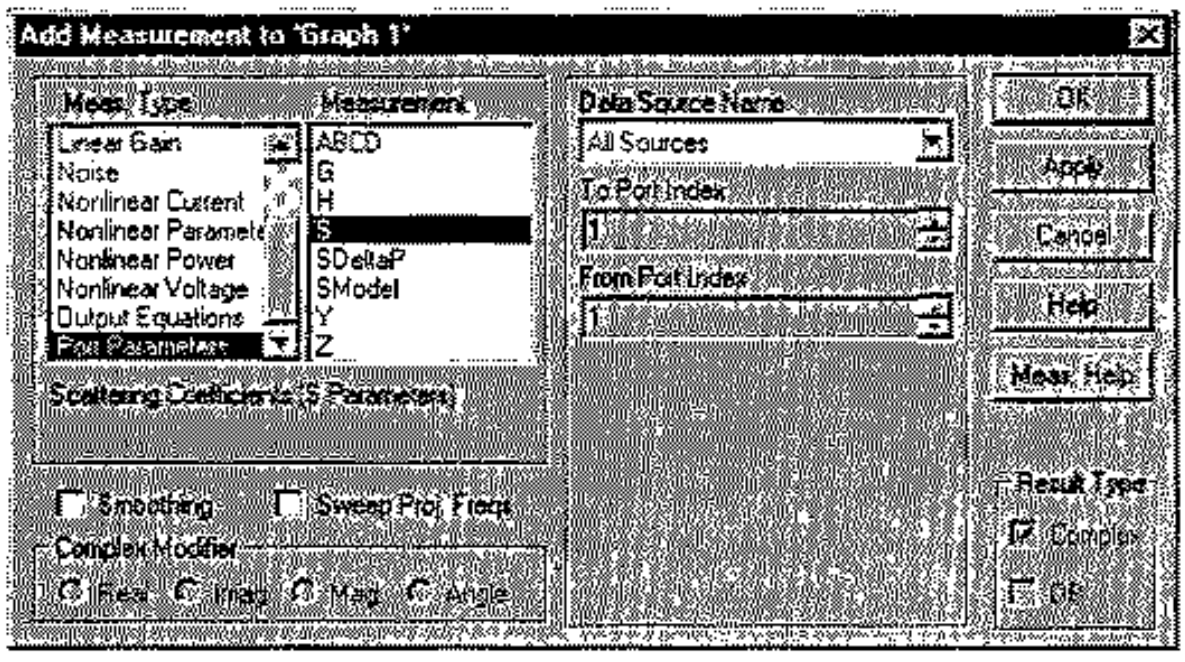


Рис 5.27. Определение характеристик расчета

9. Анализ цепи

Нажмите на кнопку  для выполнения моделирования. В результате расчетов должна быть получена диаграмма Смита с траекторией параметра S11 (рис. 5.28).

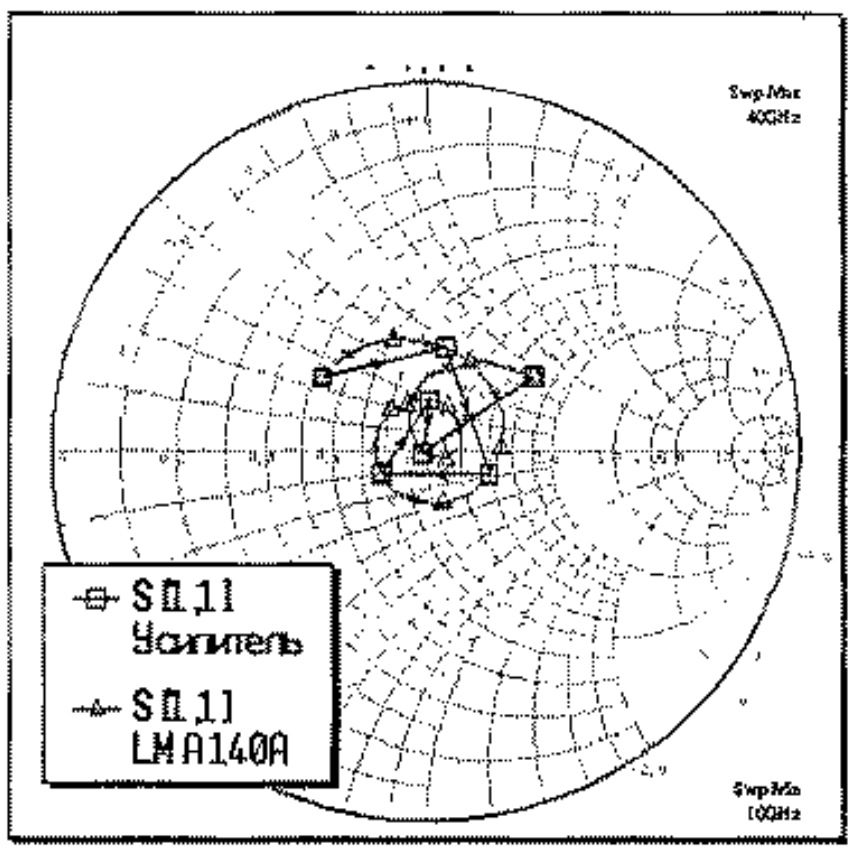


Рис. 5.28. Рассчитанные значения S11 усилителя на диаграмме Смита

Если для вычислений установлен параметр **All Sources** (все источники данных), то экспериментвльные данные *S*-параметров (из файла данных) также включатся в график.

5.5. Описание схемы в виде текстового файла

Кроме представления в виде символов, схему можно задать в виде текстового файла.

Netlist — это текстовое описание схемы. Иногда схему или подсхему удобно описать в виде текста, как это делалось в популярной программе **Touchstone** [3].

Default Ckt Option (значение параметров схемного файла по умолчанию) — обеспечивает установки по умолчанию для всех схем. Многие из параметров настройки могут быть отменены для конкретных схем.

Добавление текстового файла описания схемы к проекту

Щелкнув правой кнопкой мыши на группе **Circuit Schematics** в дереве проекта, вы можете выбрать следующие режимы для добавления Netlist к проекту:

New Netlist: создает пустой схемный файл. Эта команда работает с копией файла ***Netlist*** и делает его постоянной частью проекта. Схемный файл имеет расширение *.ckt.

Links to Netlist: обеспечивает связь с файлом, но не копирует его в проект. Файл в этом случае доступен только для чтения (рис. 5.29).

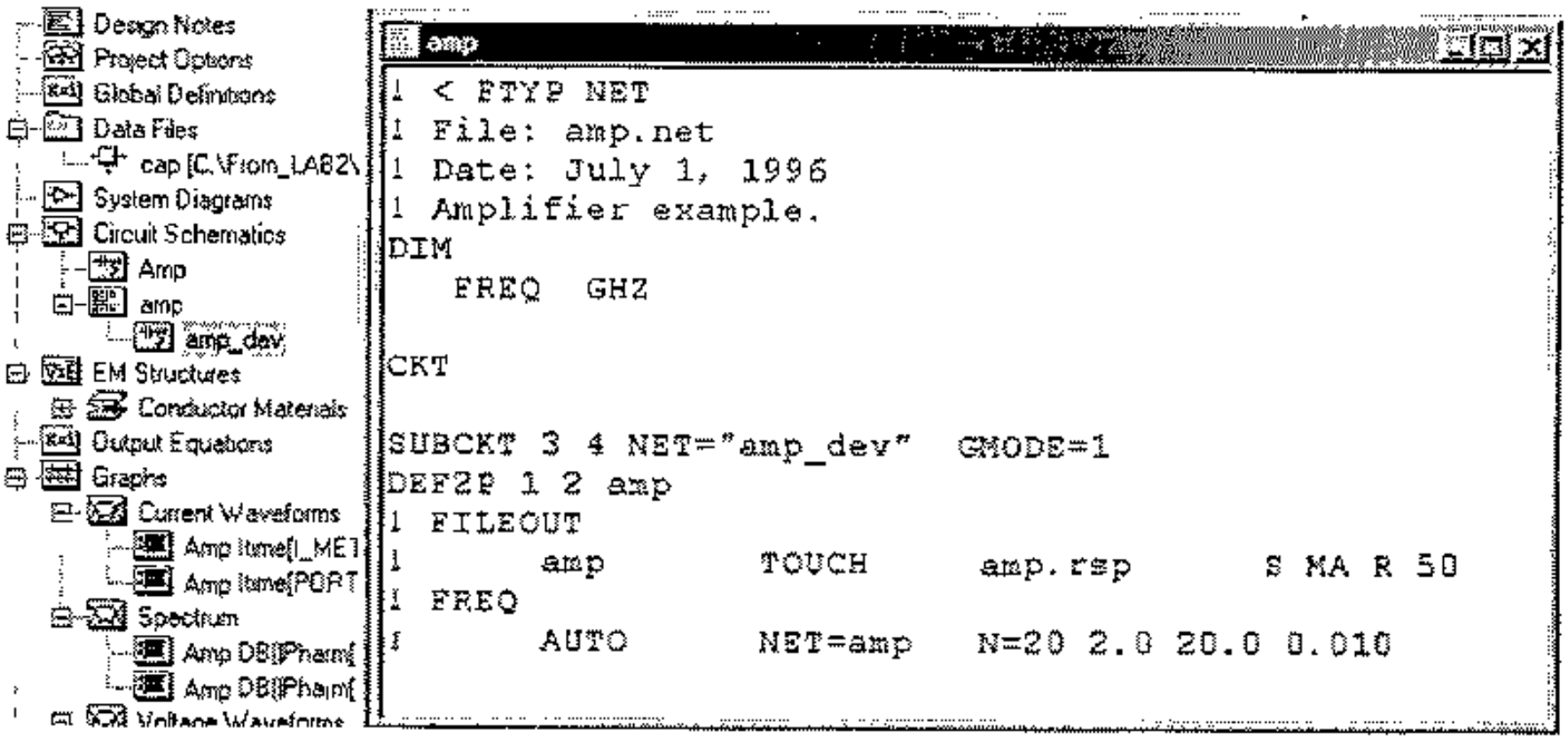


Рис. 5.29. Создание текстового описания схемы amp

Export Netlists — экспорт текстового файла Netlist, для чего в просмотре проекта выбирают **Export** из выплывающего меню.

Редактирование текстового файла описания схемы

Данные схемного файла Netlist размещены в текстовые блоки, которые должны появиться в следующем порядке:

DIM
VAR
EQN
CKT

Блок DIM

Блок DIM определяет размерность единиц. Единицы, которые не определены, по умолчанию будут иметь их базовые размерности (сопротивления в Омах, длина в метрах и т. д.). Слова в этом блоке не чувствительны к регистру (табл. 5.5).

Таблица 5.5. Базовые размерности параметров компонентов

Тип единицы	Ключевое слово	Разрешаемые величины
Частота	FREQ	Hz, kHz, MHz, GHz
Сопротивление	RES	OH, kOH, MOH
Проводимость	COND	/OH, /kOH, /MOH
Индуктивность	IND	pH, nH, uH, mH, H
Емкость	CAP	fF, pF, nF, uF, mF, F
Метрическая длина	LNG	um, mm, cm, m
Английская длина	LNG	mil, in
Время	TIME	ps, ns, us, ms, sec
Угол	ANG	rad, deg
Напряжение	VOL	uV, mV, V, kV
Ток	CUR	pA, nA, uA, mA, A

Пример:
DIM
LNG mil
RES OH
ANG rad
FREQ GHz

Блок VAR

Блок VAR определяет список переменных, которые могут использоваться уравнениями и компонентами схемы. Этот блок может отсутствовать.

Переменные должны появляться первыми и должны использоваться по правилам:

1. Первый знак должен быть символ
2. Переменная может содержать символы, числа или знак подчеркивания «_»
3. Не должно быть никаких пробелов
4. Имена читаются с учетом регистра

Имя переменной сопровождается оператором и числовыми данными, которые изменяются в зависимости от оператора (табл. 5.6).

Таблица 5.6. Операторы в Netlist

Оператор	Данные	Означает
=	Единственное значение	Присваивание
\	Единственное значение	Оптимизируемое
#	Наименьшее, номинальное, наибольшее	Для оптимизации внутри диапазона

Пример:
VAR
B = 10
C \ -3
D# -1 0 1

Блок EQN

Блок EQN подобен блоку VAR за исключением того, что он определяет уравнения, которые могут использоваться другими уравнениями и цепями. Этот блок может отсутствовать.

Сначала идет имя EQN, затем следует имя переменной. Имя переменной сопровождается оператором назначения и математическим выражением. Если выражение имеет больше чем одну составляющую, все выражение должно быть заключено в фигурных скобках. Имена переменных и именам уравнения чувствительны к регистру.

Пример:

```
EQN
e = 10
b = {1 + a*e}
g = {Sin(_PI)}
```

Заметим, что функции типа Sin(x) могут использоваться в записи. Для информации относительно доступных функций см. раздел «Встроенные функции».

Блок CKT

Блок CKT содержит список элементов, которые соединены друг с другом, приписывая числа к их узлам. Общий формат:

```
CKT
Element_name список узлов список параметра
..... Element_name список узлов список параметра
DEFNP список портов circuit_name
```

где:

Element_name — имя элемента.

Список узлов — числа, которые относятся к номерам узлов элемента. Число этих номеров в списке должно быть согласовано с числом узлов, определенных для элемента.

Список параметров — список, который приписывает величины параметрам элемента. Параметр назначается величине так же, как уравнения в блоке EQN. В качестве альтернативы, параметры могут быть установлены для оптимизации, использующей тот же самый формат, как переменные в блоке VAR. Элементы в списке должны быть отделены пробелами. Список может быть продолжен в новой линии, используя знак наклонной черты влево «\». Каждый перечисленный параметр должен точно быть согласован с именем параметра в определении элемента, иначе он будет игнорироваться. Параметрам элемента из списка, которые отсутствуют, будут даны значения по умолчанию.

DEFNP — определение многополюсника, где N — число внешних портов схемы.

Список портов — список чисел узлов, которые описывают, какие узлы являются внешними портами. Число узлов в списке должно быть согласовано с N в DEFNP.

Circuit_name — название этого блока CKT.

Должно иметься только одно определение порта в блоке CKT. Должен иметься один блок CKT в netlist.

Для справки обратитесь к библиотеке элементов для описаний всех имеющихся элементов.

Пример:
```
CKT
RES 1 2 R \ 10
TLIN 2 3 Z0 = 50 \
EL # 100 200 500
SUBCKT 2 4 NET = filter
GND 3
DEF2P 1 4 circuit1
```

Комментарии

Восклицательный знак (!) показывает, что линия является комментарием.

Пример. Описание четырехполюсника в виде текстового файла

Этот пример описывает 2-портовую схему, которая использует элемент подсхемы, чтобы подключить источник данных, определенный где-нибудь еще в проекте. Приведем текстовый файл, схема которого будет показана ниже, на рис. 5.30.

dim	! единицы размерности
res KOH	Сопротивления в килоомах
ind NH	Индуктивность в наногенри
var	! блок глобальных переменных
unit =.001	Задание значение переменной
unit = 1	! переопределение переменной
a \ 10	! тип real' слэш показывает оптимизацию
d # -1 0 1	! диапазон: знак показывает оптимизацию и границы: нижнее, начальное и максимальное значения
z = a	! переменная ссылается на ранее определенную переменную
! badVariable = {z + 20}	! ошибка синтаксиса. Переменная не может быть математическим выражением
! badVariable = z + 20	! ошибка синтаксиса
eqn	! блок глобальных уравнений
b = {1 + 1}	! математические выражения должны быть заключены в скобки
c = {cos (0)}	! можно использовать математические функции
baseInd = {b*c + d}	! уравнения могут использовать ранее определенные переменные
baseRes \ 5	! можно определить оптимизируемую переменную в уревнении
baseRes = {z + 20}	! можно переопределить уравнение

Продолжение таблицы

!	
! badEquation = z + 1	! ошибка (нет скобок)
ckt	! схемный блок
RES 1 2 R =.05	! реальный тип
! RES 1 2 R = -.05	! реальный тип (даже если указан знак «-»)
! RES 1 2 R = {.05}	! тип уравнения (даже если это просто число)
! RES 1 2 R = {unit*(baseRes + 30)}	! тип уравнения
! RES 1 2 R = unit*(baseRes + 30)	! ошибка (нет скобок)
! RES 1 2 R #.01.020.030	! тип диапазона: оптимизируемый и ограниченный: нижнее, номинальное и максимальное значение
! RES 1 2 R \ 20	! реальный тип: оптимизируемый
! RES 1 2 R \ b	! ошибка синтаксиса
! RES 1 2 R \ {2+4}	! ошибка синтаксиса
IND 2 3 L = baseInd	! тип уравнения (даже хотя здесь нет скобок)
! IND 1 2 3 L = 3	! слишком много узлов. Но ошибка будет указана только во время расчета
SUBCKT 2 4 NET = filter	! определение подсхемы с именем filter между 2 и 4
GND 3	! заземление 3 узла
def2p 1 4 circuit1	! определение схемы как ЧП с именем circuit1

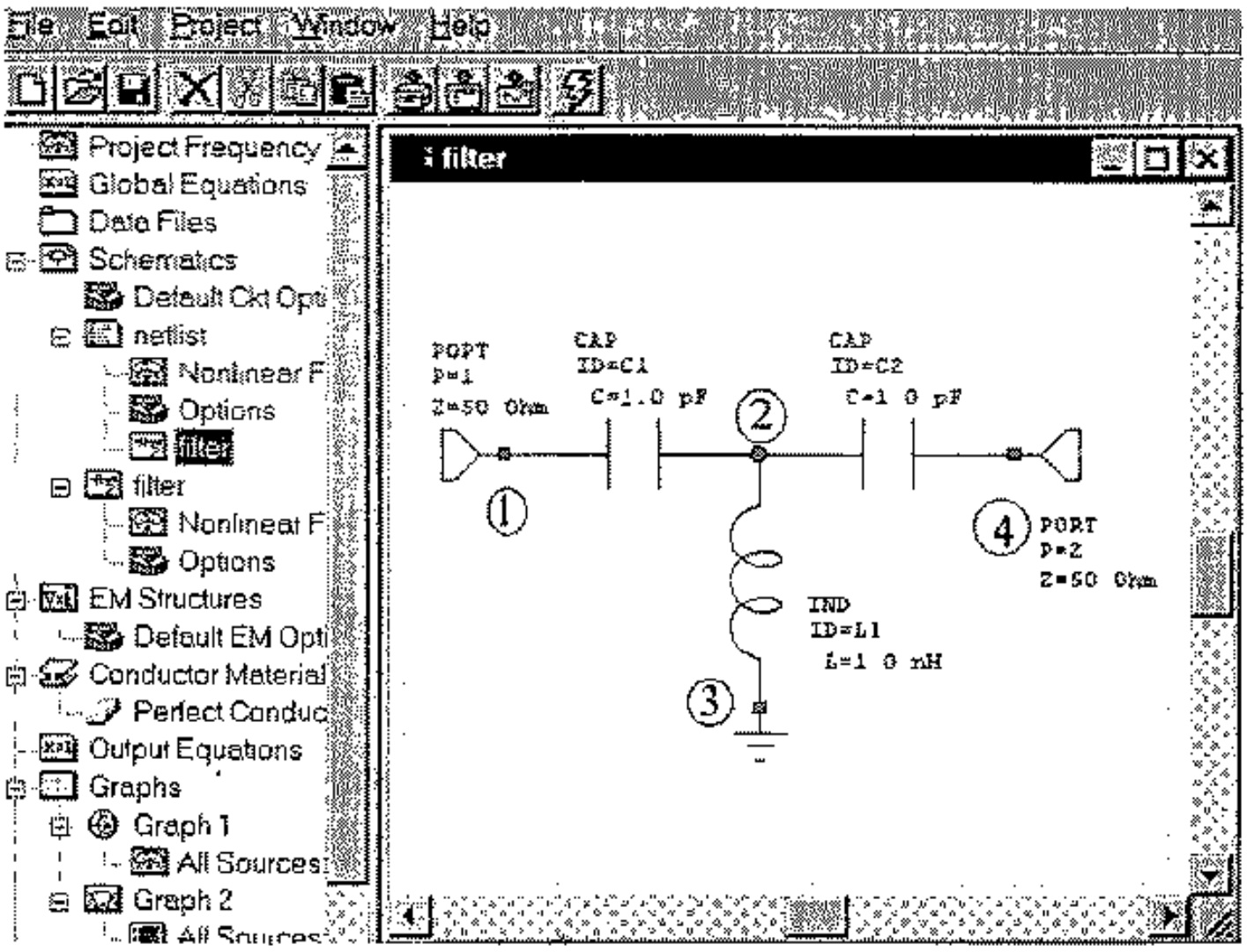


Рис. 5.30. Схема, анализируемая описанием схемного файла netlist

Описание схемы в схемном файле заканчивается определением имени def. В отличие от **Touchstone** [3], блоков вывода характеристик здесь нет. Вывод осуществляется через дерево проекта на графики рис. 5.31, 5.32, поскольку блок CKT является только частью всей схемы.

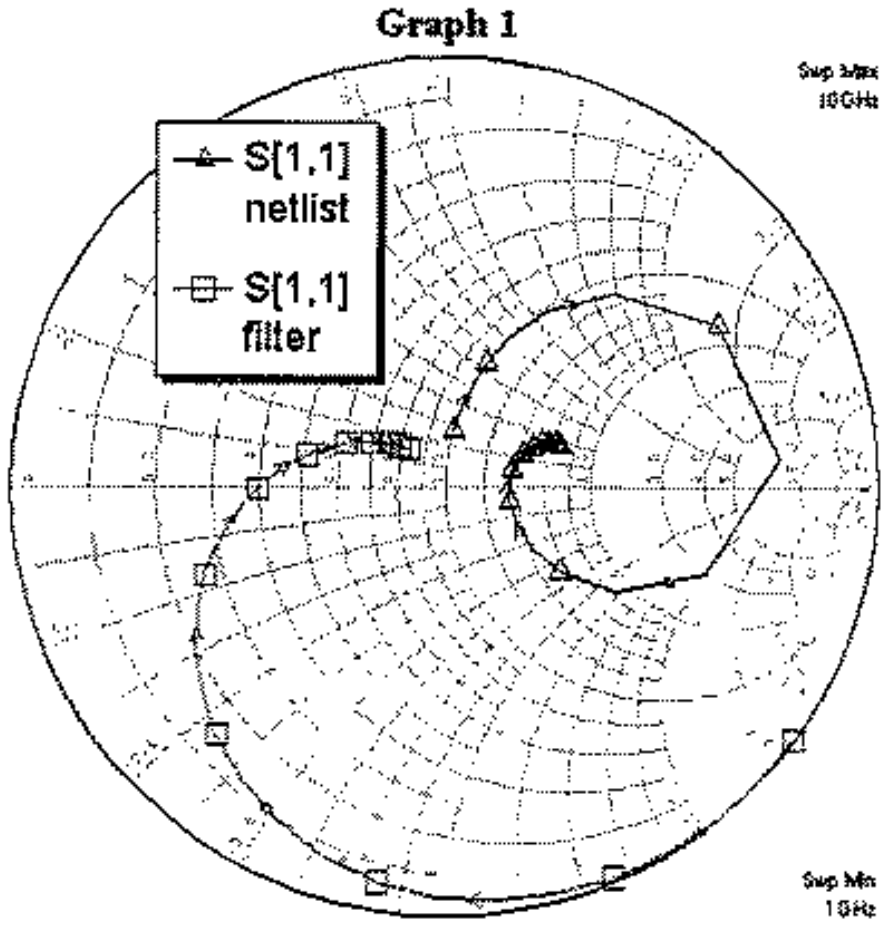


Рис. 5.31. Вывод S11 на диаграмму Смита

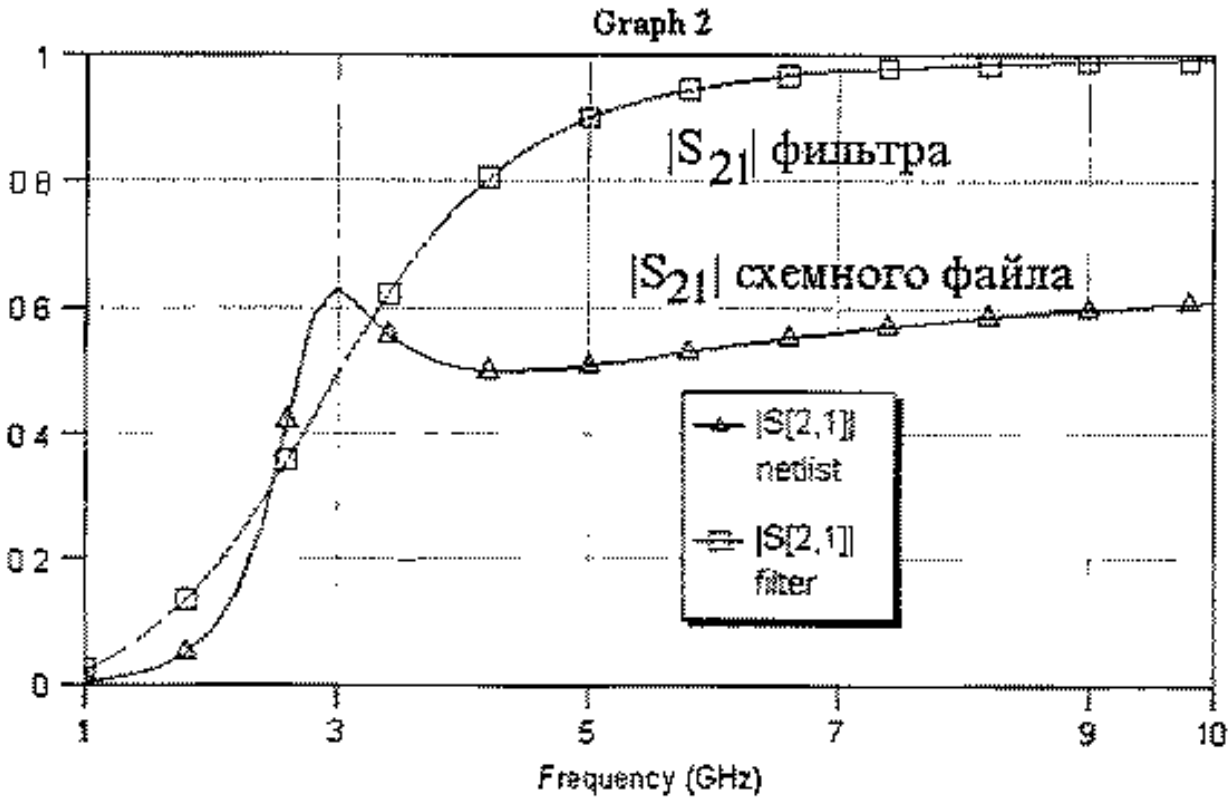


Рис. 5.32. Результаты расчета частотных характеристик

5.6. Переменные и уравнения

Уравнения — это блоки, в которых описаны связи переменных. Переменной назначается величина, которая может быть числом или любым математическим выражением.

Уравнения могут быть следующие:
- глобальные уравнения;
- уравнения расчета выходных характеристик (встроенные уравнения);
- схемные решения;
- текстовые файлы Netlist.

Глобальные уравнения

Переменние, заданные своими именами, и связь между ними помещаются в графическом поле блока *Global Definition*. Двойной щелчок на этом пункте в дереве проекта позволяет просмотреть их. Уравнения, заданные здесь, могут быть вызваны еще где-нибудь в проекте.

Встроенные уравнения

Встроенные уравнения размещены в блоке Output Equations. Двойной щелчок позволяет их просмотреть. Главная цель этой области — предоставить место, чтобы определить встроенные уравнения.

Встроенные уравнения используются для расчета характеристик и рассчитывают переменные, которые могут использоваться в других уравнениях точно так же, как любая другая переменная. Следующий пример определяет переменную с именем «s_data» и присваивает ей значение S_{11} усилителя Amp1:

$$s_data = Amp1:S\ [1,1].$$

После моделирования переменная будет равна величине S11 для каждой частотной точки моделирования.

Переменные, определенные в поле определения уравнения могут быть только вызваны внутри этого окна (рис. 5.33) или использоваться в уравнениях для подготовки вывода на график.

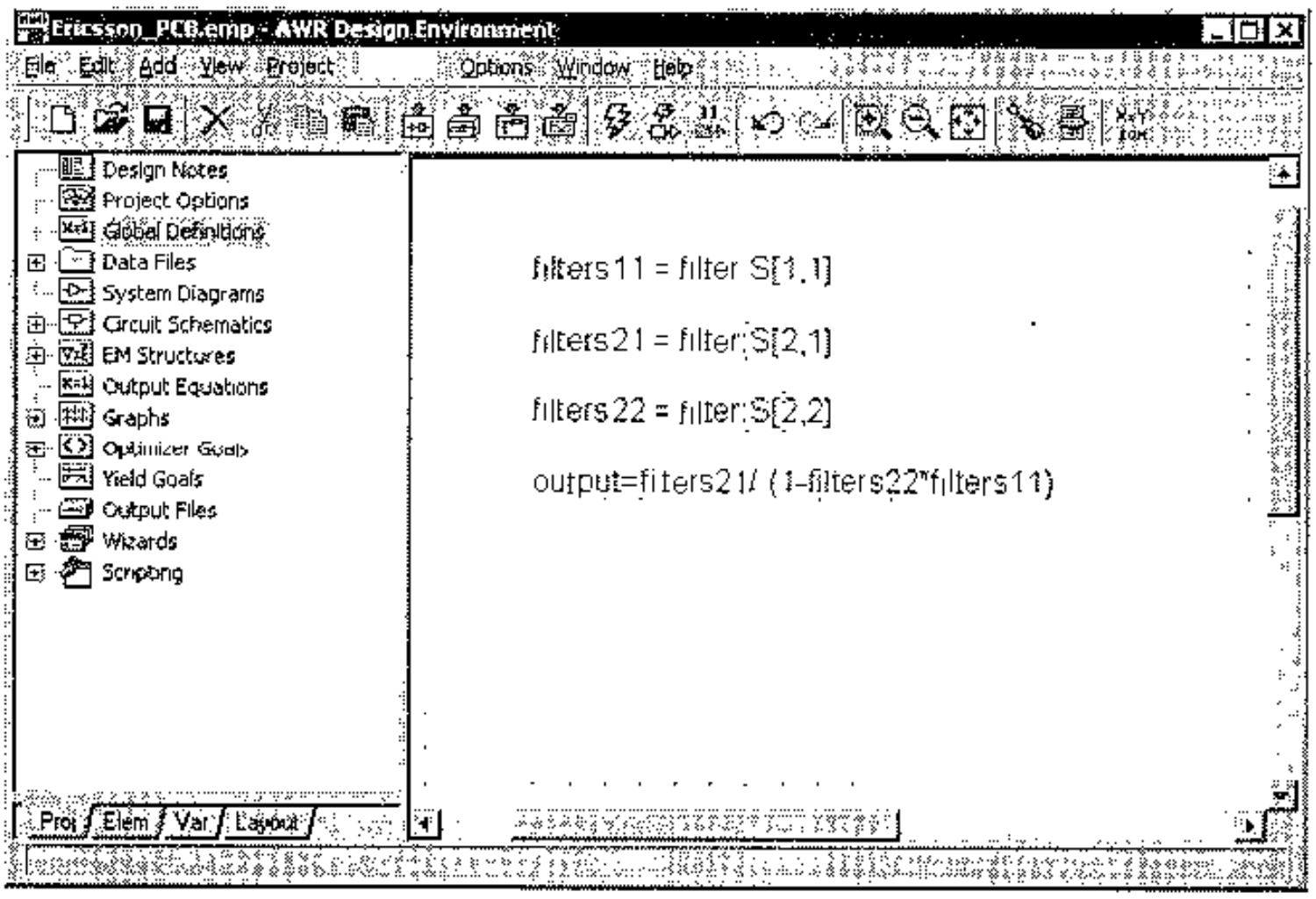


Рис. 5.33. Внесение уравнения в поле Global Equation (Global Definition)

Переменные,определенные в схеме, считаются локальными для этой схемы и не могут быть использованы в описании любой компоненты проекта. Переменные могут быть вызваны другими уравнениями или параметрами элемента схемы.

Чтобы создать уравнение, сначала открываются просмотр глобальных уравнений, уравнений расчета выходных характеристик или схемные уравнения. Выберите **Add | Equation** (Ctr+E) или нажмите кнопку панели **EQN**.

Нажмите в окне, где уравнение должно быть размещено. Напечатайте уравнение, и нажмите снаружи текстового прямоугольника, или нажмите Apply, когда операция закончена.

Уравнения могут быть отредактированы двумя способами: оперативное редактирование или через диалог.

Оперативное редактирование уравнений

Дважды щелкните уравнение, и появится текстовый прямоугольник редактирования Сделайте желаемые изменения, нажмите снаружи текстового прямоугольника или нажмите **Enter**.

Диалог редактирования уравнения

Диалог редактирования уравнения допускает изменения текста так же, как других атрибутов. Чтобы открыть диалог (рис. 5.34), выберите уравнение, и затем выберите **Edit Equation** выплывающего меню при нажатии правой кнопки.

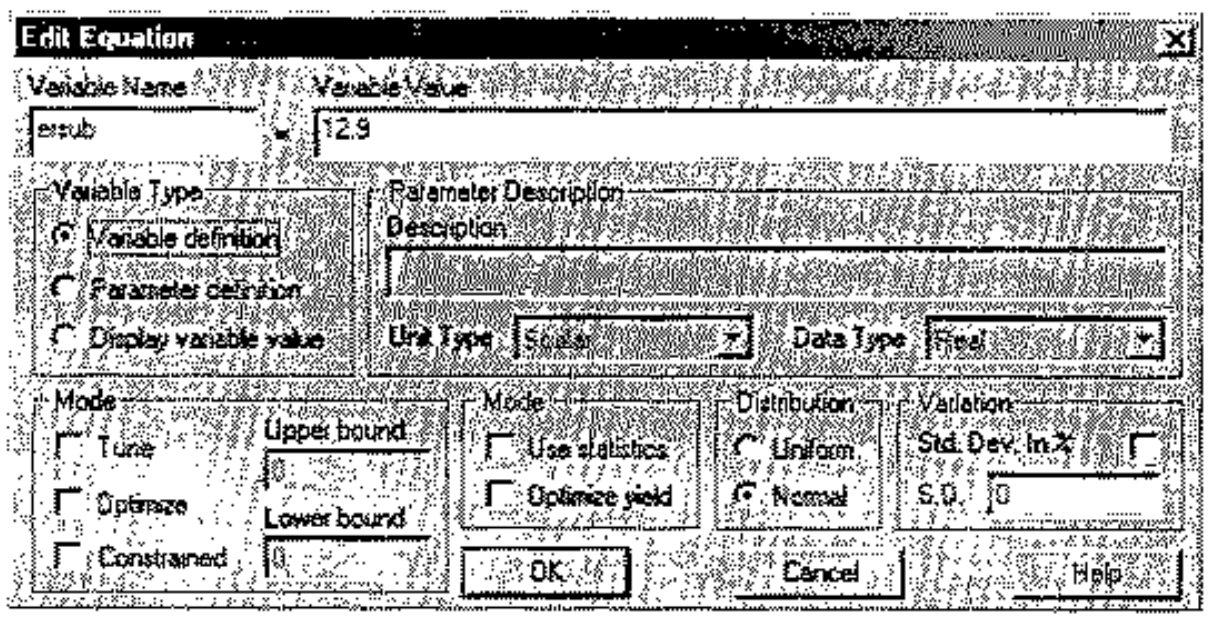


Рис. 5.34. Диалог редактирования уравнения

Этот диалог **Edit Equation** позволяет модифицировать переменные или уравнения. Чтобы показать этот диалог, выберите уравнение в окне и нажмите правую кнопку мыши, и выберите **Properties**. Этот диалог содержит следующие опции:

Таблица 5.7. Компоненты редактирования уравнений

Поле	Описание
Vanable Name	Имя переменной
Variable Value	Величина переменной, которая может быть описана простой численной величиной. Однако в окно Expression может быть введено и любое математическое выражение

Продолжение табл. 5.7

Поле	Описание
Variable Type	Тип переменной, связанной с математическим выражением
Mode	Режим выбора типа переменной, используемой в выражении
Tune	Выбор переменной для подстройки
Optimize	Выбор переменной для оптимизации
Continuous / Discrete	Дискретные переменные могут использоваться, когда применяется описание дискретными величинами, или несколькими числами
Constrained	Задание нижней и верхней границы диапазона изменения переменной при оптимизации

Программа **Voltaire XL** поддерживает и дискретные и непрерывные переменные. Дискретные переменные могут использоваться, только когда применяется описание дискретными величинами, или желательно, чтобы сохранить переменную, которая будет округлена к четному числу.

Переменная может быть описана как постоянное число или математическое выражение:

```
A = 6
Val = x * (4 + y)
```

Функция может быть определена так, что за ней следуют имена переменных со списком аргументов в круглых скобках. Следующий пример задает функцию, которая имеет два аргумента:

```
SUM (a, b) = + b
```

Здесь функция SUM суммирует аргументы «a» и «b» и присваивает результат переменной «b». Следующее уравнение

```
c = SUM (-3, 2*4)
```

присвоит переменной «c» значение (-3) + (2*4).

Показ уравнения

Эта команда позволяет увидеть величину предварительно определенного уравнения. Кроме того, можно показать любое математическое выражение. Результат выражения показан, когда проект моделируется. Следующая система уравнений:

```
Val = 5
Val:
Val + 4:
Com (0):
```

произведет следующие вычисления после моделирования:

```
Val = 5
Val: 5
Val + 4: 9
Com (0): 1
```

Уравнения, выполняемые над выходными данными расчета

Выходное уравнение может быть добавлено к уравнениям только в дереве проекта. Чтобы создать выходное уравнение открываются Output Equation (рис. 5.35). Откройте закладку Var и выберите **Add | Output Equation** из меню и заполните диалог расчета характеристик, чтобы зарегистрировать имя переменной и источник данных. После этого эти переменные, рассчитанные в результате записанных уравнений, появятся в диалоге **Measurement**, если выбрать строку Output Equation.

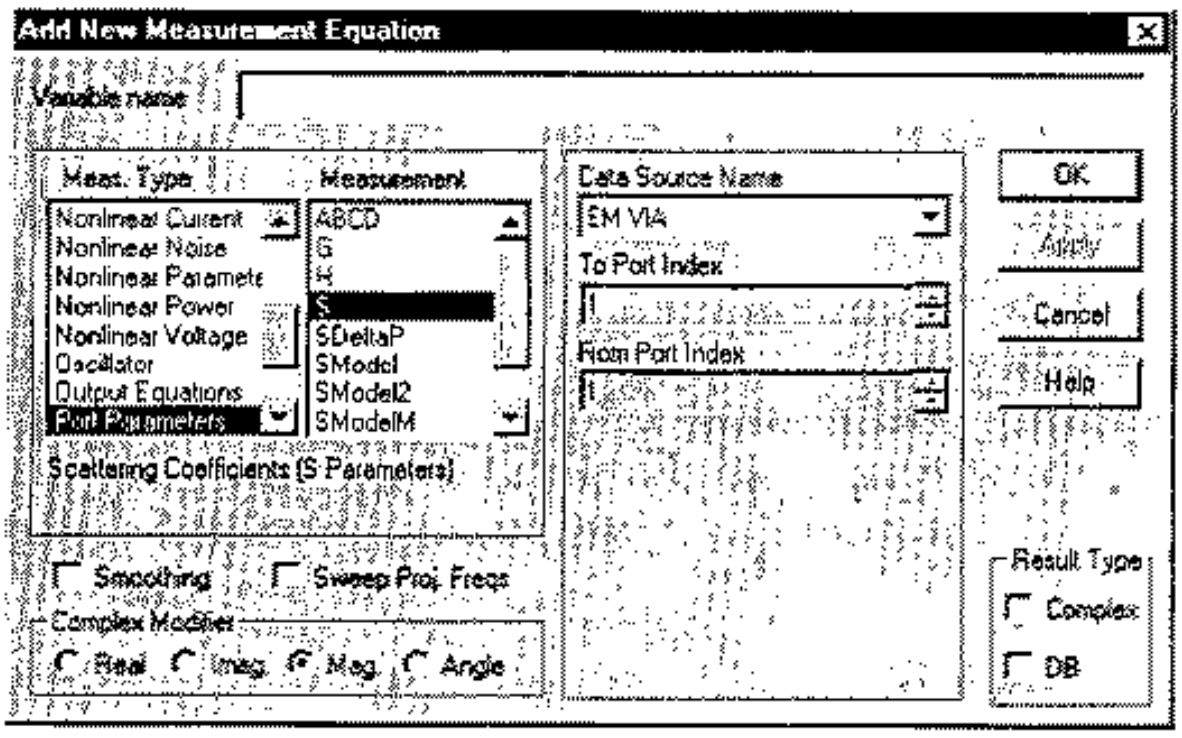


Рис. 5.35. Диалог добавления нового уравнения для обработки результатов расчета

Диалог **Add New Measurement Equation** позволяет Вам описать уравнения для расчета конкретной характеристики для пост-процессорной обработки данных. Чтобы показать этот диалог, выберите **Add > Output Equation** когда активно окно выходного уравнения. Этот диалог содержит следующие опции:

Таблица 5.8. Компоненты уравнений расчета характеристик

Поле	Описание
Variable Name	Имя уравнения
Meas Type, Measurement	Выбор конкретной характеристики для пост-процессорной обработки

Основа уравнения — это имя переменной слева от оператора назначения и математическое выражение справа. Синтаксис выражения проверяется согласно алгебраическим правилам. Если выражение не верное, уравнение будет показано зеленым цветом, а ошибки перечислены в окне ошибок.

В математических выражениях применяется правило алгебраического старшинства.

Порядок, в котором уравнения размещены на экране, определяет приоритет их вычисления. Переменная, которая должна использоваться в другом уравнении, должна быть определена ранее. Порядок приоритета определен следующим образом:

1. Уравнения, которые находятся ниже на странице, имеют более высокий приоритет.

2. Если два уравнения находятся на той же самой линии на странице, то вычисления выполняются слева направо.

Операторы

\+ — сложение;
\- — вычитание;
* — умножение;
/ — деление;
^ — возведение в степень.

Таблица 5.9. Встроенные функции, используемые для составления уравнений в проекте

Функция	Описание
sin(x)	Синус x, где x в радианах
cos(x)	Косинус x, где x в радианах
tan(x)	Тангенс x, где x в радианах
sinh(x)	Гиперболический синус x, где x в радианах
cosh(x)	Гиперболический косинус x, где x в радианах
tanh(x)	Гиперболический тангенс x, где x в радианах
arcsin(x)	Арксинус x, где результат в радианах
arccos(x)	Арккосинус x, где результат в радианах
arctan(x)	Арктангенс x, где результат в радианах
exp(x)	Экспонента x
log(x)	Натуральный алгоритм x
log10(x)	Десятичный логарифм x
sqrt(x)	Корень квадратный от x
stepped(start,stop,step)	Возвращает вектор реальные величины. Все аргументы должны быть реальными и скалярными
if(cond,trueval,falseval)	Оператор если. Если 'cond' правда, тогда 'trueval' иначе присваивается величине 'falseval'. 'cond' должна быть реальной и скалярной величиной
sign(arg)	Возвращает 0 если arg = 0, 1 если arg > 0, -1 в другом случае. arg должен быть реальным
heaviside(arg)	Возвращает 1, если arg > или равен 0, 0 в противоположном случае. arg должен быть реальным
vlen(arg)	Возвращает длину вектора arg
der(x,y)	Возвращает производную по x по отношению к изменению y
min(a,b)	Если a и b — реальные векторы, возвращается вектор с величиной a[i]<b[i]
max(a,b)	Если a и b — реальные векторы, возвращается величина a[i]>b[i]
unwrap(x,d)	Выделение выражения X, представляющая изменяемые реальные данные (обычно фаза). D — порог, который добавляет смещение 2*D к данным, если имеются больше чем изменение D от одной точки до следующей. Порог D должен быть реальной и скалярной величиной

Глобальные постоянные

_PI — математическая постоянная π (3.14159...).
i, j — мнимая единица, равная $\sqrt{-1}$.

Представление комплексных функций

Переменная может быть комплексным числом и записана так:

Complex Z = 50 — j*1. 3

В заключении покажем часть фрагмента уравнений, состааленных в проекте анализа микросхемы (рис. 5.36). Уравнения в этом примере описывают параметры подложки и топологии. Коэффициенты и данные можно оптимизировать и подстраивать, как и параметры любых элементов схемы (пример: MMIC Two Stage Amplifier в каталоге примеров MWO).

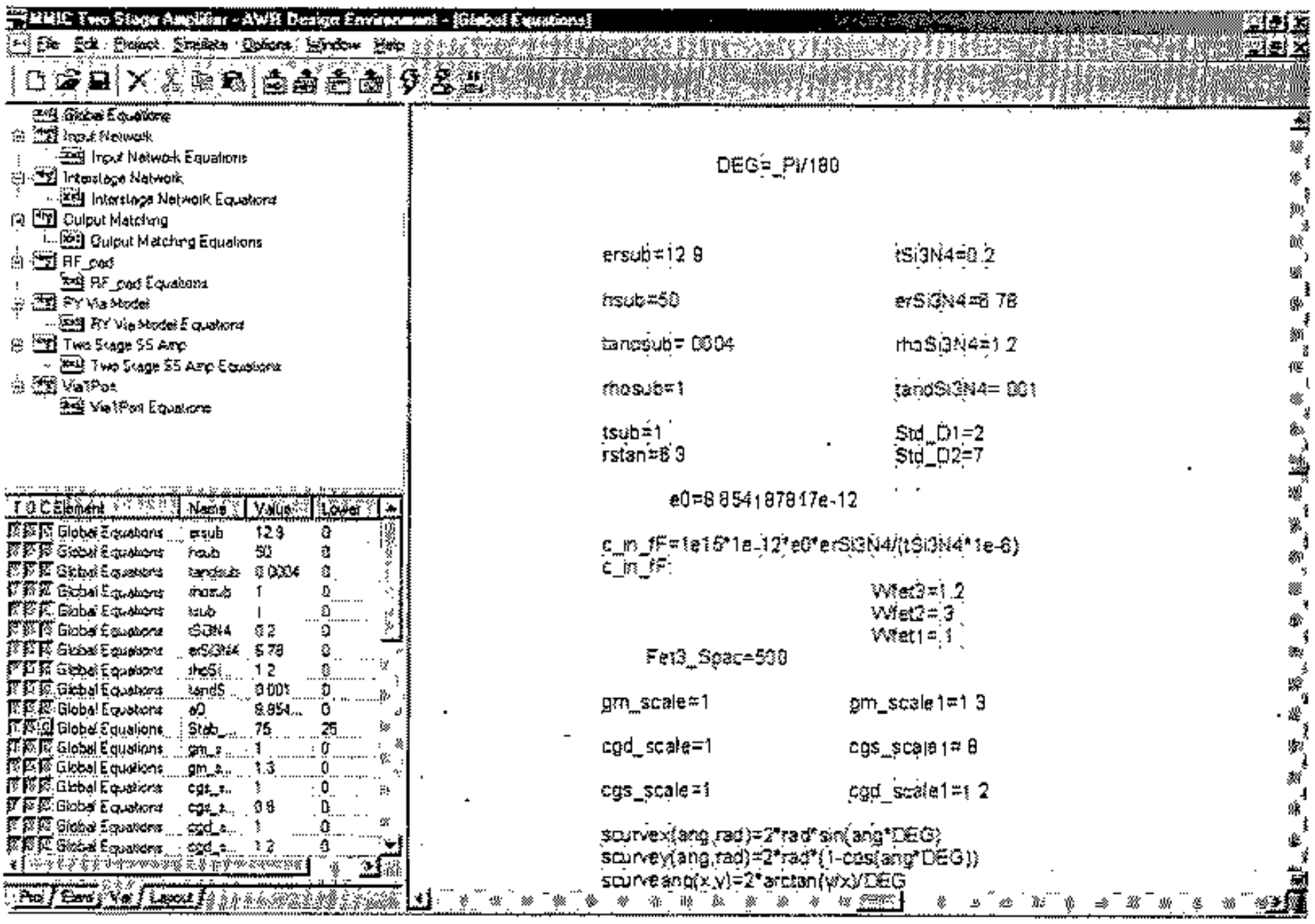


Рис. 5.36. Составленные глобальные уравнения в проекте анализа микросхемы двухкаскадного СВЧ усилителя

5.7. Ассистенты в программе MWO

Утилита **Filter Wizard** — ассистент синтеза фильтров, который обращается к программе MWO через стандартный интерфейс COM/API. Программа Filter Wizard ведет Вас через шаги, требуемые, чтобы добавить СВЧ-фильтр к вашему текушему проекту. Вы можете синтезировать полосовые, режекторные фильтры,

фильтры низких и высоких частот, используя ряд аппроксимаций характеристики передачи, включая аппроксимацию Баттерворда, Чебышева, Бесселя, и другие. Ассистент Filter Wizard включает программы синтеза и анализа и вы можете задать характеристики фильтра (порядок, ширину полосы, частоту), структуру (типа U-образной формы, гребенчатого, с разомкнутыми и короткозамкнутыми шлейфами, выбранной связью (типа коэффициента связи и импеданса связи), структуру линии передачи (например, на основе полосковой линии, микрополосковой линии, и др.) и выбирать тип вывода. Ассистент создает схему фильтра и выводит графики характеристик, основанные на заданных параметрах, и ваш проект готов к анализу оптимизации и включению в общий проект.

Чтобы запустить ассистент, откройте **Wizards** в дереве проекта и дважды кликните на **Filter Synthesis Wizard**. Далее задание на требуемые характеристики фильтра выбирается через ряд диалоговых окон, начиная с выбора типа фильтра.

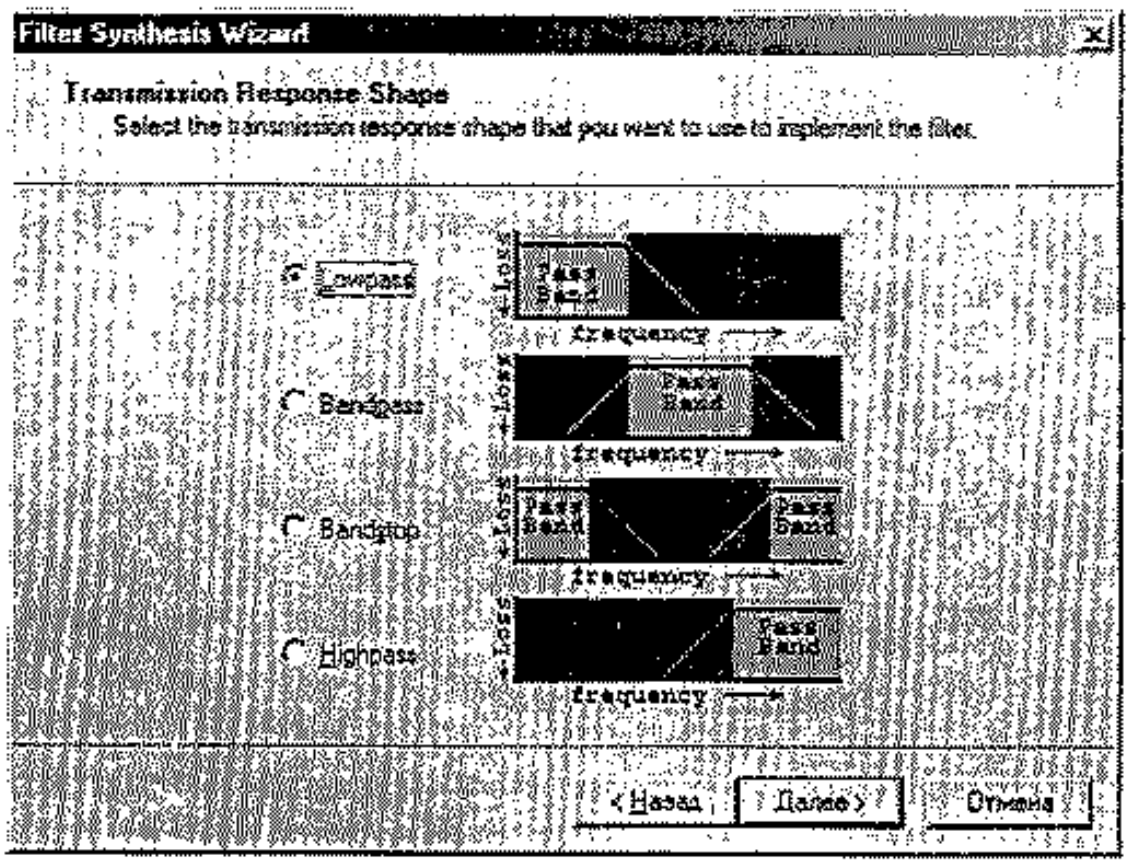


Рис. 5.37. Первый шаг в выборе типа фильтра при синтезе фильтра

После запуска Wizard, выбранные параметры сохраняются в пункте дерева проекта **Filter Synthesis Wizard**. Перезапустите Wizard используя величины по умолчанию, выбором этого узла в браузере. Пошаговое выполнение синтеза, начиная с задания (рис. 5.38) заканчивается созданием схемы и анализом характеристик фильтра (рис. 5.39).

Другой ассистент, **Swept Variable Wizard** позволяет рассчитывать и наносить на график характеристики относительно изменения каких либо параметров элементов. Эта новая характеристика может быть создана из существующих характеристик и нанесена как функция параметров элементов.

Чтобы запустить этот ассистент, откройте **Wizards** в дереве проекта и дважды кликните на **Swept Variable Wizard**. Появится диалог Swept Variable Wizard в котором можно специфицировать исходный график и характеристики, окончательный график и характеристики, переменная, которая будет изменяться, величины x-values, y-values, начальные, конечные значения переменной и шаг (рис. 5.40).

Другие возможности ассистента будут рассмотрены в следующих главах книги.

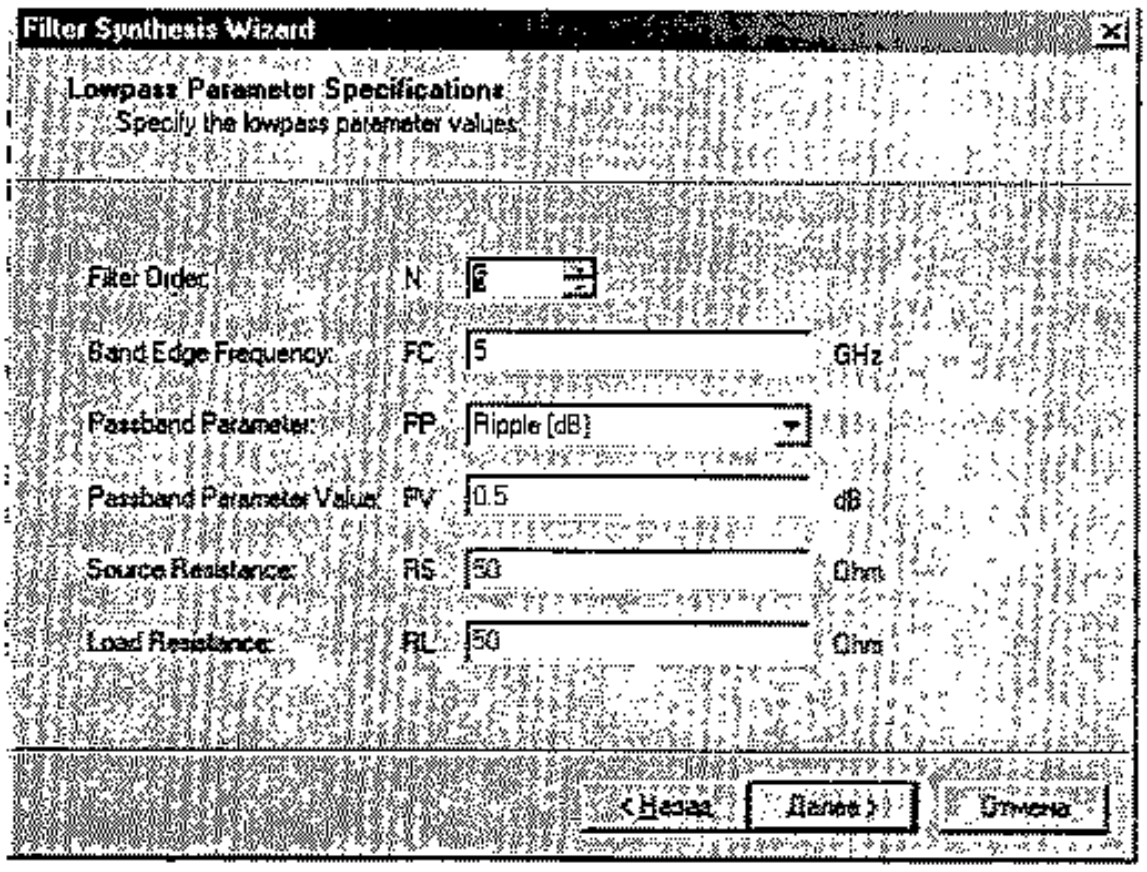


Рис. 5.38. Задание порядка фильтра, полосы, неравномерности в полосе пропускания и др. параметров фильтра

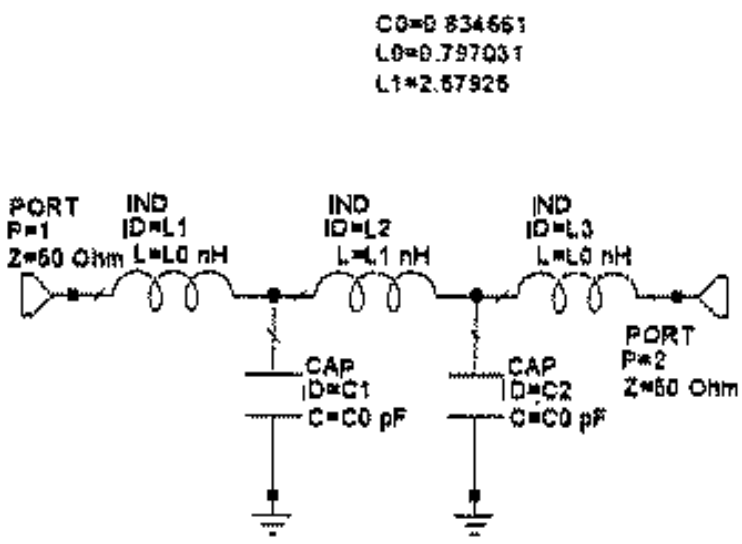
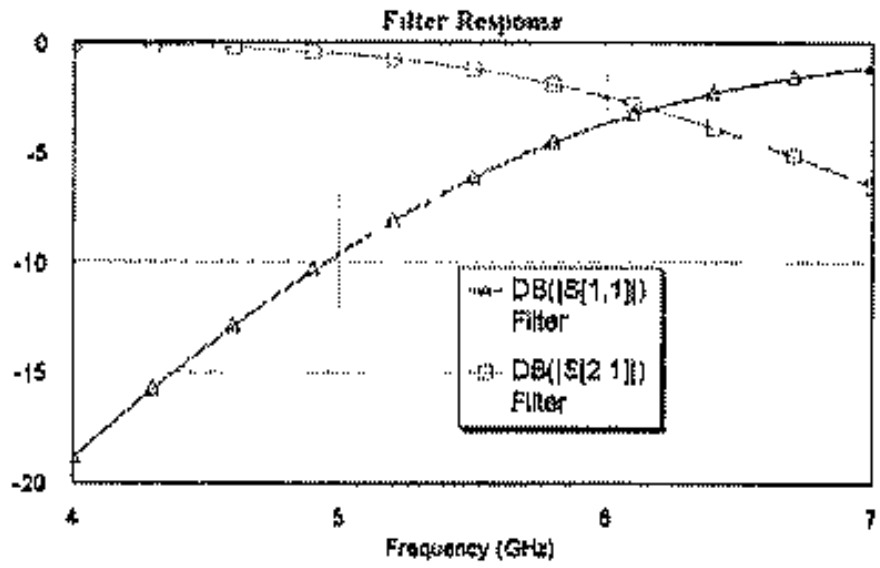


Схема синтезированного фильтра



Частотная характеристика

Рис. 5.39. Синтезированный фильтр НЧ и его характеристика

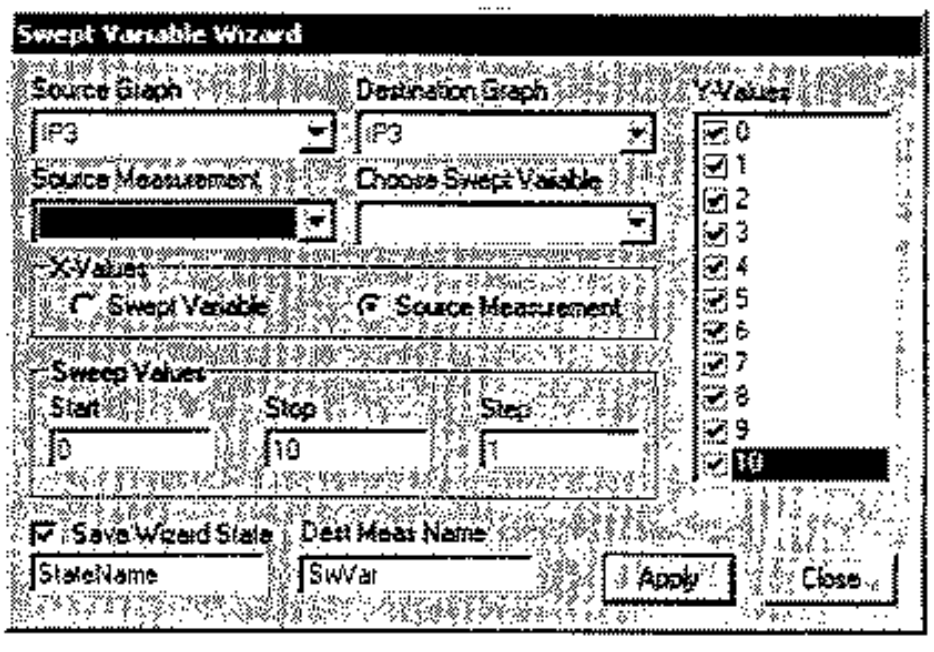


Рис. 5.40. Диалог ассистента Swept Variable Wizard

Глава 6
Вывод линейных характеристик

Характеристики выводятся на экран в виде графиков, диаграмм и таблиц. Характеристики, связанные с графиками, являются подэлементами блока **Graph** в дереве проекта.

Характеристики получаются преобразованием файла данных *N*-портовой схемы в вектор, который может быть выведен на диаграмму или график. Программа **MWO** рассчитывает и выводит следующие характеристики:

- любой параметр (S, Y, Z, H, G, ABCD) или всю матрицу;
- максимальный коэффициент усиления, коэффициент устойчивости и т. д.;
- импедансы, КСВН и постоянные распространения линий со стороны портов;
- резонансные частоты корпуса для TE и TM типов волн;
- полюсы и нули частотной характеристики;
- окружности устойчивости, равного коэффициента передачи и коэффициента шума, обеспечивая проектирование каскадов и согласующих цепей с помощью диаграммы Смита.

6.1. Расчет, создание графиков и диаграмм

Характеристики выводятся в виде модуля, фазы, действительной или мнимой составляющей, используя логарифмическую (DB) или линейную шкалу (см. пример на рис. 6.1). Режим интерполяции позволяет показывать сглаженные характеристики, рассчитанные по небольшой выборке данных. Возможно чтение данных непосредственно с графика, используя курсор данных.

Добавление диаграммы (графика). Чтобы добавить новый график, щелчком правой клавиши мыши выбирают в дереве проекта (рис. 6.2) опцию **Add Graph**, и в открывшемся диалоговом окне указывают имя графика. Должен быть также выбран тип графика: прямоугольный, полярный или др. его параметры (рис. 6.3).

Добавление характеристик. Выберите опцию **Add Measurement** в дереве проекта (рис. 6.2), и откроется диалоговое окно, в котором выбираются параметры и индексы параметров, определяющие расчет новой характеристики. Когда используется «All Source» будут рассчитаны и выведены на график характеристики для всех источников данных (схем и подсхем), которые имеются в проекте. Опция «All Source» дает возможность сравнивать расчеты, полученные для разных схем и подсхем.

Чтение данных из диаграммы или графика. MWO позволяет вывести на график курсор данных (рис. 6.4) для показа величин, соответствующих конкретной точке графика. Чтобы использовать курсор данных, нажмите и удерживайте левую кнопку мыши у линии характеристики на диаграмме. Форма курсора изменится на «х» и рядом с курсором будут показаны данные.

MWO имеет три различных типа диаграмм (графиков), которые могут использоваться для показа характеристик.

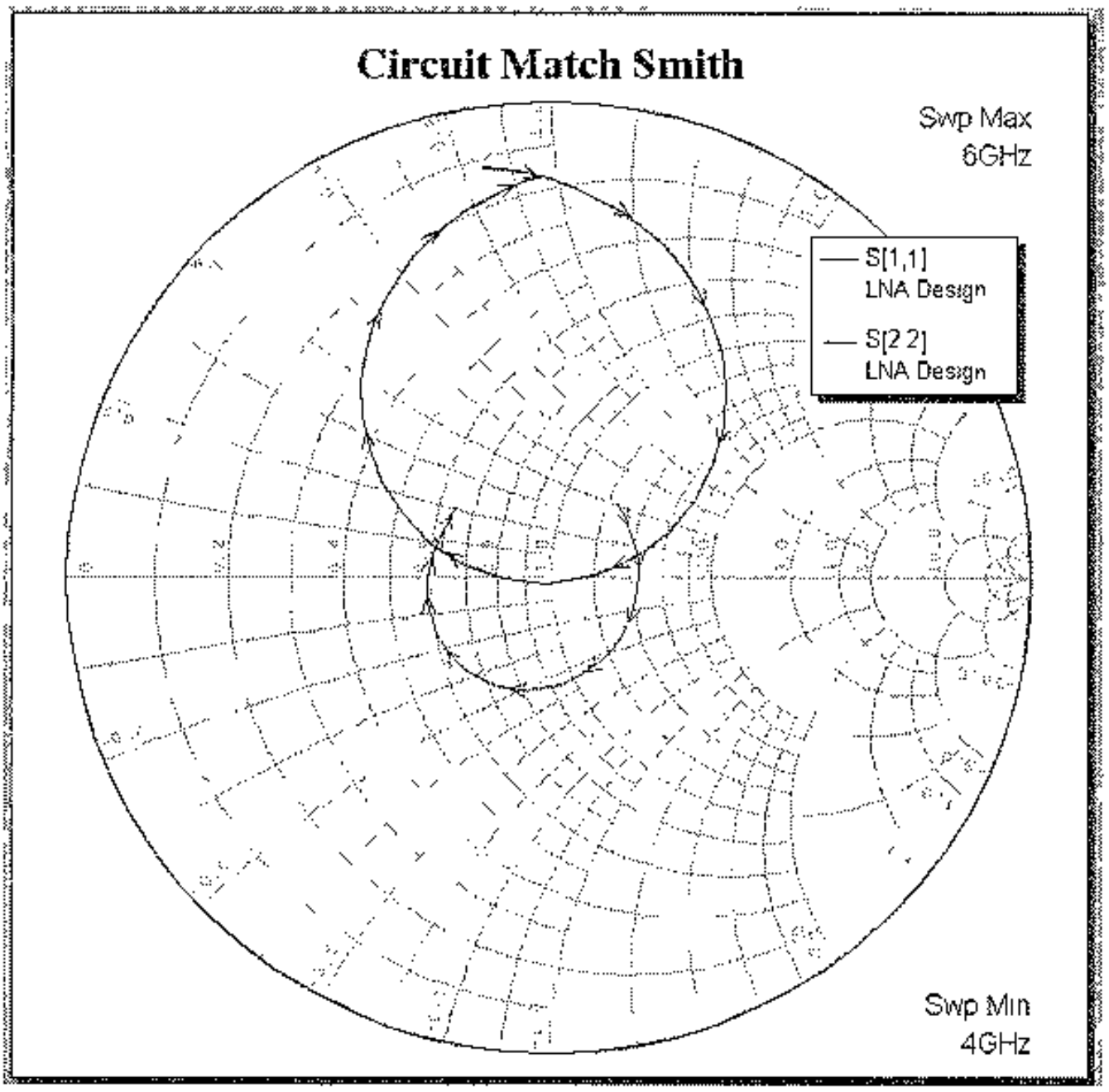


Рис. 6.1. Пример вывода характеристик: траектория параметра S11 малошумящего усилителя

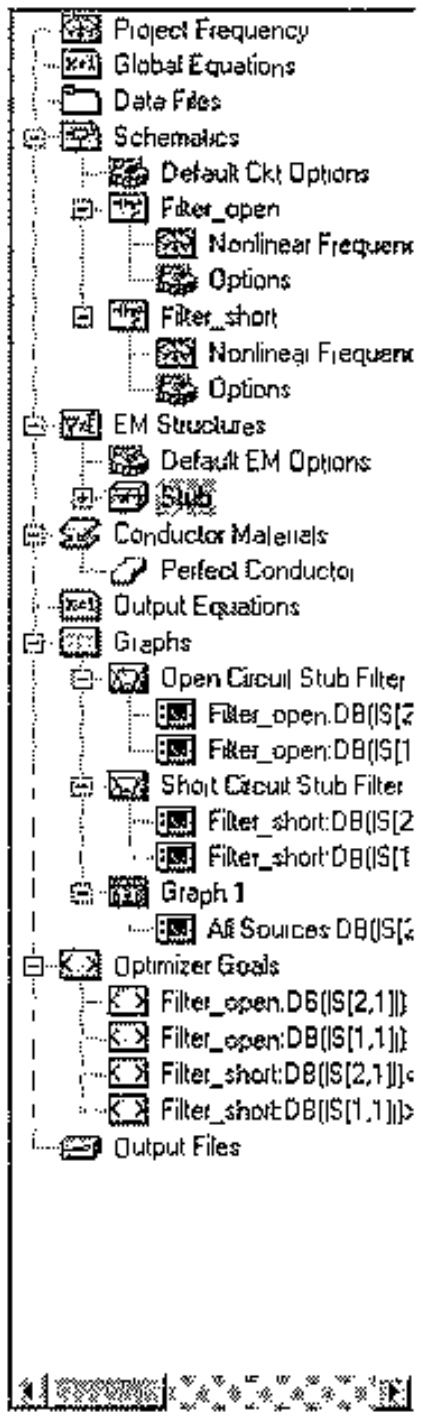


Рис. 6.2. Дерево проекта

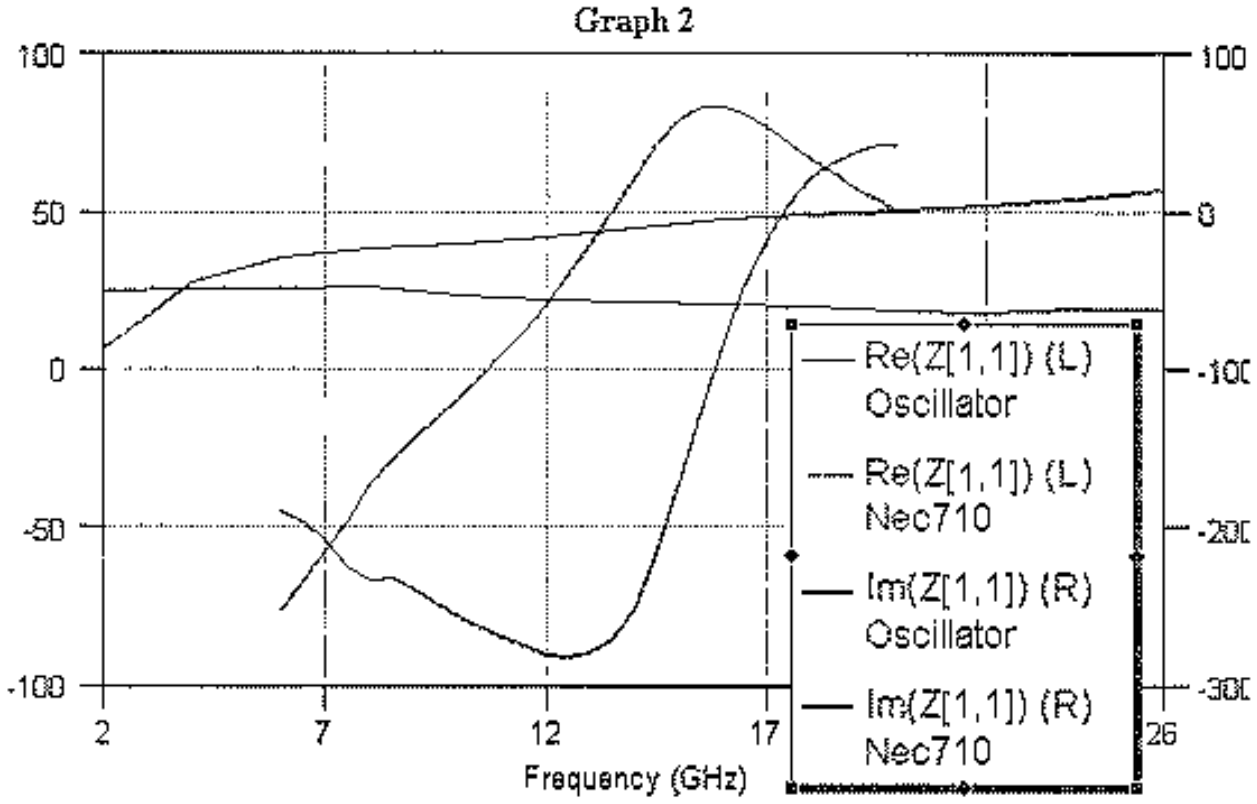


Рис. 6.3. Вывод графика входного импеданса в сечении схемы генератора на прямоугольную систему координат

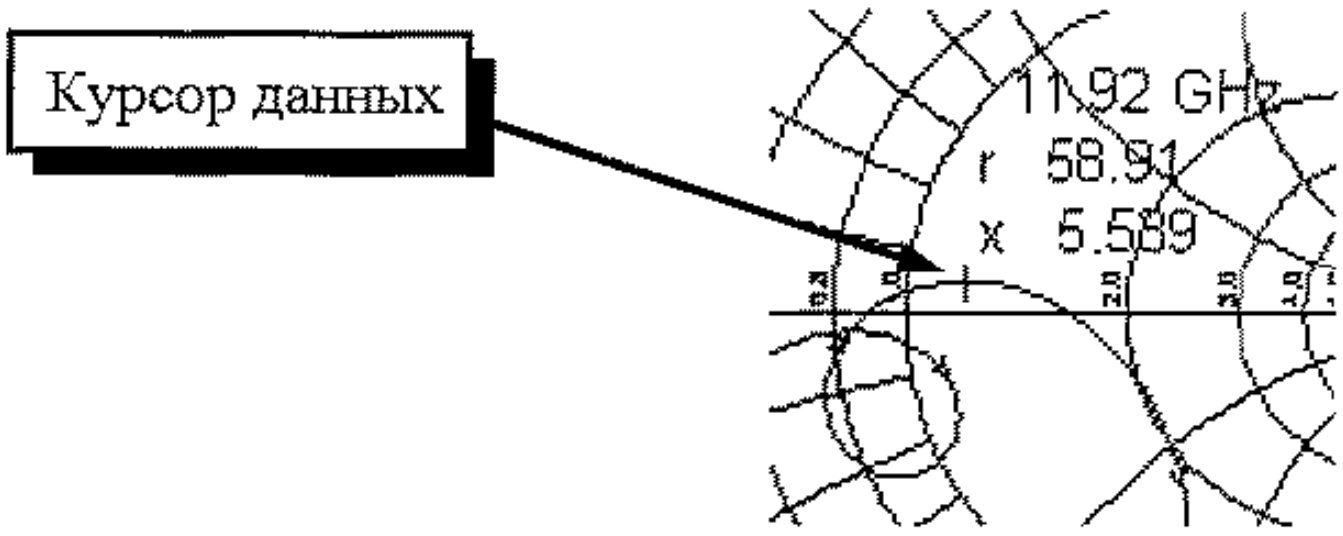


Рис. 6.4. Курсор данных

1. Диаграмма Смита — может быть показана в различных форматах. В дополнение к стандартной диаграмме Смита с радиусом, равным единице, может также быть изображена расширенная (рис. 6.5) и сжатая диаграмма Смита.

Диаграмма Смита может быть показана как для полного сопротивления или же полной проводимости. Диаграмма Смита (как и все другие диаграммы и графики) имеет полностью перестраиваемую конфигурацию. Цвета, типы линии, шрифты, обозначения, маркеры и другие подробности задаются пользователем. Курсор, поставленный на диаграмму Смита, может сразу показать полное сопротиление, полную проводимость или коэффициент отражения.

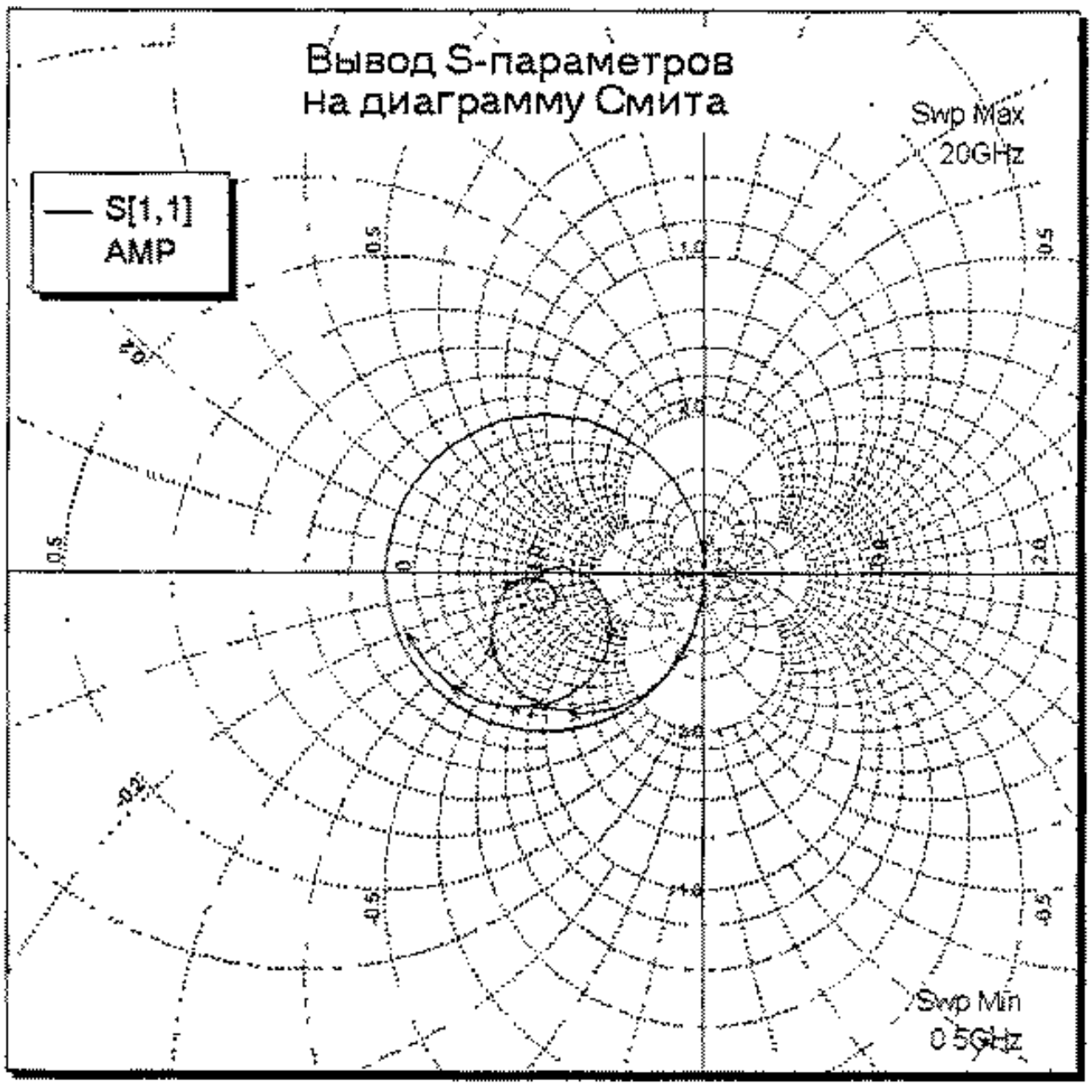
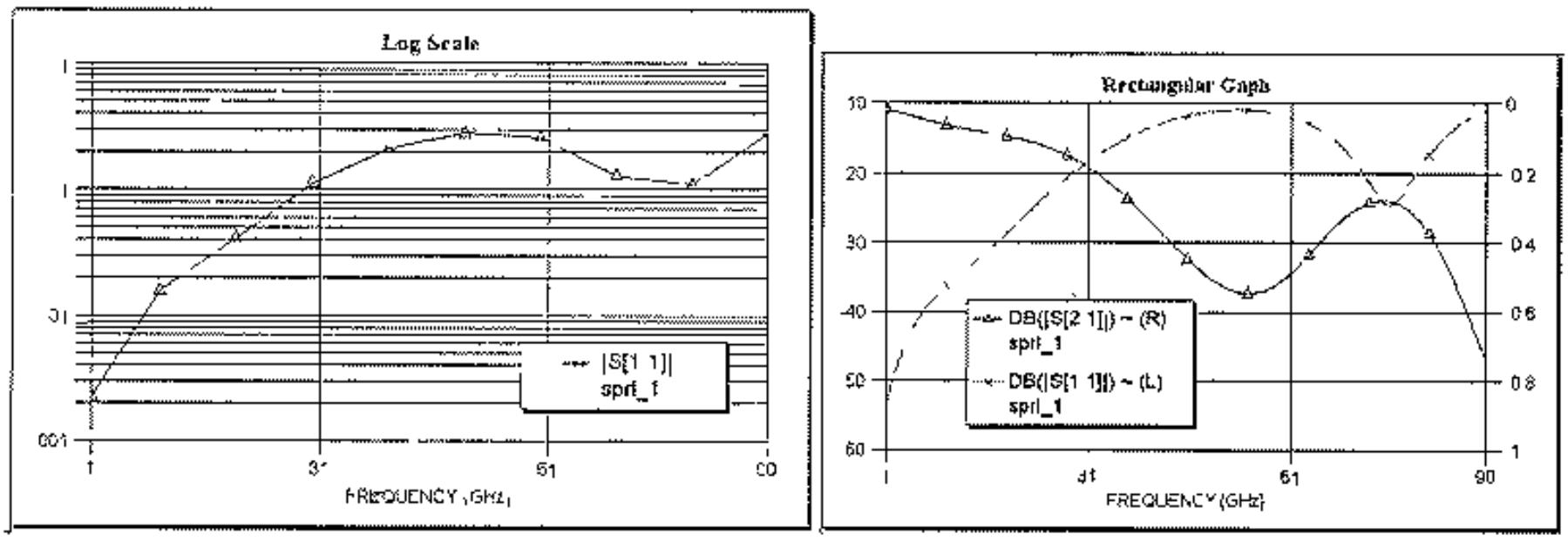


Рис. 6.5. Расширенная диаграмма Смита

2. Прямоугольные графики — используются для изображения характеристик, имеющих действительные значения. Обычно по оси *X* откладывается частота, а по оси *Y* — интересующая характеристика. Рассчитанные характеристики могут быть показаны и на левой, и на правой оси *Y*. Два примера таких графиков представлены на рис. 6.6.



а) *б)*

Рис. 6.6. Графики в декартовой системе координат

3. Таблицы. Характеристики выводятся в таблице в виде столбцов чисел. Первый столбец аналогичен оси *X* в прямоугольной системе координат, в него обычно заносят частоту. Остающиеся столбцы используются для вывода результатов расчета. В заголовке каждого столбца указывается наименование характеристики и формат данных. Для параметров, получаемых из файлов данных с различными частотными точками, первый столбец станет объединением двух частотных диапазонов. Пример таблицы выходных данных приведен на рис. 6.7.

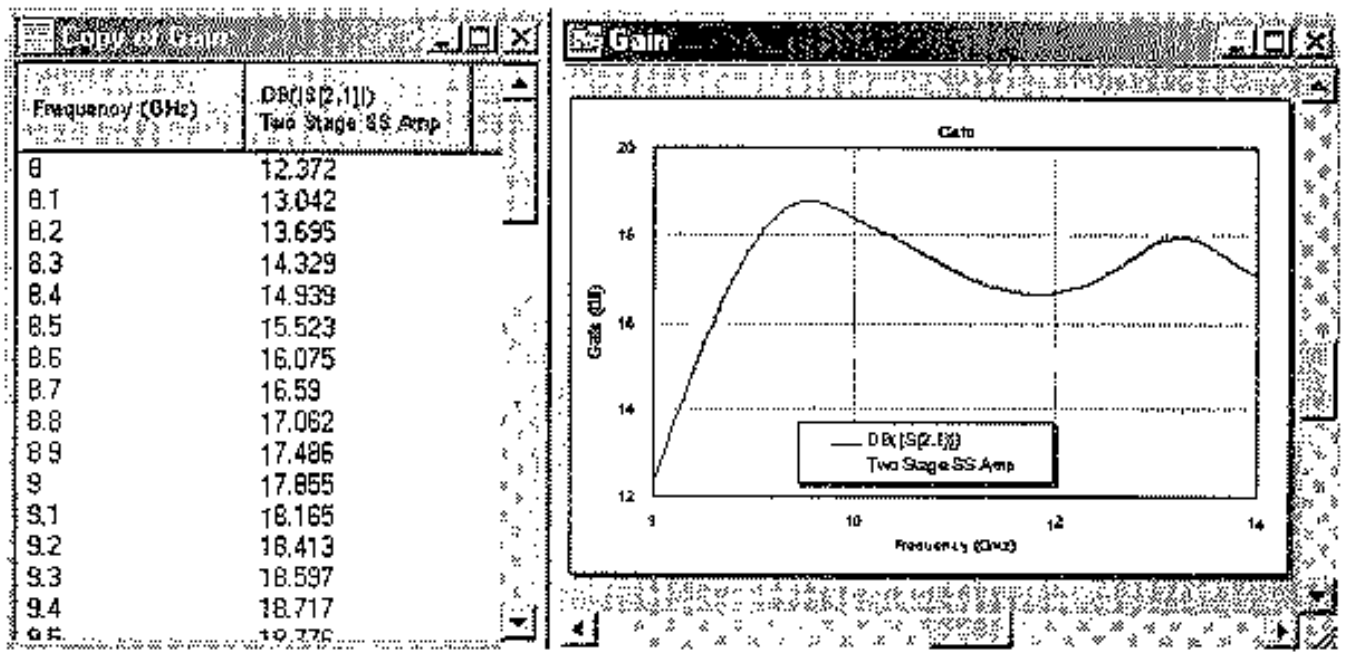


Рис. 6.7. Таблица результатов моделирования, дублируемая графиком усиления

Копирование данных в электронную таблицу. Табличное окно может использоваться для копирования данных в электронную таблицу, например в Excell. Чтобы скопировать данные, выберите в меню **Edit** пункт **All to Clipboard** (все в буфер обмена), затем вставьте результаты в электронную таблицу.

Форматирование графика. Прямоугольный график, диаграмма в полярной системе координат и диаграмма Смита могут быть отредактированы после двойного щелчка курсором на краю сетки или выбора опции **Format Graph** в меню **Grath.** Диалоговое окно задания формата диаграммы (графика) состоит из отдельных закладок (рис. 6.8). На них вводятся следующие величины:

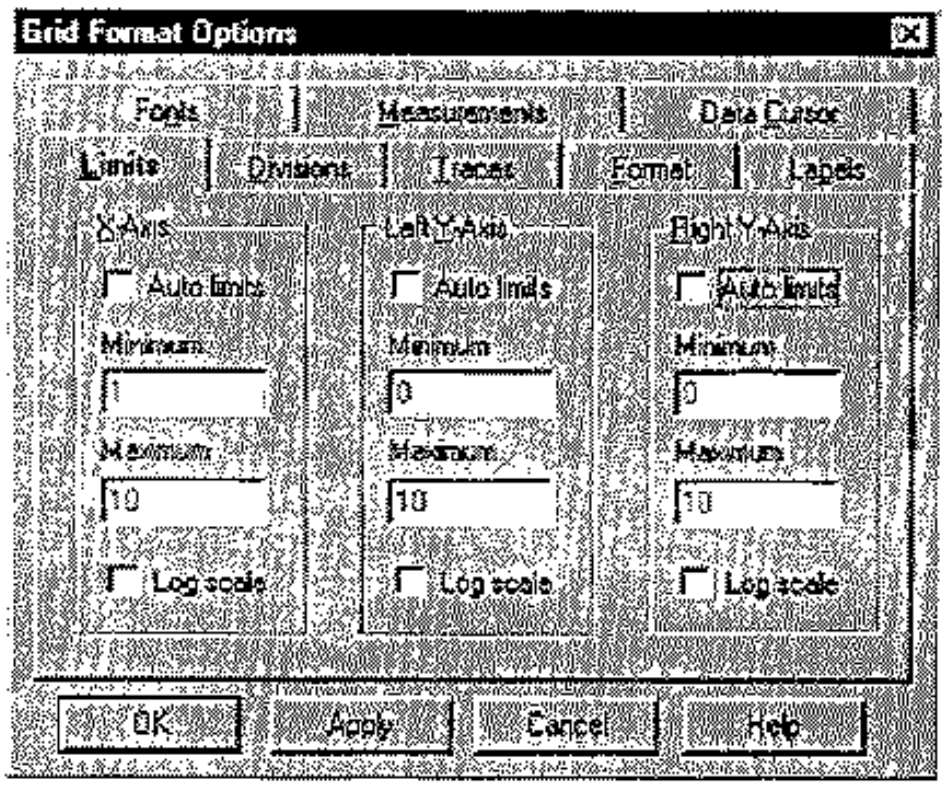


Рис 6.8 Диалоговое окно задания формата графика

1. Закладка Limits (границы страниц). Предельные значения, откладываемые по каждой оси, устанавливаются независимо друг от друга. Для каждой оси указываются следующие параметры.

Minimum/Maximum. Если не выбран режим **Auto limits**, то здесь вводится минимальная/максимальная величина, откладываемая по указанной оси.

Log scale (логарифмическая шкала) отмечается, если устанавливается логарифмический масштаб по данной оси.

2. Закладка Division (деления). Установка параметров для каждой оси. Пределы осей устанавливаются на закладке **Limits.**

Auto limits. Если в каком либо разделе выбрана опция **Auto limits,** то соответствующие параметры, приведенные в текушем разделе, определяются автоматически на основе данных моделирования.

3. Закладка Traces (линии графиков). Диалоговое окио для задания формы изображения графиков характеристик на заданных сетках. Номер каждого графика соответствует конкретной характеристике.

Color. Цвет для избранной линии может быть изменен, выбирая его из списка цветов.

Symbol. Символ, используемый для маркировки графиков, может быть изменен, выбирая из списка наименование нового символа. Если ни один из них не выбран, то на график не будет нанесен ни один символ.

Line. Тип линии избранной характеристики может быть изменен, выбирая его из списка.

Weight. Ширина линии, используемой для рисования графика. Она может быть изменена, выбирая новую ширину из списка.

4. Закладка Markers (маркеры). Маркеры помечают различные графики. Выбирается их размер и интервал между ними.

Направление изменения частоты. На диаграммы Смита и полярные диаграммы наносятся стрелки, которые указывают направление увеличения частоты.

5. Закладка Format (формат). Закладка Format используется для установки общего вида границы и разделов сетки (рис. 6.9). Диалог, показанный на рисунке, соответствует заданию прямоугольного графика. Формат диалогового окна для других типов графика подобный.

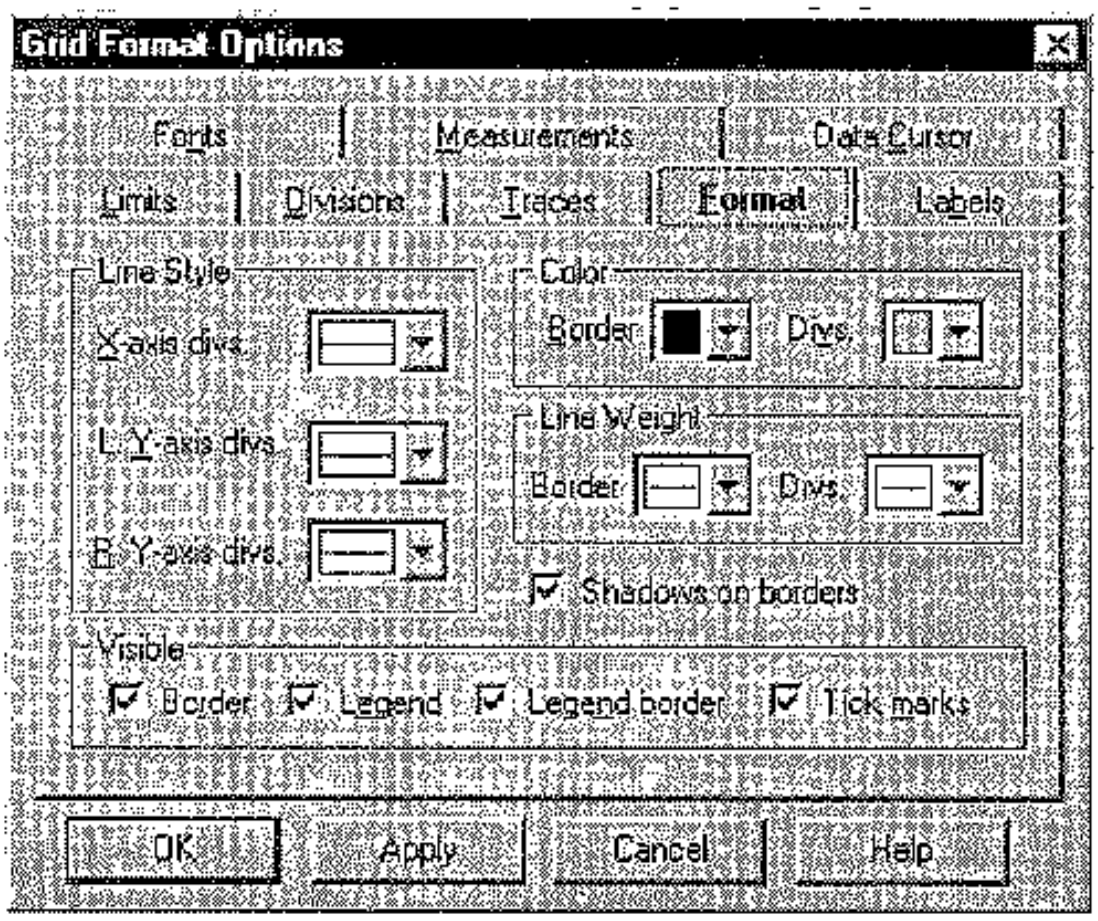


Рис. 6.9. Диалоговое окно закладки **Format**

Line Style (типы линий). Установка параметров панели **Line Style** позволяет выбрать стиль линий, используемых для черчения сетки. Типы линии сеток могут быть выбраны для диаграмм Смита полного сопротивления и полной проводимости.

Color Border. Выбирается цвет границ и линий деления сетки.

Line Weight. Эта опция устанавливает толщину линий, используемых для черчения границ и делений сетки.

Visible. Параметры видимости определяют, какие элементы графика будут видимы:

Border — обрамление вокруг диаграммы (графика);

Legend — пояснительный текст (легенды);

Legend border — граница вокруг легенды.

6. Закладка Labels. Тексты заголовков и легенд графиков (рис. 6.10):

Title (заголовок) — изменение заданного по умолчанию названия графика.

Show units (покажите единицы) — задание идентификаторов отдельных осей (например, Voltage), в которых допустимы символы кириллицы.

X-axis — текст, используемый для обозначения оси *X*.

Left Y-axis/Right Y-axis (Левая/Правая ось Y) — текст, используемый для обозначения левой и правой оси *Y*.

Legend Entries (Ввод легенды). Легенда может содержать один или два раздела: Data name и Measurement name.

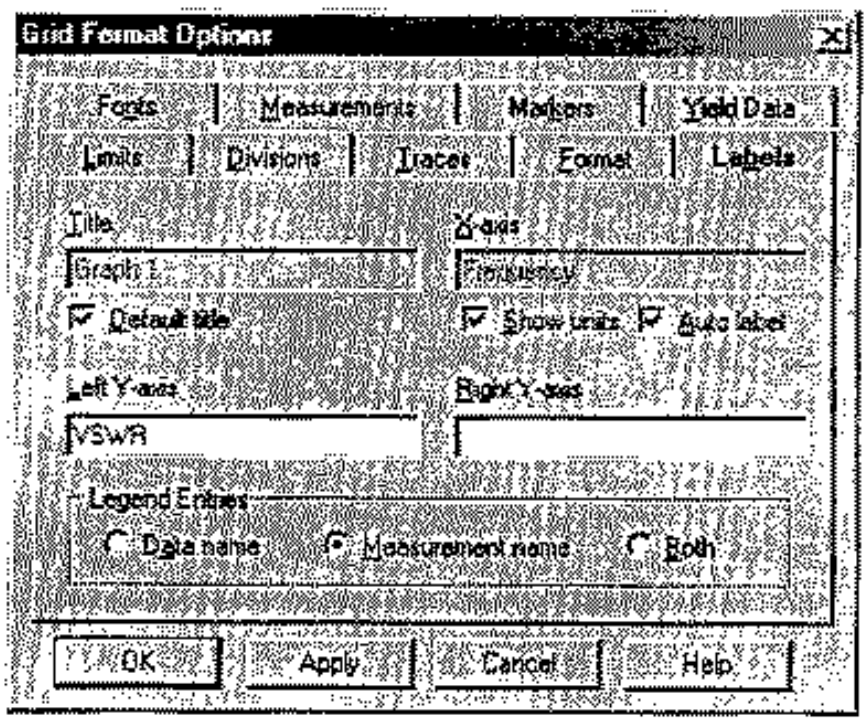


Рис. 6.10. Диалоговое окно закладки **Labels**

7. Закладка Fonts (шрифты). Пользователь может выбрать шрифт для различных составляющих графика (рис. 6.11).

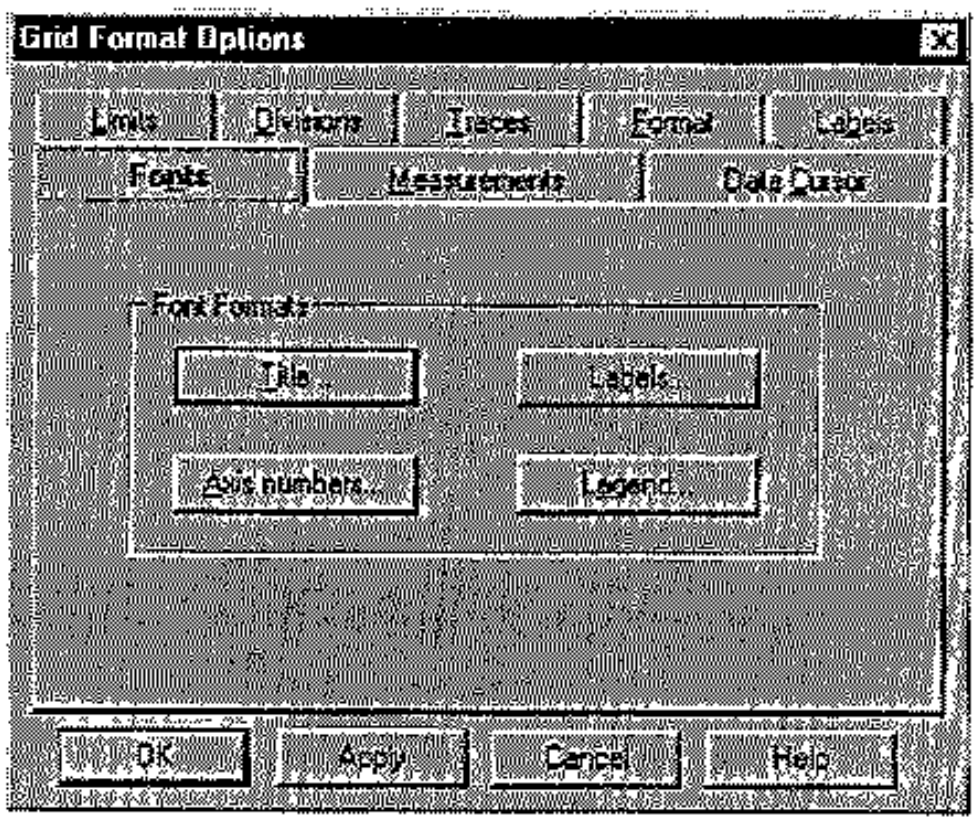


Рис. 6.11. Диалоговое окно закладки **Fonts**

Title — шрифт названия графика.
Axis numbers — шрифт, используемый для маркировки осей.
Legends — шрифт легенды.

8. Закладка Measurements. Задание параметров вида характеристик и выбор осей прямоугольных графиков.

9. Закладка Grid (сетка) для диаграммы Смита. Установки стиля диаграммы Смита:

Size — выбор типа диаграммы Смита:
Normal — нормальная диаграмма;
Compressed (сжатая) — измененная диаграмма, удобная для просмотра отрицательного полного сопротивления;
Expanded (расширенная) — диаграмма с увеличенным масштабом внутри.

Если выбрана опция **Auto Size**, то размер диаграммы Смита выбирается автоматически на основе анализа результатов моделирования.

Auto Contour — изменение плотности рисования контуров.

Visible (видимый) — параметры поля определяют, какие составляющие диаграммы Смита выводятся видимыми:

Impedance Grid — графики полных и реактивных сопротивлений;

Admittance Grid — графики реактивных сопротивлений и проводимостей;

Value — номера графиков.

10. Закладка Grid. Сетка для полярной диаграммы. Страница используется для установки вида и параметров полярной диаграммы (рис. 6.12):

Magnitude Limits. Эти пределы устанавливаются для пересчета величин осей.

Auto Limit. Если выбран этот режим, то пределы будут определены автоматически.

Minimum. Для полярных диаграмм минимальная величина — всегда ноль.

Maximum. Если Авто опция переделов не выбрана, то максимальная величина, используемая для значений может быть введена здесь.

Auto divs — если выбрана опция **Auto divs.**, то число разделов будет выбрано автоматически.

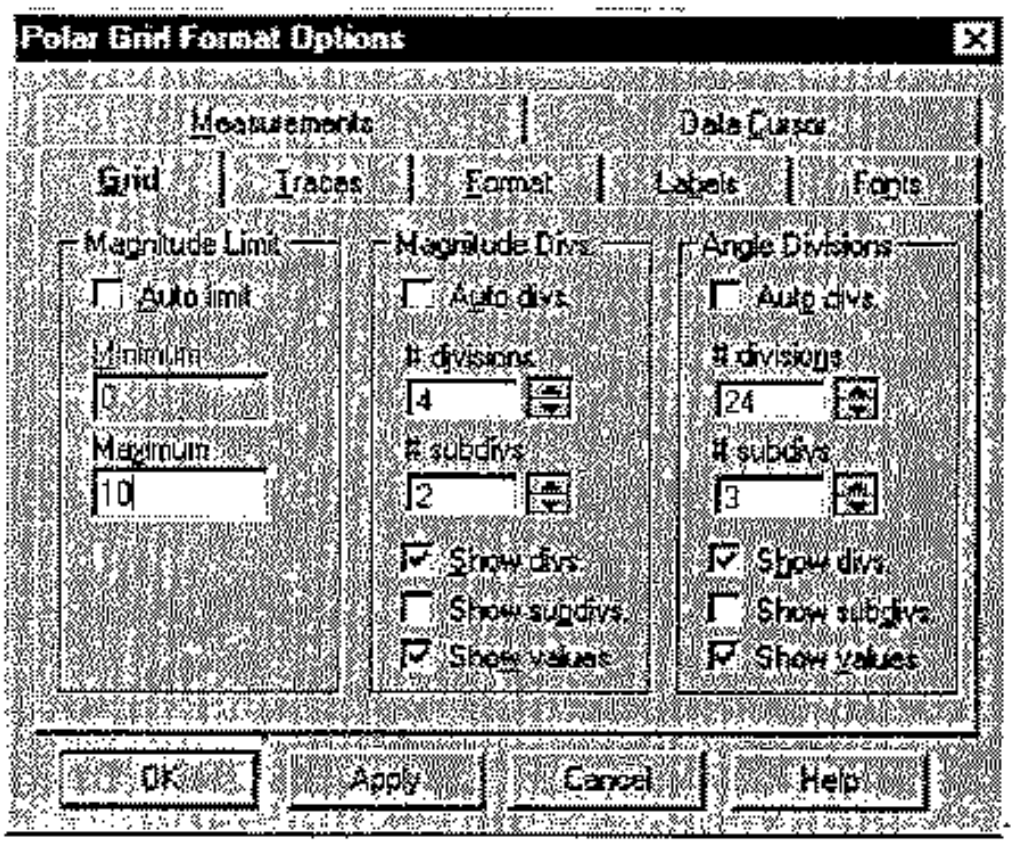


Рис. 6 12. Диалоговое окно закладки **Grid**

11. Закладка Grid для антенной диаграммы. Параметры сетки для антенной диаграммы идентичны параметрам сетки полярной диаграммы за исключением того, что доступна опция **Normalized**.

Сглаживание графиков в MWO

MWO имеет режим интерполяции выводимой информации из ЕМ-моделирования или из файла данных, используя интерполяцию рациональной функцией. При интерполяции используется нуль-полюсная модель данных. Чтобы интерполировать данные из файла данных, устанавливается опция **Smoothing** (сглаживание) в дивлоге **Add Mearsurement** (см. результаты интерполяции на рис. 6.13).

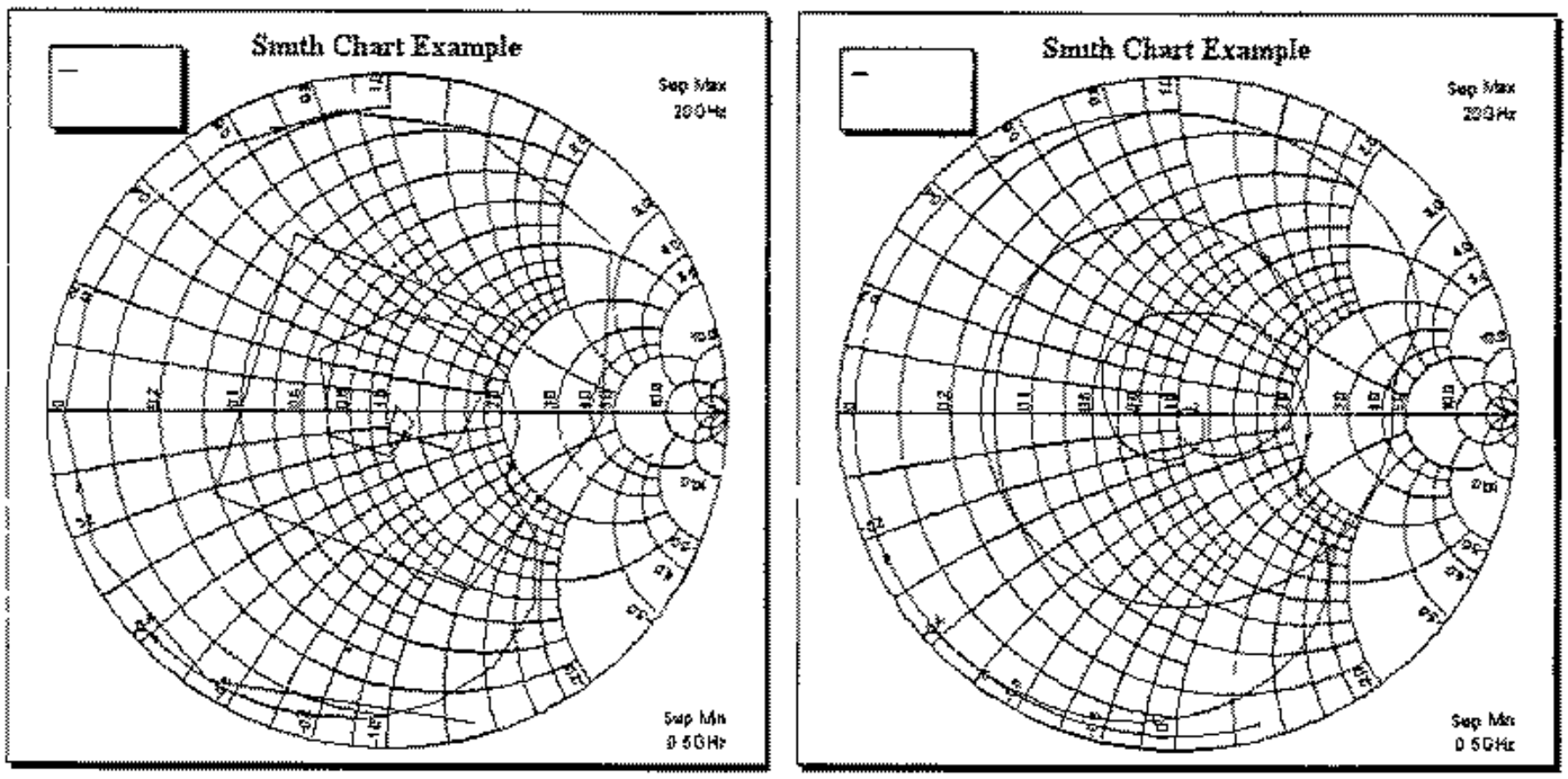


Рис. 6.13. Круговые диаграммы до (а) и после (б) интерполяции

Интерполяция рациональной функции. Вид характеристик, для которых применена интерполяция дробно-рациональными функциями (они имеют разрешение на сглаживание), показан на рис. 6.13*б*. Для такого сглаживания рациональные функции использованы для выполнения интерполяции с помощью нуль-полюсной модели, поскольку они способны интерполировать отсутствующие данные.

Размер окна (Window size). Размер окна определяет максимальное число значений частоты, которые будут использоваться для вычисления интерполируемых данных. Каждый дискретный отсчет на оси *X* представляет собой значение частот в файле данных. Маркеры, выведенные в полужирном начертании, представляют собой точки, которые используются для интерполяции данных (рис. 6.14). При изменении точки интерполяции окно весовой обработки перемещается. Окно большего размера включает большее количество отсчетов данных, но расчеты будут проводиться намного медленнее.



Рис. 6.14. Окно интерполяции

Интерполяция должна использоваться с осторожностью. Результаты интерполяции должны всегда проверяться визуально, чтобы удостовериться, что интерполированные данные не имеют разрыв. Например, если входные данные неустойчивы, интерполяция не даст верных результатов, и вместо уточнения данных выведет принципиально ошибочный результат. Если это так, попробуйте увеличить или уменьшить размер окна интерполяции.

Число интерполируемых точек (Number of interpolated points). Задается количество точек данных, которые используются для интерполяции (от 2 до 1000). Если используются только две точки, результатом интерполяции будет прямая линия. Интерполируемые точки будут располагаться от самой нижней и до самой верхней частоты в файле данных.

6.2. Каталог линейных характеристик

Для N-портовой схемы можно рассчитать ряд приведенных в табл. 6.1 характеристик многополюсников [3], причем ABCD-, H- и G-параметры могут быть рассчитаны только для четырехполюсников (ЧП).

Таблица 6.1. Параметры линейных многополюсников

Класс рассчитываемых характеристик	Рассчитываемый тип параметров	Название параметров	Источник данных	Установки
Port Parameters	ABCD	Параметры цепной матрицы	Все источники: схема, текстовый и схемный файлы	Индекс входного/выходного порта
	G	Гибридные G-параметры	Все источники	Индекс входного/выходного сигнала
	H	Гибридные H-параметры	Все источники	Индекс входного/выходного порта
	S	Матрицы рассеяния S	Все источники	Индекс входного/выходного порта
	Y	Y-параметры проводимости	Имя схемы	Индекс входного/выходного порта
	Z	Z-параметры импеданса	Имя схемы	Индекс входного/выходного порта

S-параметры — это коэффициенты рассеяния N-портовой схемы. В расчетах S-параметров принято считать, что они измерены в 50-омном тракте. Например, матрица S-параметров ЧП определяется как

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \tag{6.1}$$

где коэффициенты a_1 и a_2 представляют падающие волны, а b_1 и b_2 — отраженные волны, на портах 1 и 2. Расчет и вывод S-параметров осуществляется через диалог, показанный на рис. 6.15.

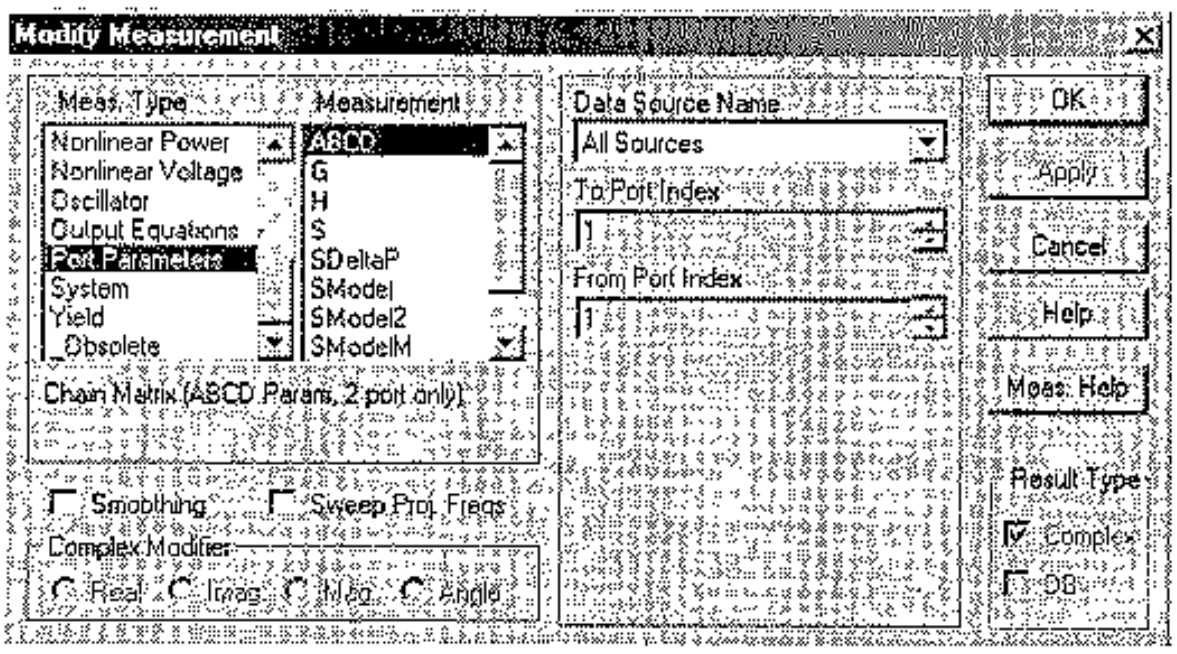


Рис. 6.15. Диалог вывода параметров многополюсников

Y-параметры — параметры полной проводимости для N-портовой схемы. Приведем пример матрицы Y-параметров для четырехполюсника (ЧП):

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \tag{6.2}$$

где i_1, i_2 — токи втекающие в порты; u_1, u_2 — напряжения на портах.

Z-параметры — параметры полных сопротивлений N-портовой схемы. Приведем пример матрицы Z-параметров ЧП:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \tag{6.3}$$

где i_1, i_2 — токи; u_1, u_2 — напряжения на портах.

ABCD-параметры — элементы цепной матрицы ЧП. Приведем пример матрицы ABCD:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ -i_1 \end{bmatrix}, \tag{6.4}$$

где i_1, i_2 — токи; u_1, u_2 — напряжения портов.

H-параметры — гибридные параметры ЧП. Приведем пример H-матрицы четырехполюсника:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \tag{6.5}$$

где i_1, i_2 — токи; u_1, u_2 — напряжения на портах.

Параметры G — инверсные гибридные параметры четырехполюсника:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}. \tag{6.6}$$

Здесь i_1, i_2 — токи; u_1, u_2 — напряжения на портах.

6.3. Линейные характеристики

Для линейной схемы могут быть рассчитаны характеристики, перечисленные в табл. 6.2.

Коэффициент устойчивости четырехполюсника [8, 16] определяется как

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|}, \tag{6.7}$$

где

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}.$$

Необходимые и достаточные условия безусловной устойчивости ЧП:

$$K > 1 \quad \text{и} \quad B_1 > 0, \tag{6.8}$$

где B_1 указана ниже в (6.11).

Таблица 6.2. Характеристики линейных четырехполюсников

Тип характеристики	Название характеристик	Установки
K	Коэффициент устойчивости	—
B1	Вспомогательный коэффициент устойчивости	—
C_PRC	Входная емкость порта, представленного как параллельная RC-цепь	Номер порта
GD	Групповая задержка	Индекс входного/выходного порта
GM1	Сопряженное согласование (на входе)	На 1 порту
GM2	Сопряженное согласование (на выходе)	На 2 порту
Geven	Коэффициент отражения (Г) четных мод	Первый/второй порт
Godd	Коэффициент отражения нечетных мод	Первый/второй порт
L_SRL	Индуктивность входа как последовательной RL-цепи	Индекс порта
MU1	Геометрический коэффициент устойчивости (на плоскости нагрузки)	—
MU2	Геометрический коэффициент устойчивости (на плоскости источника)	—
R_PRC	Сопротиаление входа хак параллельной RC-цепи	Индекс порта
R_SRL	Сопротивление входа как последовательной RL-цепи	Индекс порта
VSWR	Коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН)	Индекс порта
YIN	Входная проводимость порта	Индекс порта
YM1	Входная проводимость при одновременном согласовании на выходе	—
YM2	Выходная проводимость при одновременном согласовании на входе	—
Yeven	Проводимость при четном возбуждении	Первый/второй порт
Yodd	Проводимость при нечетном возбуждении	Первый/второй порт
ZIN	Входной импеданс порта	Индекс порта
ZM1	Импеданс на входе при одновременном согласовании на выходе	—
ZM2	Импеданс на выходе при одновременном согласовании на входе	—
Zeven	Импеданс при четном возбуждении	Первый/второй порт
Zodd	Импеданс при нечетном возбуждении	Первый/второй порт

Примеры частотных зависимостей коэффициента устойчивости приведены на рис. 6.16.

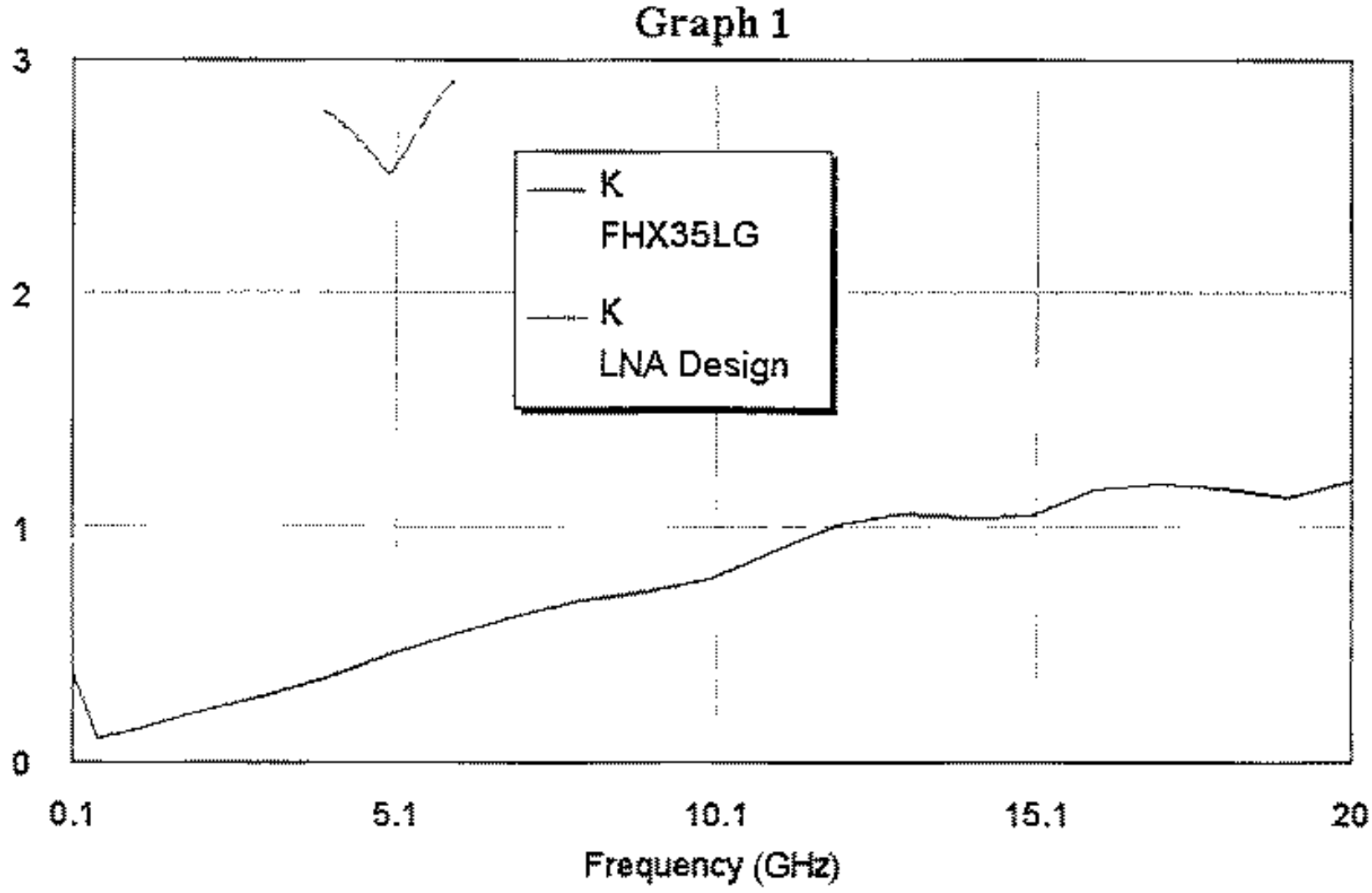


Рис. 6.16. Коэффициенты устойчивости транзистора и малошумящего усилителя

Геометрический коэффициент устойчивости — это расстояние от центра диаграммы Смита до самой близкой неустойчивой точки на выходной плоскости нагрузки. Необходимое и достаточное условие для безусловной устойчивости $MU1 > 1$. Геометрический коэффициент устойчивости вычисляется по формуле

$$MU1 = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - S_{11}^{*}\Delta| + |S_{21}S_{12}|}, \tag{6.9}$$

Геометрический коэффициент устойчивости — это расстояние от центра диаграммы Смита до самой близкой неустойчивой точки на входной плоскости. Необходимое и достаточное условие для безусловной устойчивости четырехполюсника $MU2 > 1$. Коэффициент устойчивости равен

$$MU2 = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - S_{22}^{*}\Delta| + |S_{21}S_{12}|}, \tag{6.10}$$

где

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}.$$

Величины $MU1$ и $MU2$ малошумящих усилителей показаны на рис. 6.17.

Вспомогательный коэффициент стабильности B1 (только для линейного четырехполюсника), B1 — вспомогательный коэффициент стабильности ЧП:

$$B1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2. \tag{6.11}$$

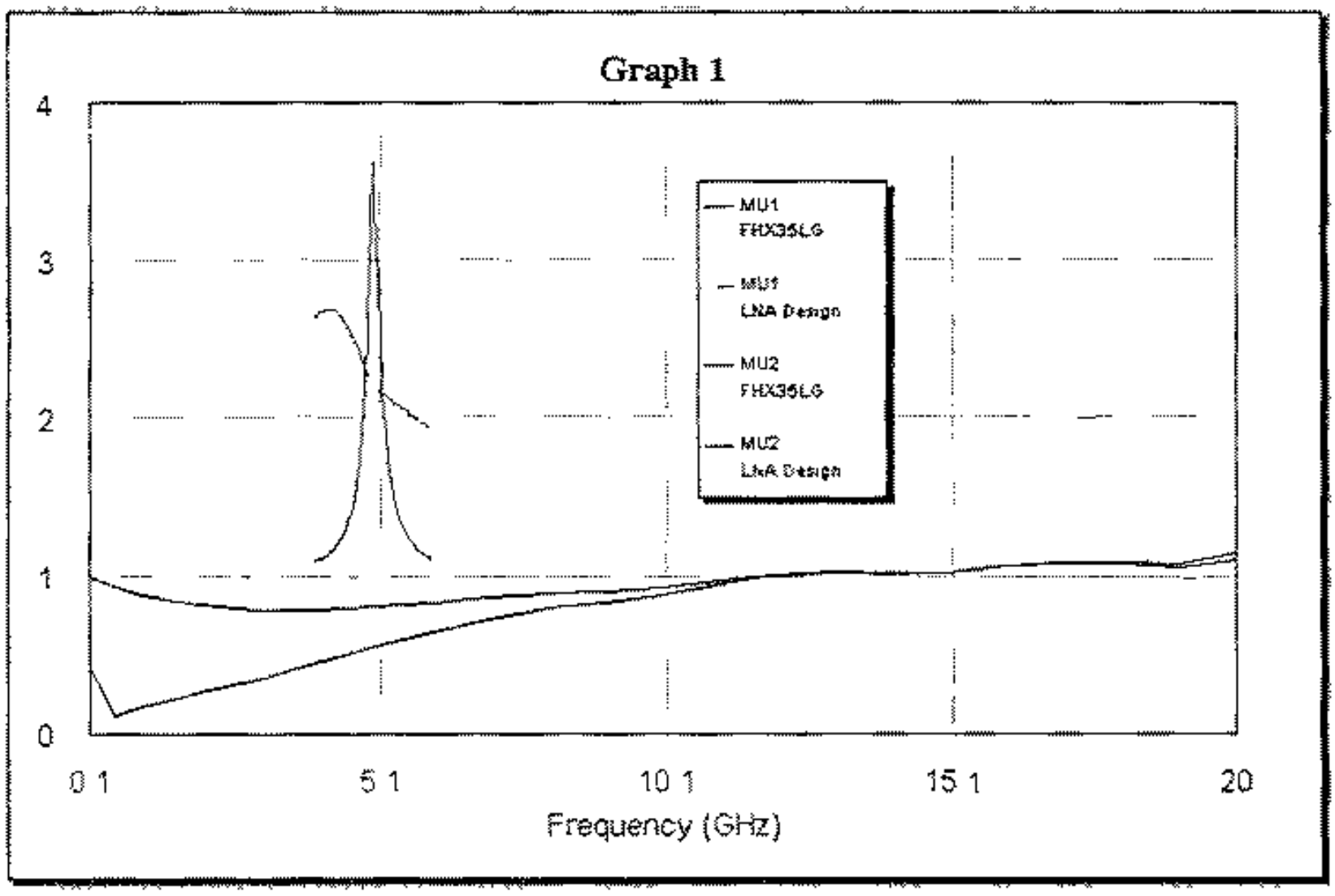


Рис. 6.17. Коэффициенты устойчивости MU1 и MU2 малошумящих усилителей

Эта характеристика является реальным числом. Ось X для этого расчета является частотой. Рассчитанная величина выводится на прямоугольную систему координат (рис. 6.18) или в таблицу.

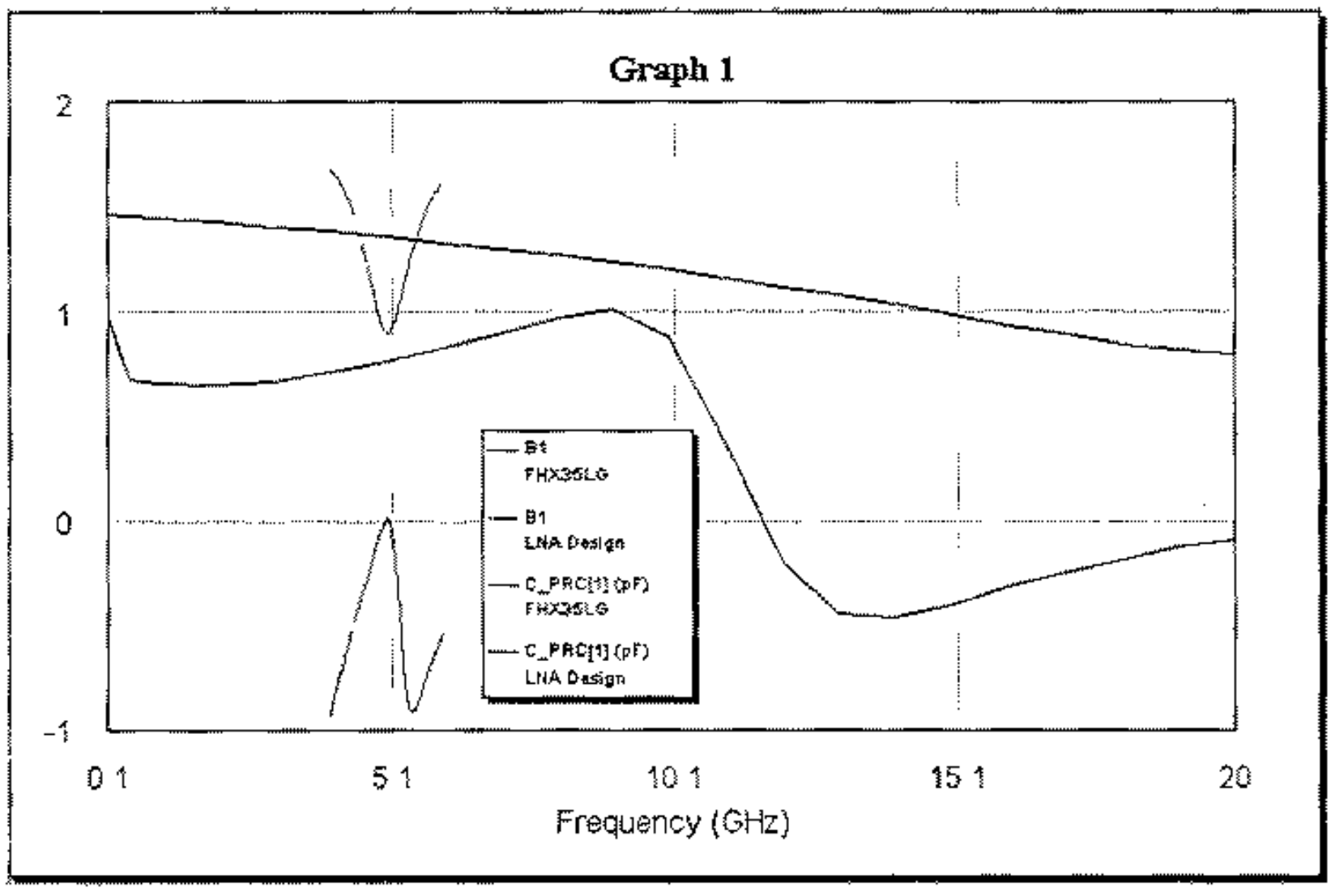


Рис. 6 18. Коэффициенты устойчивости B1 и C_PRC малошумящих усилителей

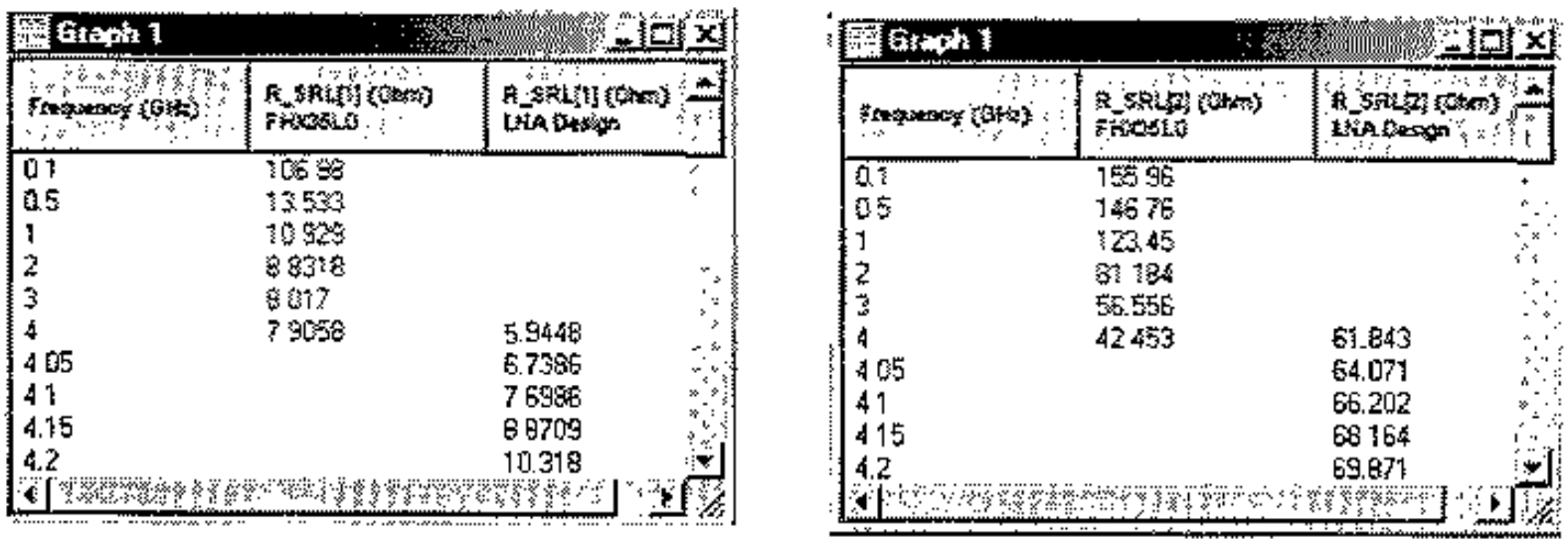
Входная емкость. Этот расчет может использоваться для вычисления емкости C_PRC параллельной RC-цепи, которая имеет тот же самый импеданс, как и импеданс, видимый со стороны конкретного порта. Все другие порты нагружены на установленное опорное сопротивление.

Параметры расчета:
P1 — имя схемы с 1—1000 портами;
P2 — номер порта, для которого выполняется расчет (целое число от 1 до 1000).

Входная индуктивность. Вычисляется величина индуктивности L_SRL катушки индуктивности с добавочным резистором, которая имеет то же самое полное сопротивление, как и полное сопротивление указанного порта. Все другие порты нагружены на соответствующие нагрузки.

Параметры расчета:
P1 — имя подсхемы (от 1 до 1000 портов);
P2 — индекс порта (целое число от 1 до 1000).

Эти расчеты дают реальную величину в единицах индуктивности. Характеристика может быть выведена в таблицу (рис. 6.19).



а) *б*)

Рис. 6.19. Расчет параметра R_SRL и L_SRL усилителя:
а — со стороны входа; *б* — со стороны выхода

Групповая задержка между любыми двумя портами *N*-портовой схемы вычисляется как

$$GD = -\frac{d\varphi_{ij}(\omega)}{d\omega}\Big|_{\omega=\omega_0}, \tag{6.12}$$

где $\varphi_{ij}(\omega)$ — определяется из S-параметров, записанных в виде

$$S_{ij} = |S_{ij}|e^{j\varphi_{ij}(\omega)}. \tag{6.13}$$

Параметры расчета:
P1 — имя подсхемы (от 2 до 1000 портов);
P2 — входной порт *i* (целое число от 1 до 1000);
P3 — выходной порт *j* (целое число от 1 до 1000).

Коэффициент отражения на входе GM1 при одновременном сопряженном согласовании (только для четырехполюсников) на входе и на выходе. Коэффициент отражения измеряется в 50-омном тракте и не зависит от импедансов портов.

Коэффициент отражения на выходе GM2, необходимый для достижения одновременного сопряженного согласования на входе и на выходе. Коэффициент отражения измеряется в 50-омном тракте. Эта характеристика (рис. 6.20) не зависит от величин полного сопротивления нагрузок портов.

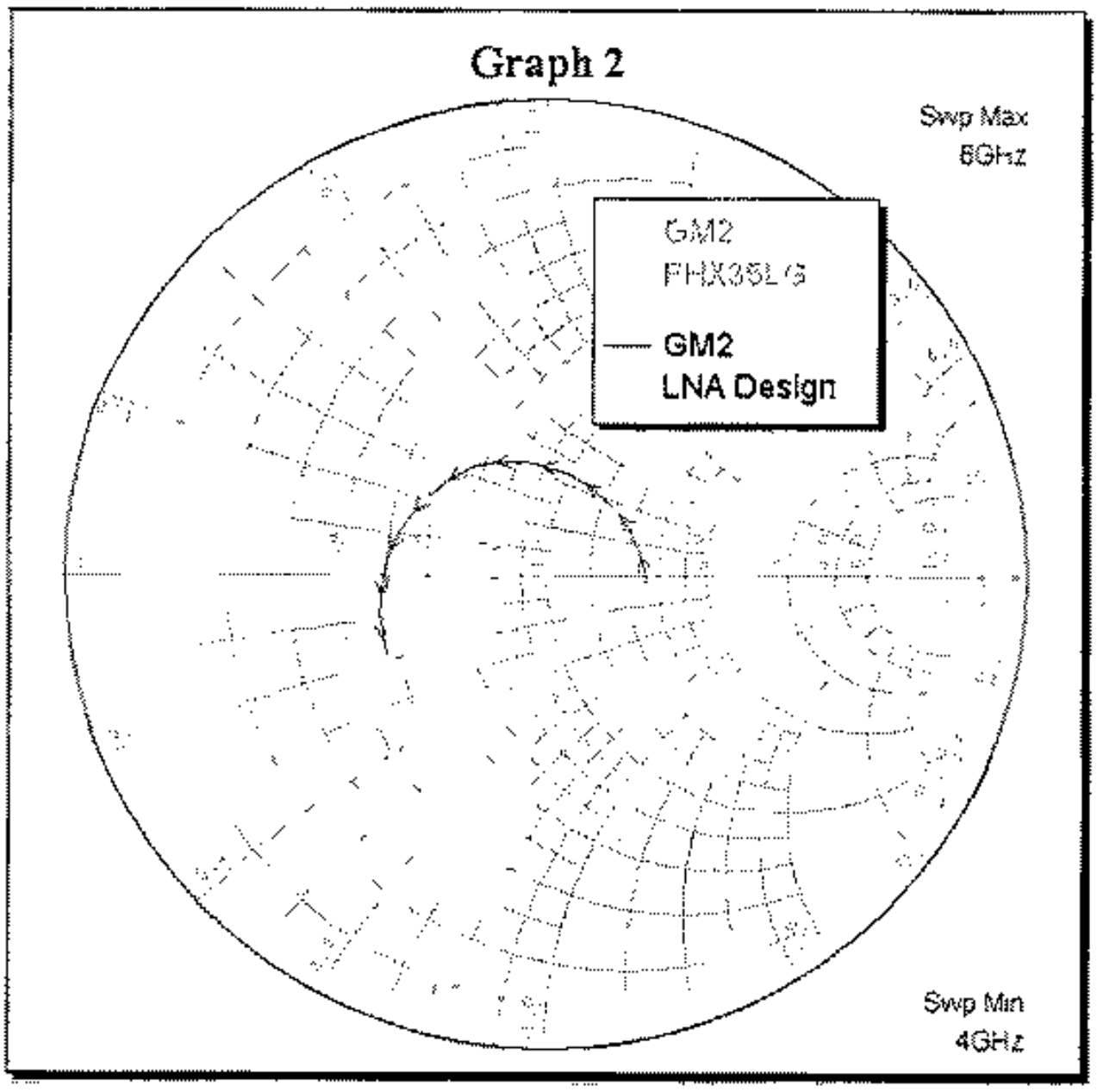


Рис. 6.20. Круговая диаграмма коэффициента отражения на выходе GM2

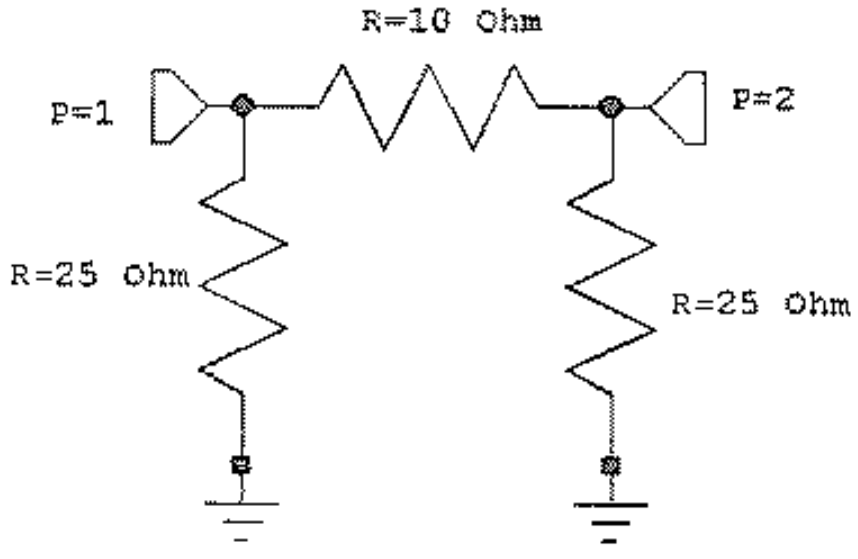


Рис. 6.21. Схема измерения и расчета коэффициентов отражений Geven в диапазоне частот

Коэффициент отражения для четных типов волн **Geven** рассчитывается со стороны одного из двух портов. Подразумевается, что имеются два равных синфазных источника. Коэффициент отражения вычисляется по току, который втекает в клеммы относительно синфазных напряжений. В примере, показанном на рис. 6.21 используется четное возбуждение портов 1 и 2. Полное сопротивление для этого режима равно 25 Ом. Обычно этот расчет используется в цепях, которые симметричны относительно узлов, возбуждаемых синфазно, и **Geven [1,2]** тогда равен **Ge-**

ven [2,1]. Если схема не симметрична относительно возбуждаемых портов P1 и P2, то Geven [1,2] не будет равен Geven [2,1]. Коэффициенты отражения обычно рассчитываются в 50-омном тракте.

Для расчета надо определить:
P1 — имя источника (подсхема с 2—1000 портами);
P2 — первый порт (целое число 1—1000);
P3 — второй порт (целое число 1—1000).

Коэффициент отражения для нечетных типов волн **Godd** рассчитывается при нечетном возбуждении со стороны портов. Это подразумевает, что имеются два источника с равными ЭДС и сдвигом по фазе на 180°. Напряжения на портах будут равны +V и -V. Коэффициент отражения Г вычисляется по току, который втекает в указанный порт.

Для схемы, показанной на рис. 6.22, коэффициент отражения при нечетном возбуждении портов 1 и 2 вычисляется из нечетного полного сопротивления 20 Ом. Полное сопротивление вычисляется как Zodd = V / I, где «+» напряжения V приложен к порту 1, а «-» приложен к порту 2, I — ток, текущий в заданный порт. Другой способ расчета этой схемы состоит в том, что режим нечетного возбуждения устанавливает мнимую заземленную стенку между двумя портами, так что схема превращается в два последовательных резистора по 20 Ом, с заземленной центральной точкой. Обычно этот расчет используется для цепей, которые симметричны относительно вершин, которые возбуждаются «в фазе» и Godd[1,2] равен Godd[2,1]. Если схема не симметрична относительно возбуждаемых узлов, то Godd[1,2] не будет равен Godd[2,1].

Коэффициент отражения рассчитывается в системе с характеристическим сопротивлением 50 Ом.

Параметры расчета:
P1 — название источника данных (подсхема, от 2 до 1000 портов);
P2 — номер первого порта;
P3 — номер второго порта.

Входное сопротивление в виде параллельной RC-цепи. Рассчитывается сопротивление R_PRC эквивалентной параллельной RC-цепи, которая имеет то же самое полное сопротивление, как и полное сопротивление со стороны заданного порта. Все другие порты нагружены на полные сопротивления, равные заданным нагрузкам.

Параметры расчета:
P1 — имя источника данных (подсхема с 1—1000 портами);
P2 — индекс порта (целое число 1—1000).

Входное сопротивление в виде последовательной RL-цепи. Рассчитывается сопротивление R_SRL эквивалентной последовательной RL-цепи, которая имеет то же самое полное сопротивление, как и полное сопротивление со стороны заданного порта. Этот расчет **R_SRL** дает величину сопротивления добавочного резистора R, последовательно соединенного с индуктивностью L. Эквивалентное полное сопротивление этой цепи равно полному сопротиалению со стороны установленного порта. Все другие порты замкнуты на импедансы с заданными нагрузками.

Параметры расчета:
P1 — имя источника данных (подсхема с 1—1000 портами);
P2 — индекс порта (целое число от 1 до 1000).

Коэффициент стоячей волны напряжения VSWR в порте, соединенным со всеми другими портами:

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma_0|}{1-|\Gamma_0|}, \tag{6.13}$$

где Γ_0 — коэффициент отражения порта, со всеми другими нагруженными портами.

Параметры расчета:
P1 — название источника данных (подсхема, от 1 до 1000 портов);
P2 — портовый индекс (целое число от 1 до 1000).

YIN — входная полная проводимость со стороны порта, со всеми другими портами, нагруженными на точно установленные нагрузки.

Параметры:
P1 — название источника данных (подсхема, от 1 до 1000 портов);
P2 — номер порта.

YM1 — полная проводимость, которая должна быть подключена ко входу, чтобы достигнуть одновременного сопряженного согласования на входе и на выходе. Эта характеристика не зависит от импедансов портов, которые имеются в схеме.

YM2 — полная проводимость, которая должна быть со стороны выхода для достижения одновременного сопряженного согласования на входе и выходе. Эта величина не зависит от импедансов портов.

Yeven — полная проводимость для четных типов волн, рассчитывается со стороны любого из двух портов, которые запитываются сигналами с четным возбуждением (рис. 6.21). Четное возбуждение подразумевает, что имеются два синфазных источника с равными ЭДС. Например, для схемы, адмитанс для четных типов был бы вычислен из полного сопротивления для четных типов волн 25 Ом (то есть 0,04 См). Обычно этот расчет используется со схемами, которые симметричны относительно узлов, которые возбуждаются «в фазе» и Yeven [1,2] в этом случае равен Yeven [2,1]. Если схема не симметрична относительно двух возбуждаемых узлов, то Yeven [1,2] не равен Yeven [2,1].

Параметры расчета:
P1 — имя исходных данных (подсхема, от 2 до 1000 портов);
P2 — первый порт (целое число от 1 до 1000);
P3 — второй порт (целое число от 1 до 1000).

Полная проводимость для нечетных типов волн Yodd есть полная проводимость со стороны одного из двух портов, на которые подаются противофазные сигналы. Режим синфазного возбуждения подразумевает, что имеются два равных источника сигналов, которые сдвинуты по фазе на 180° (подаваемые на порты на рис. 6.22). Напряжение на каждом порте равно +V и −V.

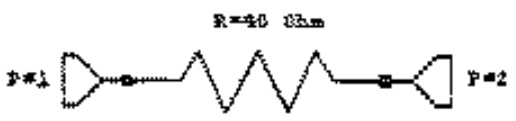


Рис. 6.22. К измерению полной проводимости для нечетных типов волн

Для схемы, показанной на рис. 6.22, полное сопротивление равно V / I, где напряжение +V прикладыва-

ется к порту 1, −V приложено к порту 2, и I — это ток, текущий в заданный порт. Другой способ расчета состоит в том, что режим нечетного возбуждения устанавливает виртуальную заземленную плоскость между двумя портами, так что схема становится последовательным соединением двух резисторов, по 20 Ом каждый со средней точкой, подсоединенной к земле. Обычно эта характеристика используется со схемами, симметричными относительно узлов, которые возбуждаются «в фазе», и в этом случае Yodd [1,2] равна Yodd [2,1]. Если схема не симметрична относительно возбуждаемых узлов, то Yodd [1,2] не равна Yodd [2,1].

Параметры для расчета:
P1 — название источника данных (подсхема, от 2 до 1000 портов);
P2 — первый порт (целое число от 1 до 1000);
P3 — второй порт (целое число от 1 до 1000).

ZIN — входное полное сопротивление порта при нагрузке всех остальных портов на сопротивления, заданные в их описаниях.

Параметры расчета:
P1 — название источника данных (подсхема, от 1 до 1000 портов);
P2 — индекс порта (целое число от 1 до 1000).

ZM1 — полное входное сопротивление при одновременном сопряженном согласовании на входе и на выходе. Эта характеристика не зависит от нагрузок на портах.

ZM2 — полное выходное сопротивление при одновременном сопряженном согласовании на входе и на выходе. Эта величина не зависит от величин полного сопротивления на портах, которые могут быть определены в схеме.

Zeven — полное входное сопротивление для четных типов волн. Рассчитывается со стороны одного из портов при подключении двух источников с четным возбуждением. Четное возбуждение подразумевает, что имеются два равных синфазных источника, как показано на рис. 6.21. Для этой схемы полные сопротивления для четного режима равны 25 Ом. Обычно этот расчет используется с цепями, которые симметричны относительно узлов, возбуждаемых «в фазе» и Zeven [1,2] в этом случае равен Zeven [2,1]. Если схема не симметрична относительно возбуждаемых узлов, то Zeven [1,2] ≠ Zeven [2,1].

Параметры расчета:
P1 — имя исходных данных (подсхема, от 2 до 1000 портов);
P2 — индекс первого порта;
P3 — индекс второго порта.

Zodd — полное сопротивление со стороны одного из двух портов для нечетных типов волн. Имеется в виду, что к многополюснику подключены два источника напряжения с равными по модулю ЭДС и фазами, смещенными на 180° (рис. 6.22). Напряжение на каждом порте обозначим как +V и −V. Для схемы, показанной на рис. 6.22, полные сопротивления для нечетного возбуждения портов 1 и 2 равны по 20 Ом. Полное сопротивление вычислено по формуле Zin = V / I, где напряжение +V приложено к порту 1, −V приложено к порту 2, а I — ток, текущий в заданный порт.

Другой способ решения состоит в том, что для создания режима нечетного возбуждения устанавливается земляная плоскость между двумя портами так, что

схема делится на два последовательных резистора по 20 Ом с точкой соединения в центре, являющейся виртуальной землей. Обычно этот расчет используется в схемах, которые симметричны относительно узлов, которые возбуждаются «в фазе», и Zodd [1,2] равно Zodd [2,1]. Если схема не симметрична относительно двух возбуждаемых узлов, то Zodd [1,2] не равно Zodd [2,1].

Параметры расчета:
P1 — имя исходных данных (подсхема, от 2 до 1000 портов);
P2 — первый порт (целое число от 1 до 1000);
P3 — второй порт (целое число от 1 до 1000).

6.4. Коэффициенты усиления линейных усилителей

Проектирование усилителя сводится, вслед за обеспечением смещения по постоянному току, к нахождению параметров согласующих цепей на входе и выходе схемы (рис. 6.23), при которых получаются требуемые характеристики.

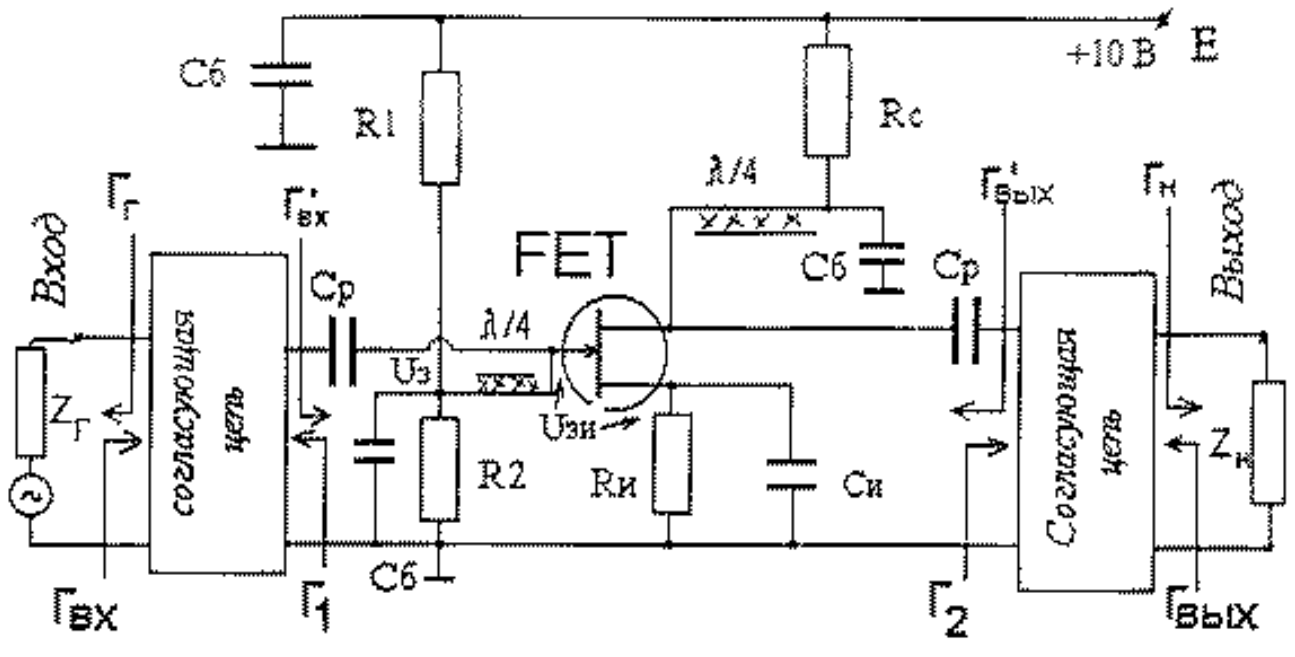


Рис. 6.23. Схема транзисторного СВЧ усилителя

Приведем определения усиления по мощности и напряжению, которые используются в расчете и проектировании как линейных, так и нелинейных схем. Они перечислены в табл. 6.3.

GA — располагаемый коэффициент усиления (также известный как номинальный коэффициент передачи по мощности) — отношение номинальной мощности на выходе четырехполюсника к номинальной мощности источника. Номинальный коэффициент передачи по мощности определяется как [16]

$$G_A = \frac{P_{\text{вых ном}}}{P_{\text{г ном}}} \tag{6.14}$$

и вычисляется по формуле

$$G_A = \frac{1-|\Gamma_1^2|^2}{|1-S_{11}\Gamma_1|^2}|S_{21}|^2\frac{1}{1-|\Gamma'_{\text{вых}}|^2}, \tag{6.15}$$

Таблица 6.3. Определения коэффициентов усиления

Класс характеристик	Обозначение характеристики	Название характеристики	Установка
Linear Gain	GA	Номинальный коэффициент передачи по мощности	к порту/ от порта
	GMAX	Максимальное номинальное усиление	к порту/ от порта
	GP	Фактический коэффициент передачи по мощности	к порту/ от порта
	GT	Реализуемый коэффициент передачи по мощности	к порту/ от порта
	ISG	Усиление по току от входного источника тока	к порту/ от порта
	ITG	Коэффициент усиление по току	к порту/ от порта
	MSG	Максимальное устойчивое усиление	к порту/ от порта
	VSG	Усиление по напряжению от входного источника напряжения	к порту/ от порта
	VTG	Усиление по напряжению по отношению к напряжению на входном порту	к порту/ от порта

где $\Gamma'_{вых}$ — коэффициент отражения со стороны выхода активного элемента (рис. 6.23), заданного S-параметрами, равный

$$\Gamma'_{вых} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_1}{1 - S_{11}\Gamma_1}, \qquad (6.16)$$

где Γ_1 — коэффициент отражения в сечении активного элемента со стороны генератора.

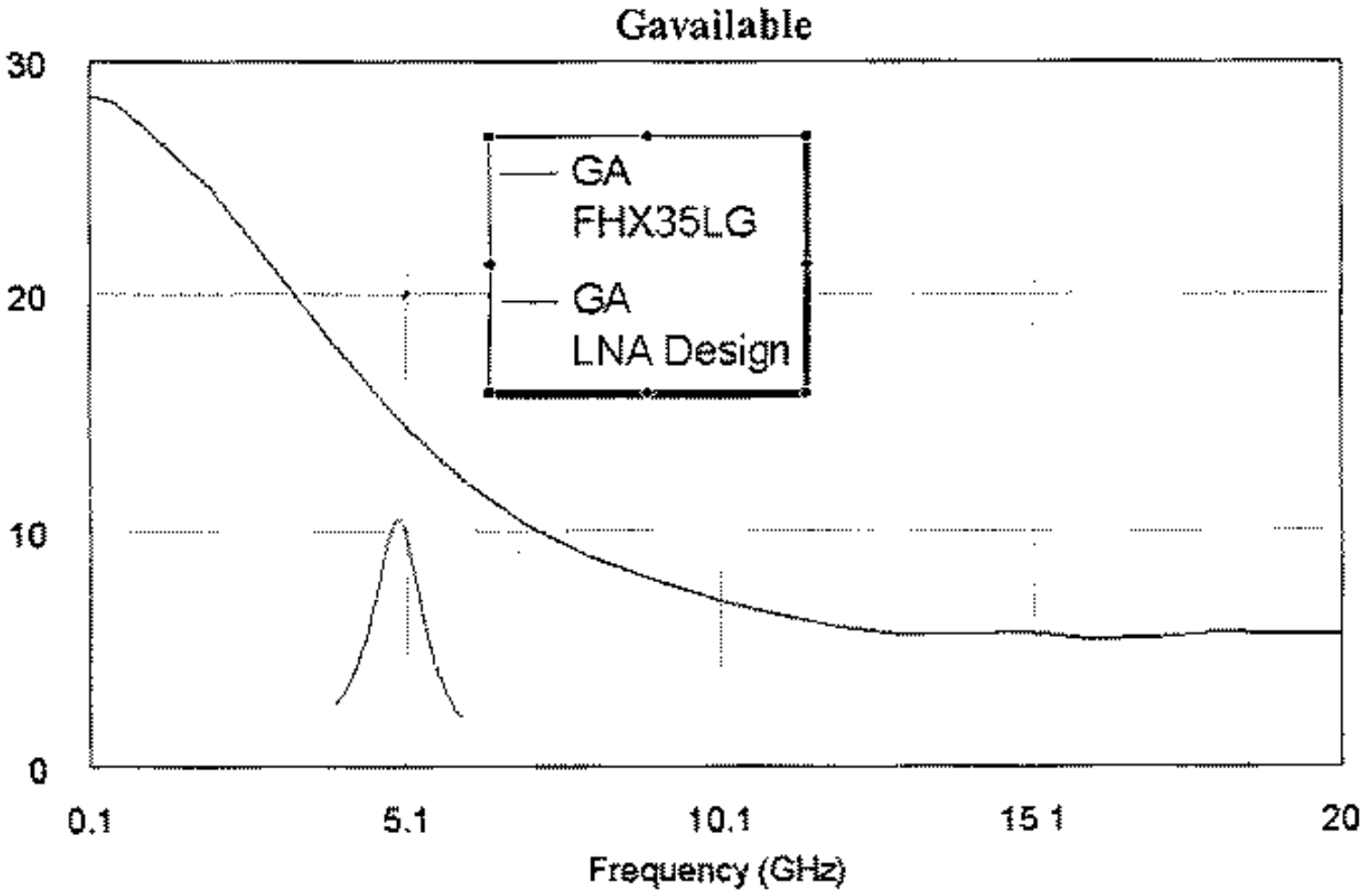


Рис. 6.24. Номинальный коэффициент усиления ПТ FHX35LG и МШУ на нем

GMAX — максимальный коэффициент передачи по мощности для безусловно устойчивых четырехполюсников:

$$G_{max} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|}\left(K - \sqrt{K^2 - 1}\right), \tag{6.17}$$

где K — коэффициент устойчивости. Для четырехполюсника, который не является безусловно устойчивым, GMAX будет определен как максимальный устойчивый коэффициент усиления

$$\frac{|S_{21}|}{|S_{12}|}. \tag{6.18}$$

GP — фактический коэффициент передачи по мощности (также известный как фактический коэффициент усиления), равный отношению мощности в нагрузке к мощности на входе из источника:

$$G_P = \frac{P_н}{P_г}, \tag{6.19}$$

Коэффициент усиления мощности вычисляется по формуле

$$G_P = \frac{1}{1 - |\Gamma'_{вх}|^2}|S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_2^2|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_2|^2}, \tag{6.20}$$

где $\Gamma'_{вх}$ — коэффициент отражения на входе активного элемента (рис. 6.23), равный

$$\Gamma'_{вх} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}, \tag{6.21}$$

где Γ_2 — коэффициент отражения от нагрузки активного элемента.

GT — реализуемый коэффициент передачи по мощности, равный отношению мощности в нагрузке к номинальной мощности источника:

$$G_T = \frac{P_н}{P_{г.ном}}. \tag{6.22}$$

Он равен

$$G_T = \frac{1 - |\Gamma_1|^2}{|1 - \Gamma'_{вх}\Gamma_1|^2}|S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_2^2|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_2|^2}, \tag{6.23}$$

где $\Gamma'_{вх}$ — коэффициент отражения на входе, равный

$$\Gamma'_{вх} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}, \tag{6.24}$$

а Γ_1, Γ_2 определены ранее.

ISG — коэффициент усиления по току от входного источника

$$ISG = \frac{I_н}{I_{вх}}, \tag{6.25}$$

где $I_н$ — ток нагрузки; $I_{вх}$ — входной ток.

Эта характеристика может использоваться для вычисления коэффициента усиления между любыми двумя портами N-портовой схемы. Для схем с более, чем двумя портами, все порты, которые не выводят мощности, замыкаются на нагрузки, установленные в схеме.

Параметры расчета:
P1 — название источника данных (от 2 до 1000 портов);
P2 — индекс входного порта (1—1000);
P3 — индекс выходного порта (1—1000).

ITG — коэффициент усиления по току

$$ITG = \frac{I_н}{I_i}, \tag{6.26}$$

где $I_н$ — ток нагрузки; I_i — ток i-го порта.

MSG — максимальный коэффициент устойчивого усиления, который может быть достигнут потенциально неустойчивым прибором:

$$MSG = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|}. \tag{6.27}$$

VSG — коэффициент усиления по напряжению от источника, равный

$$VSG = \frac{V_н}{V_г}, \tag{6.28}$$

где $V_н$ — напряжение на нагрузке; $V_г$ — напряжение источника сигнала.

VTG — коэффициент усиления напряжения, равный

$$VTG = \frac{V_н}{V_i}, \tag{6.29}$$

где $V_н$ — напряжение на нагрузке; V_i — напряжение сигнала на i-м порту.

6.5. Окружности характеристик на комплексной плоскости

MWO позволяет рассчитать и вывести на графики разнообразные характеристики, используемые в проектировании СВЧ устройств. Окружности этих характеристик, наносимые на диаграмму Смита, перечислены в табл. 6.4.

GACIR — окружности равного номинального коэффициента передачи мощности. Эта характеристика показывает линии постоянного номинального коэффициента передачи на плоскости входного коэффициента отражения. Коэффициент передачи изменяется от заданного минимального до максимального значения с указанным шагом.

Параметры расчета:
P1 — имя источника данных (только четырехполюсника);
P2 — максимальное усиление, дБ (действительная величина от −200 до 200 дБ);
P3 — шаг изменения усиления от окружности к окружности, дБ (от 0 до 200 дБ);
P4 — число окружностей (целое число от 1 до 20).

Таблица 6.4. Определения окружностей характеристик

Класс характеристик	Характеристика	Описание характеристики	Установка
Circle	GACIR	Окружности номинального коэффициента передачи G_A	Max gain/Gain step
	GAC_MAX	Окружности G_A, построенные с учетом GMAX	Gain step (шаг по усилению)
	GPCIR	Окружности фактического коэффициента передачи по мощности	Max gain/Gain step
	GPC_MAX	То же используя GMAX	Gain step (шаг по усилению)
	MMCIRC	Окружности постоянного импеданса рассогласования	Рассогласование порта/ возвратные потери (дБ)
	NFCIR	Окружности равного N_F	Число окружностей/шаг между окружностями (дБ)
	SCIR1	Окружности устойчивости на плоскости Γ_1	—
	SCIR2	Окружности устойчивости на плоскости Γ_2	—

В результате рассчитываются параметры (центры и радиусы) набора окружностей. Эти характеристики выводятся только на диаграмму Смита (рис. 6.25).

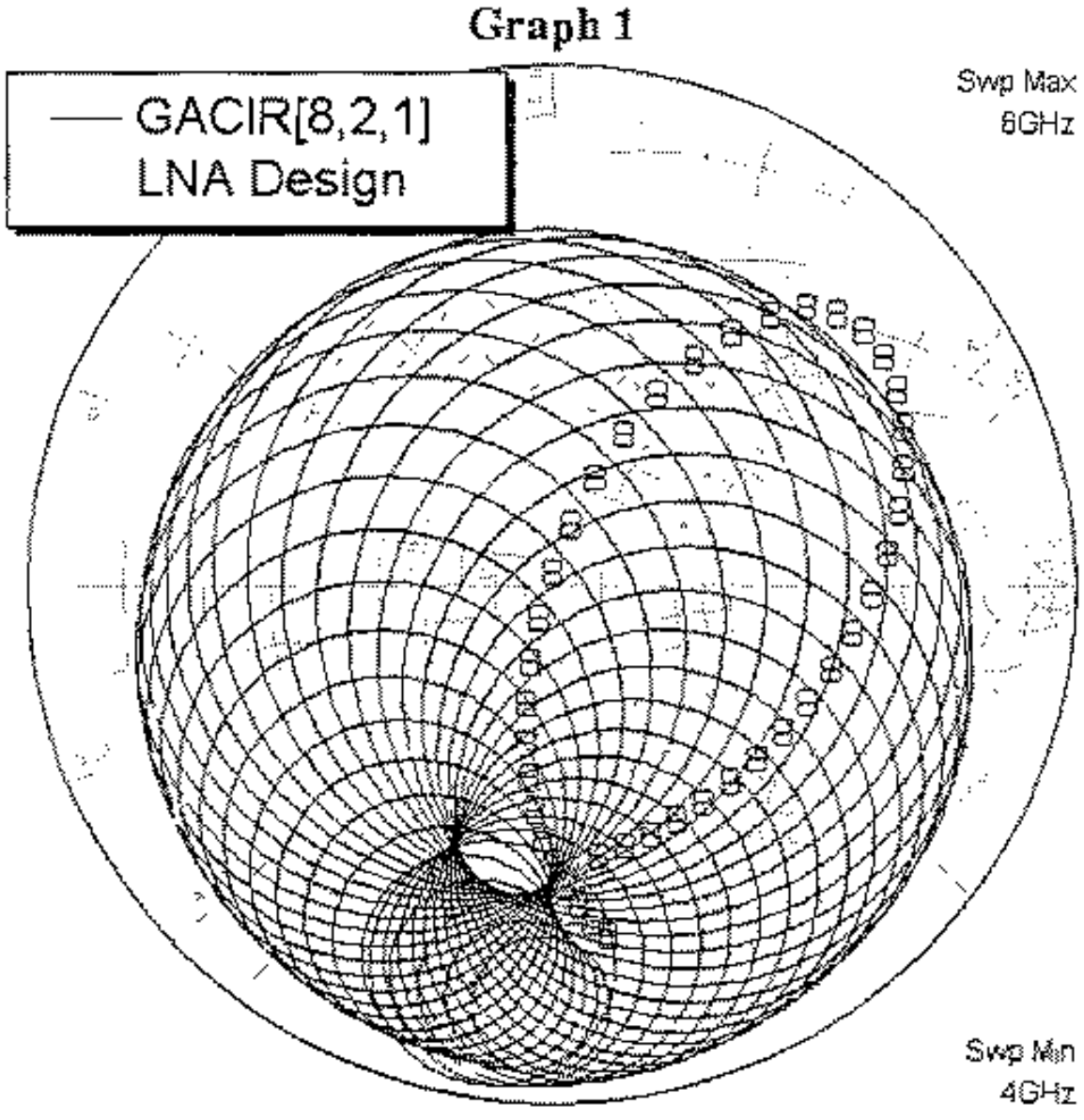


Рис. 6.25. Окружности равного номинального коэффициента передачи мощности

GAC_MAX — окружности равного номинального коэффициента передачи, построенные с учетом GMAX (только для четырехполюсников). Этот расчет показывает окружности постоянного номинального усиления на входной комплексной плоскости. В нем используется величина G_{max} для первой окружности и дальнейшее построение проводится с заданным шагом. Эти характеристики выводятся только на диаграмму Смита (см. пример на рис. 6.26).

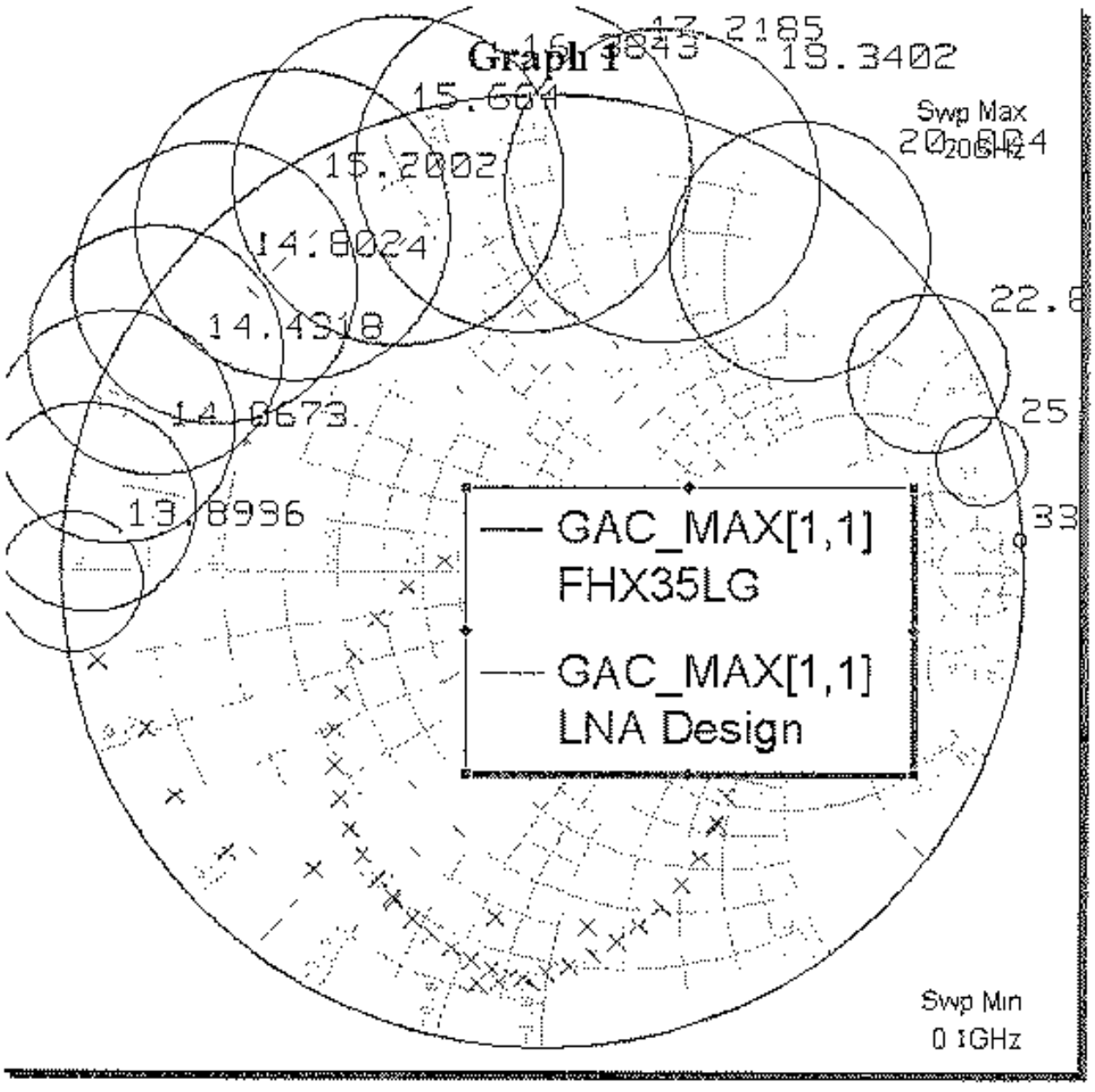


Рис 6.26. Окружности равного номинального коэффициента передачи мощности, построенные с помощью GMAX

Параметры расчета:

P1 — имя источника данных (только четырехполюсник);
P2 — шаг изменения усиления, дБ (от 0 до 200);
P3 — число окружностей (целое число от 1 до 20).

GPCIR — окружности фактического коэффициента передачи мощности на плоскости входного коэффициента отражения четырехполюсника. Первая окружность задается точкой на плоскости, последующие расположены с заданным шагом. Эта характеристика может быть выведена только на диаграмму Смита (рис. 6.27). Дополнительную информацию см. в пояснении к расчету фактического коэффициента усиления мощности GP.

Параметры расчета:

P1 — имя источника данных (только четырехполюсник);
P2 — максимальное усиление, дБ (действительное число от −200 до 200);
P3 — шаг усиления, дБ (действительное число от 0 до 200);
P4 — число окружностей (целое число от 1 до 20).

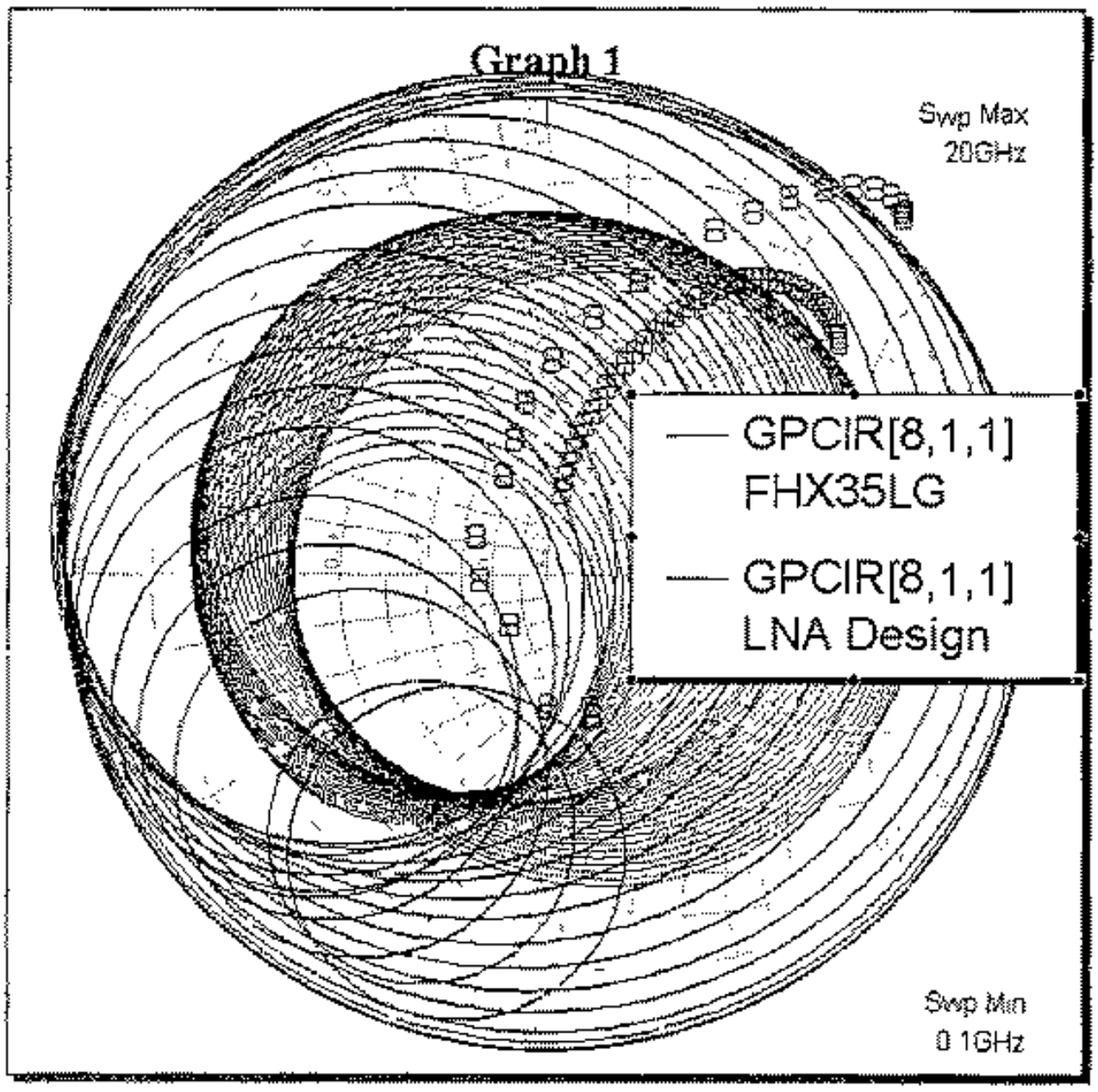


Рис. 6.27. Окружности равного фактического коэффициента передачи мощности малошумящего усилителя

GPC_MAX — окружности равного фактического коэффициента передачи по мощности, построенные с учетом GMAX. Выводятся окружности равного усиления мощности на плоскости входного коэффициента отражения. Для расчета первой окружности используется величина Gmax, для последующих принимается во внимание заданная величина шага. Эти окружности выводятся только на диаграмму Смита. Дополнительную информацию см. в пояснении к расчету фактического коэффициента усиления мощности GP.

Параметры расчета:

P1 — имя источника данных (только четырехполюсник);

P2 — шаг изменения усиления в дБ (действительная величина от 0 до 200);

P3 — число окружностей (целое число от 1 до 20).

MMCIRC — окружности равного импеданса рассогласования. Эта характеристика используется для того, чтобы на плоскости импеданса показать окружности, которые обеспечивают рассогласование конкретного порта. Это рассогласование создает возвратные потери. Окружности рассогласования будут представлены на нормализованной к 50 омам диаграмме Смита. Все другие порты нагружены на заданные в схеме нагрузки. Эта характеристика показывается только на диаграмме Смита.

Параметры расчета:

P1 — имя источника (подсхема, от 1 до 1000 портов);

P2 — рассогласованный порт (индекс от 1 до 1000);

P3 — возвратные потери, дБ (от 0 до 200).

NFCIR — окружности равного коэффициента шума. Этот расчет выводит окружности равного коэффициента шума на плоскости источника. Величина минимального коэффициента шума Fmin указывается в центре первой окружности (рис. 6.28).

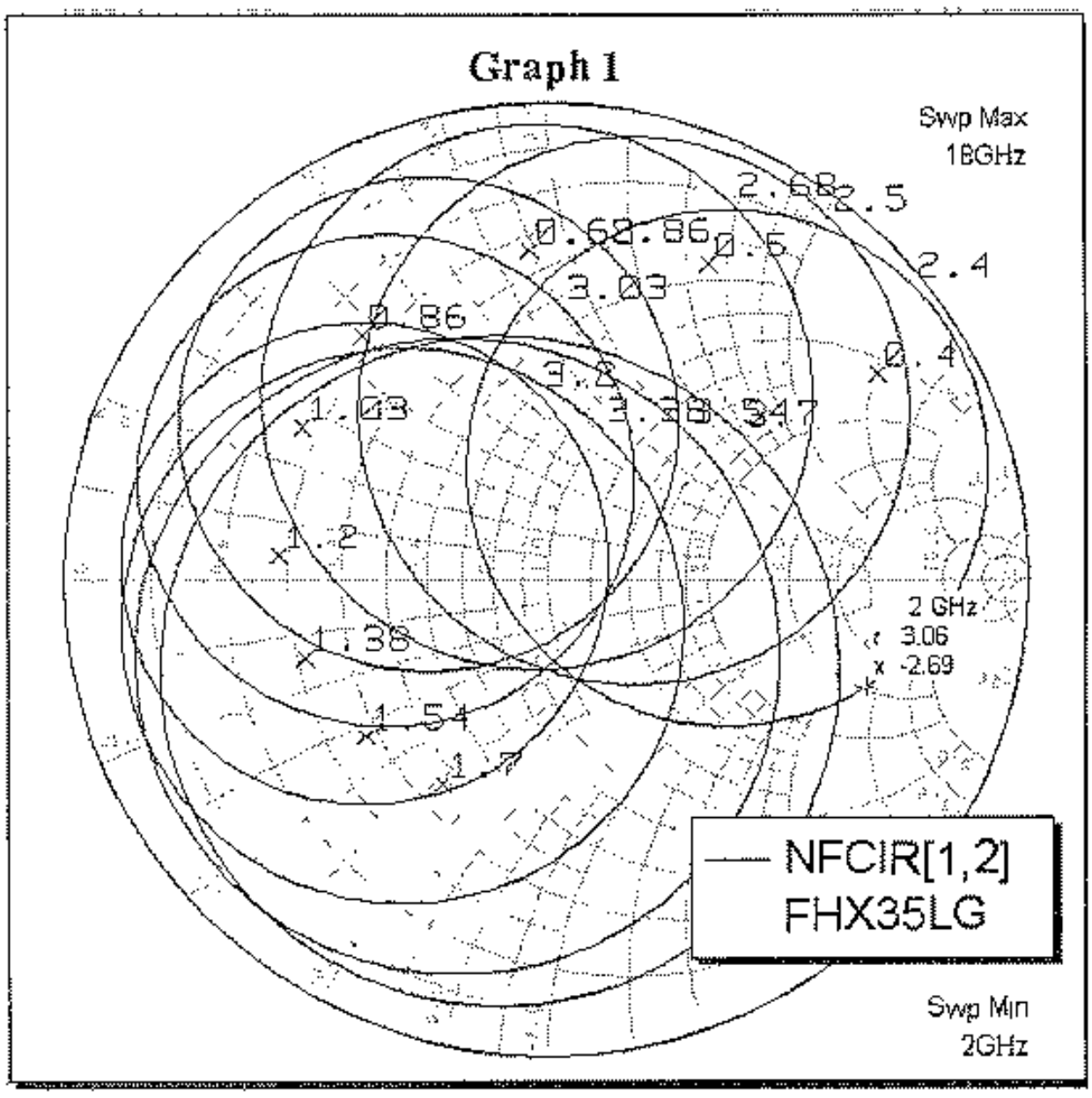


Рис. 6.28. Окружности равного коэффициента шума транзистора FHX35LG

Параметры расчета:
P1 — имя четырехполюсника;
P2 — число окружностей (целое число от 1 до 10);
P3 — шаг в дБ (от 0 до 100).

SCIR1 — окружности устойчивости на входной плоскости. На диаграмме Смита изображаются окружности устойчивости. Окружность устойчивости на входной плоскости это есть контур на входной плоскости, который показывает величины коэффициентов отражения от генератора, при которых коэффициент отражения на выходе будет равен единице (см. пример на рис. 6.29). Выходной коэффициент отражения меньше единицы — показывает устойчивость прибора, тогда как коэффициент отражения, больший 1 — показывает потенциальную неустойчивость прибора. Окружность устойчивости показывает область неустойчивости пунктирной линией. Если пунктирная линия оказывается внутри сплошной линии, то внешняя сторона окружности показывает область устойчивости, тогда как если пунктирная линия расположена вне сплошной линии, то внутренняя сторона представляет область устойчивости (рис. 6.29).

Параметры расчета:
P1 — имя источника данных (только четырехполюсник).

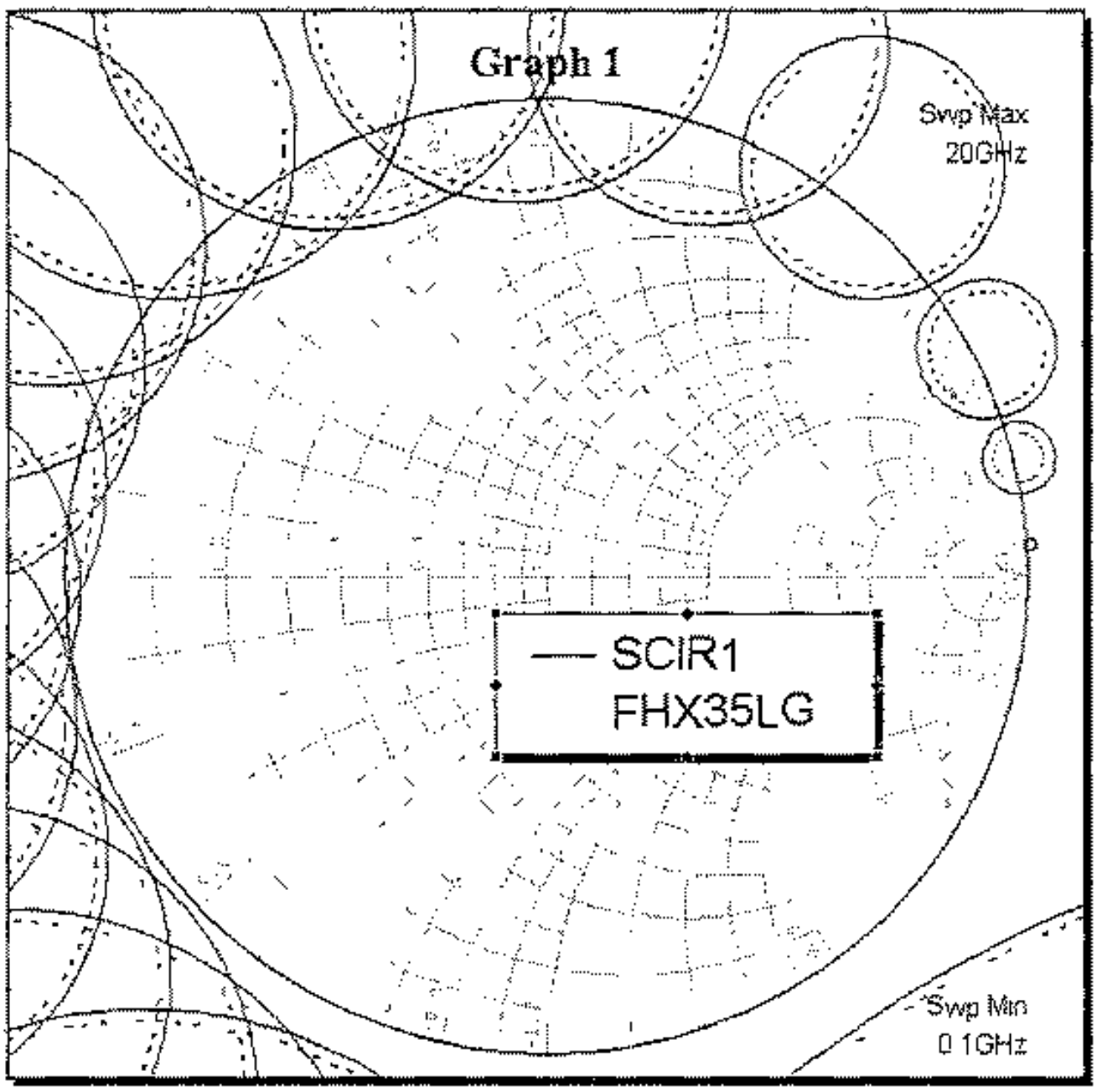


Рис. 6.29. Окружностей устойчивости транзистора FHX35LG на диаграмме Смита

SCIR2 — окружности устойчивости на выходной плоскости. Этот расчет используется для показа окружностей устойчивости на диаграмме Смита. Окружность устойчивости на выходной плоскости — это есть контур на плоскости нагрузки, который показывает те величины отражения от нагрузки, при которых коэффициент отражения на входе будет равен единице. Входной коэффициент отражения, меньший 1, показывает на устойчивость прибора, тогда как коэффициент отражения, больший чем 1, показывает потенциальную нестабильность прибора. Окружность устойчивости показывает область нестабильности пунктирной линией в нестабильной области. Если пунктирная линия расположена внутри сплошной линии, тогда внешняя сторона окружности показывает область стабильности, тогда как если пунктирная линия расположена вне сплошной линии, то внутренняя сторона представляет собой стабильную область.

SCIR_IJ — окружность устойчивости на порту *I* для |Gamma|=1 на порту *J*. Расчет используется для анализа устойчивости части *N*-портовой схемы, расположенной между какими либо двумя портами (см. пример на рис. 6.30). Эти окружности устойчивости есть контура на входной плоскости *I*, которые показывают величины нагрузок, при которые коэффициент отражения на плоскости *J* будет равен единице. Все другие порты схемы нагружены на нагрузки, заданные в схеме. Коэффициент отражения, меньший 1, будет показывать устойчивый прибор, тогда как коэффициент отражения, больший 1, показывает потенциальную неустойчивость прибора. Окружности устойчивости, прорисованные пунктирной линией в области неустойчивости, показывает область неустойчивости. Если пунктирная

линия находится внутри окружности, изображенной непрерывной линией, то внешняя область показывает область устойчивости, тогда как если пунктирная линия находится вне окружности с непрерывной линией, то внутренняя область окружности представляет область устойчивости. Эти окружности изображаются только на диаграмме Смита (рис. 6.30).

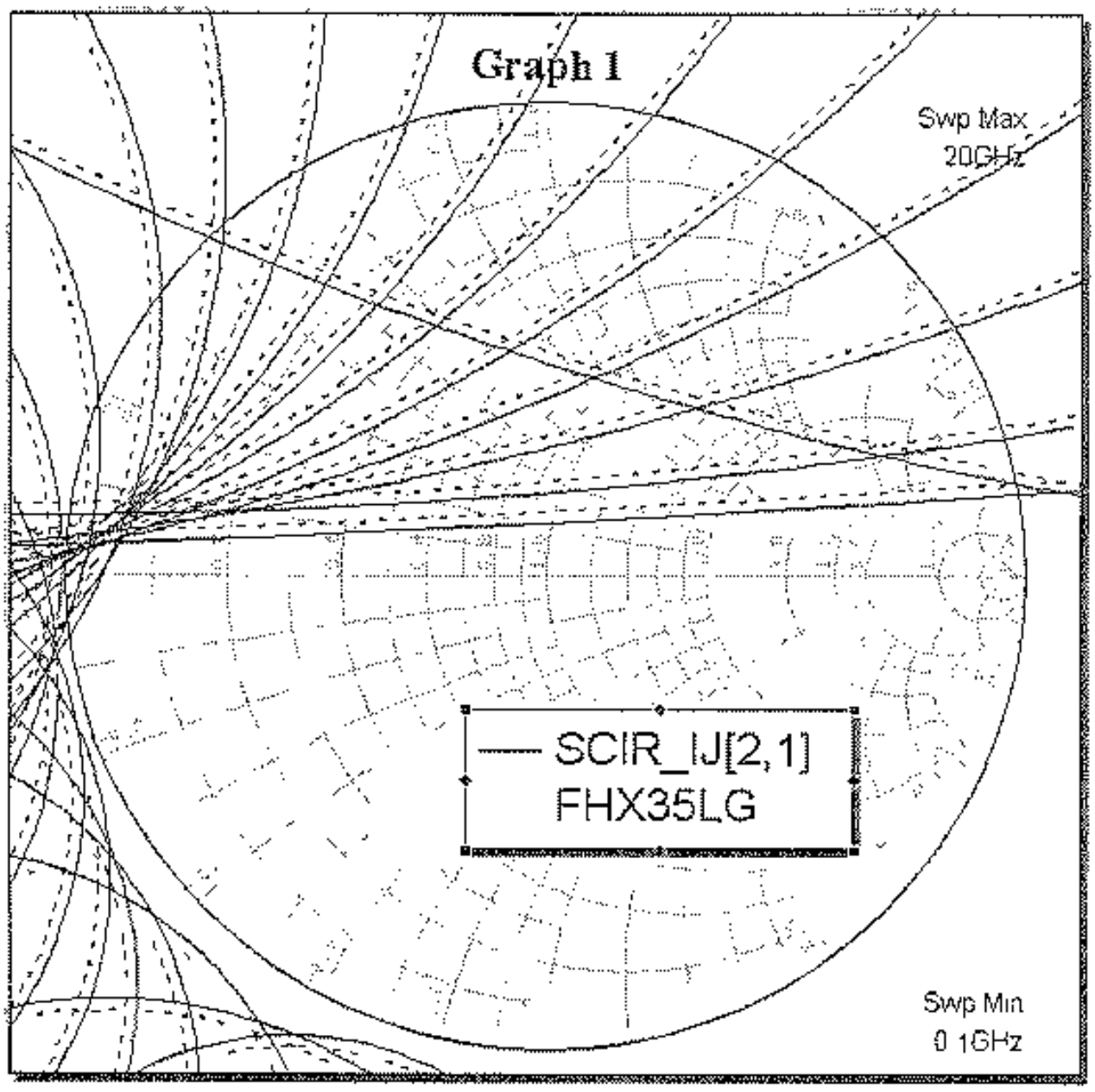


Рис. 6 30. Окружности устойчивости на плоскости Γ_2

Параметры расчета:
P1 — имя источника (подсхема, от 2 до 1000 портов);
P2 — порт окружности устойчивости (от 1 до 1000);
P3 — порт, на котором |Gamma|=1 (от 1 до 1000).

SMAP — окружности на входной диаграмме. Этот расчет используется для показа окружностей равного импеданса на порту «To (к)», которая производится линиями импедансов на порту «From (от)» (см. [6]). Расчет показывает трансформированную диаграмму Смита на комплексной плоскости импеданса порта «From» в комплексной плоскости порта «To».

Параметры расчета:
P1 — имя источника данных (подсхема, от 2 до 1000 портов);
P2 — плоскость порта «To» (от 1 до 1000);
P3 — плоскость порта «From» (от 1 до 1000).

Пример расчета показан на рис. 6.31.

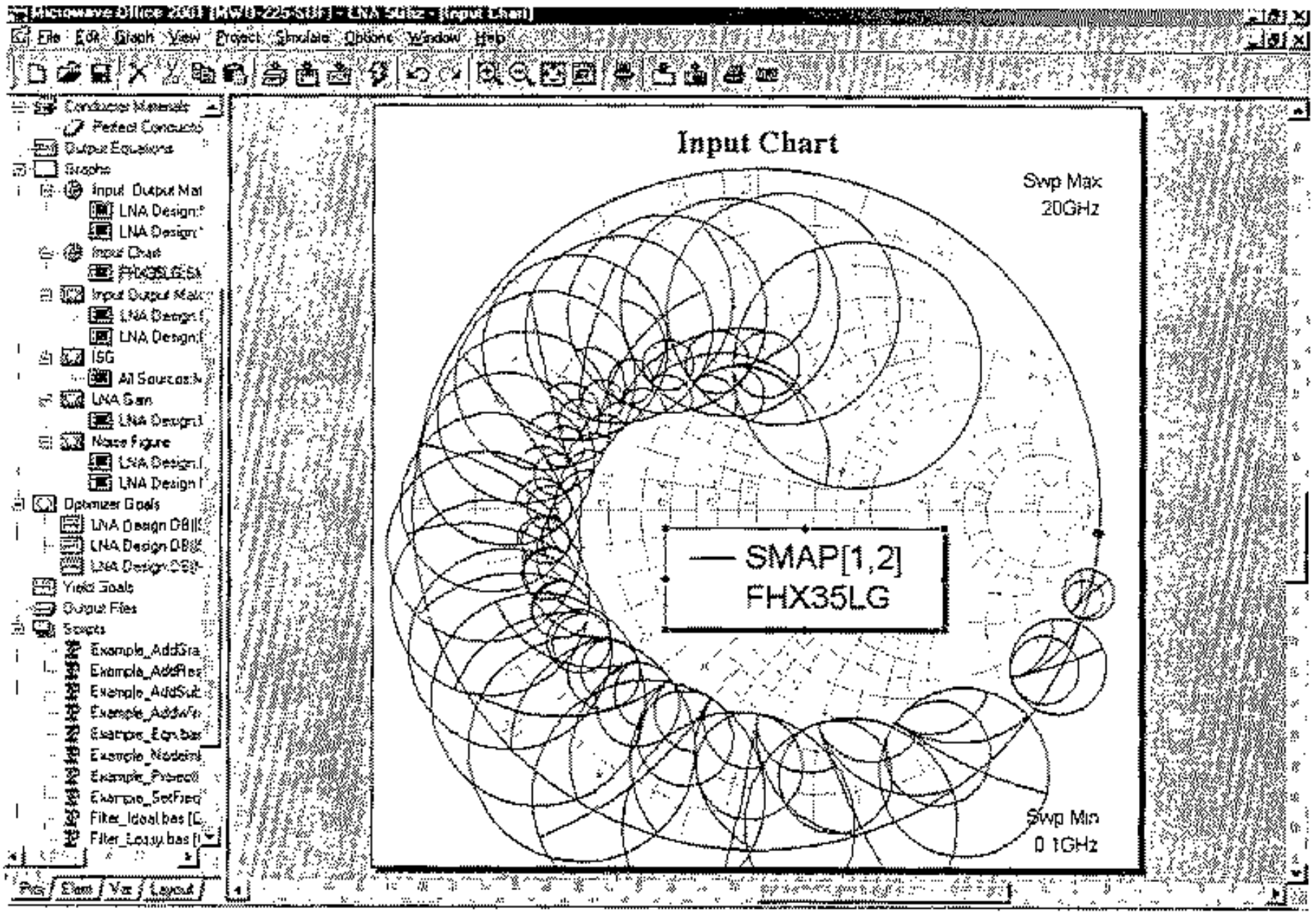


Рис. 6.31. Окружности равного выходного импеданса на плоскости входного импеданса

6.6. Шумовые характеристики

Очень важной характеристикой радиосистем являются шумовые характеристики, которые оценивают степень ухудшения отношения мощности сигнала к мощности внутренних шумов в различных сечениях СВЧ схем и структур.

В MWO в расчете шумовых характеристик используется система А-параметров [3]. В этой системе имеем следующую связь напряжений и токов

$$\begin{aligned} U_1 &= A_{11}U_2 + A_{12}I_2 + E_A \\ I_1 &= A_{21}U_2 + A_{22}I_2 + I_A \end{aligned}. \tag{6.30}$$

В этой системе, как мы видим, шумовые источники (рис. 6.32) можно выделить в отдельный четырехполюсник, каскадно соединенный с нешумящим четырехполюсником. Поэтому можно предположить, что выражение для коэффициента шума в этой системе параметров будет проще: коэффициент шума этого каскадного соединения равен коэффициенту шума первого каскада (нешумящий ЧП вклад не дает).

Нормированная матрица спектральных плотностей шумов в этой системе параметров представляет собой:

$$[W_A] = \frac{1}{4kT_0\Delta f}\begin{bmatrix} E_A \\ I_A \end{bmatrix}\begin{bmatrix} E_A \\ I_A \end{bmatrix}^{*} = \begin{bmatrix} R_{ш} & \gamma^{*} \\ \gamma & G_{ш} \end{bmatrix}. \tag{6.31}$$

Получим выражение для $K_{ш}$ в системе А-параметров. По определению

$$K_{ш} = \frac{P_{ш\,вых}}{P_{ш\,т\,вых}}, \tag{6.32}$$

где $P_{ш.вых}$ — мощность на выходе от всех причин; $P_{ш\,т\,вых}$ — мощность шума на выходе, определяемая только мощностью генератора.

Удобство системы А-параметров заключается в том, что коэффициент передачи первого ЧП, в котором сосредоточены шумовые источники, равен 1. Второй четырехполюсник, поскольку от нешумящий, не изменяет коэффициент шума в целом (что видно хотя бы из формулы Фрииса).

Закорачивая зажимы 1-1 (рис. 6.32), определим ток короткого замыкания:

$$I_{кз} = I_A + E_A Y_Г + I_{Г\,Ш}. \tag{6.33}$$

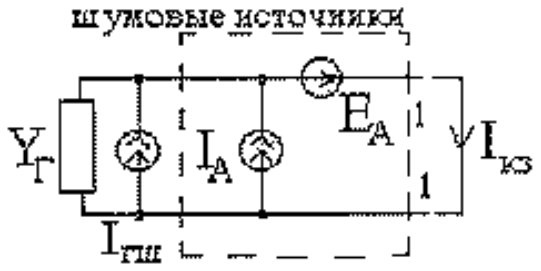


Рис. 6 32. Шумящий четырехпоюсник
в системе А-параметров

Таким образом, мы находим эквивалентный источник (согласно теореме Тевенина) с источником тока и проводимостью $Y_Г$.

Возьмем среднеквадратическое значение этой величины:

$$\overline{I^2_{кз}} = \overline{I^2_A} + \overline{E^2_A}|Y_Г|^2 + 2\,\mathrm{Re}(\overline{I^*_A E_A} Y_Г) + \overline{I^2_{Г\,Ш}}. \tag{6.34}$$

Тогда мощность на выходе от всех источников пропорциональна $\overline{I^2_{кз}}$, а мощность на выходе только от генератора пропорциональна $I^2_{Г\,Ш}$. Поэтому коэффициент шума равен

$$K_{Ш} = 1 + \frac{\overline{I^2_A} + \overline{E^2_A}|Y_Г|^2 + 2\,\mathrm{Re}(\overline{I^*_A E_A}\,\overline{Y_Г})}{\overline{I^2_{Г\,Ш}}}. \tag{6.35}$$

Используя элементы нормированной матрицы спектральных плотностей (6.23), получаем

$$K_{Ш} = 1 + \frac{G_N + R_N|Y_Г|^2 + 2\,\mathrm{Re}(\gamma Y_Г)}{\mathrm{Re}\,Y_Г}. \tag{6.36}$$

Итак, коэффициент шума полностью определяется тремя шумовыми параметрами R_N, G_N, γ и проводимостью источника $Y_Г$. Поскольку γ — комплексное число, то всего действительных шумовых параметров 4. Из формулы также очевидно, что коэффициент шума зависит от проводимости генератора. Особо отметим шумовое сопротивление R_N, которое используется в системе шумовых параметров программы ***Touchstone*** [5].

В ранних версиях MWO расчет коэффициентов шума производился только для линейных систем, а начиная с версии 5.2 — и для систем нелинейных (после выполнения линеаризации в рабочей точке).

Приведем в табл. 6.5 определения разнообразных шумовых характеристик, которые могут быть рассчитаны в MWO для линейных или линеаризованных цепей.

Таблица 6.5. Перечень шумовых характеристик

Тип характеристики	Название характеристики
GMN	Оптимальное согласование по шуму
NF	Коэффициент шума
NFMin	Минимальный коэффициент шума
NMEAS	Мера шума
RN	Шумовое сопротивление
TE	Эквивалентная входная шумовая температура
TN	Эквивалентная выходная шумовая температура
YMN	Оптимальная проводимость для шумового согласования

NF — коэффициент шума. Этот параметр оценивает частотные зависимости собственных шумов четырехполюсника (рис. 6.33). Чтобы получить коэффициент шума $K_ш$ в дБ, нужно при расчете использовать опцию dB. При расчете учитывается импеданс сопротивления генератора на входе четырехполюсника, от которого зависит коэффициент шума. Эта характеристика (как и все остальные шумовые характеристики, при этом сглаживание таких характеристик не производится) может быть построена на графиках в декартовой системе координат и в таблице.

Параметры расчета:

P1 — имя четырехполюсника.

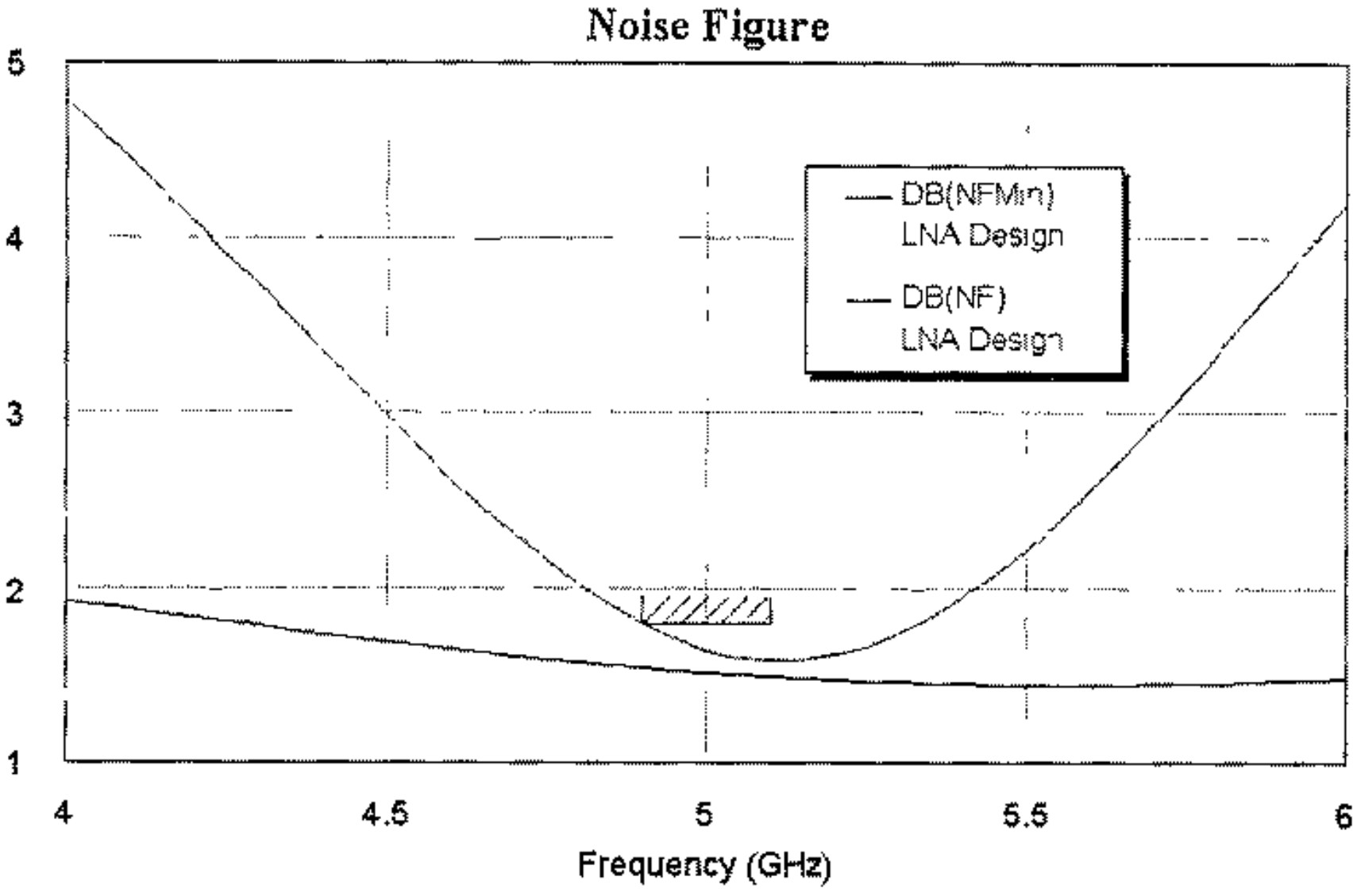


Рис. 6.33. Зависимость коэффициента шума усилителя $K_ш$ от частоты

NFMin — минимальный коэффициент шума, достигаемый путем оптимального рассогласования на входе. Чтобы получить значение в децибелах, отметьте опцию dB. Данная характеристика — одна из трех, которые требуются, чтобы описать шумовые свойства ЧП. Соотношение между шумовыми параметрами и коэффициентом шума следующее:

$$NF = NF_{\min} + \frac{R_N}{G_\Gamma}|Y_\Gamma - Y_{opt}|^2, \tag{6.37}$$

где сопротивление источника задается как

$$Y_\Gamma = G_\Gamma + jB_\Gamma, \tag{6.38}$$

коэффициент шума NF_{min} задан в единицах (не в дБ).

NMEAG — мера шума. Представляет собой коэффициент шума бесконечного числа каскадно соединенных одинаковых каскадов. Мера шума рассчитывается по формуле

$$NMEAS = \frac{NF - 1}{1 - \frac{1}{G_a}}, \tag{6.39}$$

где G_a — номинальный коэффициент усиления; NF — коэффициент шума каскада. Эта характеристика зависит от величины импеданса источника. Пример частотной зависимости меры шума приводится на рис. 6.34.

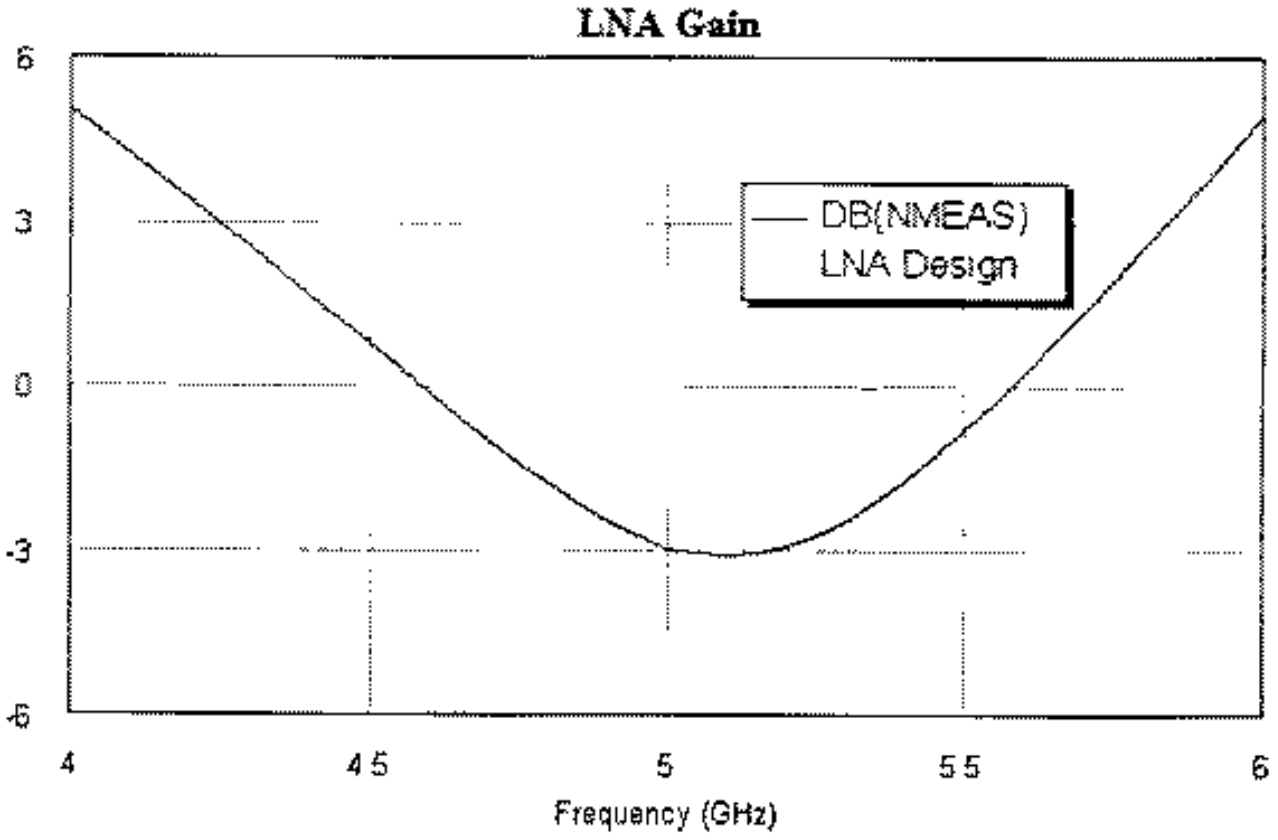


Рис. 6.34. График меры шума

RN — шумовое сопротивление. Эта характеристика — одна из трех, требуемых для полного определения шумовых свойств ЧП. Соотношение между шумовыми параметрами и коэффициентом шума указано в (6.30). Пример шумового сопротивления показан на рис. 6.35.

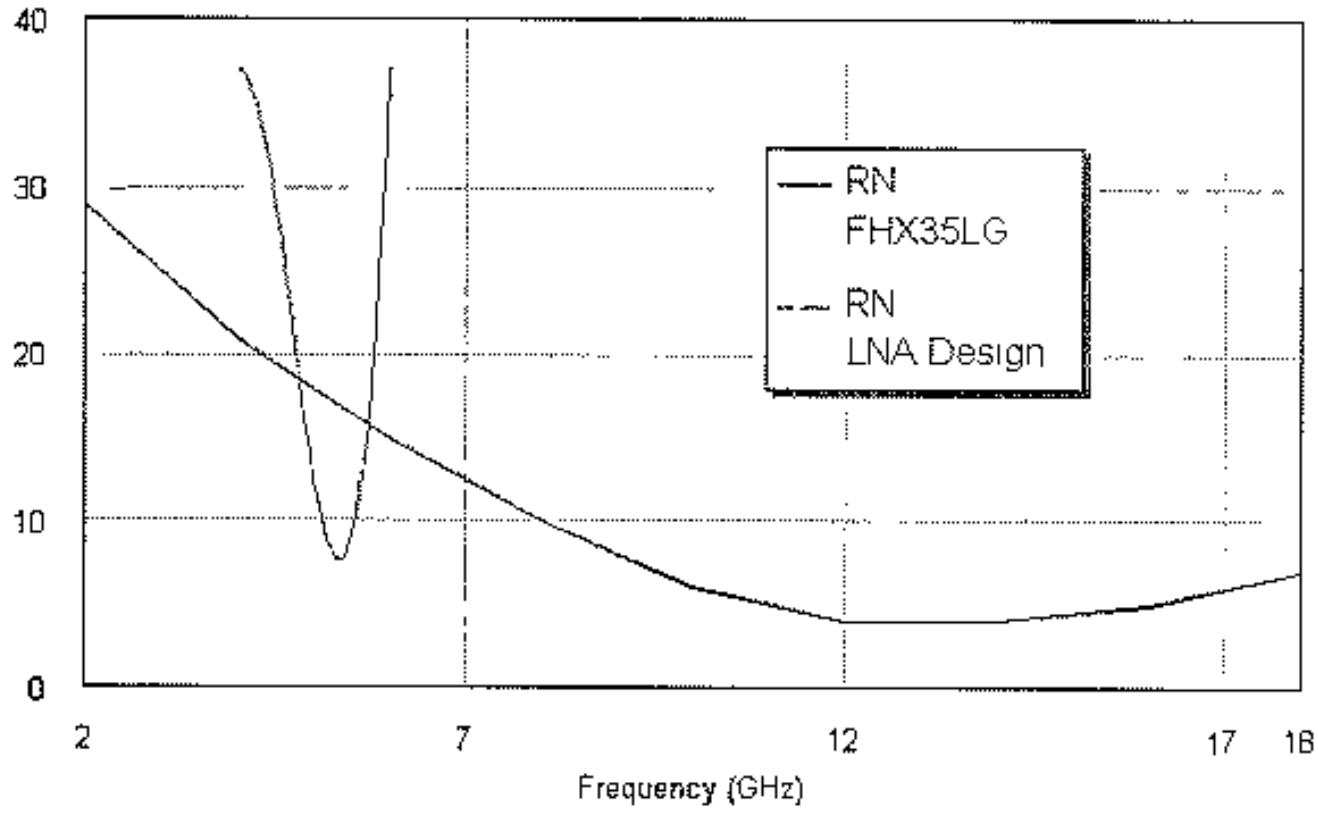


Рис. 6.35. Графики шумового сопротивления транзистора и усилителя

TE — эквивалентная входная шумовая температура. Является эквивалентной шумовой температурой ЧП в градусах Кельвина, причем

$$TE = T_0(NF - 1), \tag{6.40}$$

где T_0 — стандартная температура (290 °K); NF — коэффициент шума. Это учитывает импеданс источника при расчете коэффициента шума. Пример — на рис. 6.36.

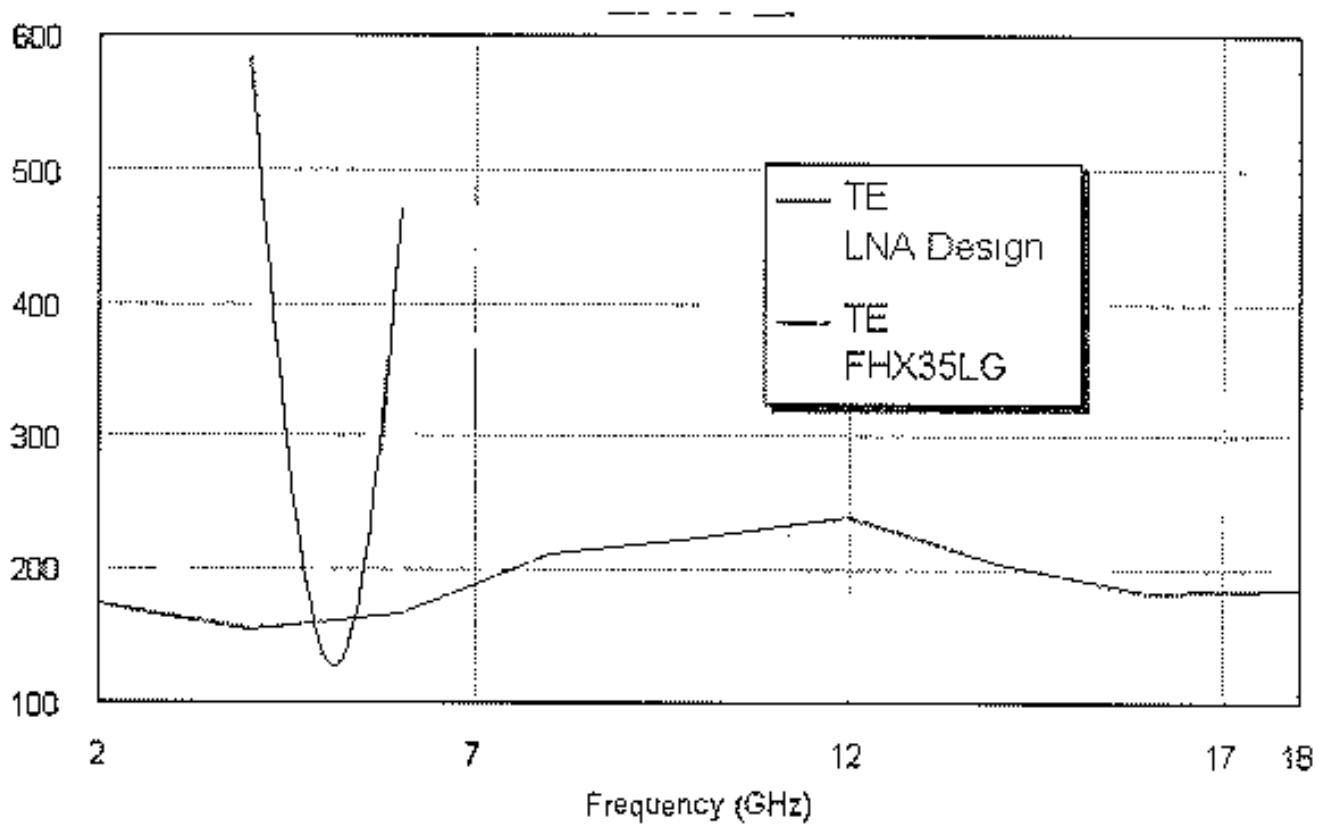


Рис. 6.36. Графики эквивалентной шумовой температуры малошумящего усилителя LNA и активного элемента, FHX35LG, стоящего на входе этого усилителя

TN — эквивалентная шумовая выходная температура рассчитывается как

$$TN = G_a TE, \tag{6.41}$$

где TE — эквивалентная входная шумовая температура; G_a — номинальный коэффициент усиления. Этот расчет производится при подключении нагрузок к портам так же, как и при расчете коэффициента шума.

YMN — оптимальный адмитанс (рис. 6.37), при котором достигается минимальный коэффициент шума. Это проводимость со стороны источника, которую нужно подключить для получения согласования по шумам (только для четырехполюсника). Эта характеристика может быть использована для расчета оптимального импеданса источника в каскадном соединении. *YMN* можно также использовать как один из трех параметров для полного описания шумовых свойств четырехполюсника (см. формулу (6.30)).

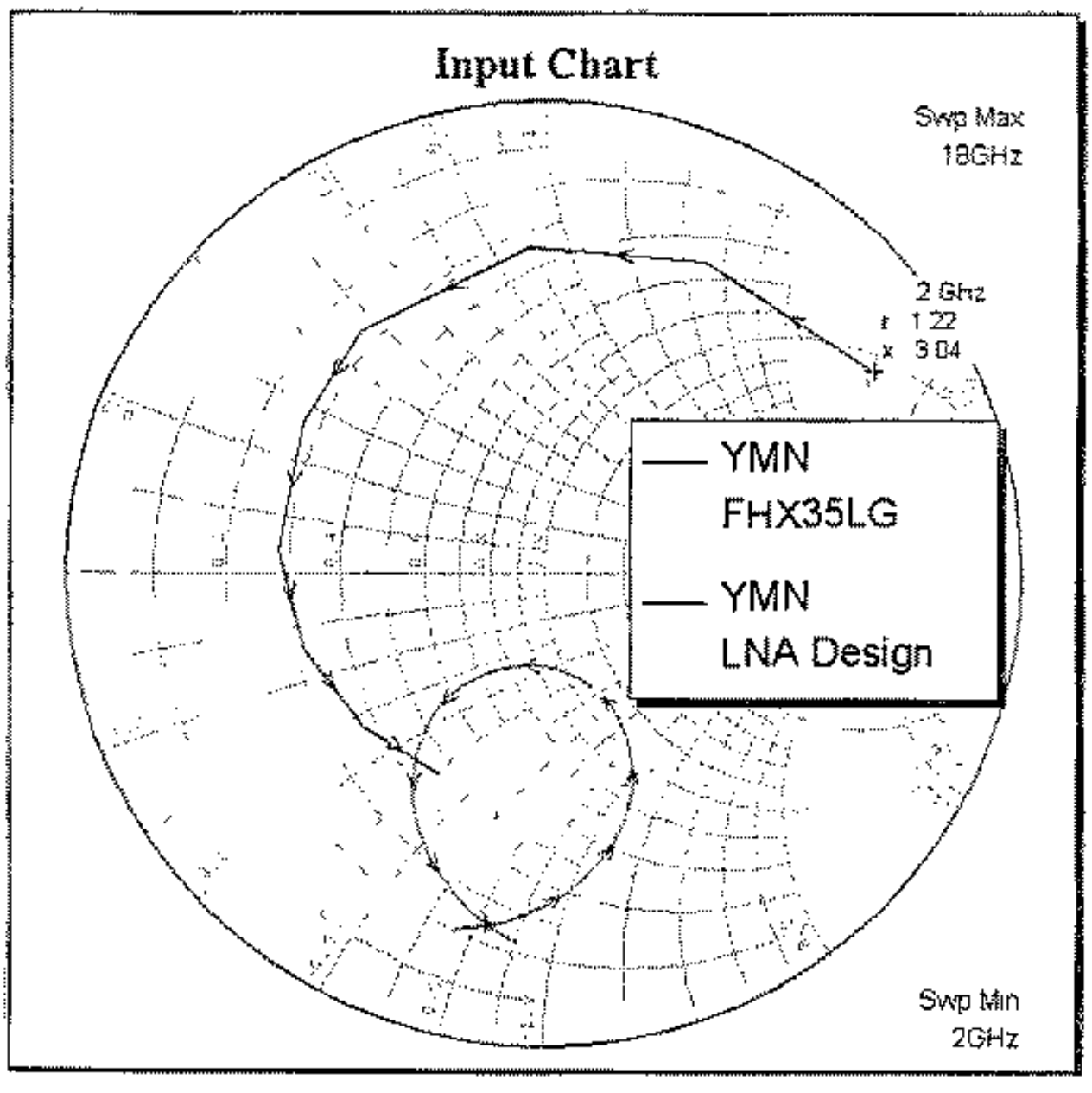


Рис. 6.37. Оптимальный адмитанс транзистора и усилителя

ZMN — оптимальный импеданс для шумового согласования. Используется для получения оптимального импеданса источника, при котором обеспечивается минимальный коэффициент шума. ZMN можно также использовать как один из трех параметров для полного описания шумовых свойств четырехполюсника. Соотношение между шумовыми параметрами и коэффициентом шума следующее:

$$NF = NF_{\min} + \frac{G_N}{R_\Gamma} |Z_\Gamma - Z_{opt}|, \tag{6.42}$$

где импеданс источника дается выражением

$$Z_\Gamma = R_\Gamma + jX_\Gamma. \tag{6.43}$$

Глава 7
Расчет нелинейных схем

Нелинейный анализ — важная часть современного проектирования электронных схем. Возможность рассчитывать и управлять такими явлениями, как нелинейные искажения, может существенно улучшить характеристики проектируемой системы.

Современные системы связи очень чувствительны к нелинейным искажениям. Интерференция, которая проявляется в виде интермодуляционных искажений (IMI), определяет фундаментальный предел многих характеристик военных и коммерческих систем радиосвязи, и уже поэтому имеет большую важность. Конечно, потребность в хороших, «чистых» смесителях и усилителях не уменьшилась и в обычных радиосистемах.

7.1. Методы анализа нелинейных схем

Важность нелинейных характеристик радиосистем существенно повлияло на развитие методов расчета и создание программ нелинейного схемотехнического анализа. Несколько лет назад единственную возможность для нелинейного схемотехнического анализа предоставляла программа SPICE [4, 5, 16], а теперь пользователь может выбирать между широким многообразием программ и алгоритмов, включая применение метода гармонического баланса в частотной области и расчет методом рядов Вольтерра.

Программа **PSPICE** выполняет моделирование линейных и нелинейных электронных цепей во временной области, которое называется анализом переходных процессов. PSPICE формирует систему нелинейных дифференциально-разностных уравнений в матричной форме, и интегрирует их во временной области (см. рис. 7.1). Чтобы выполнить интегрирование, PSPICE должна получить решение на каждом из многих последовательных шагов времени; для сложных схем это длительный процесс.

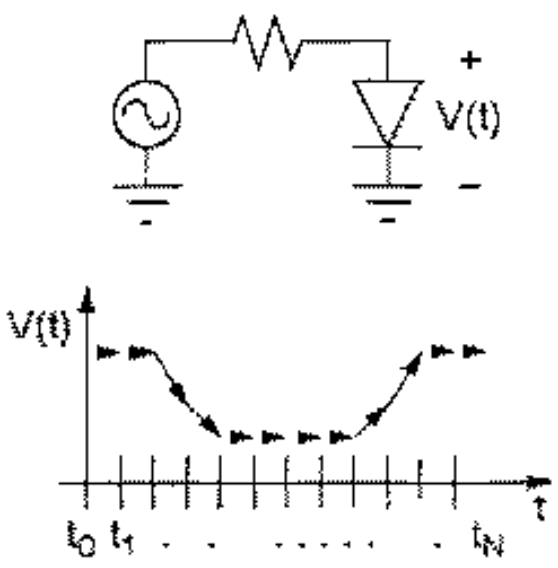


Рис 7 1. Анализ во временной области. Напряжения в схеме определены в ряде дискретных точек времени, численно решая систему нелинейных дифференциально-разностных уравнений

Самая большая трудность в использовании PSPICE для ВЧ и СВЧ цепей, заключается в вопросе: как описывать дисперсионные линии передачи с потерями и другие цепи с распределенными параметрами во временной области? Схемы, анализируемые в PSPICE, *могут* включать в себя идеальные линии передачи, но PSPICE не может обрабатывать более сложные неоднородности СВЧ. Это первое ограничение SPICE для расчетов на СВЧ. Вторая проблема — необходимость интегрировать *длительные* переходные процессы, чтобы достичь установившееся состояние. Это особенно трудная задача для СВЧ устройств, имеющих большой разброс постоянных времени. SPICE3 содержит некоторые алгоритмы, которые решают эту задачу, но SPICE2 этого не делает.

Программа SPICE почти идеальна для анализа переключаемых и логических схем. Она может моделировать широкое многообразие нелинейных элементов, цепей и явлений. Например, PSPICE может использоваться (хотя иногда и с трудом) для разработки генераторов, когда метод гармонического баланса не решает эту задачу.

В MWO есть два метода анализа нелинейных схем: метод гармонического баланса и метод рядов Вольтера. Любая схема, которая включает нелинейные элементы (рис. 7.2), требует нелинейного моделирования. Программа VoltaireXL автоматически вызовет лучший метод моделирования в зависимости от требуемых характеристик и от того, содержит ли схема нелинейные элементы. Для линейных и нелинейных схем могут рассчитываться и линейные, и нелинейные характеристики.

Когда для нелинейной схемы задан расчет линейной характеристики, программа вычисляет смещение по постоянному току, а затем рассчитает линеаризованную схему относительно режима по постоянному току. Это позволяет для линейных и нелинейных схем задавать анализ любых линейных характеристик, включая переходные процессы в автогенераторах. При выполнении линейного анализа нелинейной схемы все источники сигналов обнуляются, кроме источников постоянного тока (имеющих тип DC).

Впрочем, анализ нелинейных характеристик не требует, чтобы схема имела нелинейные компоненты. Любую нелинейную характеристику можно рассчитать для линейной схемы. Когда нелинейная характеристика задана для схемы без нелинейных элементов, используется более эффективный линейный анализ. Одно очень полезное приложение этой возможности — включение нескольких источников сигнала в линейной схеме и расчет интермодуляции (IM), используя характеристики переходного процесса нелинейных схем.

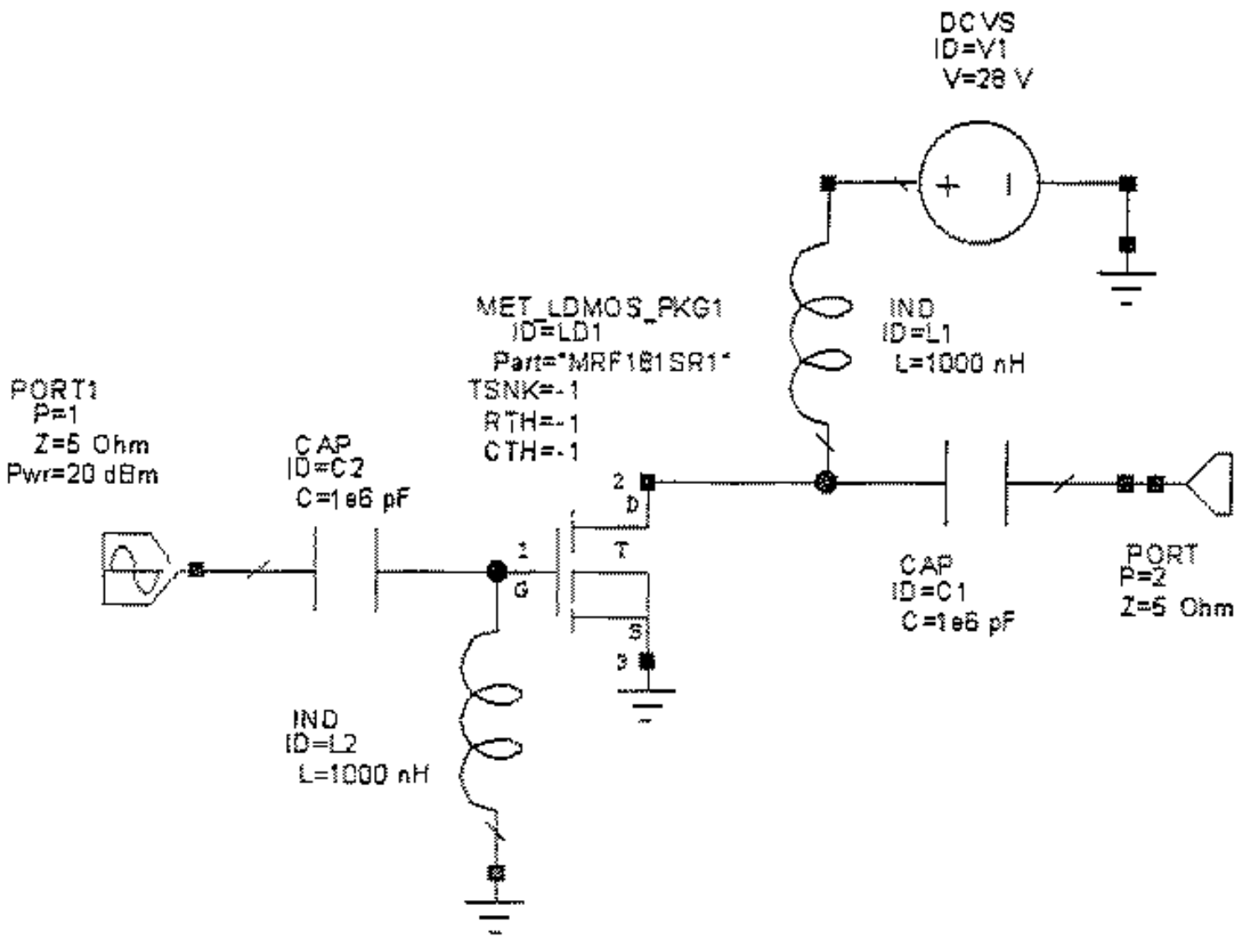


Рис. 7.2. Однокаскадный транзисторный СВЧ усилитель мощности на LDMOS транзисторе

7.2. Метод гармонического баланса

При анализе методом гармонического баланса схема разбивается на две подсхемы: линейную, которая содержит все линейные элементы, и нелинейную, содержащую только нелинейные элементы. Две подсхемы связаны рядом портов (рис. 7.3).

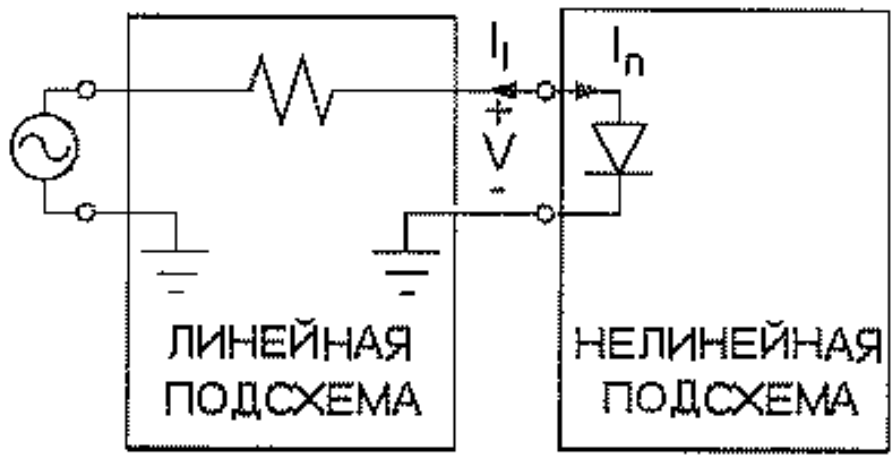


Рис. 7.3. Анализ методом гармонического баланса

Напряжения в портах соединения — переменные, и программа решает схемные уравнения итерационным методом гармонического баланса. Токи портов используются для того, чтобы определить, является ли найденное решение правильным: если это так, токи в нелинейных I_n и линейных подсхемах I_l для каждой гармоники удовлетворяют первому закону Кирхгоффа.

Напряжения в узлах связи линейной и нелинейной подсхем трактуются как переменные состояния схемы на разных частотах (на нулевой частоте, на фундаментальной частоте и на частотах гармоник). Процесс гармонического баланса итерационно меняет вектор этих напряжений, который удовлетворяет линейным уравнениям линейной подсхемы (обычно описываемых многогармонической матрицей полной проводимости) и нелинейным уравнениям, описывающим нелинейную подсхему. Линейные уравнения легко решаются в частотной области, но нелинейные должны быть решены во временной области. Результаты во временной и частотной областях связываются преобразованием Фурье.

7.2.1. Особенности метода гармонического баланса

Метод гармонического баланса имеет следующие особенности.

1. Итерационный процесс решения не даст гарантии успеха. Отсутствие сходимости является трудностью метода гармонического баланса.

2. Если имеется только одна частота возбуждения, все хорошо. Однако если используются две частоты (например, при расчете IM), то как осуществить преобразование между частотной и временной областями? Фурье-преобразование для такого случая существуют, но они не работают так хорошо, как классическое односигнальное преобразование Фурье.

3. Точность преобразования Фурье (особенно для двухсигнального IM анализа) ограничена определенными амплитудами сигналов. Слабые продукты IM часто теряются в шумах вычислений при расчете преобразования Фурье.

4. Каждая итерация процесса решения методом гармонического баланса требует инверсии «огромной» матрицы. По этой причине, анализ методом гармони-

ческого баланса очень медленный; эффективный анализ большой схемы требует большого объема памяти и высокой производительности компьютера.

Несмотря на эти трудности и частично из-за агрессивного маркетинга, моделирующие устройства, используемые метод гармонического баланса, стали наиболее популярными средствами анализа нелинейных цепей СВЧ.

Метод гармонического баланса (НВ) — мощный способ анализа высокочастотных нелинейных устройств, типа смесителей, усилителей мощности и генераторов. Начиная с 1990 года он стал признанным методом моделирования нелинейных схем. Затем, используя новые численные методы, диапазон применимости НВ был расширен на существенно нелинейные устройства, и на цепи, которые обрабатывают сложные сигналы, состоящих из сотен спектральных составляющих.

В отличие от программ анализа во временной области, наиболее известной из которых является SPICE, программы гармонического баланса анализируют цепи в частотной области.

Развитие технологии моделирования в частотной области мотивировалось следующими неточностями методов анализа во временной области:

- цепи с распределенными параметрами почти исключительно моделируются, измеряются и анализируются в частотной области, и их моделирование в программах типа SPICE ненадежно и неэффективно;
- в практике анализа ВЧ и СВЧ схем частот необходимо много-гармоническое моделирование, но такие сигналы очень трудно обработать в программах анализа во временной области. Рассмотрим, например, усилитель, который должен тестироваться при воздействии двух синусоид с равными амплитудами, с частотами *9,999 ГГц* и *10,001 ГГц*. Такое тестирование часто применяется, чтобы определить «точку пересечения третьего порядка». Двухтоновый сигнал на входе может рассматриваться как высокочастотная несущая, модулируемая медленной синусоидой, в данном примере, $F_{нес} = 10\ ГГц$ и $F_{мод} = 1\ МГц$. В этом случае 10000 циклов несущей соответствует одному периоду огибающей и, кроме того, программа должна выполнить моделирование как минимум несколько периодов, чтобы достигнуть установившего режима. Чтобы получить неизвестную форму волны, программа анвлизирует состояние схемы в сотнях тысяч временных точек, и число отсчетов увеличивается с увеличением отношения ширины полосы несущей/огибающей. Процесс решения поэтому медленный, требуется большая оперативная память и свободная память на жестком диске, и часто просто нереален;
- многие высокочастотные цепи высокодобротны, и переходные процессы в них длятся более чем сотни и тысячи периодов ВЧ колебаний.

Метод гармонического баланса обходит упомянутые проблемы довольно изящным и эффективным способом, переводя расчет схемных уравнений в частотную область («схемные уравнениями» составляются по контурам схемной структуры, и являются результатом приложения законов Кирхгоффа). Область анализа в частотной области получается, заменяя неизвестные формы волны их комплексными векторами, и затем согласовывая коэффициенты комплексных компонент, на различных частотах.

Как видно из рис. 7.3, схема разбита на две подсхемы — та, которая содержит все линейные элементы и другая, которая содержит нелинейные устройства. Напряжения в портах соединения рассматриваются как неизвестные величины, так что цель анализа методом гармонического баланса состоит в том, чтобы найти на-

бор векторов напряжения таким способом, чтобы были удовлетворены законы Кирхгоффа с заданной точностью. Один способ можно сформулировать так:

Найти

$$V_1(\omega_k),\ V_2(\omega_k),\ldots,V_N(\omega_k)$$

для всех ω_k и для каждого межсоединения, с учетом выполнения условия

$$|I_{linear}(\omega_k) - I_{nonlinear}(\omega_k)| < \varepsilon. \qquad (7.1)$$

Здесь ω_k — это набор значимых частот в напряжениях на портах; ε — определяет желательную точность.

Поиск решения состоит из следующих шагов.

1. Определение набора существенных частот, определение желательной точности, и определения начального предположения в решении.
2. Вычисление токов, которые вводятся в линейную подсхему.
3. Вычисление токов через нелинейные приборы.
4. Вычисление разности между двумя наборами токов.
5. Определение нового предположения в решении в случае уменьшения разности.
6. Повторение процесса, начиная со второго шага, пока законы Кирхгоффа не выполнятся.

Преимущества метода гармонического баланса, по отношению к методам решения во временной области, заключаются в следующем:

На каждом шаге итерационного процесса, токи, входяшие в линейную подсхему, связаны с напряжениями порта соединения Y-параметрами линейной подсхемы. Поэтому компоненты с распределенными параметрами, моделируются более естественным методом расчета линейных схем в частотной области.

Частотный состав при воздействии двухтоновых сигналов, редко когда больше чем 100 частотных компонентов. Это намного меньше, в отличие от представления во временной области, которое требует сотни тысяч отсчетов.

Моделяторы методом гармонического баланса рассчитывают в условиях установившегося процесса на основании спектрального разложения неизвестных сигналов. Время моделирования, поэтому, не зависит от длительности переходных процессов схемы.

Зная основные шаги НВ анализа, можно ответить на ряд практических вопросов. Некоторые из этих вопросов имеют значительное влияние на точность, скорость расчета и окончательный результат моделирования.

7.2.2. Выбор значимых частот, скорость и сходимость

Вообще говоря, волновая форма нелинейного устройства эквивалентна частотному представлению, состоящему из бесконечного числа частотных компонентов. Если на входе нелинейной схемы действует синусоидальный сигнал с частотой ω_0, то эти члены соответствуют частотам в наборе $n\omega_0$, $n = 0, 1, \ldots, \infty$, как показано на рис. 7.4.

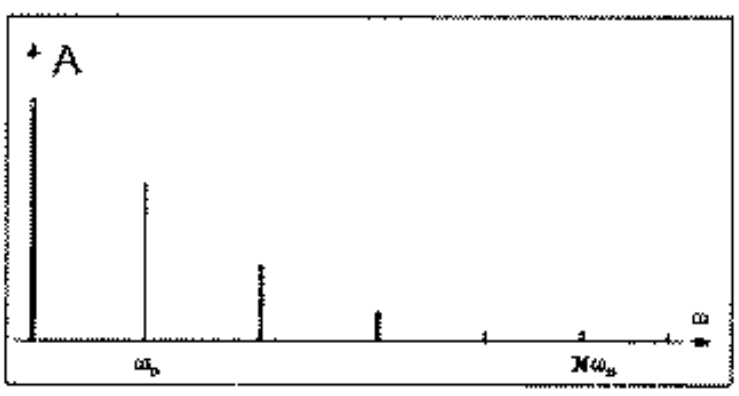


Рис. 7.4. Спектр в нелинейной схеме

Для моделирования необходимо усечь это представление, отказываясь от компонентов вне $n = N$. Действие спектрального усечения — естественное, поскольку члены высокой частоты станут млалшими из-за с ограниченной полосы физических схем.

Как общее правило, выбор N зависит от уровня нелинейности. Усилители мощности, например, требуют анализа большего числа гармоник, чем малошумящие усилители или усилители, которые ведут себя почти линейно. Для усилителя мощности может потребоваться $N = 8$, в то время как для анализа малошумящего усилителя достаточно $N = 3$.

Усечение спектра немного более сложное в случае многосигнального возбуждения. Многосигнальное возбуждение предполагает на входе две или больше гармоники, которые не связаны целым числом, как в примере, данном ранее $\omega_1 = 9.999$ GHz и $\omega_2 = 10.001$ GHz. В этом случае, можно показать, что частотные компоненты на выходе схемы соответствуют частотам в наборе

$$n\omega_1 + m\omega_2, \quad n = 0, 1, \ldots \infty, \quad m = 0, 1, \ldots \infty, \tag{7.2}$$

Тогда усеченный гармонический состав имеет вид, показанный на рис. 7.5.

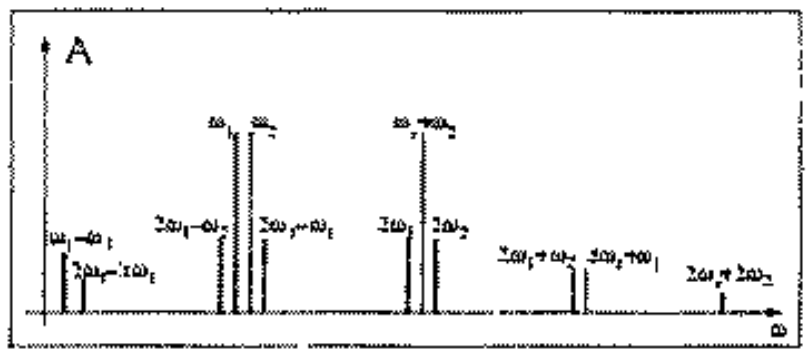


Рис 7.5. Спектр в нелинейной схеме при воздействии двух сигналов с близкими частотами

Вообще, спектральные компоненты, которые сохранены в моделировании, имеют частоты

$$|m\omega_1 + n\omega_2|, \tag{7.3}$$

где $m = -M, \ldots, M$; $n = -N, \ldots, N$.

На рис. 7.5 усечение было выполнено, используя M = N = 2. Члены $n\omega_1$ называются гармониками 1-го тона и, точно так же $n\omega_2$ называются гармониками 2 тона. Множители m и n называются индексами гармоник. Величины |m| и |n| называются порядком продуктов интермодуляции.

Спектр при двухтоновом возбуждении, показанный на рисунке может быть упрощен далее, отказываясь от интермодуляционных помех, которые имеют индексы выше, чем K = |M| + |N|. В высоколинейном усилителе, при двухтоновом возбуждении, например, составляющие с частотами $2\omega_2 - 2\omega_1$ и $2\omega - 2\omega_2$ имеют очень маленький уровень. Такие составляющие, при порядке 4, можно исключить из рассмотрения, устанавливая $K = 3$.

Случай анализа с тремя тонами аналогичен двухтоновому случаю. Моделирование с тремя тонами очень полезны для испытания линейности смесителей, где схема находится под действием гетеродина LO и двух близко расположенные синусоид IF (или RF) на входе. В этом случае, каждая форма волны в схеме имеет эквивалентное представление комплексных амплитуд на частотах в наборе

$$n\omega_1 - m\omega_2 + p\omega_{LO}, \quad n = 0, 1, \ldots \infty, \quad m = 0, 1, \ldots \infty, \quad p = 0, 1, \ldots \infty \tag{7.4}$$

и этот набор усечен, устанавливая индексы в границах

$$\begin{aligned} m &= -M, \ldots, M, \\ n &= -N, \ldots, N, \\ p &= -P, \ldots, P. \end{aligned} \tag{7.5}$$

Как правило, относительно сигнала гетеродина LO схема существенно нелинейная, в то время как входной сигнал вносит относительно небольшие нелинейные искажения. В практических случаях P должен быть установлен большим чем

M и N; обычно P равен по крайней мере 5 (и часто в два или три раза выше) относительно 2 или 3 для M и N.

Независимо от типа моделирования, хорошо проверить, что частоты, используемые в анализе, обеспечивают точные результаты. Это выполняется, постепенно увеличивая число частот, повторяя моделирование, и убеждаясь, что результаты моделирования меняются незначительно.

Большинству пользователей интуитивно ясно, что чистая синусоида на входе требует анализ с одиночным тоном, а если на вход подаются две близко расположенные синусоиды, то требуется двухсигнальный анализ. Сложности возникают в моделировании с источниками типа прямоугольных импульсов, которые состоят из большого количества гармоник, которые расположены не рядом.

Чтобы избежать эту трудность нужно иметь в виду, что моделирование выполняется как n-тоновая, если n — самый маленький номер частот, чьи целочисленные линейные комбинации описывают все другие частоты в источнике. Прямоугольный сигнал или, аналогично, периодический сигнал произвольной формы, имеет частотные компоненты, которые кратны одной частоте, а именно, фундаментальной частоте, поэтому такое моделирование выполняется одиночным тоном.

7.2.3. Вычисление токов в нелинейных устройствах

Как упомянуто ранее, вычисление токов на линейных портах довольно простое, поскольку здесь используется теория линейных многополюсников в частотной области. Однако более сложно, когда в методе гармонического баланса вычисляются нелинейные токи прибора.

Нелинейные приборы почти всегда описываются временными функциями, зависящими от управляемых напряжений. В методе гармонического баланса, однако, напряжения управления представлены в частотной области. Чтобы рассчитать нелинейные функции прибора, программа использует следующую процедуру:

1) она преобразует векторы напряжения во временную область, используя преобразование Фурье;

2) рассчитываются нелинейные устройства во временной области;

3) применяется обратное преобразование Фурье, чтобы получить комплексные огибающие токов в частотной области.

Из-за частичного использования расчета во временной области, метод гармонического баланса иногда называют смешанным (частотно-временным) методом. Это — главным образом вопрос условного обозначения, но частотная область здесь имеет приоритет из-за представления комплексных векторов частотных составляющих.

Преобразования из временной в частотную форму и обратно вносят погрешности расчета. Эти погрешности вызваны прежде всего явлением выравнивания (aliasing), степень которого зависит от уровня нелинейности и числа частотных компонентов, учитываемых в моделировании. В принципе явления выравнивания могут быть уменьшены к незначительным уровням, просто выполняя анализ с очень большим количеством частот. Это, однако, нежелательно, так как ведет к медленному моделированию. Более простой метод для уменьшения эффектов выравнивания основан на том, что в терминах НВ, известно как дополнительная выборка (*oversampling*).

Нижний предел числа выборок во временной области, используемых в оценке нелинейных устройств равно 2N (предел Найквиста) где N — число значимых частот. Чтобы уменьшить выравнивание, пользователь может увеличить число выборок во временной области вне предела Найквиста; результирующее число выборок пропорционально 2N, и равно, скажем 2rN. Поскольку нелинейные токи прибора рассчитываются в 2rN временных выборках, преобразование Фурье выдает rN частотных компонентов. Окончательно, компоненты rH усекаются обратно к исходным N компонентам, которые были выбраны для моделирования.

Дополнительная выборка — эффективное средство уменьшения эффекта выравнивания без существенного увеличения времени моделирования. Вопрос возникает относительно того, когда использовать этот режим и какова оптимвльная дополнительная выборка (**oversampling sampling factor**) должна быть.

В MWO, по умолчанию коэффициент дополнительной выборки равен 2, что достаточно в большинстве моделирований, за исключением, возможно, анализа интермодуляционных искажений (ИМИ) в смесителях. В анализе ИМИ смесителя, нужно иметь возможность фиксировать интермодуляционные искажения, которые могут быть на 100 dB меньше, чем самый большой сигнал в схеме (обычно LO). Так как LO очень большой, то даже незначительное результаты выравнивания могут сильно «маскировать» интермодуляционные продукты или вызывать ошибки в их вычислении. Это можег быть предотврашено надлежашим выбором частот для гармонического баланса, выбирая больший коэффициент дополнительной выборки. Как всегда — хорошая идея проверить результаты, повторяя моделирование с большим набором сушественных частот и большего коэффициента дополнительной выборки.

Задание точности моделирования

Моделирование методом гармонического баланса — итеративный процесс, который заканчивается, когда законы Кирхгоффа для схемы выполнены. Абсолютная мера степени выполнения законов Кирхгоффа оценивается неравенством

$$|I_{linear}(\omega_i) - I_{nonlinear}(\omega_i)| < \varepsilon \qquad (7.6)$$

для каждой заданной частоты и в каждом порте соединения.

Значения по умолчанию, используемые в MWO. достаточны в большой части случаев, но нужно быть осторожным при моделировании цепей, которые работают с очень маленькими, но однако существенными, сигналами.

7.2.4. Сходимость

Программа делает конечное число попыток для удовлетворения законов Кирхгоффа, после чего сообщается о невозможности сходимости или прибегает к переходу в исходное состояние.

Отсутствие сходимости обычно является следствием очень сильной нелинейности анализируемой схемы. В таких случаях, трудность, с которой сталкивается программа — отсутствие «хорошей начальной точки». Обычно, решение DC или решение из линейного приближения дает хорошее предположение, но это не может иметь место для сильно нелинейных устройетв.

Чтобы найти лучшее начальное приближение, программа уменьшает уровень возбуждения (что понижает уровень нелинейности схемы) с целью найти приближенное решение и, после удачи, использует это состояние как начальное приближение для решения.

Адаптивные алгоритмы управления сходимостью в MWO, вместе с пощаговым изменением уровия сигнала источника, приводят к успешной сходимости в большинстве случаев. Иногда, однако, процесс решения не будет в состоянии сходиться.

Приведем некоторые из обычных причин и способы избежать этого.

Слишком мало анализируемых частот. Если анализируемая схема сильно нелинейна, то это важно для точности и сходимости, задать достаточное число анализируемых гармоник в моделировании. Убедиться, что дело обстоит так — первый шаг в решение проблем сходимости.

Нелинейное моделируемое устройство. Резкие переходы в нелинейных уравнениях модели и их производных являются частыми источниками несходимости. При использовании заданных пользователем моделей, необходимо описывать нелинейные функции и их производные гладкими функциями. Существуют универсальные методы для аппроксимации таких гладких функций, но проблемы могут все еще остаться, если их параметры введены или извлечены неверно.

Недостаточно итераций. Пользователь обычно устанавливает число итераций, принятых иммитатором для нахождения решения. Иногда, увеличение этого числа — простой способ достижения сходимости.

7.2.5. Параметры гармонического баланса

Имеются два типа опций в методе гармонического баланса *global* и *local*; два типа параметров отличаются по названию, но во многом идентичны.

Глобальные параметры, по умолчанию, применимы ко всем схемам в проекте. Иногда, отдельные схемы будут содержать цепи, для которых устанаваливается другой набор параметров, отличных от глобальных. что приведет к более быстрым и точным результатам; в этом случае локальные параметры могут использоваться. чтобы отменить значения по умолчанию.

Выберите **Options > Default Circuit Options,** чтобы вывести диалоговое окно **Circuit Options** для установки глобальных значений по умолчанию. Вы можете устанавливать опции для схемы, щелкая правой кнопкой мыши на пункте **Schematic** в дереве проектов и выбирая **Options** (рис. 7.6).

Number of harmonics (Число гармоник)

Number of Tone 1 Harmonics, Number of Tone 2 Harmonics и **Number of Tone 3 Harmonics** задают величины M, N и P. как задано в уравнениях (7.4). Точно так же **Max order** аналогичен величине K в разделе **Limit harmonic order**, и выполняет спектральное усечение гармонических составляющих, начиная с более высоких, чем **Max order**.

Frequency conversion setting (установки преобразования частоты)

Samples rel. to Nyquist — коэффициент дополнительной выборки r, рассмотренный ранее. Значение r = 2 рекомендуется в большинстве случаев; возможное исключение — анализ продуктов интермодуляции смесителей.

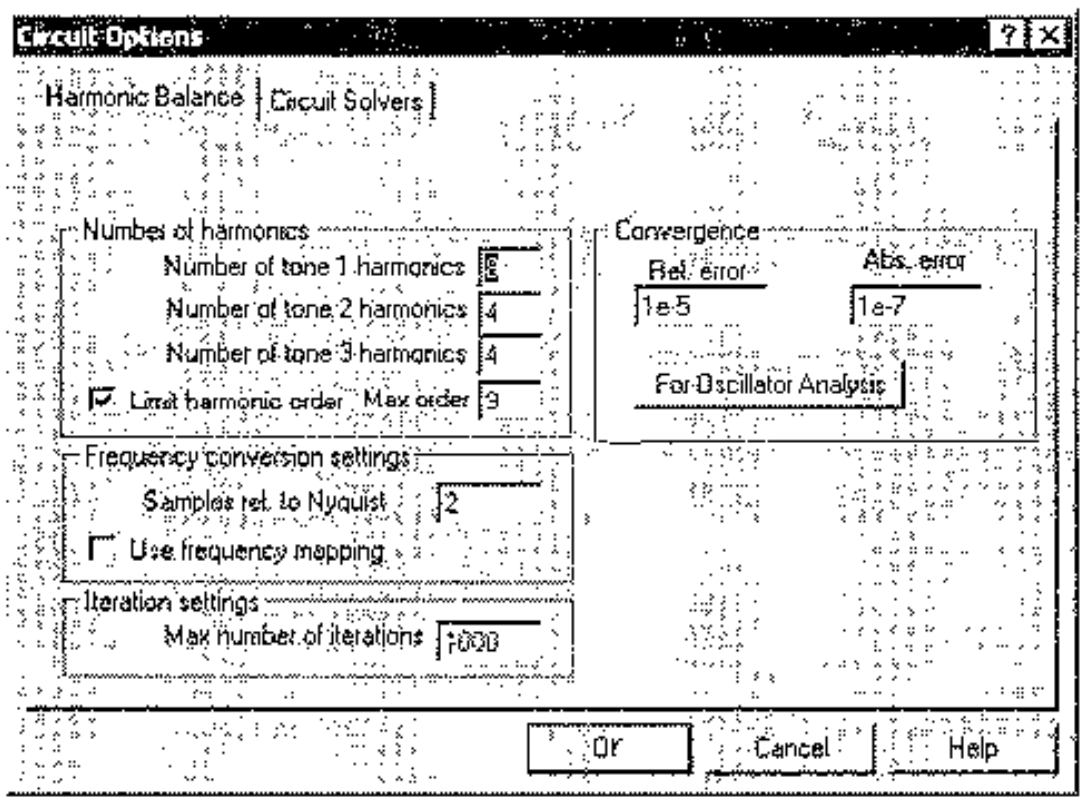


Рис. 7.6. Установки режима гармонического баланса

Iteration settings (установки итераций расчета)

Max number of iteration устанавливает предел числу шагов при обнаружении решения. Если это число превышено, сообщается об отсутствии сходимости и программа возвращается в исходную точку. Режим ступенчатого изменения уровня источника может быть заблокирован в окне Circuit Options в закладке **Circuit Solvers**.

Convergence (сходимость)

Rel. Error — относительная сходимость.

Abs. Error — величина, которая в конечном счете устанавливает точность моделирования. Значение по умолчанию достаточно в большинстве случаев.

7.2.6. Установки гармонического баланса

Схемы, которые включают нелинейные элементы, требуют нелинейного моделирования, или методом расчета по постоянному току DC, или методом гармонического баланса. MWO вызывает соответствующий иммитатор автоматически, когда заданы требуемые рассчитываемые характеристики.

Если требуется рассчитать линейную характеристику в нелинейном устройстве, иммитатор вычисляет линейную характеристику, вычисляя точку смещения, и затем линеаризируя схему. При выполнении линейного анализа нелинейной схемы, все источники, кроме источников DC, устанавливаются равными нулю.

Задание нелинейных частот

MWO позволяет задавать частоты, как определено в закладке **Frequency Values** диалогового окна Project Options. Для расчета характеристик в диапазоне частот необходимо задать основную частоту, используемую в моделировании методом гармонического баланса. Кроме того, можно задать частоты **Nonlinear Frequency** для моделирования методом гармонического баланса, которые относятся к отдельным схемам.

Анализ с одиночным тоном

Моделирование с одиночным тоном выполняется на наборе частот, определенных

$$n\omega_0, \qquad n = 0, 1, 2, ..., N. \tag{7.7}$$

Фундаментальная частота ω_0 определена в списке Nonlinear Frequencies или Project Frequency.

Ряд возбуждений может быть задан для анализа с одной гармоникой, включая синусоидальный, прямоугольный сигнал и сигнал, заданный в файле.

Двухтоновый анализ

Двухтоновые моделирования выполняются на наборе частот, определенных

$$|m\omega_1 + n\omega_2| . \tag{7.8}$$

Фундаментальная гармоника **tone-1** ω_1 управляется (обычно) **Nonlinear Frequencies** или **Project Frequency**. Имеются несколько способов определить фундаментальную гармонику **tone-2**. Некоторые источники сигнала позволяют непосредственное задание ω_2, другие позволяют задать ω_2 как смещение от **tone-1**. Фундаментальная частота второго тона может, кроме того, быть определена как функция основной частоты первого тона. Чтобы задать **tone-2** как функцию **tone-1**, можно использовать зарезервированную переменную **_FREQH1**. Например, если $\Delta\omega = 0.1$ GHz, можно определять ω_2, вводя **_FREQH1 + 0.1** для частоты генератора **tone-2**.

Анализ с тремя тонами

Моделирование с тремя тонами использует набор

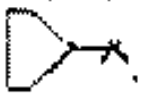
$$|m\omega_1 + n\omega_2 + \omega_3| . \tag{7.9}$$

Фундаментальные частоты могут быть определены непосредственно в источнике (элемент PORTFN) или комбинацией одиночных и двухсигнальных элементов. Например, **tone-1** и **tone-2**, могут быть определены элементом PORT2, в то время как PORTFN может использоваться чтобы определить третий сигнал.

Источники

В MWO имеются два типа источников: портовые и дискретные. Дискретные, которые имеются в папке **Sources** в закладке **Elem** — идевльные источники напряжения или тока. Портовые источники, которые имеются в папке **Ports** в закладке **Elem**, определены их номинальной мошностью и полным сопротивлением.

Портовые источники, во первых, имеют удобное определение мошности источников; во вторых, они определяют входы и выходы схемы, позволяя использовать ее как подсхему в пределах другой схемы.

Имеются несколько типов портов, которые используются, чтобы определить возбуждения. Порт добавляется в схему, перемещая его из закладки Elem. Параметры портов задаются, дважды нажимая элемент порта и изменяя **Port Type** в окне **Element Options** закладки **Port** (пассивный порт) на инструментальной панели: .

7.3. Примеры расчета методом гармонического баланса

Анализ усилителя с одиночным тоном

Рассмотрим схему усилителя при возбуждении с одиночным тоном. Пример рис. 7.7 соответствует **amp_1tone.emp**, который имеется в каталоге ...\Examples\Amplifiers.

Чтобы выполнить анализ, вы должны задать частоту возбуждения 3 GHz. Для этого дважды щелкните **Project Options**, в закладке **Frequency** удалите частоты по умолчанию и введите частоту 3 GHz (рис. 7.8).

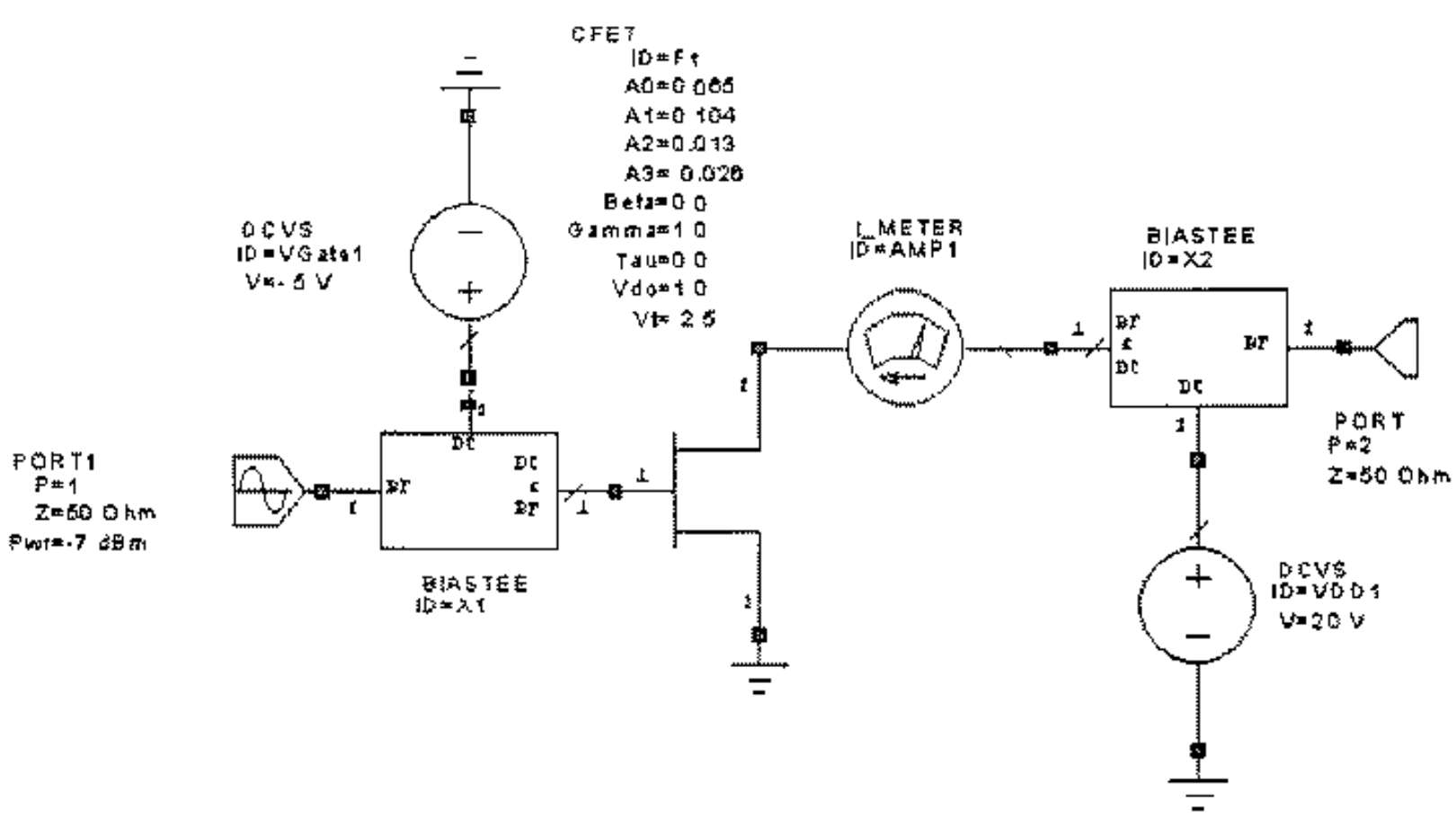


Рис. 7.7. Усилитель мощности при воздействии одного гармонического сигнала

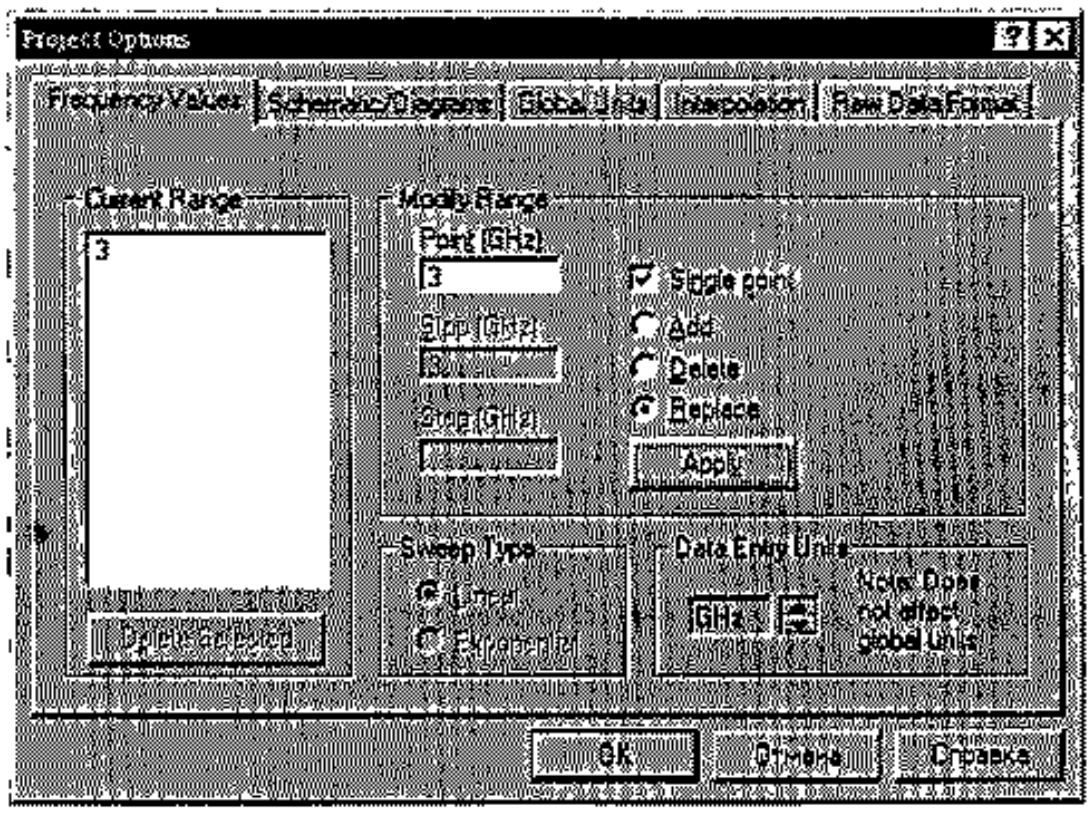


Рис. 7.8. Диалоговое окно установки частот нелинейного анализа

Заметим, что выбор частот можно сделать, щелкая правой кнопкой мыши на Schematic в дереве проекта, выбирая **Parameters** и затем снимая флажок **Use Project Frequency** в диалоговом окне Options.

Затем, необходимо прибавить нагрузку и источник. Наиболее удобно сделать это при помощи портов. Если необходимо выполнить моделирование в диапазоне мощностей, нажмите закладку Elem. В категории **Ports** под **Harmonic Balance**, выберите **PORT_PS1**. Этот элемент соответствует порту с однотоновым сигналом при изменяемой мощности (на что указывает приставка PS). Выберите символ, перетащите и подключите его к схеме. Параметры порта могут быть отредактированы непосредственно на схеме, дважды нажимая конкретные параметры, или дважды нажимая символ порта и редактируя значения в диалоговом окне Element Options. Введите PStart = −20 dBm, PStop =10 dBm и PStep =1 dBm.

Чтобы добавить нагрузки, нажмите кнопку **Add Port** на инструментальной панели, затем перетащите порт мышью на схему. В случае необходимости, шелкните правой кнопкой мыши, чтобы вращать символ порта на удобный угол, затем нажмите, чтобы установить символ и подключить его к схеме.

Проверьте, что параметры моделирования установлены верно, дважды нажимая Circuit Schematics в дереве проекта. Выберите 7 для **Number of tone 1 harmonics**, и оставьте другие параметры по умолчанию.

Щелкните правой кнопкой мыши желательный график под **Graphs** в дереве проекта, и выберите **Add Measurement**. В диалоговом окне **Add Measurement**, выберите **Nonlinear Power** для **Meas. Type** и LSSnmSP. Эта характеристика — составит график больше — сигнальных S параметров, от порта *m* до порта *n*, в диапазоне входных мощностей. S-параметры могут быть рассчитаны на любой из гармоник, заданных в программе (т. е. на любой из 7 гармоник от фундаментальной, основной частоты).

Выберите имя вашей схемы в разделе **Data Source Name**, выберите **PORT_2** для Port (To), **PORT_1** для Port (From) и 1 для обоих гармонических индексов Harmonic Index. Отметьте опцию DB, чтобы отобразить результаты в децибелах (рис. 7.9).

Чтобы рассчитать спектр напряжения на выходе, добавьте другой график и выведите диалоговое окно Measurement снова. На сей раз выберите **Nonlinear Vol-**

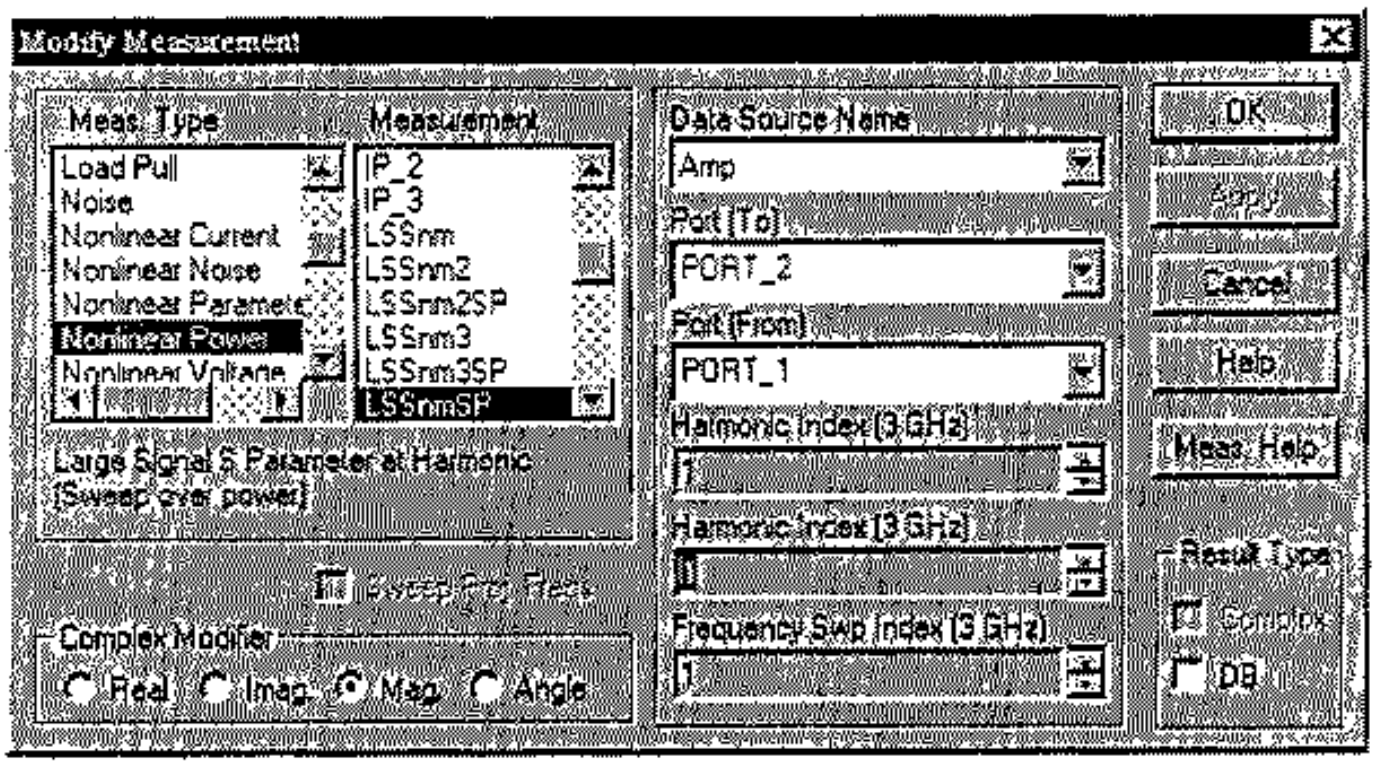


Рис. 7.9. Окно расчета и вывода нелинейных характеристик

tage как **Meas. Type**, **Vharm** как **Measurement**, **PORT_2** как **Measurement Component**, Frequency **Swp Index = 3GHz**, **Power Swp Index = 31** и нажмите **OK**.

Выполните моделирование, щелкая кнопку **Analyze** на инструментальной панели, нажимая F8, или выбирая **Simulate > Analyze**. Спектр напряжения и графики амплитудных искажений должны выглядеть как на рис. 7.10 и рис. 7.11:

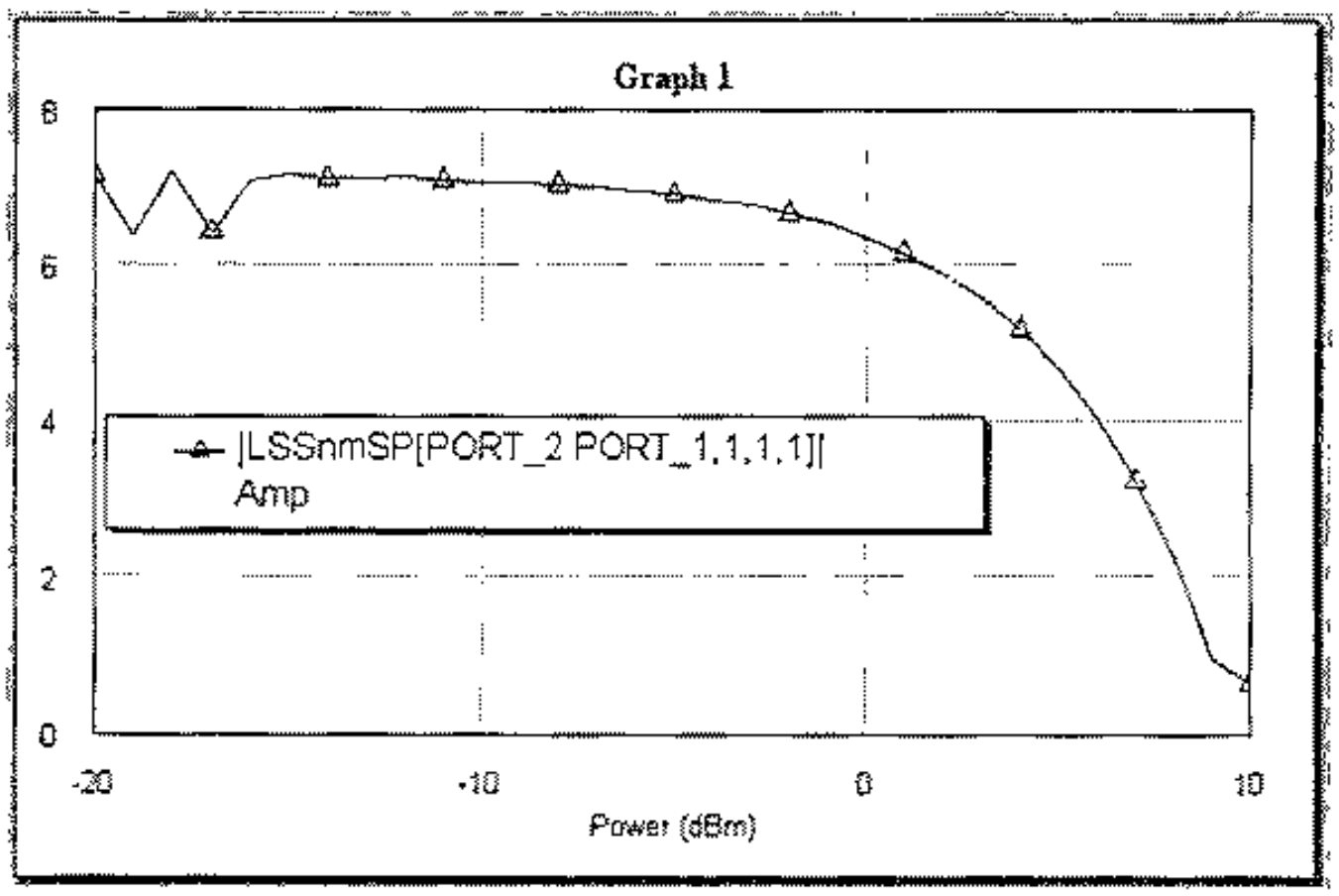


Рис. 7.10. Вывод модуля нелинейного параметра S21

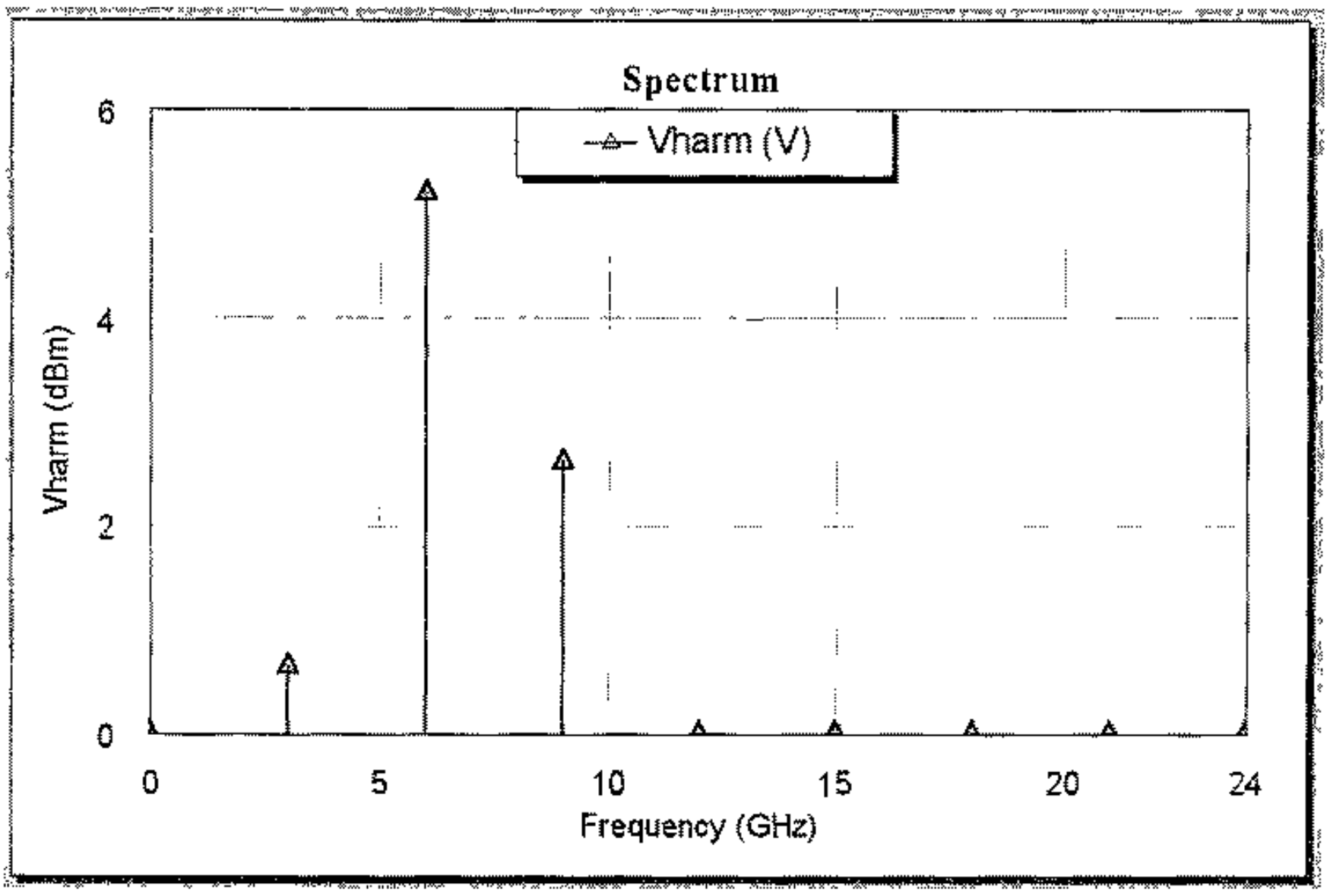


Рис. 7.11. Вывод спектра на выходе нелинейной схемы

Двухтоновый анализ усилителя

Теперь выполните анализ того же самого усилителя при двухсигнальном возбуждении.

Можно создать другой проект или, более удобно, создать другую схему в существующем проекте, а далее копируя и вставляя схему в новое схематическое окно.

В закладке **Nonlinear Frequency** зададим частоты сигналов 2.99 GHz и 3.01 GHz (2.99 GHz основная частота **tone-1** для этой схемы).

Самый простой способ — включить двухтоновый источник с помощью портов. Двухтоновый источник находится в разделе **Ports** в закладке **Elem**. Вы можете также редактировать существующий порт, дважды нажимая элемент PORT_PS1, и в закладке **Port** диалогового окна Element Options, выбирая новый портовый тип. Выберите **Tone 1 & 2** как **Tone Type**, и нажмите **OK**. Кликните OK еще один раз для изменения элемента порта в схеме на PORT_PS2, двухтоновый источник с изменяемой мощностью. Схема должна иметь следующий вид (рис. 7.12).

Отредактируйте параметры порта так, чтобы PStart = −20 dBm, PStop = = 10 dBm, PStep = 1 dB и Fdelt = 0.02 GHz.

Щелкните правой кнопкой мыши **Circuit Schematics** и выберите Options, в закладке **Harmonic Balance** диалогового окна Circuit Options введите «5» для **Number Of Tone 1 Harmonics** и «5» **Number Of Tone 2 Harmonics**. Снимите флажок **Use Project Defaults**.

Предположим, что представляет интерес мощность на частоте f_1 (2.99 GHz) и $2f_1 - f_2$ (2.97 GHz). Прибавьте другой прямоугольный график к проекту, и выведите на него **Nonlinear Power** характеристику **Pcomp2SP**.

Pcomp2SP вычисляет мощность частотной компоненты в двухсигнальном моделировании и составляет график этого относительно изменяемой входной мощности. Выберите **PORT_2** как **Measurement Component**, и выберите **Harmonic Index =1** для первого гармоники, и **0** для второй.

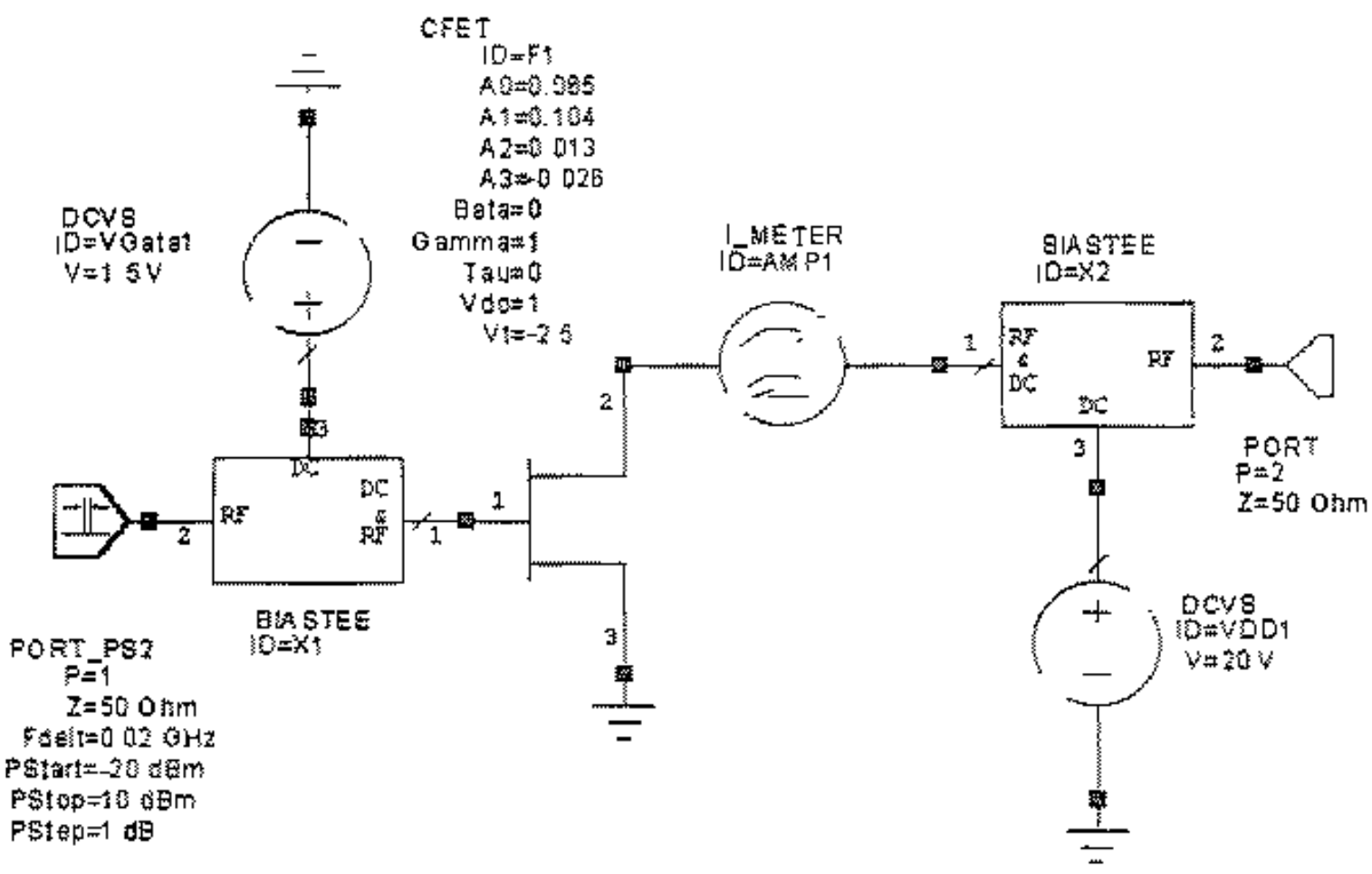


Рис. 7.12. Схема усилителя с двухтоновым возбуждением

Прибавьте другую характеристику, чтобы вывести график зависимости мощности продуктов взаимной модуляции аналогично (рис. 7.13), на сей раз устанавливая **Harmonic Index = (2, −1).**

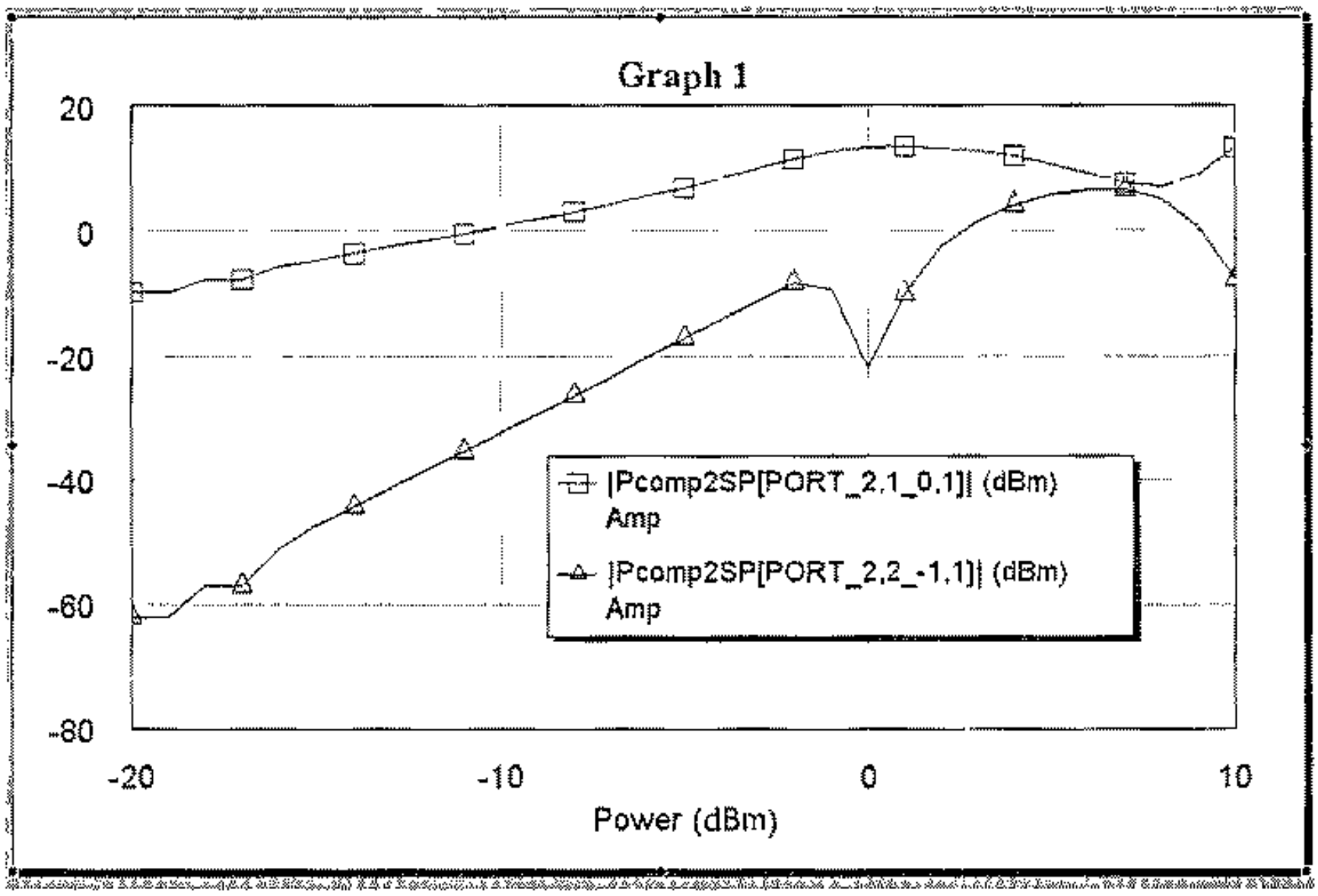


Рис. 7.13. Зависимость мощности основной гармоники и продукта интермодуляционных искажений третьего порядка

Анализ смесителя с тремя частотами

Этот пример выполняет анализ смесителя с тремя частотами на входе. Пример **FET_Mixer.emp** находится в подкаталоге \Examples\Mixers каталога программы MWO.

Сохраните пример под другим именем, скажем FET_MIXER_3T.EMP. Откройте другую схему, назовите ее «Three Tone» и скопируйте принципиальную электрическую схему «Mixer FET».

Набор нелинейных частот для новой схемы к 1890 МГц

Отредактируйте источник (LO), устанавливая в компоненте Port 1 Tone 3 для типа тона.

Установите частоту порта равной 1400 МГц. Отредактируйте Port 2 (входной), устанавливая тип тона на тоне **1&2**, Pwr1 = Pwr2 = −10 dBm и Fdelt = 20 МГц.

Схема анализа смесителя на полевом транзисторе, на которую подаются сигналы с тремя разными частотами, выглядит как на рис. 7.14.

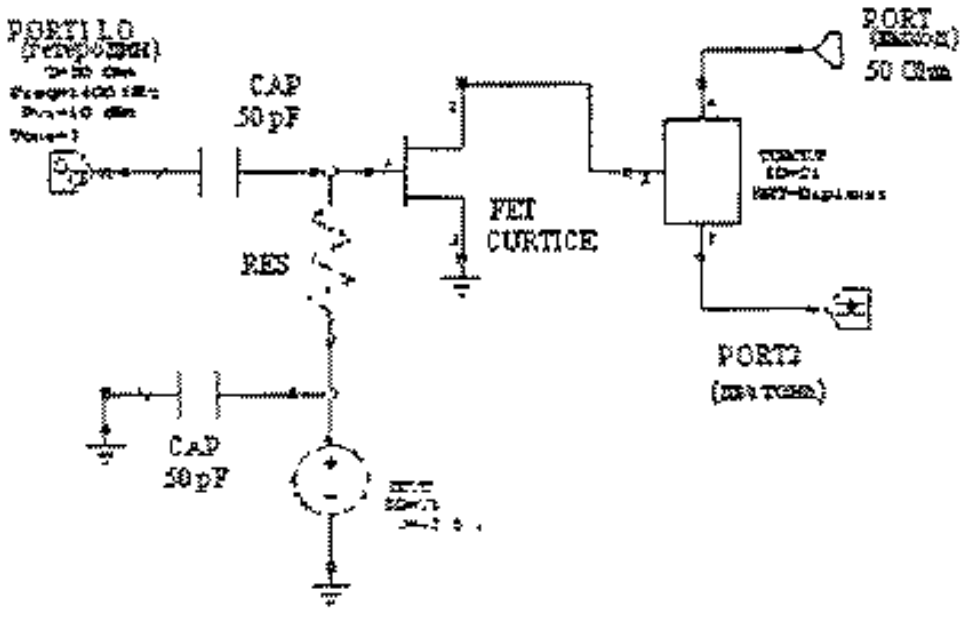


Рис. 7.14. Схема смесителя на полевом транзисторе

Выберите параметры для этой схемы: число гармоник для первого тона = 3, число гармоник для второго тона = 3, число гармоник для третьего тона = 11 и Max Order = 11.

Задайте график вывода и прибавьте на него характеристику Pharm из категории Nonlinear Power, чтобы вывести спектр в порту 1F (Порт 3). Спектр должен иметь вид, показанный на рис. 7.15.

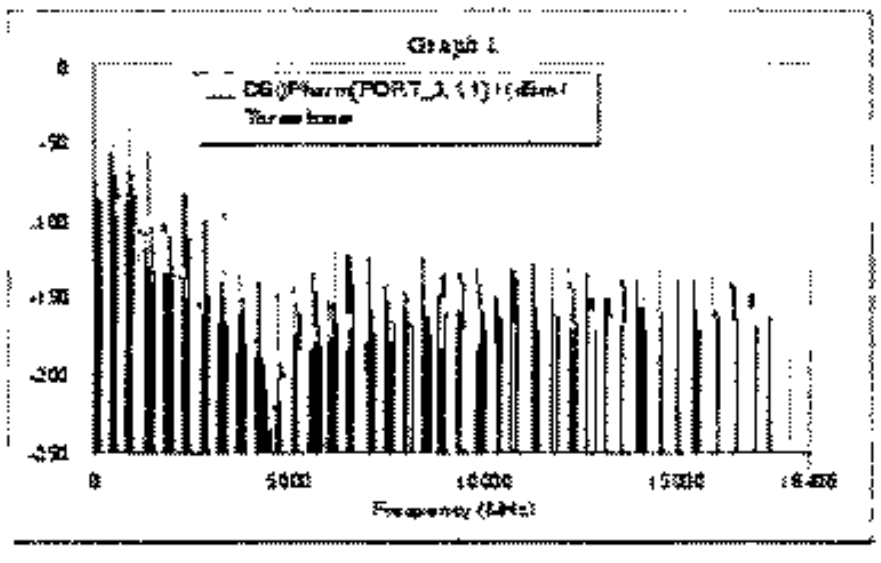


Рис. 7.15. Спектр на выходе смесителя на полевом транзисторе

7.4. Моделирование нелинейных приборов

Программа, выполняющая нелинейный анализ — только половина задачи. При анализе схемы без точных моделей твердотельных приборов результаты не будут точными. Программа SPICE была популярна достаточно долго, поэтому для нее написаны большие библиотеки коммерческих приборов. Это заставляет пользователя думать, что задача моделирования уже решена. К сожалению, многие из этих моделей не очень точны, имеется большой разброс параметров конкретных элементов и много моделей учитывают не все нелинейные эффекты. Например, имеется немного транзисторных моделей, пригодных для вычисления тонких нелинейных эффектов, и моделирование биполярных транзисторов для анализа искажений, используя модели SPICE имеет серьезные недочеты.

Большое количество работ в настоящее время посвящено моделированию особенно МОП-приборов для анализа методом гармонического баланса.

Большинство работ посвящено нелинейным схемам с одним сигналом на входе применительно к усилителям мощности, умножителям частоты и подобным устройствам. Однако реально не все модели МОП-приборов пригодны для анализа 1М методом гармонического баланса. Модели биполярных приборов лучше работают для 1М-анализа, но все еще не очень точны. Модели диодов работают лучше, но диоды используются прежде всего в смесителях.

Задача, стоящая перед проектировщиком, который должен рассчитать и оптимизировать нелинейные характеристики проектируемого устройства стоит так: если данный прибор, например транзистор, имеет нелинейную модель, поставляемую разработчиком прибора, то насколько она точная? А если модели нет, то как подобрать параметры модели, и создать самостоятельно адекватную нелинейную модель?

Общий ответ на этот вопрос формулируется так: необходимо выполнить синтез модели, причем эту модель нужно синтезировать 1) по DC характеристикам с целью максимального совпадения моделируемых и измеренных характеристик, 2) по линейным частотным характеристикам, и 3) по нелинейным характеристикам.

Основным шагом в синтезе модели является анализ и расчет нелинейных характеристик на каждом шаге расчета. На примере анализа усилителя мощности покажем шаги, которые можно использовать для синтеза нелинейной модели СВЧ транзистора.

Этот пример покажет, как MWO используется для моделирования усилителя мощности, используя метод гармонического баланса. Он включает следующие шаги:

- использование нелинейной модели из библиотеки элементов;
- расчет вольт-амперных характеристик DC;
- добавление элементов смещения для расчета напряжений и токов;
- добавления портов гармонического баланса к схеме;
- создание иерархической схемы, используя подсхемы;
- расчет спектрального состава на выходе;
- расчет динамической нагрузочной линии.

Создайте новый проект с именем «**nonlinear_example**», установите единицы и другие глобальные опции. Для создания схемы:

1. Выберите **Project > Add Schematic > New Schematic**. Появится диалог Create New Schematic.
2. Напечатайте «**IV Curve**» и кликните **OK**. Появится схематическое окно.

Для размещения модели нелинейного элемента из библиотеки:

1. Откройте закладку **Elem**, найдите и дважды кликните на **Library**.
2. Дважды кликните на **Nonlinear** в разделе Library и откройте его.
3. Кликните на **GBJT** в разделе **GettingStarted**. Модель показывается в нижней панели.
4. Кликните модель **BLT11_chip**, и удерживая мышью, перетащите ее в окно схемы, а затем отпустите (рис. 7.16).

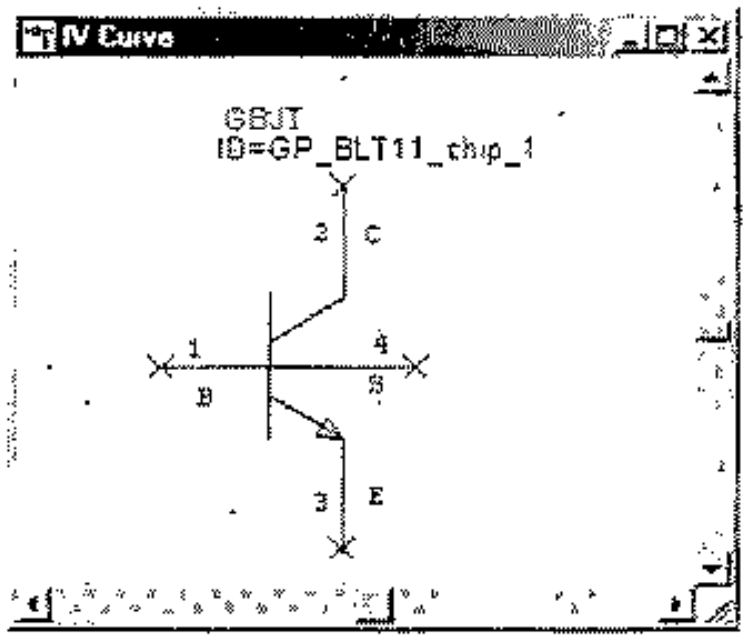


Рис. 7.16 Модель нелинейного биполярного транзистора из библиотеки

Для расчета семейства вольт-амперных характеристик нелинейного элемента:

1. Найдите в списке элементов и дважды нажмите на Mease Devices для расширения списка. Кликните IV чтобы увидеть модели измерителей в нижней панели.
2. Кликните на модель IVCURVE1 и, удерживая кнопку мыши, перетащите ее в схему. Соедините выводы прибора измерения вольт-амперных характеристик и модель транзистора, как показано на рис. 7.17.

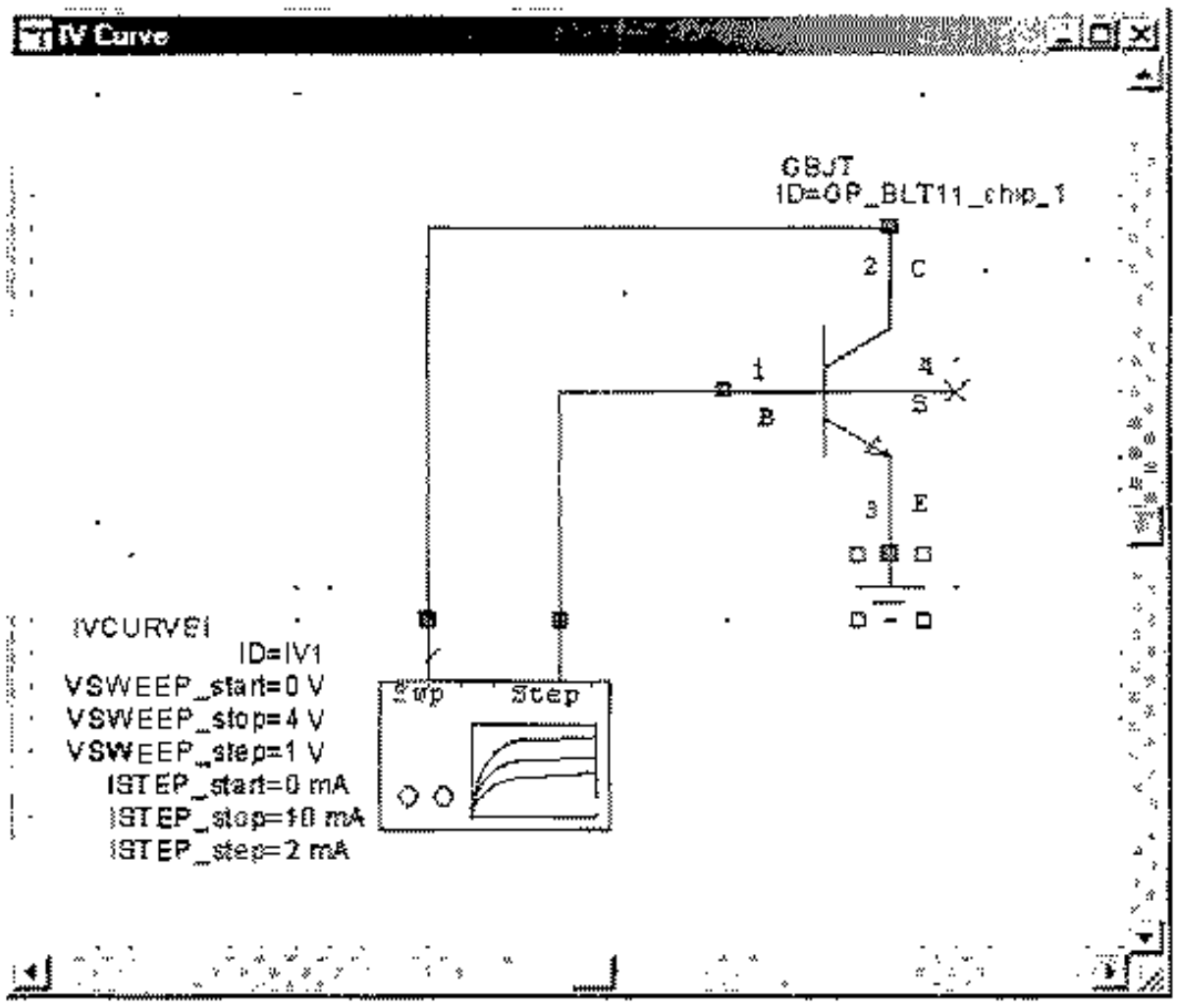


Рис. 7.17. Включение модели транзистора в схему для расчета вольт-амперной характеристики

3. Установите элемент **Ground** из инструментальной линейки MWO и присоедините его к эмиттеру модели транзистора.

Для спецификации установок измерителя IV дважды кликните на него. Появится диалог установок его параметров. Установите пределы изменения напряжений и токов на выводах транзистора в соответствие рис. 7.18.

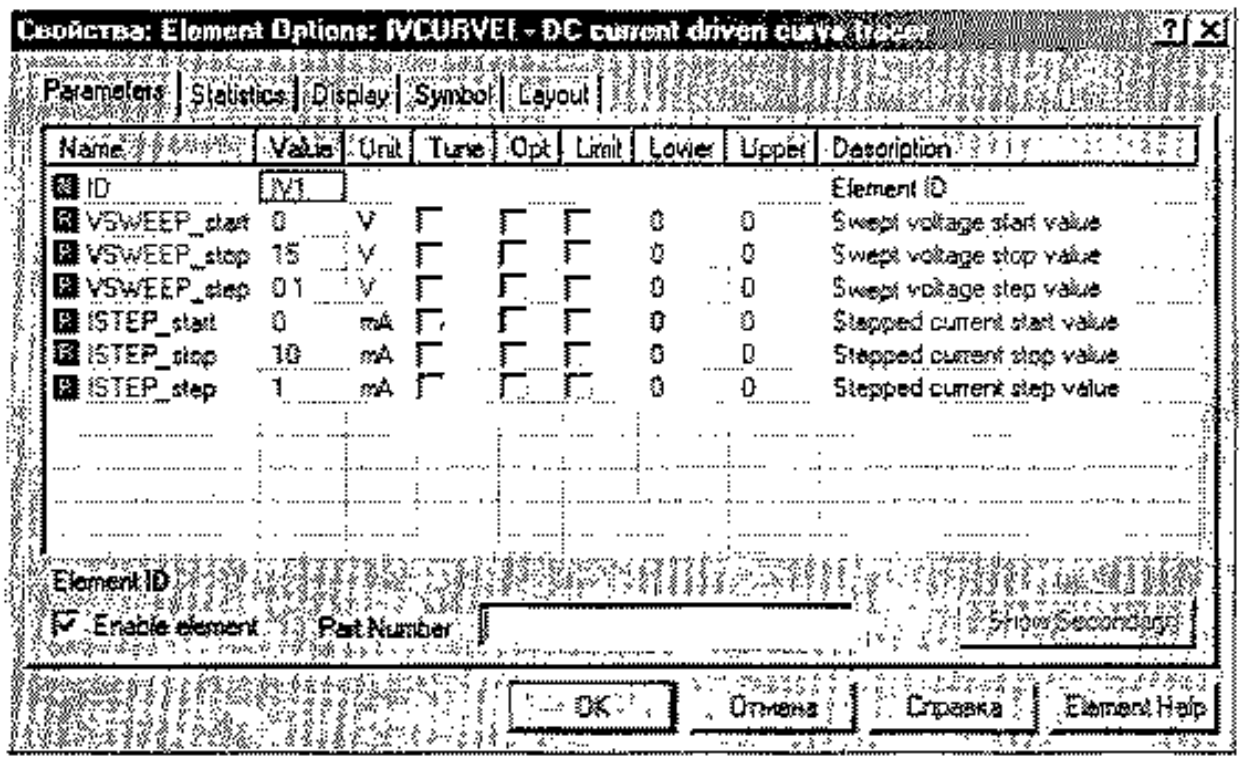


Рис. 7.18. Окно установки параметров элемента расчета вольт-амперных характеристик

Расчет вольт-амперных характеристик

Для этого надо добавить график и вывести на график характеристику IV:

1. Откройте закладку **Proj**, кликните правой кнопкой мыши на Graph и выберите Add Graph. Появляется диалог Create Graph.
2. Напечатайте «IV BJT» в **Graph Name**, выберите **Rectangle** как тип графика и кликните **OK**. Появится график.
3. Нажмите правой кнопкой мыши на **IV BJT** и выберите команду **Add Measurement**. Появится диалог характеристик.
4. Выберите **Nonlinear Current** в разделе Meas.Type и IV Curve в Measurement. Выберите IV Curve как имя данных **Data Source Name** и кликните **OK**.
5. Выберите **Simulate > Analyze**. Рассчитанные характеристики будут выведены на график в виде семейства вольт-амперных характеристик (рис. 7.19).

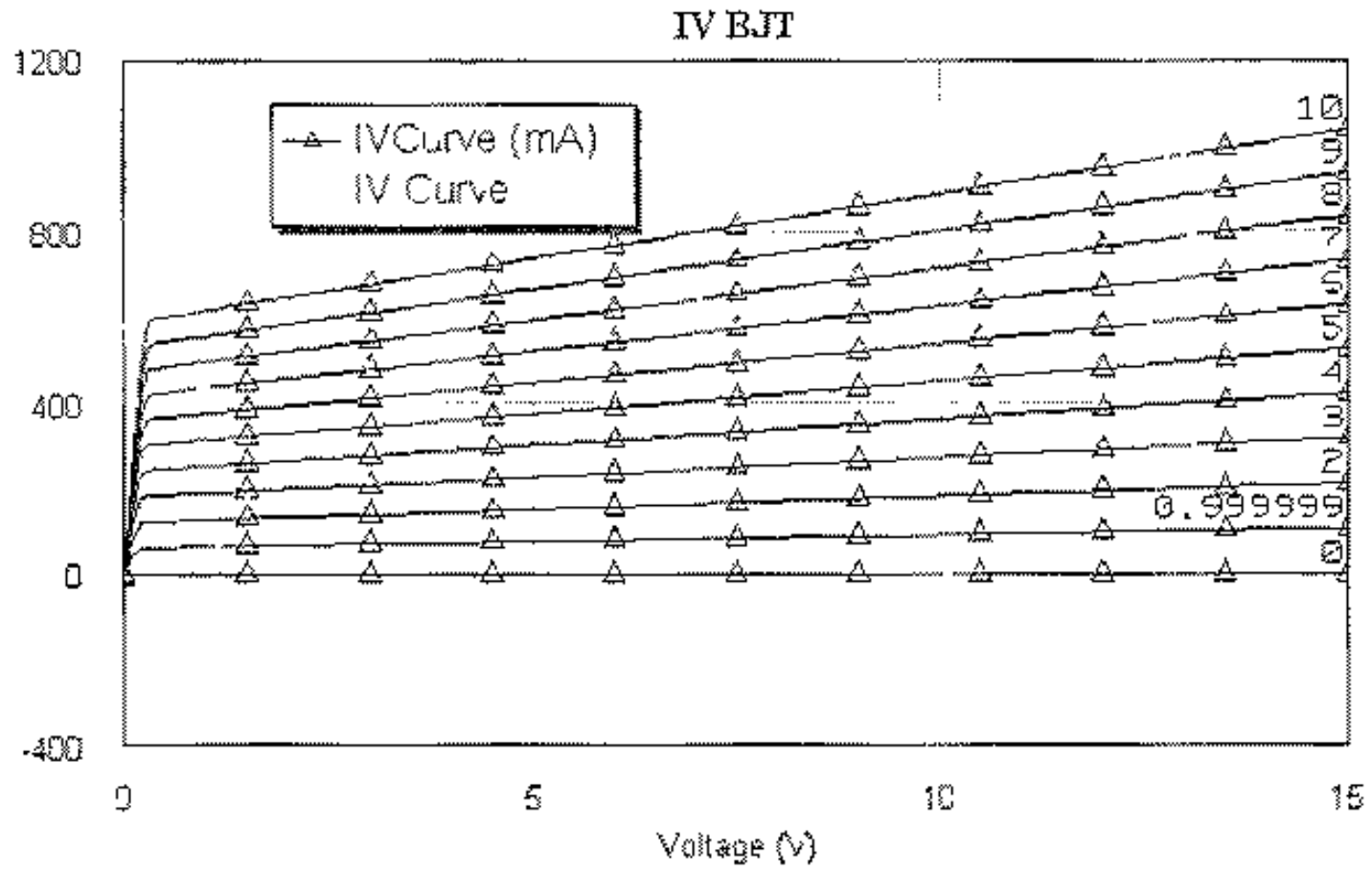


Рис. 7.19. Семейство выходных вольт-амперных характеристик биполярного транзистора

Создание схемы смещения

1. Выберите **Project > Add Schematic > New Schematic**. Появляется диалог Create New Schematic. Напечатайте «**DC Bias**» и кликните **OK**. Появится схематическое окно.
2. Откройте закладку **Elem**.
3. Найдите папку **Library** и разверните эту библиотеку. Дважды нажмите на **Nonlinear** чтобы развернуть его, затем кликните **GettingStarted** и затем GBJT. Модель появится в нижней панели. Кликните на модель BL11_chip и перенесите эту модель на схему.
4. Дважды нажмите на Lumped Element, расширив библиотеку дискретных элементов и перетащите в схему **Inductor**. Поместите также на схеме сопротивление RES, находящийся в папке Resistor. Установите также источники постоянного напряжения **DCVS** из папки **Source** раздела **DC**, а также амперметр **I_Meter** и вольтметр **V_Meter** из папки **MeasDevice**. Установите параметры элементов схемы в соответствии с рис. 7.20.

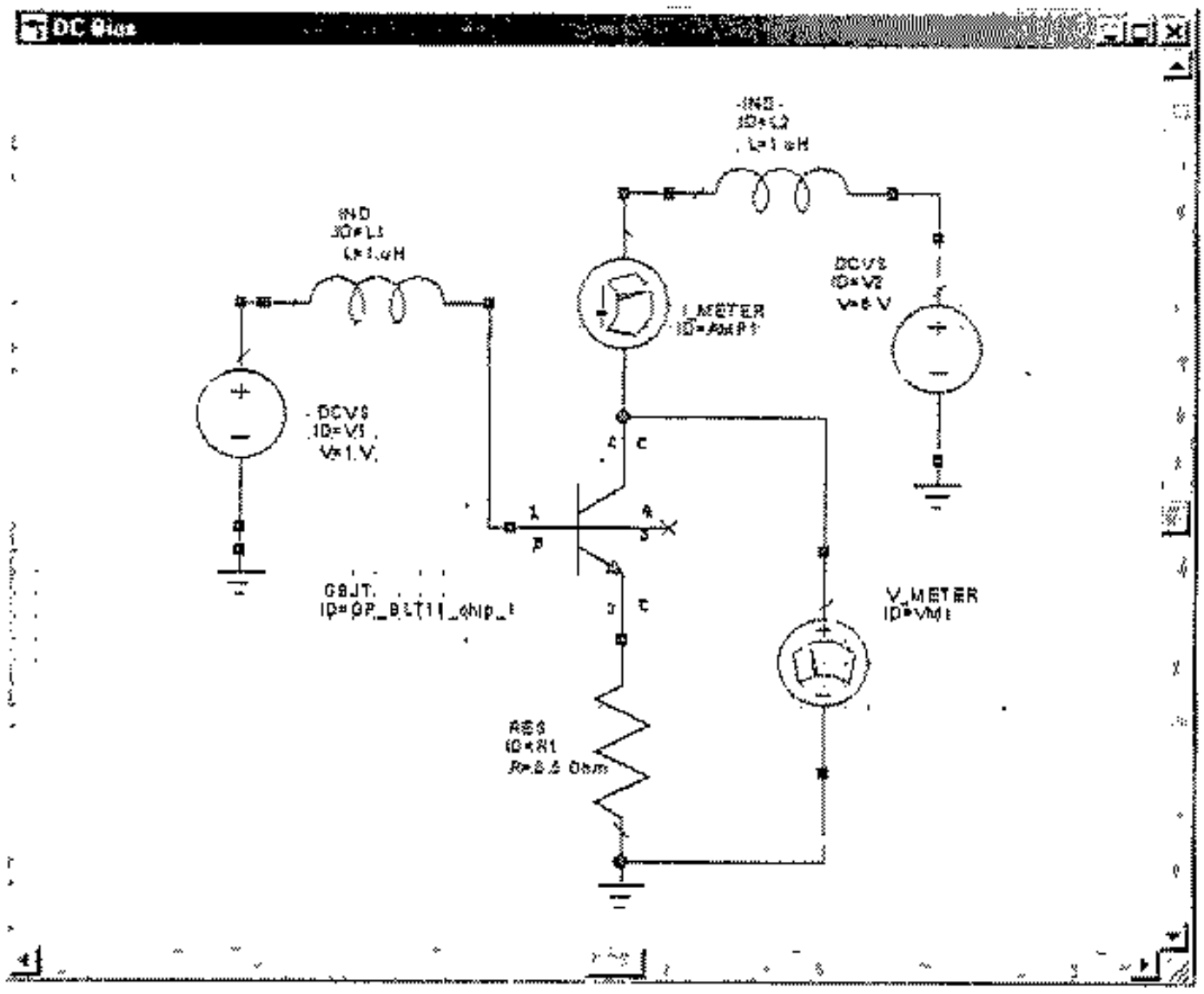


Рис. 7.20. Схема расчета DC вольт-амперных характеристик

Добавление рассчитываемых характеристик

1. Нажмите правой кнопкой мыши на **Graph** в закладке Proj и добавьте график Add Graph. Появляется диалог **Create Graph**. Напечатайте в нем имя «DC Bias» как Graph Name, выберите Tabular как тип графика (это будет вывод в таблицу) и кликните **OK**.
2. Теперь нажмите правой кнопкой на DC Bias и выберите Add Measurement. Появляется диалог выбора характеристик для вывода в таблицу. Выберите в нем Nonlinear Current в блоке **Meas.Type** и выберите Icomp в разделе Measurement. В списке Data Source Name (имя источника данных) выберите DC_Bias, а компоненту измерения I_METER.AMP1. Установите гармонический индекс (рис. 7.21) Harmonic Index=0 (постоянный ток) и Power Swp

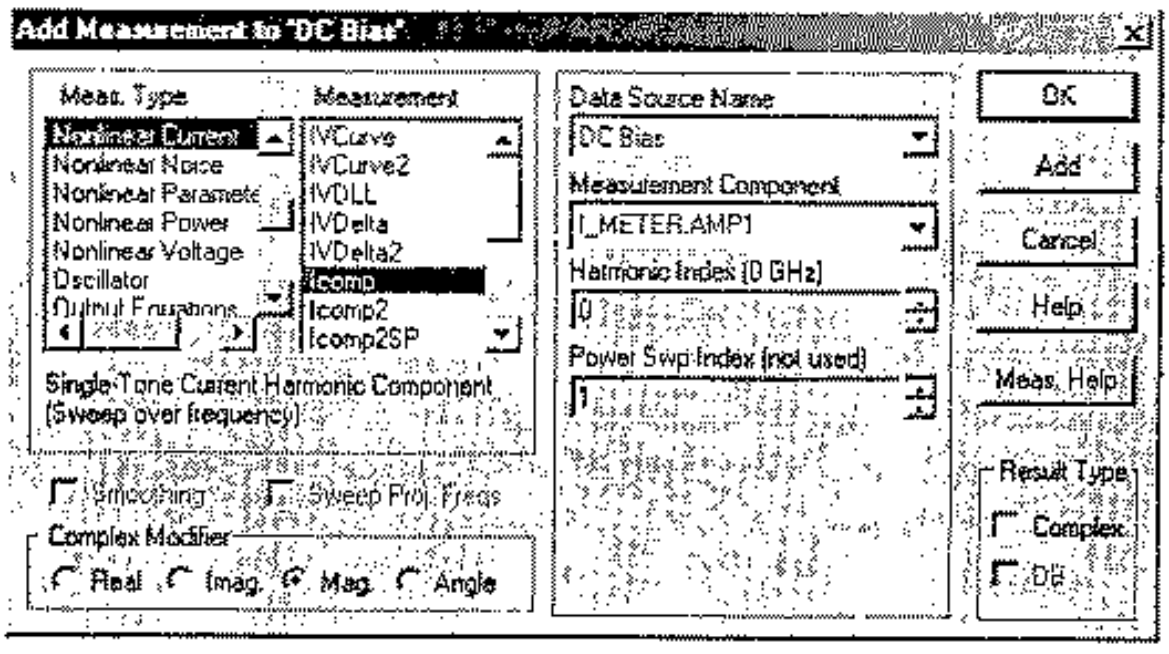


Рис 7.21. Диалог расчета и вывода нелинейных характеристик

Index = 1 и нажмите кнопку **Add**, что будет означать, что на этот же график мы выведем еще одну характеристику.

3. Выберите Nonlinear Voltage в Meas. Type, выберите Vcomp как характеристику, DC Bias как источник данных и V_METER.VM1 как компоненту измерения. Результаты расчета смещения показан в таблице рис. 7.22.

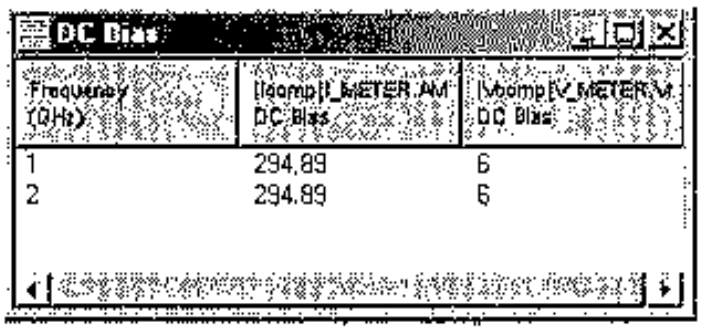


Рис. 7.22. Вывод смещения в таблицу

Добавление портов гармонического баланса

1. Выберите из папки **Lumped Element** элемент **Capacitor** и установите 3 конденсатора в поле схемы, как показано на рис. 7. 23. Используйте проводники и операцию вращения, чтобы соединить элементы нужным образом. Установите значения параметров элемснтов.
2. Дважды нажмите на Ports, откройте его и выберите **Harmonic Balance** (порты, работающие в режиме гармонического баланса) выберите PORT1 и установите его на входе схемы, а на выходе схемы установите порт, находящийся на инструментальной панели.
3. Дважды нажмите на входной порт и установите уровень сигнала «23» как Value (PWR) и кликните **OK**. Схема должна соответствовать рис. 7.23.

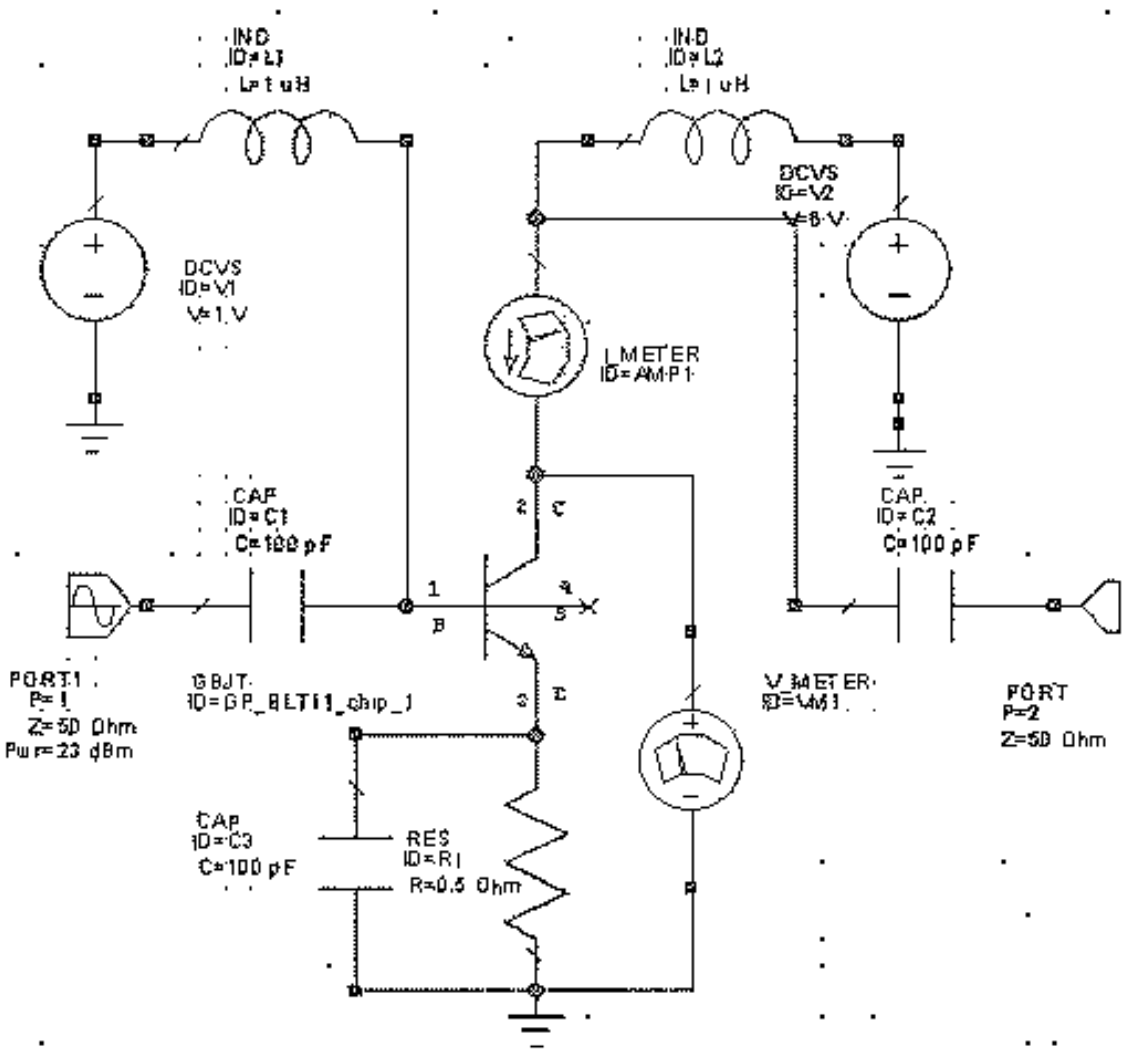


Рис. 7.23. Окончательная схема усилителя на биполярном транзисторе

Задание частот нелинейного моделирования

Частоты нелинейного анализа могут быть заданы независимо от частот проекта.

Для задания нелинейных частот:

1. Откройте закладку **Proj**, кликните символ «+» слева папки **Circuit Schematic**, затем кликните на имени схемы правой кнопкой мыши и выберите **Options.**

Откройте закладку Nonlinear Frequency (рис. 7.24), снимите режим Use Project Frequency (использование частот проекта) и внесите частоты от 1,5 ГГц до 2,5 ГГц через 0,2 ГГц.

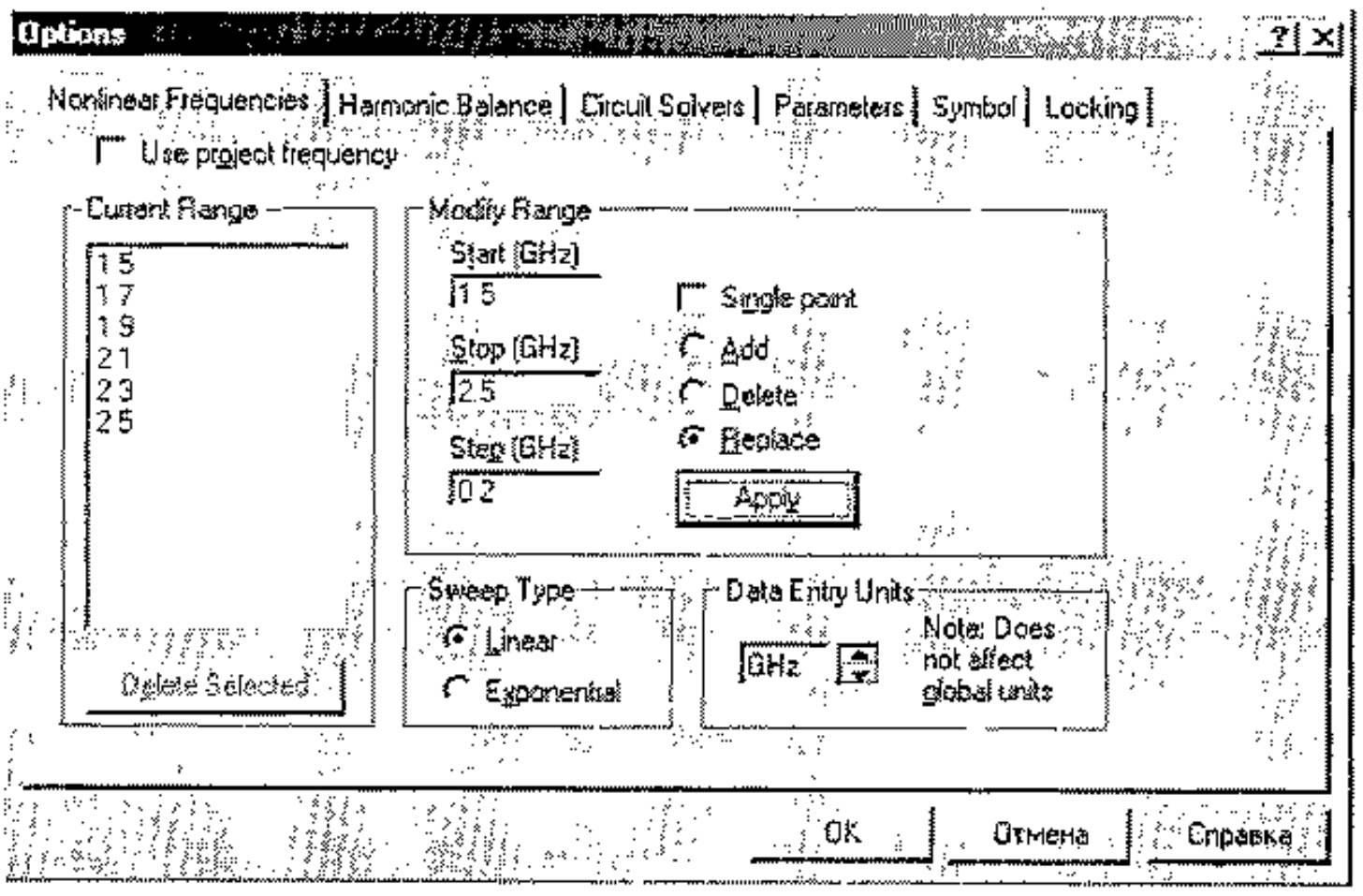


Рис. 7.24. Задание частот нелинейного анализа

Выберите **Replace** и нажмите **Apply.**

Расчет большесигнальных характеристик отражения

Большесигнальные характеристики отражения, определяются, например, как S(1,1). Большесигнальные S-параметры имеют общую форму большесигнальная Gamma (Gcomp и др.). Например, большесигнальный S-параметр может быть определен как S21 для гармоники 1 на порту 2 и гармоники 2 на порту 1.

Чтобы вывести большесигнальные S-параметры на диаграмму Смита:

1. Кликните правой кнопкой на **Graph** в дереве проекта, и выберите **Add Graph**.
2. Напечатайте **«Input Reflection»** в **Graph Name** выберите **Smith Chart** как тип графика и кликните **OK.**
3. Чтобы добавить расчет большесигнальных параметров Gamma, нажмите правой кнопкой мыши на блок Input Reflection и добавьте характеристику командой Add Mesurement (рис. 7.25).

Выберите **Simulate > Analyze.** Результаты расчета показаны на рис. 7.26.

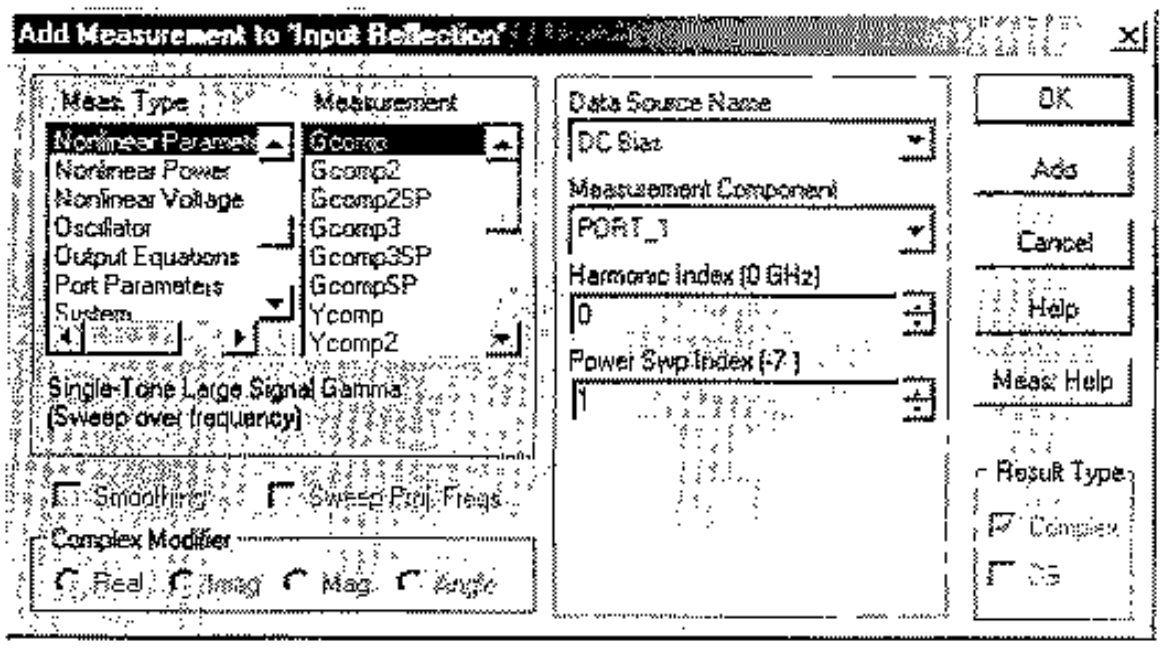


Рис. 7.25. Окно расчета и вывода нелинейных параметров

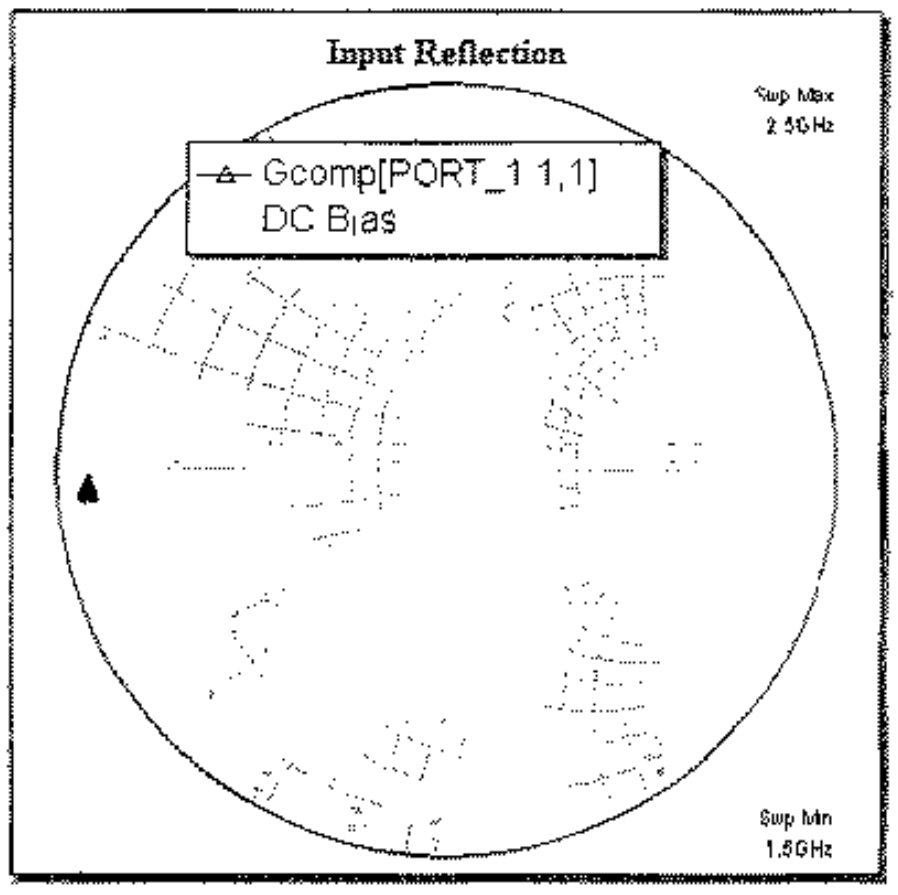


Рис. 7.26. Вывод на диаграмму Смита коэффициента отражения

Импорт схем

Входные и выходные согласующие цепи можно импортировать, когда они уже созданы. Для этого:

1. Откройте закладку **Proj**. Нажмите правой кнопкой мыши на **Circuit Schematic.**
2. Нажмите правой кнопкой мыши на **Circit Schematic** и выберите **Import Schematic.** Открывается диалог **Open** (рис. 7.27).
3. В диалоге примеров **AWR** выберите папку **Quick Start** и найдите файл **input match.**

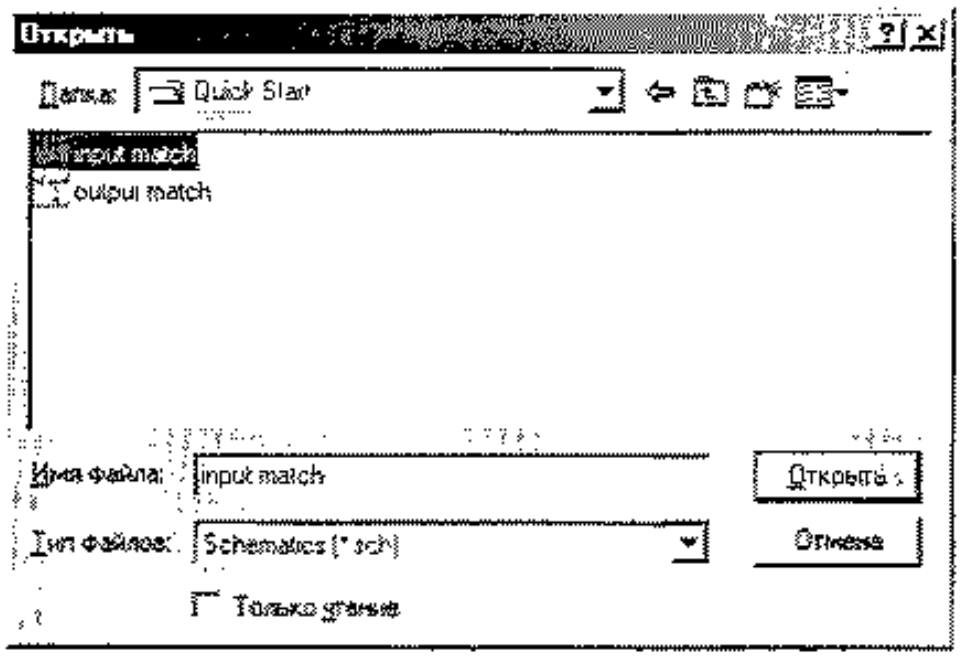


Рис. 7.27. Окно для включения схем в проект

Кликните **Open.** Таким образом выбирается уже имеющаяся структура входной согласующей цепи (рис. 7.28) и она включается в проект.

Аналогично, в той же директории, откройте и включите в проект выходную согласующую цепь output match (рис. 7.29).

Добавление подсхем в схему усилителя. Все составляющие, включая схему входной и выходной согласующей цепи, находятся теперь в закладке **Elem** в папке **Subcircuits**.

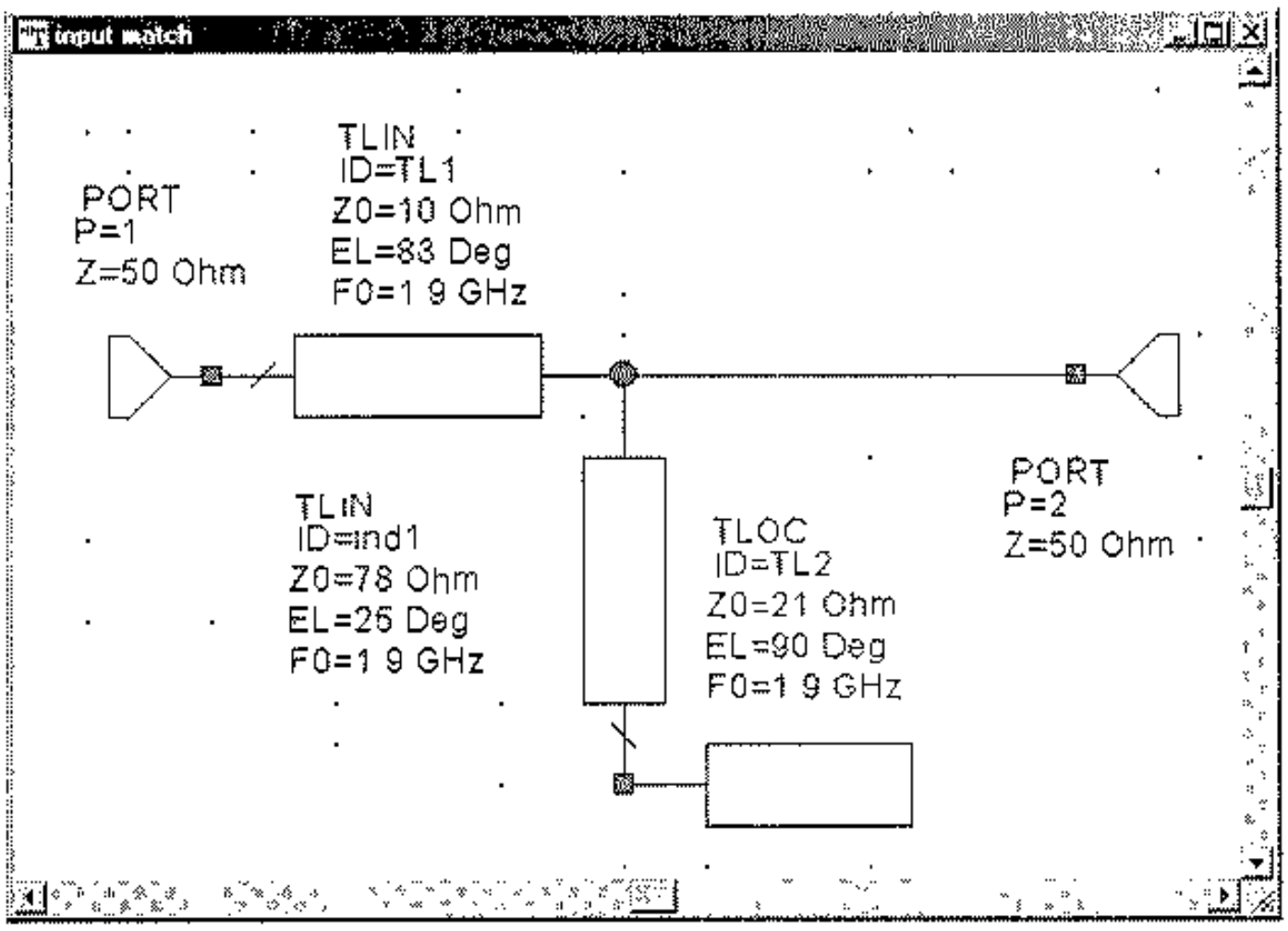


Рис. 7.28. Схема входной согласующей цепи

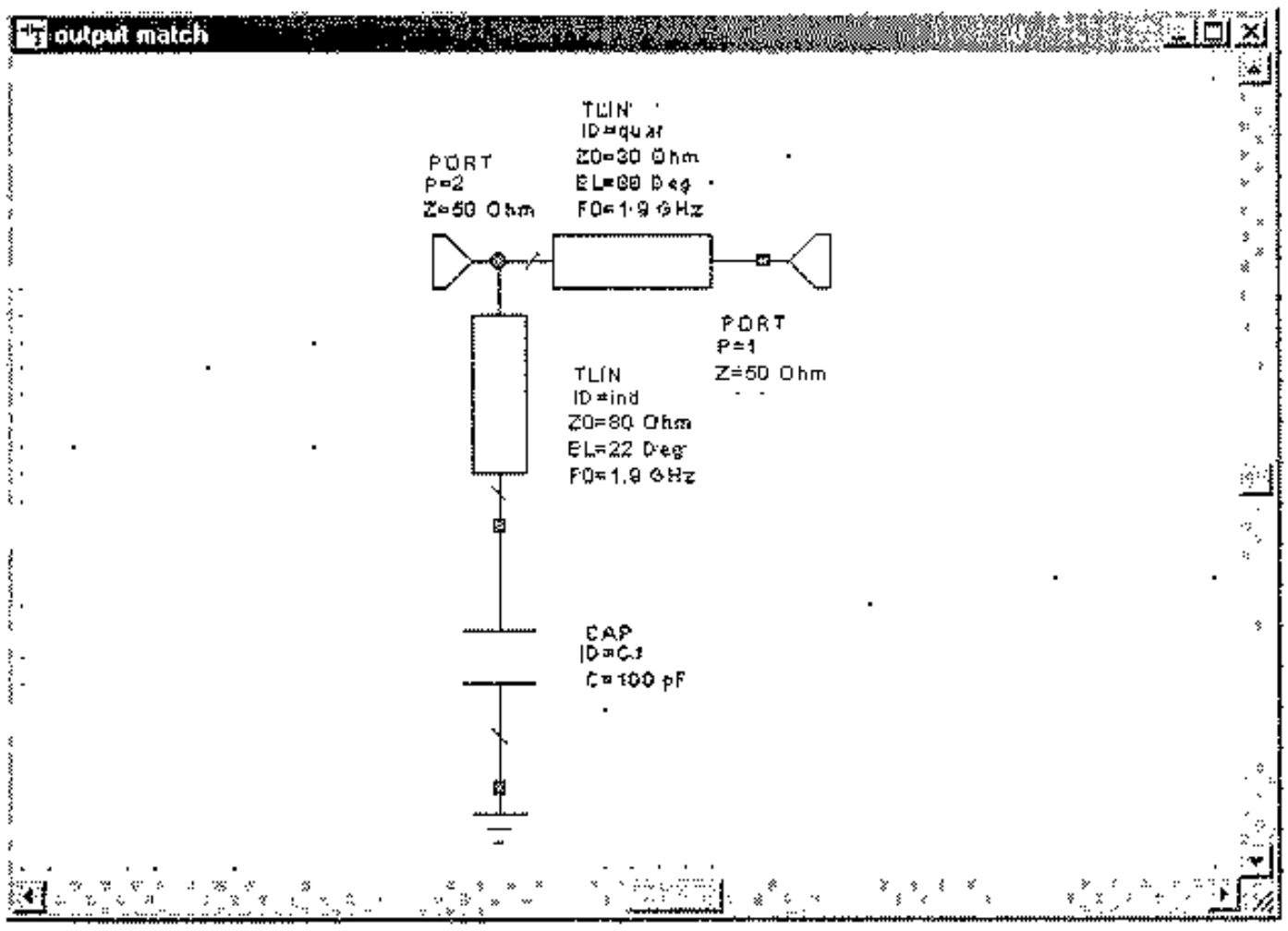


Рис. 7.29. Схемы выходной согласующей цепи

Откройте эту папку и перетащите подсхемы на схему DC Bias, предварительно разъединив элементы для включения этих подсхем. Отметим, что выходную согласующую цепь нужно перевернуть командой Flip. В итоге схема принимает следующий вид, показанный на рис. 7.30.

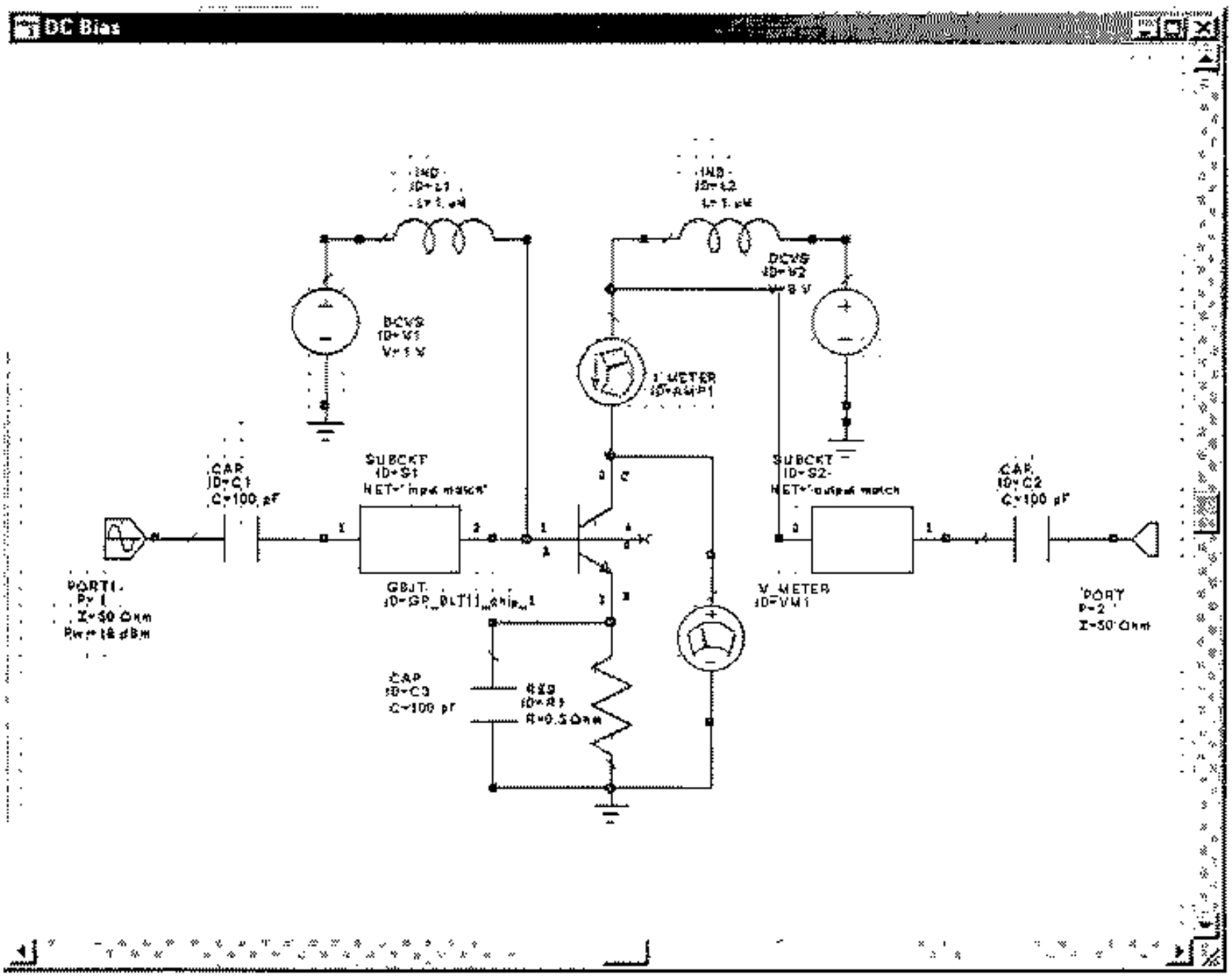


Рис. 7.30. Схема усилителя с включенными подсхемами входной и выходной согласующей цепями

Расчет выходной мощности в частотном диапазоне

1. Откройте закладку **Proj**, нажмите правой кнопкой мыши на **Graphs** и выберите Add Graph.
2. Напечатайте «Pout» в Graph Name выберите прямоугольный график и кликните OK.
3. Теперь нажмите правой кнопкой мыши на Pout и выберите Add Mesuerements.
4. Выберите **Nonlinear Power** как тип характеристики Meas.Type и выберите Pcomp как Measurement. Выберите схему DC Bias как источник рассчитанных данных, выберите PORT_2 для компоненты измерения Component Measurements (рис. 7.31), переведите стрелки так, чтобы Harmonic Index = 1, Power_Swp_Index = 1, а также отметьте в нижнем окошечке DBm.

Выберите **Simulate > Analyze**. В результате расчета получается частотная зависимость мощности на выходе (рис. 7.32).

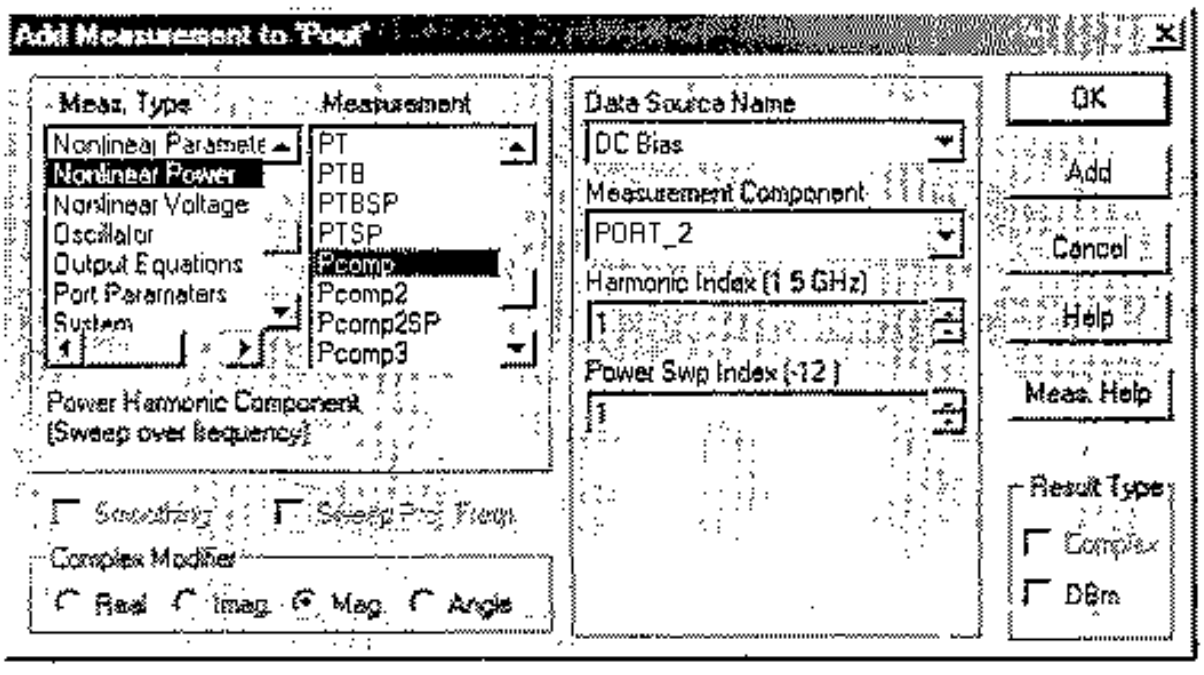


Рис. 7.31. Окно расчета и вывода параметров нелинейной мощности

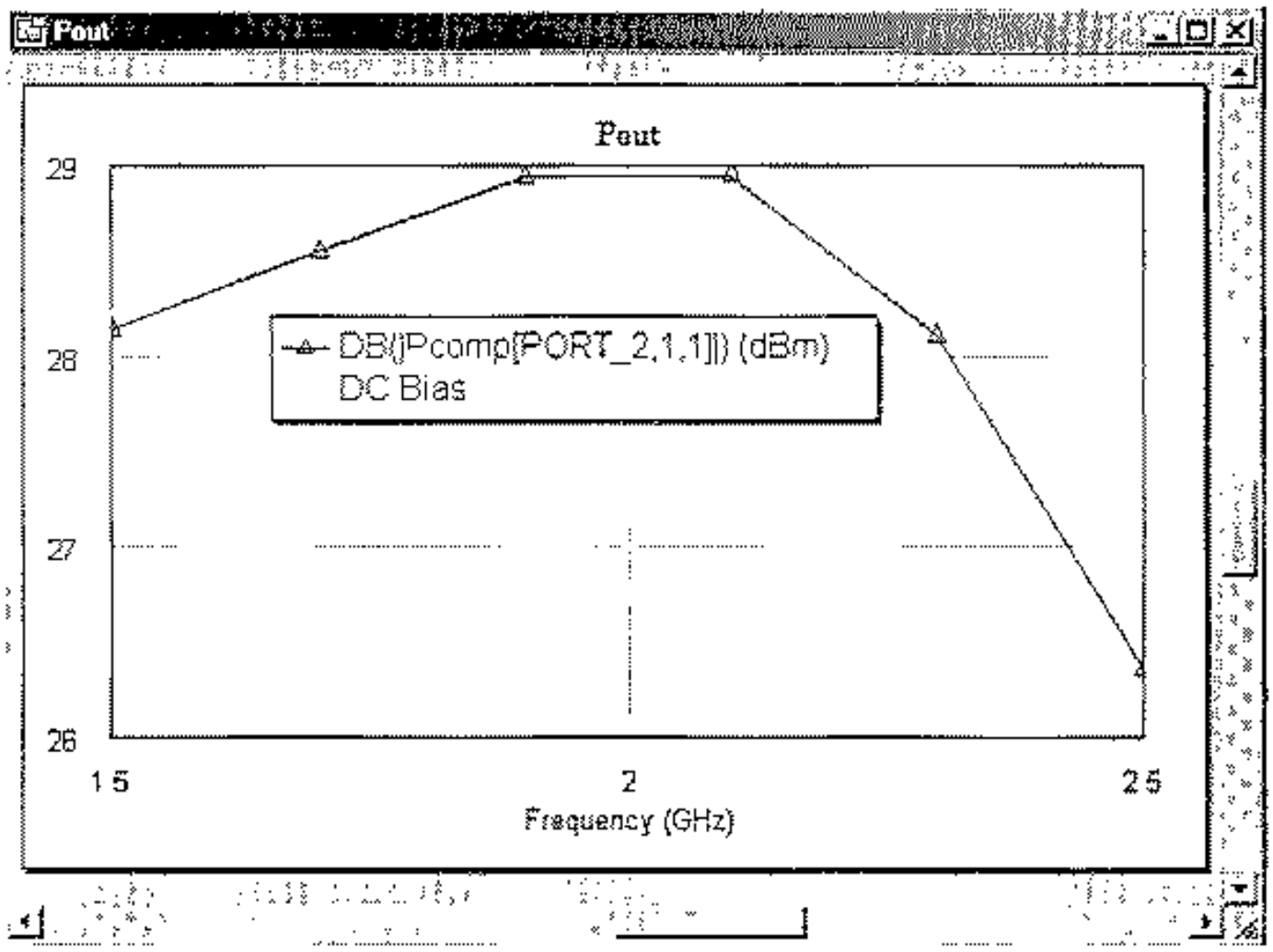


Рис. 7.32. Рассчитанная зависимость выходной мощности

Построение динамической нагрузочной линии

Динамическая нагрузочная линия как большесигнальная характеристика наносится на семейство выходных вольт-амперных характеристик. Для расчета динамической нагрузочной линии:

1. Откройте закладку **Proj**, кликните на «+» для расширения Graphs в дереве проекта.
2. Нажмите правой кнопкой на **IV BJT** и выберите **Add Mesurement**. Выберите Nonlinear Current как тип Meas.Type и выберите IVDLL как тип характеристики. Выберите **DC Bias** как **Data Source Name**, выберите **V_METER.VM1** для Voltage Measured Component, **I_METER.AMP1** как Current Measured Component. а также выберите индекс частоты и мощности, равные 1.
3. Выберите **Simulate** > **Analyze**. Характеристики показываются на рис. 7.34.

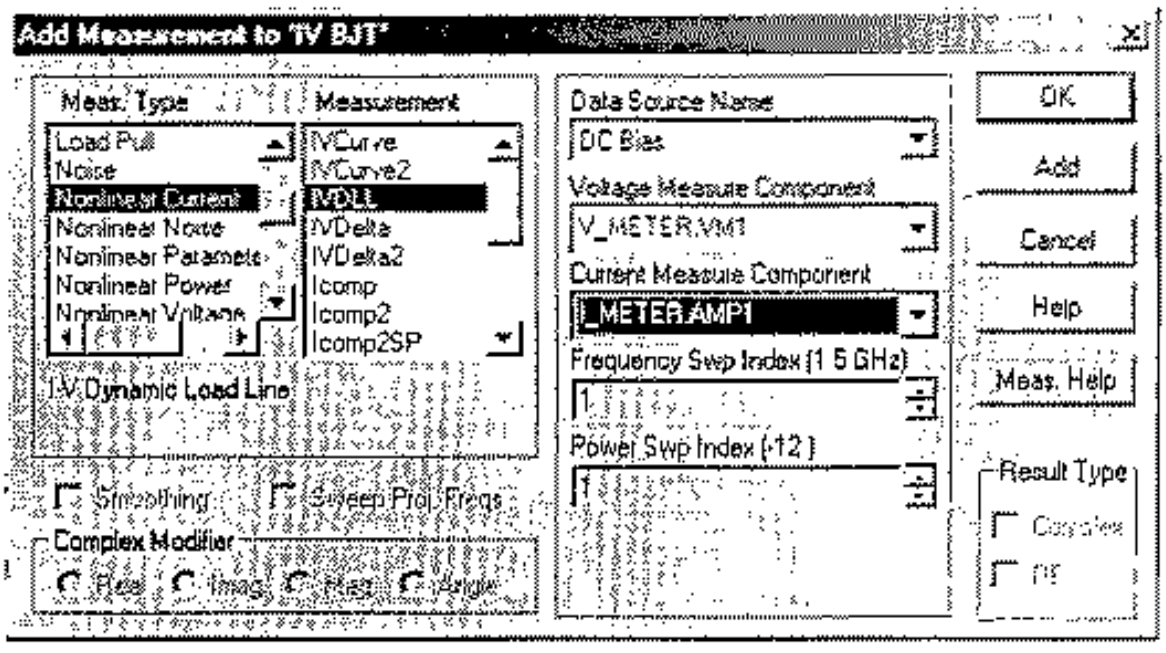


Рис. 7.33. Включение расчета динамической нагрузочной линии

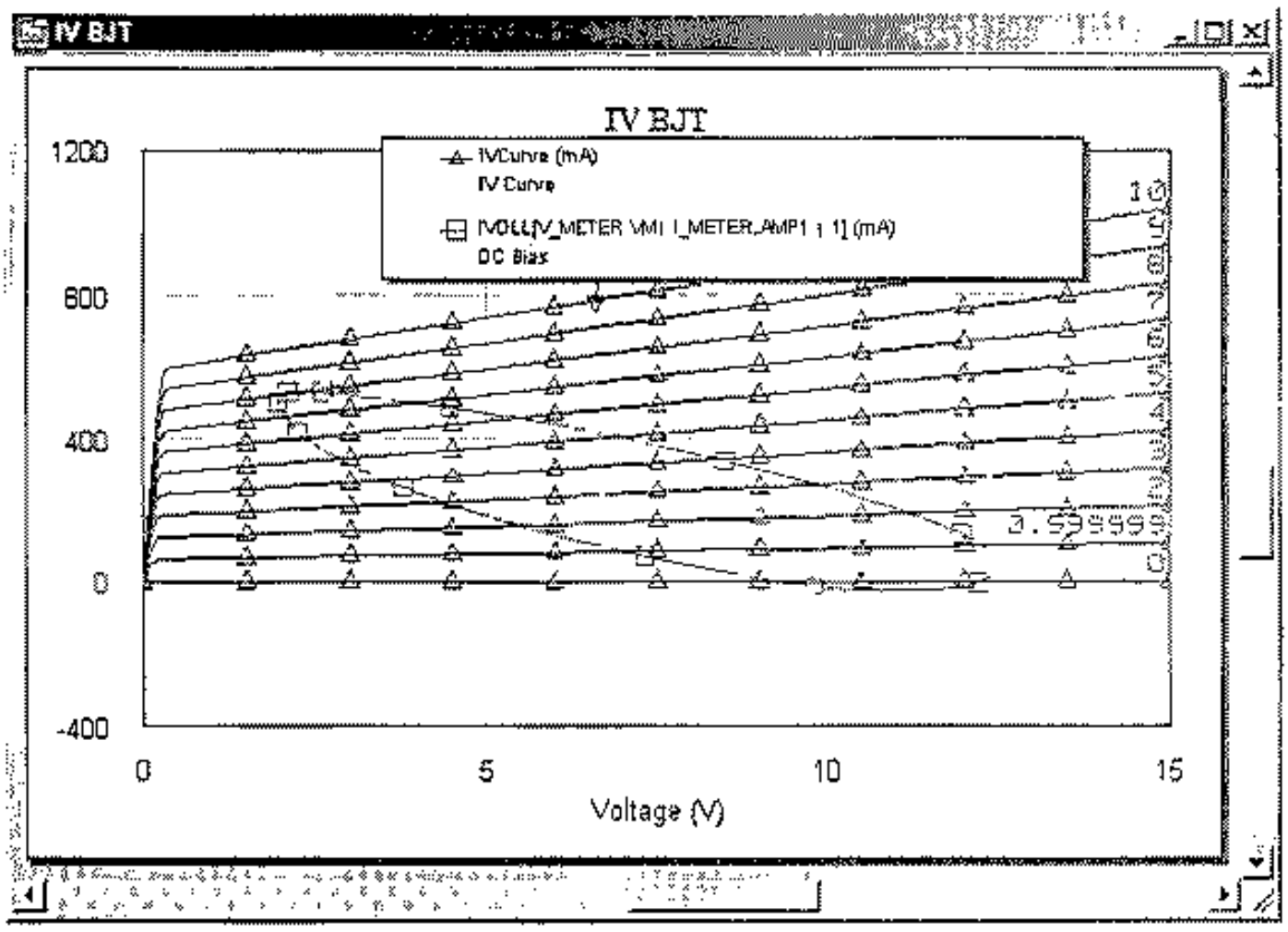


Рис. 7.34. Рассчитанные выходные вольт-амперные характеристики с нагрузочной линией

Добавление порта с двумя гармоническими сигналами

Сначала скопируем схему **DCbias** и переименуем копию как «Two Tone Amp».

Чтобы рассчитать в схеме нелинейного усилителя такие характеристики, как уровень интермодуляционных искажений третьего порядка, точку пересечения, необходимо выполнить двухтоновый гармонический баланс. Для этого:

1. Кликните на **Two Tone Amp** чтобы сделать ее активной. Затем кликните дважды на **PORT1**. Появится диалог опций входного источника. Откройте закладку **Port** (рис. 7.35).

Откройте закладку **Parameters** и измените **Values** на величины, соответствующие рис. 7.36, а затем нажмите **OK.**

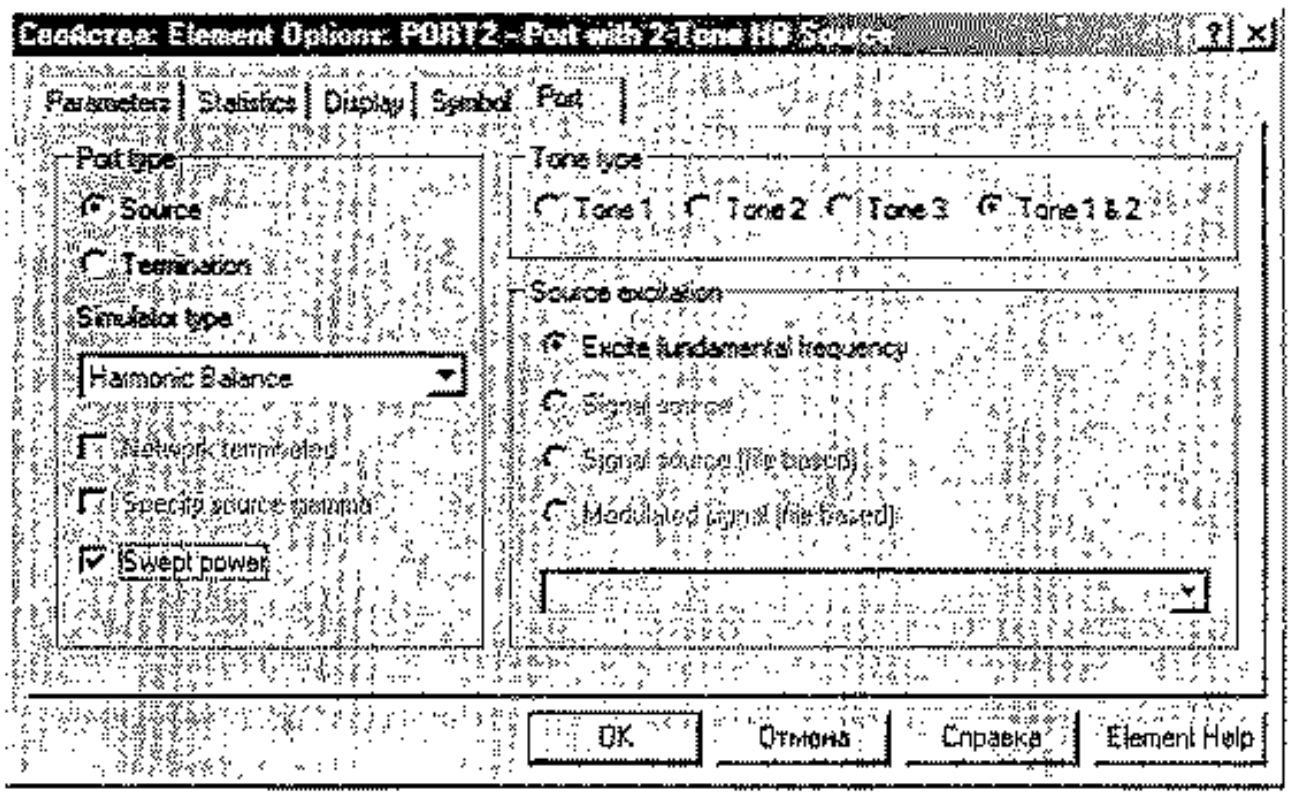


Рис. 7.35. Диалог установки параметров порта на входе схемы

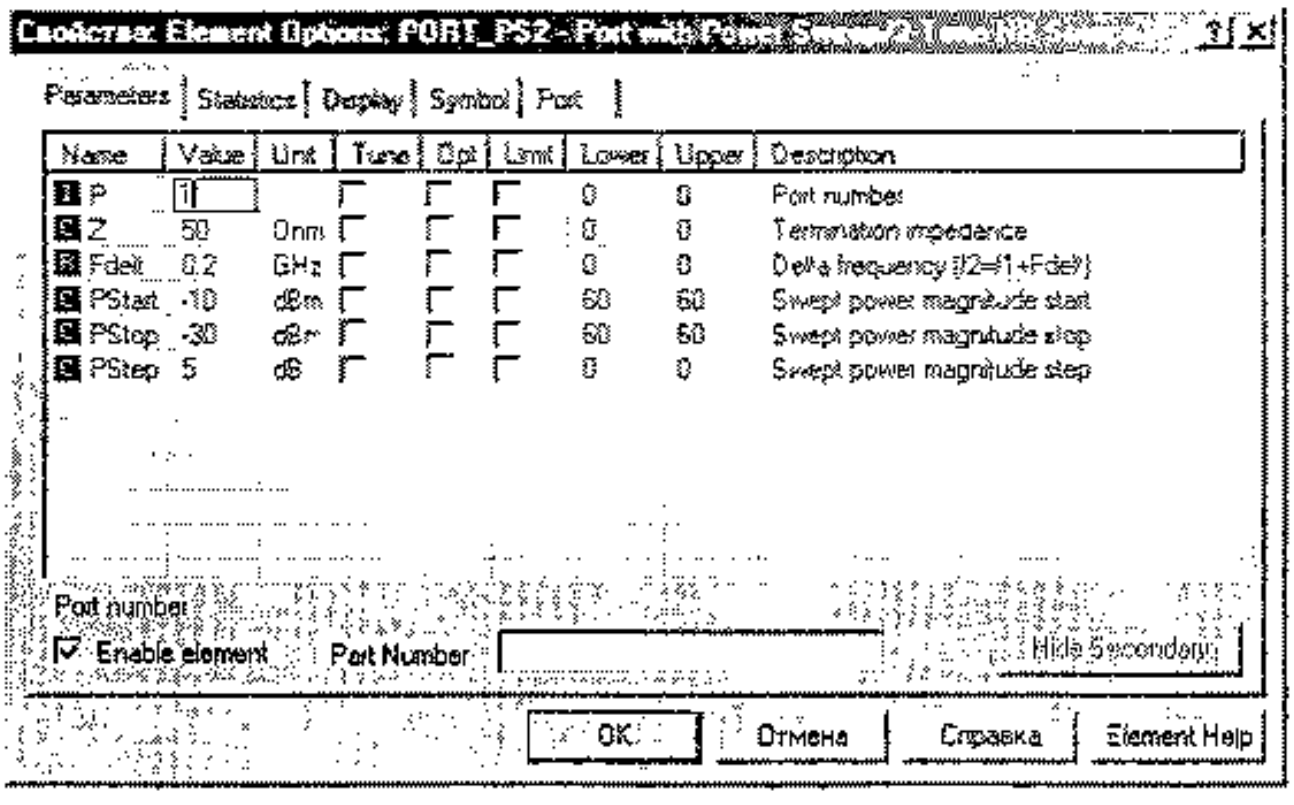


Рис. 7.36. Установка параметров генератора на входе, включая изменение мощности

Расчет интермодуляционных искажений третьего порядка

1. Добавьте новый график в дереве проекта командой **Add Graph** на пункте **Graph**.

   Напечатайте имя **IM3** в **Graph Name**, выберите **Rectangle** как тип графика и кликните **OK**.
2. Дважды кликните правой кнопкой на **IM3** и выберите Add **Measurement**. Появляется диалог выбора характеристик (рис. 7.37).

Выберите **Nonlinear Power** как **Meas.Type**, и выберите **IM1_SP** как характеристику расчета (фундаментальная частота при изменении мощности на входе), усилитель **Two Tone Amp** как источник данных и **PORT_2** как компонента расчета. Выберите частоту расчета устанавливая **Frequency Swp Index = 1.** Затем нажмите **Add,** чтобы добавить характеристику **IM3_SP** на этот же график. Процесс моделирование сопровождается индикацией процесса сходимости (рис. 7.38) и в результате мы получаем характеристики, показанные на рис. 7.39.

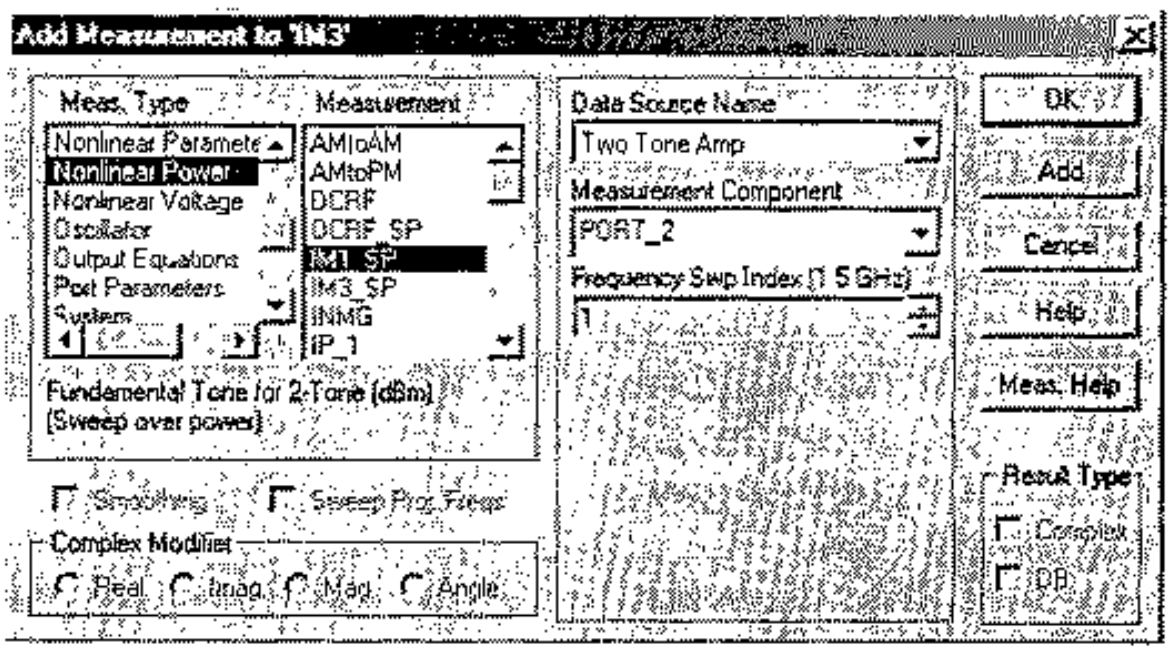


Рис. 7.37. Диалог вывода интермодуляционных искажений

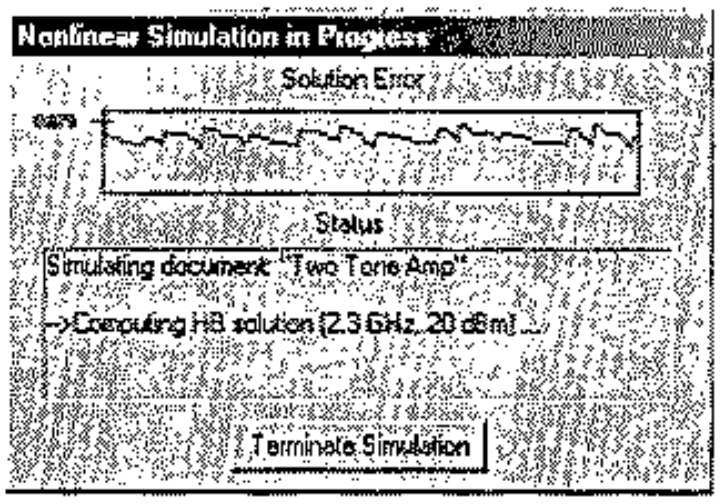


Рис. 7.38. Диалог процесса расчета гармонического баланса

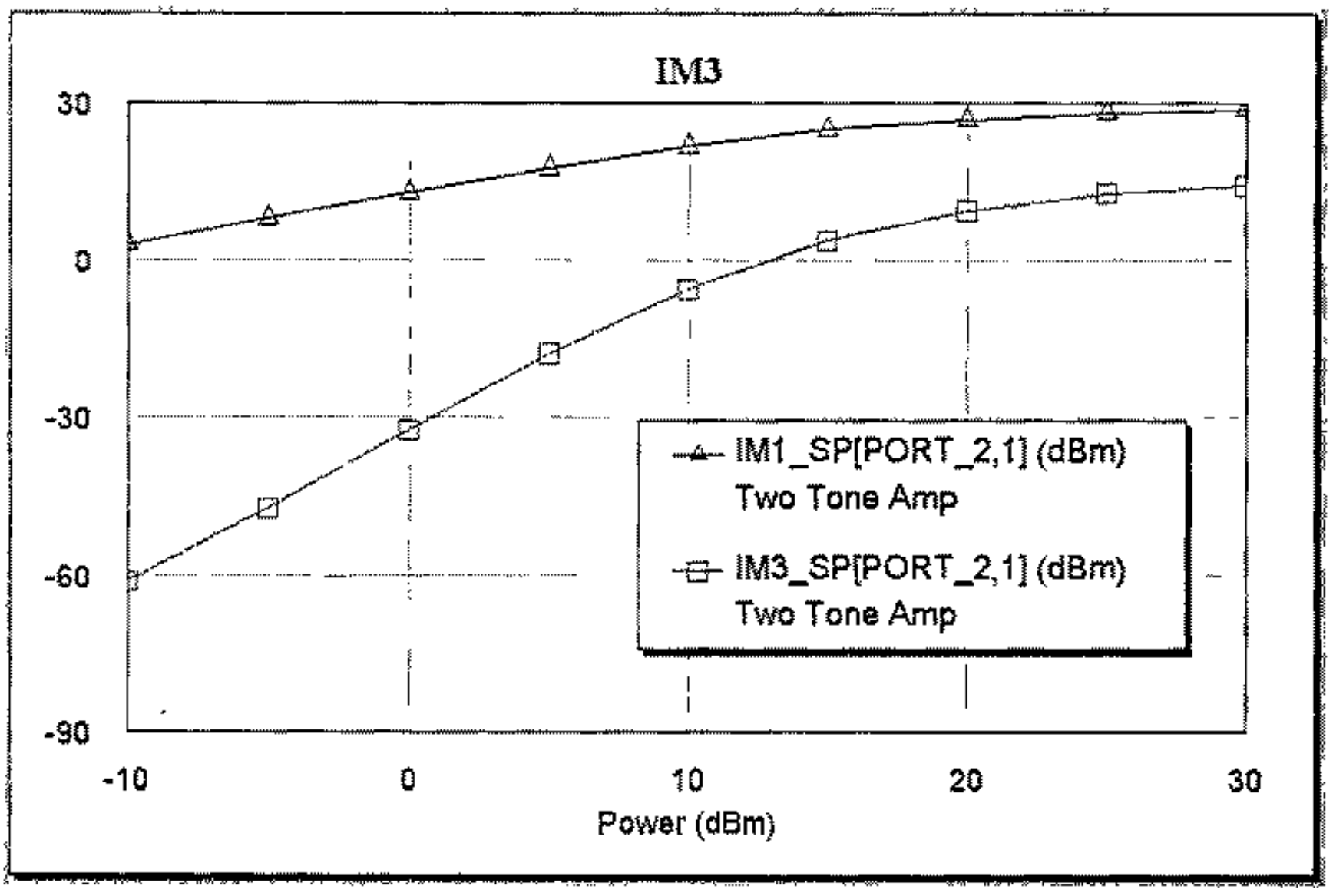


Рис. 7.39 Зависимость мощности основной гармоники и продуктов интермодуляционных искажений третьего порядка от мощности генератора

Расчет зависимости точки пересечения третьего порядка IP3 относительно изменения напряжения источника постоянного напряжения

Характеристика IP3 не требует изменения мощности на входе. Чтобы ускорить расчет при изменении переменной, закроем новую схему, в которой изменяется мощность и создадим новую схему, которую назовем **IP3**.

MWO имеет ассистент **Swept Variable**, который позволяет создать график любой характеристики относительно параметра элемента. Новая характеристика будет создана из расчета **IP3** по входу. Для этого:

1. Откройте закладку **Proj**, нажмите правой кнопкой мыши на **Graphs** и выберите **Add Graph**.
2. Напечатайте имя IP3 как **Graph Name**, выберите прямоугольный график и кликните **OK**.
3. Нажмите правой кнопкой мыши на **IP3** и выберите **Add Measurement**. Появится диалог (рис. 7.40).

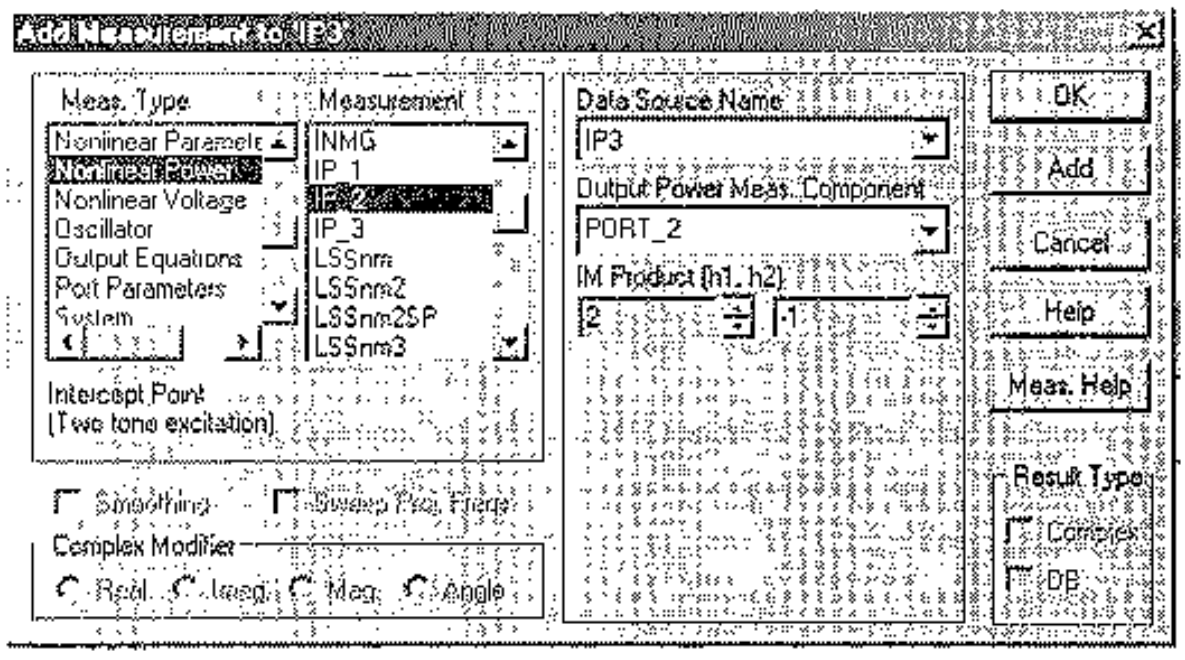


Рис. 7.40. Расчет и вывод точки пересечения 2-го порядка

4. Выберите **Nonlinear Power** как **Meas.Type**, а **IP_2** как **Measurement**. Выберите IP3 как источник данных, и PORT_2 как компонента Output Power Meas. Component. Выберите IM Product (h1)=2 и IM Product (h2)=-1, затем кликните Add и OK.
5. Выберите **Simulate > Analyze**. График IP3 показывается на рис. 7.41.

Теперь создадим зависимость IP3 относительно напряжения VC из исходного рассчитанного набора данных. Перед тем, как будет выполняться работа Swept Variable Wizard, должен быть создан график цели.

6. В закладке **Proj** нажмите правой кнопкой **Graph** и выберите **Add Graph**. Напечатайте «IP3 vs VC» как **Graph Name**, выберите **rectangle** как тип графика и кликните **OK**. Изменяемая переменная для новой характеристики должна подстраиваться. Это очень важный шаг должен быть сделан перед работой **Swept Variables Wizard** (рис. 7.42).

Для того чтобы открыть подстройку напряжения на коллекторе:

7. Откройте закладку **Proj**, для чего дважды нажмите на схему **IP3**. Выделите элемент DCVS ID=V2 на схеме. Кликните инструмент Tune Tool на инструментальной линейке и разместите курсор мыши сверху параметра V=6V. Пересечение превратится в небольшой круг. Кликните на этот параметр для возможности подстройки.

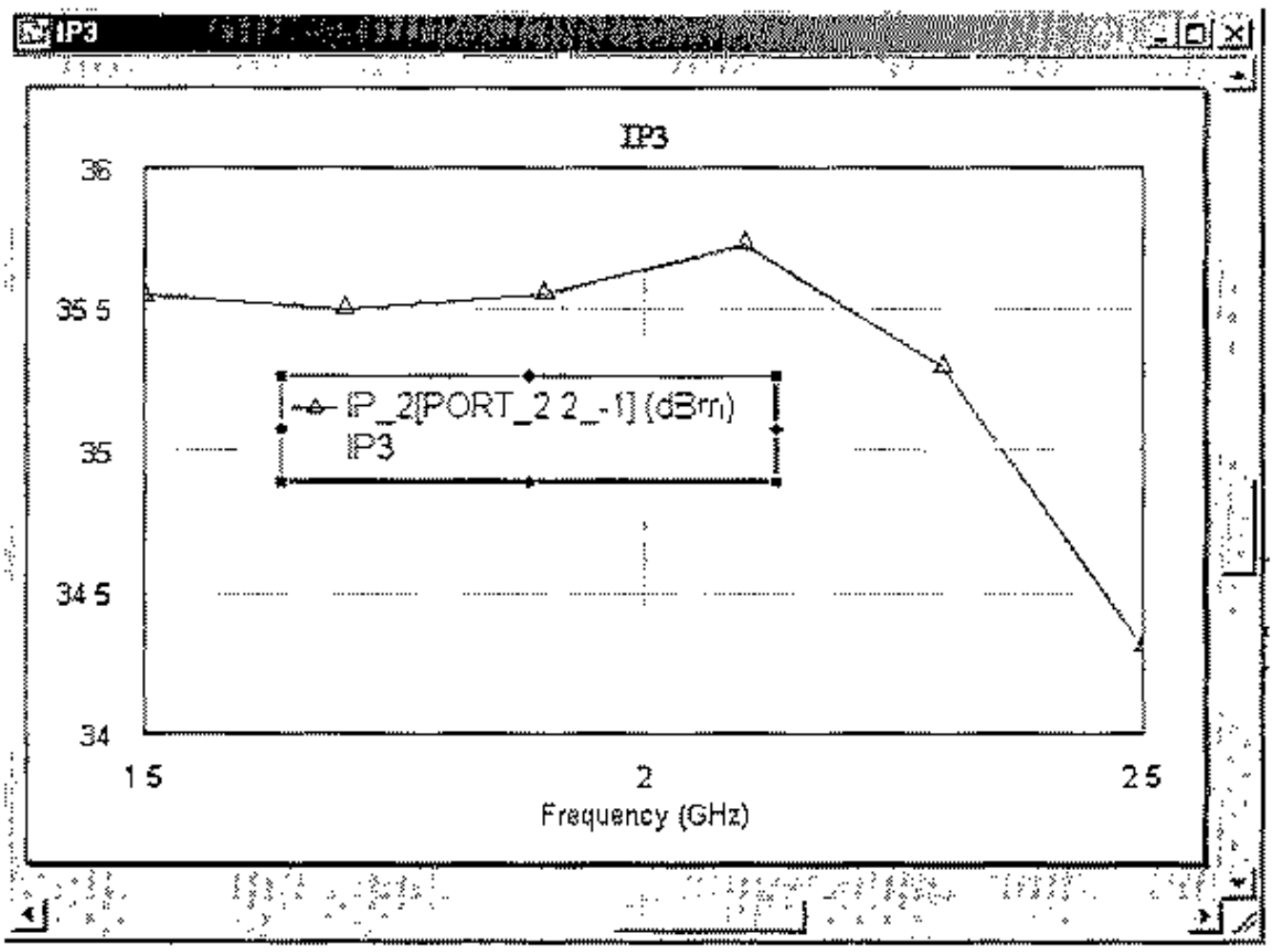


Рис. 7.41. Зависимость точки пересечения от частоты

Для завершения расчета IP3 относительно характеристики VC, вы должны активизировать **Swept Variable Wizard**:

8. Откройте закладку **Proj**, расширьте **Wizard** и дважды кликните на **Swept Variable Wizard.**
   Появится диалог ассистента свипирования переменных (рис. 7.42).

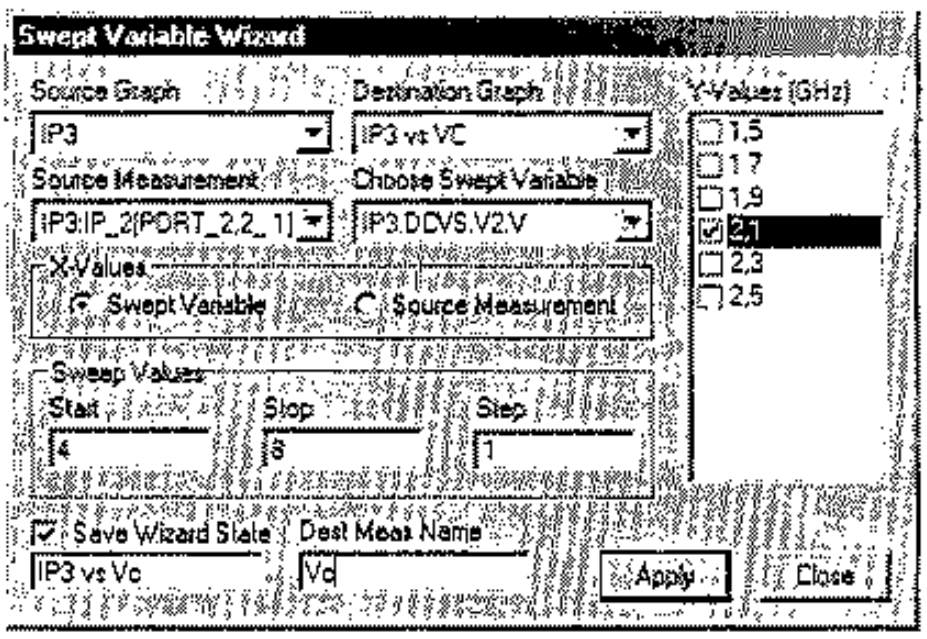


Рис. 7.42. Панель ассистента MWO, предназначенного для выделения изменяющихся характеристик

9. Выберите IP3 как исходный график и IP3 IP_2(Port2,2_-1) как исходную характеристику **Source Measurement.**
10. Выберите **Swept Variable** как величину по оси **X**. Напечатайте «**4**» для начальной точки **Start**, «**8**» для конечной точки **Stop** и «**0.5**» для шага **Step.**
11. Выберите режим сохранения состояния ассистента Save Wizard State и напечатайте «IP3 vs VC» в текстовом окне ниже, и «VC» как Dest. Meas.Name
12. Выберите 2.1 в разделе Y-Values (GHz). Кликните **Apply**. Окончательно график примет вид, показанных на рис. 7.43.

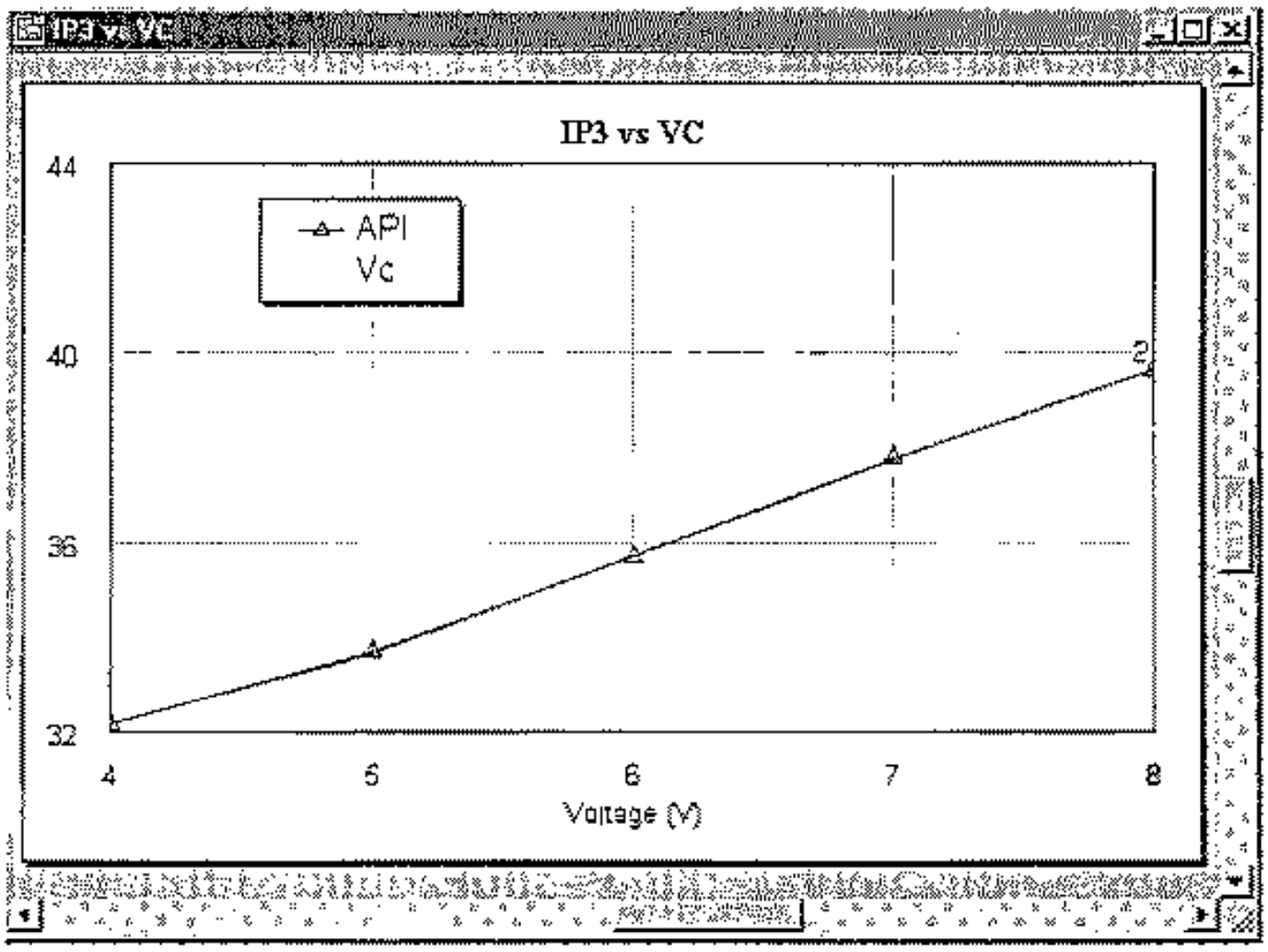


Рис. 7.43. Зависимость точки пересечения третьего порядка от напряжения на коллекторе транзистора

7.5. Практические замечания

1. Программы, использующие метод гармонического баланса, не являются универсальными и не могут рассчитать любые нелинейные устройства. Они больше всего подходят для анализа потерь преобразования смесителя и анализа усилителя мощности с одним сигналом на входе. Однако они имеют плохую сходимость при расчете смесителей и мощных усилителей. Этот метод хорошо сходится при расчете уровней интермодуляционных искажений в малосигнальных усилителях, но модели усилительных приборов обычно неточны, поэтому абсолютное значение этого уровня может быть неточное. Тогда рекомендуется применять «определяемую пользователем» модель нелинейного прибора (FET, BJT, ...).
2. Помните, что нелинейный прибор и модели компонентов схемы должны быть справедливы на постоянном токе и всех гармониках, а также на основной частоте.
3. Используйте для расчета смесителей конверсионно-матричный анализ (т. е. описание смесителя на системного уровне, с заданными нелинейными свойствами), а не метод гармонического баланса. Он намного быстрее и более точен для этого случая.
4. Не рассчитывайте большее количество гармоник, чем необходимо. Четыре или пять гармоник — обычно достаточно для схем с FET, если они не входят в резкое насыщение; диодные цепи из-за их более сильных нелинейностей могут потребовать восемь гармоник.
5. Когда ставится новая задача, начинайте с простого случая. Используйте только идеальные элементы (например, идеальный трансформатор вместо симметрирующего устройства), не учитывайте цепи смещения и т. п. Когда имеется базовый проект, дающий начальные расчеты, начинайте по одному

заменять в нем идеализированные элементы реальными. Попытка заменить все сложные объекты сразу оставляет слишком много неопределенных переменных; поэтому усложняется поиск решения.

6. Точность метода гармонического баланса обычно приемлема только для основных частот. Для более высоких гармоник точность ухудшается. Попытка вычислять уровень пятой гармоники мощного усилителя практически бесполезна.
7. Многие нелинейные явления (особенно интермодуляционные искажения высших порядков, кратные и некратные гармоники) очень чувствительны к параметрам схемы и уровню входного сигнала. Из-за этого неизбежно ухудшается точность. Не ожидайте при анализе смесителя точного расчета, например, IM пятого порядка или старше.
8. Точность метода гармонического баланса недостаточна для IM-анализа. Для решения IM-задач рекомендуется использовать метод рядов Вольтерра.

При возникновении проблем со сходимостью рекомендуется:

1. Убедиться, что в схеме нет узлов, изолированных по постоянному току. Например, узел, соединяющий два последовательных конденсатора, имеет неопределенное постоянное напряжение, и лучше соединить его с землей большим сопротивлением.
2. Добавить резисторы с большим сопротивлением (например, 1 МОм) между узлами нелинейных элементов и землей. Процесс разделения схемы на линейные и нелинейные подсхемы может вызывать трудности. Часто это приводит к тому, что часть линейной схемы остается разъединенной, поэтому рекомендуется ставить эти резисторы.
3. Если модель не дает сходимости, предельно упростите ее, введите простые данные для параметров модели. Убедитесь, что ток стока действительно достигает нуля в точке отсечки и не увеличивается снова ниже нее. Проверьте крутизну и линейный коэффициент усиления, полученный из нелинейной модели, и убедитесь, что эти данные согласуются с рассчитанными *S* или *Y* параметрами.
4. Сходимость ухудшается при высоких уровнях мощности. Часто лучше последовательно выполнить моделирование для нескольких значений входных мощностей, чем моделировать проект при одном значении сигнала с высоким уровнем. В методе гармонического баланса часто предыдущий результат используется как исходные данные для последующих расчетов. Иногда быстрее выполнить много маленьких шагов, гарантирующих сходимость результатов расчета, чем один большой шаг, от нулевого до сигнала с высоким уровнем.

7.6. Анализ методом рядов Вольтерра

MWO включает уникальную возможность расчета методом рядов Вольтерра уровней гармоник и уровней взаимных модуляций в слабо нелинейных устройствах, типа усилителей, работающих ниже точки сжатия 1 dB. Анализ методом рядов Вольтерра может использоваться, чтобы оптимизировать слабо нелинейные устройства точно и эффективно. MWO — первая коммерческая программа анализа СВЧ схем, которая включает универсальный анализ методом рядов Вольтерра.

Нет необходимости понимать все тонкости метода Вольтерра, используя его в MWO. Многие радиоинженеры знают немного относительно внутренних алгорит-

мов работы программ, но все же используют их успешно. В значительной степени, можно делать то же самое с нелинейной программой. Однако, ограничения методов анализа нелинейных схем более сильные, чем линейных, так что важно понять возможности программы и ее ограничения.

7.6.1. Основы метода рядов Вольтерра

Анализ методом рядов Вольтерра может быть описан как метод возмущения: изменение напряжения на рабочей частоте принимается как малое возмущение напряжения смещения в каждом узле схемы. Эта схема не намного отличается от линейных схем замещения. Например, проводимость g_d смещенного перехода диода равна

$$g_d = \left.\frac{dI_d}{dV_d}\right|_{V_d = V_{bias}}, \tag{7.10}$$

где V_d — напряжение на зажимах диода; I_d — ток; V_{bias} — напряжение смещения.

Тогда малосигнальный ток ВЧ

$$i_d = g_d v_d = \left.\frac{dI_d}{dV_d}\right|_{V_d = V_{bias}}, \tag{7.11}$$

где v_d — напряжение малого сигнала.

Уравнение (7.11) представляет первый член в разложении в ряд Тейлора нелинейного тока:

$$i_d = \left.\frac{dI_d}{dV_d}\right|_{V_d = V_{bias}} v_d - \frac{1}{2}\left.\frac{d^2 I_d}{dV_d^2}\right|_{V_d = V_{bias}} v_d^2 + \frac{1}{6}\left.\frac{d^3 I_d}{dV_d^3}\right|_{V_d = V_{bias}} v_d^3 + \ldots \tag{7.12}$$

Очевидно, что нелинейные члены v_d^2 и v_d^3 определяют нелинейные искажения тока и появление высших гармоник в случае одногармонического воздействия и интермодуляционных искажений при многогармоническом входном сигнале. Анализ на основе ряда Вольтерра является рекурсивным методом для вычисления тока, представленного этими уравнениями, непосредственно в частотной области.

В методе рядов Вольтерра нелинейная схема преобразуется в линейную и набор «нелинейных источников тока» (рис. 7.44). Источники представляют токи второй и более высоких гармоник в элементе. Токи найдены с помощью рекурсивного процесса, и каждый шаг процесса дает конкретный член в ряде Вольтерра. Эти токи трактуются как возбуждения разных порядков; I_2 — ток второго порядка, I_3 — третьего порядка и т. д.

Эти токи затем трактуются как возбуждения линейной схемы, в результате должен выполняться только линейный схемотехнический анализ! По этой причине анализ методом рядов Вольтерра намного быстрее, чем анализ во временной области или метод гармонического баланса. Кроме того, не используется никакое Фурье-преобразование, так что диапазон чисел ограничен только точностью их представления. Поэтому методом рядов Вольтерра могут быть вычислены очень незначительные продукты IM искажений.

Эта замечательная эффективность имеет цену, показанную уравнением (7.12): ряд Тейлора точен только для малых отклонений напряжения вблизи точки смещения. Если сигнал слишком большой, точность падает. Анализ методом рядов

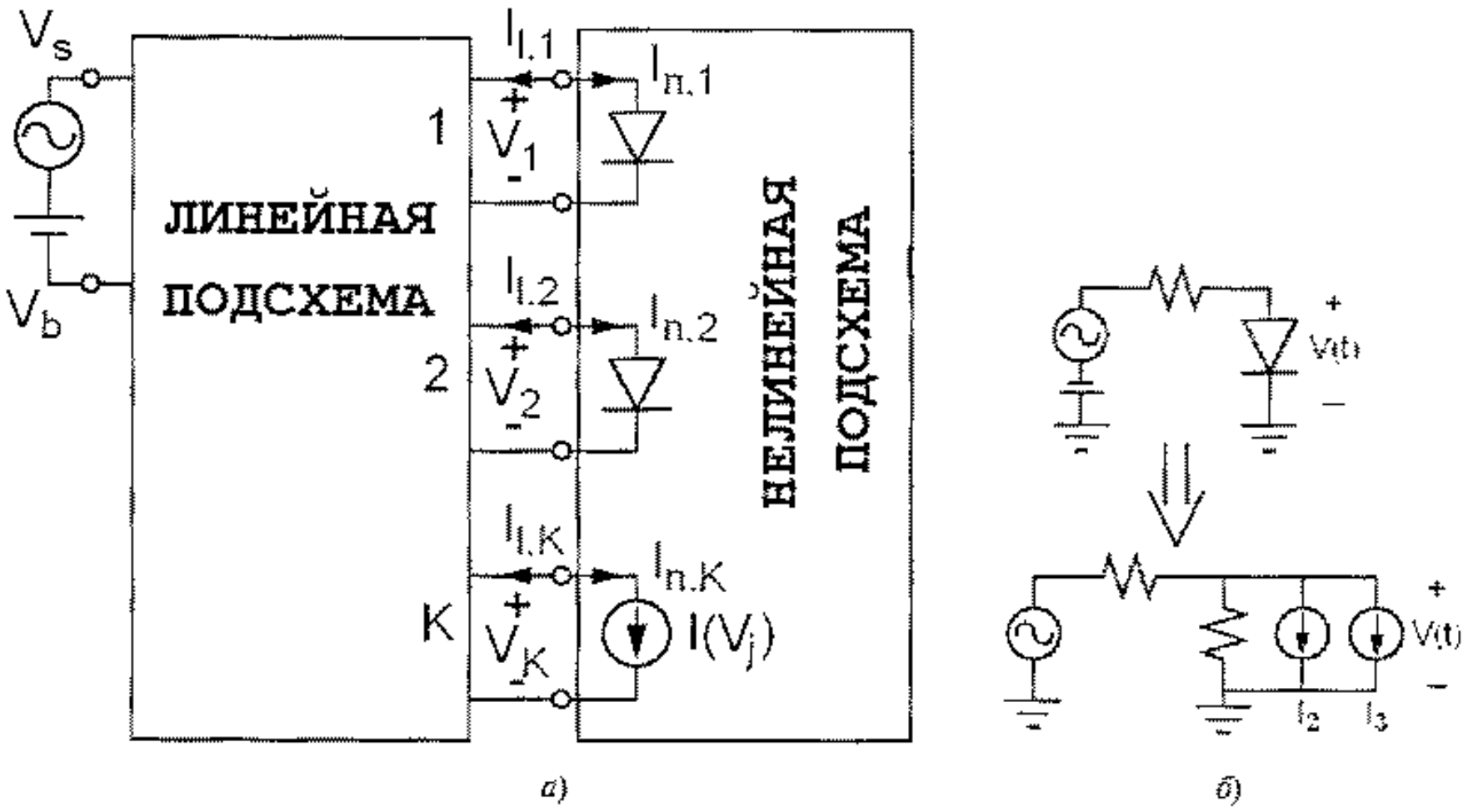


Рис. 7.44. Эквивалентная схема, поясняющая метод рядов Вольтерра

Вольтерра полезен только для слабо нелинейных схем или схем, работающих значительно ниже уровней насыщения.

Утилита **VoltaireXL** программы MWO — лучшее Вольтерровское моделирующее устройство до настоящего времени.

Анализ методом рядов Вольтерра заключается в расчете нелинейностей в слабо нелинейном устройстве как относительно маленькие возмущения от линейности. Например, ток и напряжение в линейном резисторе связаны соотношением

$$G = \frac{I}{V}, \tag{7.13}$$

где G — проводимость резистора. Это выражение показывает линейное отношение между током и напряжением в резисторе. Когда реальное нелинейное устройство (например диодный переход) становится нелинейным, зависимость тока от напряжения уже не линейная. В этом случае проводимость определяется как производная I/V характеристики в точке смещения, V_0:

$$g(V_0) = \frac{d}{dV} I(V)\Big|_{V=V_0}. \tag{7.14}$$

Величина $g(V_0)$ — малосигнальная проводимость, линейная величина, которая равна отношению изменения тока при небольшом изменении напряжения AC (амплитуда ВЧ напряжения) добавленного к напряжению смещения DC. Это — обычный путь определения проводимости в нелинейных устройствах. Однако, потому что эта величина линейна, она может использоваться только, чтобы получить ток AC на той же самой частоте как напряжение; это не объясняет нелинейное искажение. Если мы хотим объяснить также нелинейность, мы должны разложить $I(V)$ в ряд Тейлора и оставить старшие члены:

$$i(v) = \frac{dI(V)}{dV}\Big|_{v=v_0} V + \frac{1}{2}\frac{d^2I(V)}{dV^2}\Big|_{v=v_0} V^2 + \frac{1}{6}\frac{d^3I(V)}{dV^3}\Big|_{v=v_0} V^3 + \ldots. \tag{7.15}$$

Или просто

$$i(v) = a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + \ldots, \tag{7.16}$$

где $i(v)$ — малосигнальный ток AC; v — малосигнальное напряжение; a_n — коэффициенты ряда Тейлора. Малосигнальный ток и напряжение (I и V), называются величинами приращения, потому что они представляют малосигнальные или немного возрастающие отклонения от тока смещения DC и напряжения. Заметим, что G в (7.13), и a_1 в (7.16) идентичны (то есть, a_1 — малосигнальная линейная проводимость).

Мы можем выполнить аналогичную процедуру с нелинейной емкостью. Если конденсатор имеет нелинейную характеристику заряд/напряжение, то можно записать

$$q(v) = \frac{dQ(V)}{dV}\Big|_{v=v_0} V + \frac{1}{2}\frac{d^2Q(V)}{dV^2}\Big|_{v=v_0} V^2 + \frac{1}{6}\frac{d^3Q(V)}{dV^3}\Big|_{v=v_0} V^3 + \ldots \tag{7.17}$$

или

$$q(v) = c_1 v + c_2 v^2 + c_3 v^3 + \ldots \tag{7.18}$$

Конечно, знание зависимости $q(v)$, является столь же полезным как знание емкости C(v), потому что $c(v)$ — просто производная $q(v)$ относительно напряжения.

MWO также имеет нелинейную модель индуктивности. Индуктивность определена магнитным потоком

$$\varphi(v) = l_1 i + l_2 i^2 + l_3 i^3 + \ldots \tag{7.19}$$

и

$$v = \frac{d\varphi}{dt}. \tag{7.20}$$

Это — управляемый током элемент и непосредственно не часто применяется в программе анализа цепей. Однако его просто конвертировать к элементу, управляемому напряжением. Ток как функция магнитного потока может быть найден обращением ряда (7.19).

Характеризовав нелинейные элементы, мы можем решить задачу вычисления уровней продуктов интермодуляционных искажений. Большинство радиоинженеров используют традиционные методы расчета интермодуляции в усилителях и других целях. Они основаны на том, что в схеме имеется нелинейная передаточная функция, в которой ток на выходе I может быть выражен как степенной ряд от напряжении возбуждения v, и что имеется двухсигнальное синусоидальное возбуждение

$$v = V_1 \cos(2\pi f_1 t) + V_2 \cos(2\pi f_2 t). \tag{7.21}$$

Подставив (7.21) в (7.15), после выполнения алгебраических действий находим, что ток i содержит ряд новых частот и эти частотные компоненты — продукты взаимодействия между гармониками частот сигнала возбуждения — имеют частоты выражениями

$$f_{m,n} = mf_1 + nf_2, \tag{7.22}$$

где m, $n = 0, 1, 2,\ldots$ Эти новые частоты называются гармониками и продуктами интермодуляции (IM). (Хотя мы называем гармоники и интермодуляционные

продукты нелинейного взаимодействия различными названиями, они сгенерированы таким же образом; они — различные проявления того же самого явления, нелинейного искажения, и мы можем использовать члены продуктов IM или продукты интермодуляции, чтобы обозначать их). Если (4) должны были представлять, например, источник управляемого тока в эквивалентной схеме FET, мы могли очевидно вычислять все гармоники на выходе и уровни IM. Этот подход называется анализом методом степенного ряда.

Хотя этот подход кажется разумным, при более близком рассмотрении мы обнаруживаем некоторые проблемы. Хотя может казаться сразу неочевидным, этот подход не может использовать нелинейные реактивные элементы, типа емкости затвор—исток FET. Во вторых, если схема имеет любые элементы обратной связи (например, емкость затвора или сопротивление источника в FET), напряжение возбуждения v содержит гармоники и IM, также как две входных частоты. Нелинейное устройство тогда генерирует гармоники и IM, и число частотных компонентов на выходе теоретически бесконечно. Анализ степенного ряда, однако, не может предсказывать частотные компоненты, имеющие порядок большее чем степень степенного ряда. Хотя анализ степенного ряда терпит неудачу в этой точке, анализ методом Вольтерра (который связан с анализом степенного ряда) решает эти проблемы легко. Фактически, расчет методом степенного ряда может рассматриваться частным случаем анализа методом ряда Вольтерра. Дополнительно, использование алгоритма, называемого методом нелинейного тока позволяет использовать метод Вольтерра в схеме, имеющей произвольную топологию.

Ряд Вольтерра может использоваться, чтобы записать передаточную функцию (называемую нелинейной передаточной функцией) слабо нелинейного устройства. Анализ методом рядов Вольтерра подобен во многом анализу с помощью степенного ряда. MWO не вычисляет передаточные функции явно, но вместо этого использует эквивалентный процесс расчета, основанный на методе нелинейных токов, чтобы вычислить напряжения в частотах IM непосредственно. В методе рядов Вольтерра нелинейность в каждом элементе нелинейного устройства преобразованы в источники тока. Токи в этих источниках — нелинейные функции напряжений схемы и таким образом имеют частотные составляющие на частотах взаимной модуляции. Хотя токи в этих источниках получены через нелинейные уравнения, токи на каждой частоте IM линейны и обрабатываются как обычные линейные возбуждения. Поскольку нелинейность схемы представлена источниками, сама схема считается линейной и только преобразует с определенным коэффициентом передачи вклад источников нелинейных токов в выходную характеристику. Таким образом, метод нелинейных токов преобразует нелинейность схемы к набору «нелинейных токов» и линейную электронную схему. Нелинейные вычисления используют только в расчете токов, а не в анализе схемы.

Чтобы найти выходную мощность данного продукта интермодуляции, необходимо выполнить линейные расчеты продуктов более низкого порядка, смешивающего частоты. Например, чтобы найти выходное напряжение на частоте $2f_2 - f_1$, когда частоты возбуждения f_1 и f_2, программа сначала выполняет линейный анализ, чтобы определить узловые напряжения на частотах f_1 и f_2. Затем программа вычисляет «нелинейные токи» второго порядка на частотах продуктов интермодуляции $f_2 - f_1$ и $2f_2$, и снова выполняет линейный анализ всей схемы, чтобы получить напряжения на этих частотах. Наконец, она вычисляет нелинейные токи на $2f_2 - f_1$ и снова решает уравнения схемы, чтобы получить выходное напряжение (и следовательно мощность) на этой частоте. Полный процесс требует пяти исследо-

ваний линейной схемы, так что полный нелинейный анализ требует только приблизительно в пять раз большее время, чем выполнение линейного анализа.

MWO использует специальный алгоритмы, которые выбирают только компоненты IM, которые дают вклад в продукт IM, представляющий интерес и генерируют нелинейные токи с максимальной эффективностью. Он включает большое разнообразие элементов линейной радиоэлектронной схемы и решает набор узловых уравнений с помощью устойчивого линейного решающего устройства разреженной системы уравнений. Решение быстрое, устойчивое и позволяет использовать численную оптимизацию даже очень больших цепей.

7.6.2. Моделирование схемы и приборов в методе рядов Вольтерра

Преимущество анализа методом рядов Вольтерра состоит в том, что он использует очень простое моделирование нелинейных СВЧ цепей. Линейные элементы схемы (резисторы, конденсаторы, линии передачи, и т. д.) моделируются аналогично линейной программе. Нелинейности смоделированы как нелинейные элементы цепи с сосредоточенными постоянными.

Нелинейные проводимости и управляемые источники смоделированы с помощью функции $i(v)$ для приращения; они — разложения в ряд Тейлора их больше сигнальных I/V характеристик вокруг точек смещения (уравнения (7.11) и (7.12)). Например, нелинейная проводимость может иметь I/V характеристику для приращения в виде

$$i(v) = 0.0033v - 0.0012v^2 + 0.0002v^3, \tag{7.23}$$

где v — малосигнальное отклонение от напряжения смещения DC (то есть, часть AC напряжения на элементе) и i — отклонение от тока смещения DC (часть AC тока). Следовательно, параметры нелинейной проводимости

$$G1 = 0.0033, \quad G2 = -0.0012, \quad G3 = 0.002.$$

Это значения, которые вы должны ввести в диалоговое окно элемента. Заметьте, что первый член в этом случае 0.0033, является линейной проводимостью элемента. Таким образом, ввод

$$G1 = 0.0033, \quad G2 = 0.0, \quad G3 = 0.0$$

эквивалентен линейной проводимости с 303.03 омным резистором.

Емкости смоделированы в MWO разложениями в ряд Тейлора их больше сигнальных Q/V характеристик (заряд/напряжения) (уравнения (7.17) и (7.18)), а не C/V характеристик (емкости/напряжения). Например, характеристика конденсатора $q(v)$, выраженная как ряд Тейлора, имеет вид

$$q(v) = 1 \times 10^{-12}v + 2.0 \times 10^{-13}v^2 + 3.0 \times 10^{-14}v^3, \tag{7.24}$$

откуда параметры элемента

$$Q1 = 1.0 \times 10^{-12}, \quad Q2 = 2.0 \times 10^{-13}, \quad Q3 = 3.0 \times 10^{-14}.$$

Заметим, что первый член ($1.0E^{-12}$) — линейная составляющая емкости.

Измерить проводимость и емкость часто проще, чем малосигнальный ток и заряд. Поэтому, самый простой способ определить коэффициенты степенного ряда состоит в том, чтобы рассчитать $g(v)$ или $c(v)$ характеристики и выразить их как степенной ряд. Представления ряда $i(v)$ и $q(v)$ могут тогда быть найдены как

$$c1 = \gamma_0 \quad G1 = \varsigma_0,$$

$$c2 = \gamma_1 / 2 \quad G2 = \varsigma_1 / 2,$$

$$c3 = \gamma_2 / 3 \quad G3 = \varsigma_1 / 2,$$

где γ_0, γ_1, и γ_2 — постоянные коэффициенты первой и второй степени степенного ряда $C(v)$; точно так же ζ_0, ζ_1 и ζ_2 — $g(v)$ коэффициенты.

Хотя измерение этих характеристик по сути простое, оно может быть непросто практически. Проблема состоит в том, что много нелинейных проводимостей, особенно у арсенид-галиевых полевых транзисторов, являются частотночувствительными. Таким образом, они должны быть измерены на высокой частоте, а не постоянном токе. Другая проблема состоит в том, что, хотя они являются часто очень небольшими, но могут давать существенный вклад в генерирование продуктов интермодуляции. При небольшой ошибке в расчете параметра можно получить значительное отклонение в нелинейных характеристиках, и следовательно рассчитанные данные могут быть нереальными. Наконец, процесс оптимизации методом наименьшего квадрата, сглаживание и интерполирование данных к полиномиальной функции усиливает степень использования неточной системы уравнений и таким образом может быть очень чувствителен к ошибкам и выбору параметров. Методы усреднения данных могут быть очень полезны в уменьшении некоторых из этих ошибок. Также, измеряя G_m на низких частотах (где паразитные емкости незначительны), можно получить лучшие результаты. В литературе [4, 5] описываются методы для определения $i(v)$ полевого транзистора на арсениде галлия, когда нелинейность очень слабая.

7.6.3. Использование моделей рядов Вольтерра

MWO включает ряд специальных Вольтерровских моделей: источники управляемого тока, нелинейные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т. д. Имеется также полная модель полевого транзистора FET, диод, и модели BJT. Они предназначены прежде всего для использования в анализе методом рядов Вольтерра, хотя они могут также использоваться в анализе методом гармонического баланса.

Схемы, использующие только модели для анализа методом рядов Вольтерра не должны иметь смещение по DC. Так как коэффициенты ряда Тейлора определены в конкретной точке смещения DC, это смещение подразумевается в модели. Фактически, используя смещение DC вероятно вызовет ошибочные результаты.

Использование моделей, предназначенных для метода гармонического баланса, может быть реализовано и при использовании анализа методом рядов Вольтерра. Некоторые модели нельзя использовать в методе рядов Вольтерра. Правило для получения точных мало-сигнальных результатов IM с любой моделью очень просто: чтобы получить точный анализ IM, модель должен точно воспроизвести n-производные ее I/V или C/V характеристик. Много моделей для метода гармонического баланса не делают этого. Например, модели Curtice, Statz, и SPICE модели МОП-транзисторов вообще то не точны. Однако, когда модели должным об-

разом синтезированы и приближены к экспериментальным данным, результирующие модели диода SPICE и модели FET весьма точны.

Эти модели для приращений, в том смысле, что они описывают нелинейные зависимости при маленьких отклонениях от точки смещения DC. Таким образом, они полезны для определения интермодуляционных искажений малого уровня при малых отклонениях от смещения (даже если напряжение смещения или ток равны нулю), используемые или в методе Вольтерра или гармоническом балансе.

VGNL: Нелинейный резистор

VGNL — простой нелинейный резистор, характеристика I/V которого описаны рядом Тейлора относительно его напряжения смещения DC. Эта модель хорошо работает и в методе Вольтерра и в малосигнальных вычислениях IM методом гармонического баланса. I/V характеристика

$$I(v) = \frac{dI(V)}{dV}\Big|_{v=v_0} V + \frac{1}{2}\frac{d^2I(V)}{dV^2}\Big|_{v=v_0} V^2 + \frac{1}{6}\frac{d^3I(V)}{dV^3}\Big|_{v=v_0} V^3 + \ldots \quad (7.25)$$

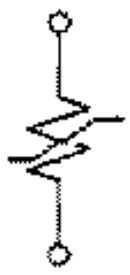


Рис. 7.45. Символ нелинейного резистора

может быть выражена как

$$i(v) = g_1 v + g_2 v^2 + g_3 v^3 + \ldots, \quad (7.26)$$

где коэффициенты g_n — параметры модели нелинейного резистора.

Параметры g_n определяются для конкретного смещения DC и зависят от него. А сама цепь смещения DC не включается в схему.

VCNL: Нелинейная емкость

VCNL — простой нелинейный конденсатор, Q/V характеристика которого описана рядом Тейлора относительно около напряжения смещения DC. Эта модель подходит для использования с Вольтерровским анализом или с малосигнальными вычислениями IM методом гармонического баланса. Q/V характеристика

$$q(v) = \frac{dQ(V)}{dV}\Big|_{v=v_0} V + \frac{1}{2}\frac{d^2Q(V)}{dV^2}\Big|_{v=v_0} V^2 + \frac{1}{6}\frac{d^3Q(V)}{dV^3}\Big|_{v=v_0} V^3 + \ldots \quad (7.27)$$



Рис. 7.46. Нелинейная емкость

может быть выражена как

$$q(v) = q_1 v + q_2 v^2 + q_3 v^3 + \ldots, \quad (7.28)$$

где коэффициенты q_n — параметры модели нелинейной емкости. Так как q_n оценены для конкретного напряжения смещения DC, смещение DC свойственно модели. Но цепь смещения DC не должна быть включена в схему.

VLNL: Нелинейная катушка индуктивности

VLNL — простая нелинейная катушка индуктивности, Ф/I характеристика которой описана рядом Тейлора относительно его тока смещения DC. Модель подходит для использования с Вольтерровским анализом или с малосигнальными вычислениями IM методом гармонического баланса.

Зависимость между потоком и током Φ/I описывается формулой

$$\phi(v) = \frac{d\Phi(V)}{dV}\Big|_{v=v_0} V + \frac{1}{2}\frac{d^2\Phi(V)}{dV^2}\Big|_{v=v_0} V^2 + \frac{1}{6}\frac{d^3\Phi(V)}{dV^3}\Big|_{v=v_0} V^3 + \ldots, \qquad (7.29)$$

которая может быть выражена как

$$\phi(v) = \phi_1 i + \phi_2 i^2 + \phi_3 i^3 + \ldots, \qquad (7.30)$$

Коэффициенты ϕ_n — параметры модели нелинейной индуктивности. Поскольку ϕ_n оценены для конкретного тока смещения DC, смещение DC учитывается в модели. Но смещение DC не должно быть включено в схему.

VVCN: Нелинейный источник тока, управляемый напряжением

VVCN — нелинейный источник тока управляемый напряжением, характеристика I/V которого описана рядом Тейлора относительно напряжения смещения DC. Эту модель можно использовать и в методе рядов Вольтерра или в вычислениях 1M методом гармонического баланса. I/V характеристика

$$i(v) = \frac{dI(V)}{dV}\Big|_{V=V_0} V + \frac{1}{2}\frac{d^2I(V)}{dV^2}\Big|_{V=V_0} V^2 + \frac{1}{6}\frac{d^3I(V)}{dV^3}\Big|_{V=V_0} V^3 + \ldots, \qquad (7.31)$$

может быть выражена как

$$i(v) = g_1 v + g_2 v^2 + g_3 v^3 + \ldots, \qquad (7.32)$$

где i — ток источника; v — управляющее напряжение. Коэффициенты g_n — параметры модели. Так как g_n оценены при определенном напряжении смещения DC, смещение DC свойственно модели. Смещение DC не должно быть включено в схему.

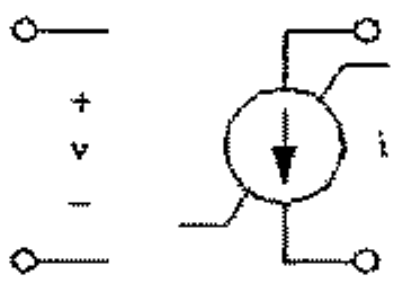


Рис. 7.47.Схема нелинейного источника тока, управляемого напряжением

VDIODE1: Нелинейный диод с барьером Шоттки

VDIODE1 — нелинейная модель для малых приращений диода с барьером Шоттки эквивалентна модели SDIODE, но предназначена для анализа методом рядов Вольтерра и малосигнального анализа 1M методом гармонического баланса. Напряжение на переходе VDD задается пользователем и программа рассчитывает коэффициенты ряда Тейлора для резистивных и емкостных параметров перехода.

VCJCN: Емкостной переход с барьером Шоттки

VCJCN — просто емкостная часть модели диода VDIODE1, см. уравнения (7.27), (7.28).

VJCN: Резистивный переход с барьером Шоттки

VJCN — резистивная часть VDIODE1, см. уравнения (7.25), (7.26).

VFET1: Нелинейная модель полевого транзистора

Емкость «затвор-исток» моделируется элементом VCJCN. Нелинейный источник тока, управляемый током смоделирован элементом VVCN, а нелинейное сопротивление «исток-сток» элементом VGNL.

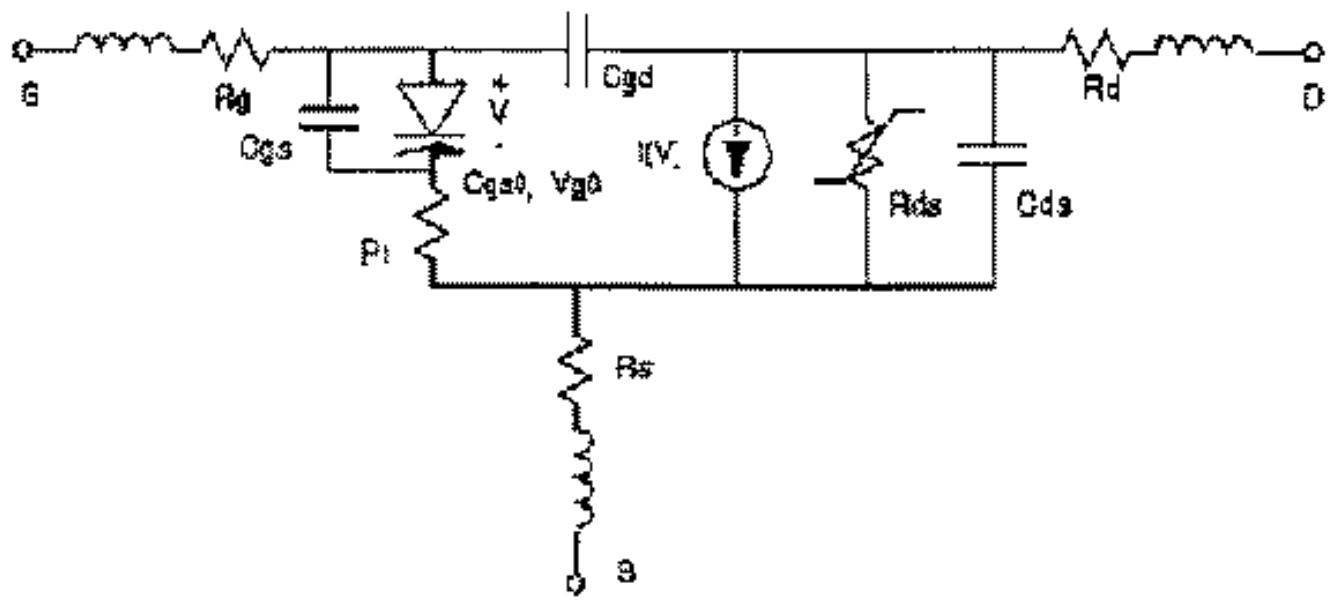


Рис. 7.48 Нелинейная модель полевого транзистора для приращений

VBJT1: Нелинейная модель биполярного транзистора

Источник управляемого тока нелинейный, и учитывает нелинейную зависимость малосигнального усиления тока. Смещение по постоянному току определяет ток коллектора. Эта величина используется, для определения коэффициенты ряда Тейлора диода перехода и нелинейной емкости.

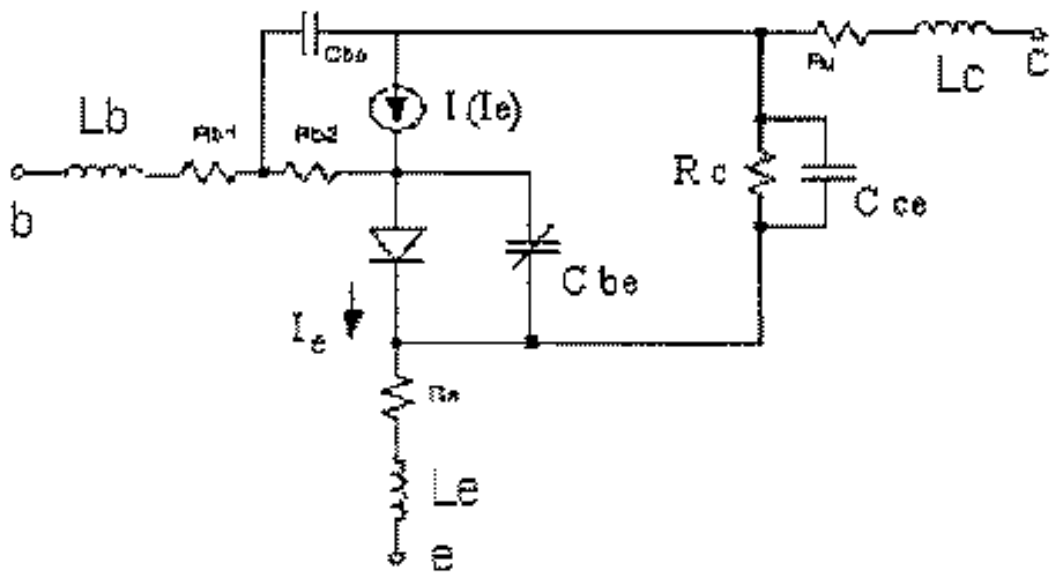


Рис. 7.49. Нелинейная модель биполярного транзистора, используемая в методе рядов Вольтерра

7.7. Каталог нелинейных характеристик

Нелинейные характеристики получаются на основании напряжений, токов, мощностей или ряда других параметров, являющихся основными величинами для последующего расчета нелинейных параметров. Сначала проводится анализ схемы, рассчитываются напряжения, токи и мощности на всех элементах схемы (рис. 7.50), а затем находятся комбинации их, составляющие характеристики и параметры.

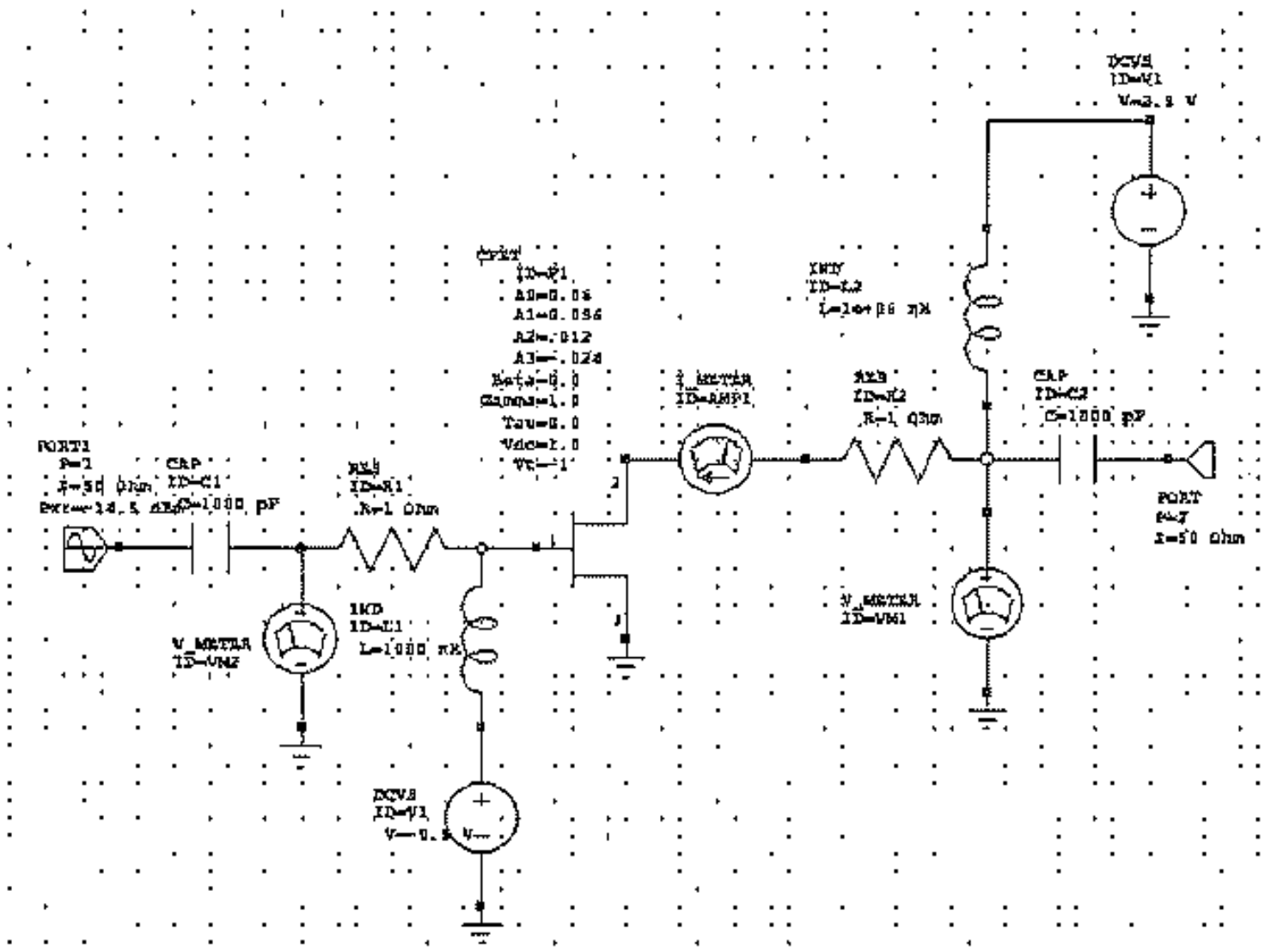


Рис. 7.50. Включение измерительных приборов в схеме усилителя

Для того чтобы рассчитать напряжения на узлах и токи в ветвях имеется ряд приборов, с указанными идентификаторами ID: вольтметр, амперметр, измеритель мощности. Приборы включаются в схему аналогично тому, как это выполняется в эксперименте. Поэтому термин «расчет» часто ассоциируется с термином «измерение».

7.7.1. Приборы, устанавливаемые в схеме для измерения нелинейных характеристик

Вольтметр

Вольтметры (рис. 7.51) включаются в схему, чтобы указать напряжение, которое необходимо рассчитать (или измерить, если следовать лабораторной традиции). Параметр ID вольтметра используется для его опознавания.

Напряжение измеряется между положительной и отрицательной клеммами вольтметра. Отрицательная клемма вольтметра обычно заземлена.

Напряжение может также измеряться на портах схемы. Входные порты состоят из идеального источника напряжения, включенного последовательно с импедансом источника. Когда напряжение измеряется в порте генератора, оно будет измеряться на зажимах комплексного сопротивления, которое стоит последовательно с идеальным источником напряжения (пунктирная линия на рис. 7.52).

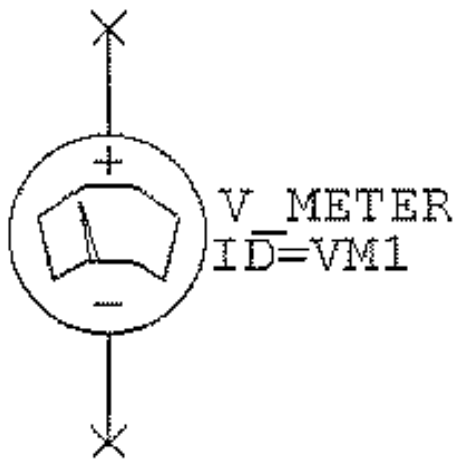


Рис. 7.51. Символ вольтметра

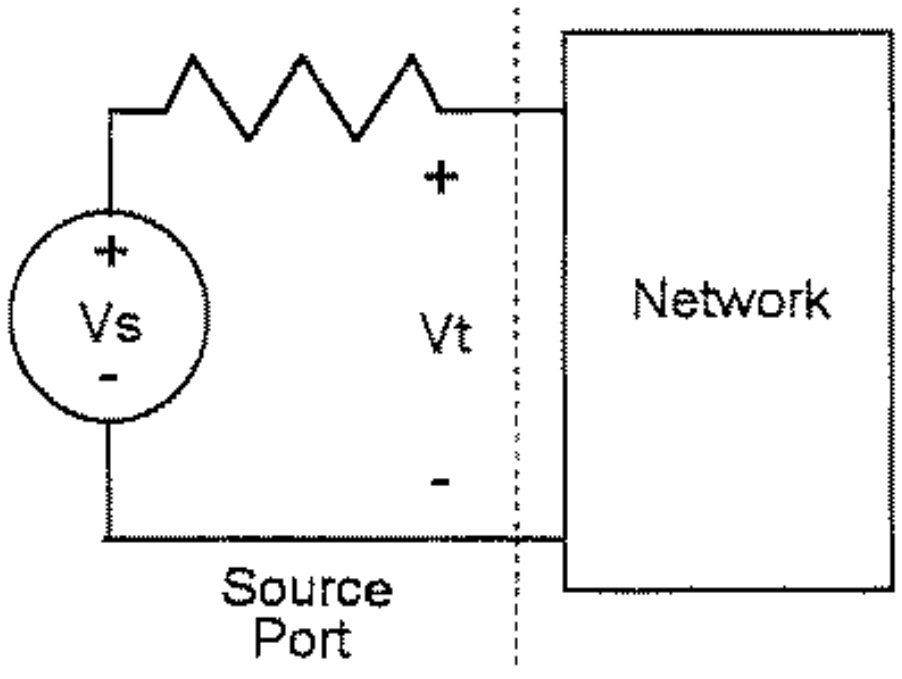


Рис. 7.52. Входной порт как измеритель напряжения

Для портов нагрузки измеряется напряжение на полном сопротивлении нагрузки.

Измерение тока

Измерители тока (амперметры) помещаются в схему, чтобы указать ток, который необходимо измерить. Амперметр должен быть помещен последовательно с элементом, через который необходимо рассчитать (измерить) ток. Параметр ID амперметра используется для его опознания. Положительное направление измеряемого тока совпадает со стрелкой, указанной на символе амперметра (рис. 7.53).

Ток может также измеряться в портах схемы. Положительное направление тока определено, как показано на рис. 7.54 (заметим, что это направление противоположно тому, которое используется в общей теории четырехполюсников при определении коэффициентов передачи).

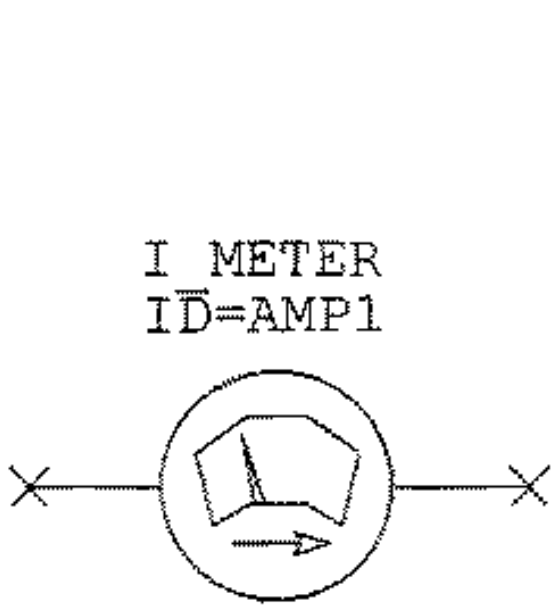


Рис. 7.53. Символ амперметра

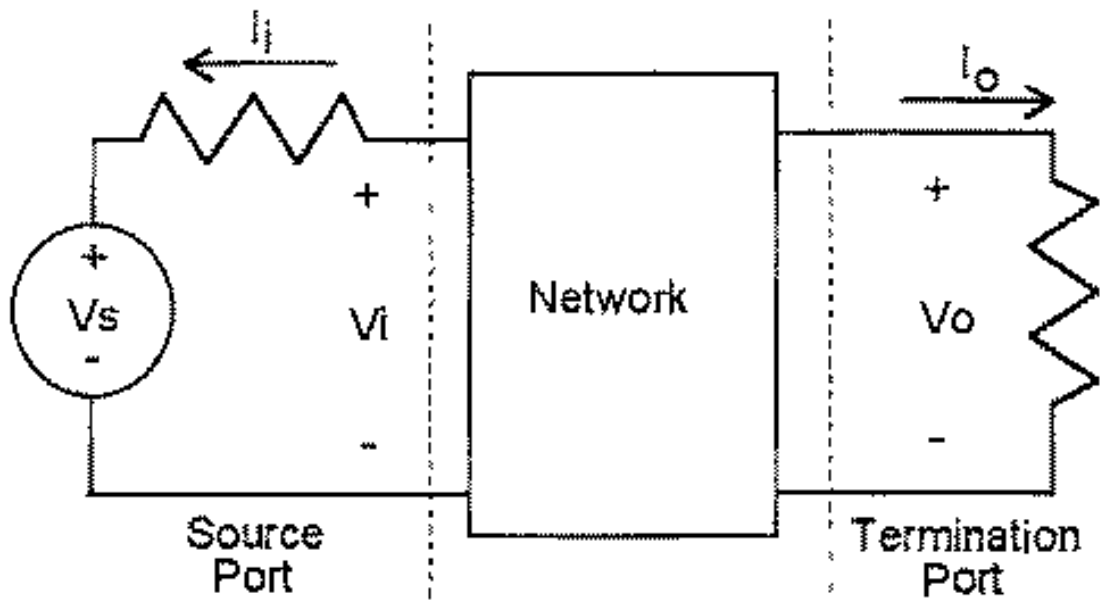


Рис. 7.54. Измерение напряжений и токов четырехполюсника

Измерение мощности

Измерители мощности помещаются в схему для измерения мощности, при этом они измеряют и напряжение, и ток. Путь тока измерителя мощности должен быть направлен последовательно с элементом, в котором измеряется мощность. Напряжение измеряется между клеммой амперметра и отрицательной клеммой измерителя мощности (рис. 7.55).

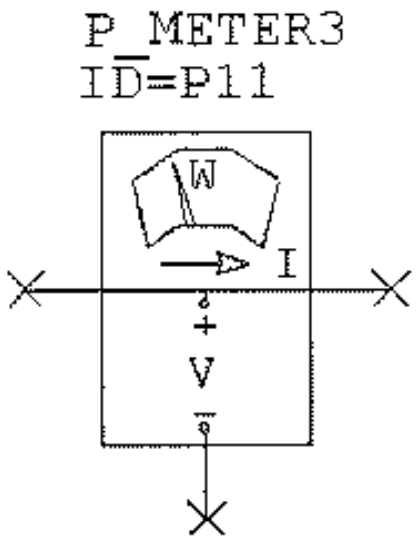


Рис. 7.55. Символ измерителя мощности

Мощность может также измеряться в портах схемы. Положительный ток определен как ток, втекающий в порт, как показано на рис. 7.55.

Перечень характеристик, рассчитываемых в нелинейном анализе, приведен в табл. 7.1.

Таблица 7.1. Нелинейные характеристики

Характеристики нелинейного тока	
IVCURVE	Вольт-амперные характеристики I—V
IVDLL	Динамическая нагрузочная прямая I—V
Icomp	Гармоника тока (частотная развертка)
Icomp2	Гармоника тока (двухсигнальное возбуждение) (частотная развертка)
Icomp2SP	Гармоника тока (двухсигнальное возбуждение) (развертка по мощности)
IcompSP	Гармоника тока (развертка по мощности)
Iharm	Гармоника тока в частотной области
Itime	Ток во временной области
IVDeltasw	Вольт-амперная характеристики при сканировании тока
IVDeltast	Вольт-амперная характеристики при ступенчатом изменении тока
IVCurve2	Вольт-амперные характеристики
Характеристики передачи	
Gcomp	Большесигнальный коэффициент отражения (в диапазоне частот)
Gcomp2	Большесигнальный коэффициент отражения (двухсигнальное возбуждение, вариация по частоте)
Gcomp2SP	Большесигнальный коэффициент отражения (двухсигнальное возбуждение, вариация по мощности)
GcompSP	Большесигнальный коэффициент отражения (вариация по мощности)
Ycomp	Большесигнальная полная проводимость (вариация по частоте)
Ycomp2	Большесигнальная полная проводимость (двухсигнальное возбуждение, вариация по частоте)
Ycomp2SP	Большесигнальная полная проводимость (двухсигнальное возбуждение, вариация по мощности)
YcompSP	Большесигнальная полная проводимость (вариация по мощности)
Zcomp	Большесигнальное полное сопротивление (вариация по частоте)

Продолжение табл. 7.1

Zcomp2	Большесигнальное полное сопротивление (двухсигнальное возбуждение, вариация по частоте)
Zcomp2SP	Большесигнальное полное сопротивление (двухсигнальное возбуждение, вариация по мощности)
ZcompSP	Большесигнальное полное сопротивление (вариация мощности)
Характеристики нелинейной мощности	
DCRF	Эффективность (кпд) DC по ВЧ (%, вариация частоты)
DCRF_SP	Эффективность (кпд) DC по ВЧ (%, вариация мощности)
IM1_SP	Фундаментальный (основной) сигнал (dBm) при двухсигнальном возбуждениим (вариация мощности)
IM3_SP	Максимальный IM продукт 3-го порядка (dBm) (вариация мощности)
IP_1	Точка пересечения (с одним возбуждающим сигналом)
IP_2	Точка пересечения двухсигнальная
LSSnm	Большесигнальный S-параметр (вариация частоты)
LSSnm2	Большесигнальные S-параметры (двухсигнальное возбуждение, вариация частоты)
LSSnm2SP	Большесигнальные S-параметры (двухсигнальное возбуждение, вариация мощности)
LSSnm3SP	Большесигнальные S-параметры (трехсигнальное возбуждение, вариация мощности)
LSSnmSP	Большесигнальные S-параметры при односигнальном возбуждении (вариация мощности)
PAE	Эффективность по добавляемой мощности (кпд, %, вариация частоты)
PAE_SP	Эффективность по добавляемой мощности (%, вариация мощности)
PGAIN	Коэффициент усиления мощности на фундаментальной частоте (вариация частоты)
PT	Общая мощность (вариация частоты)
PTSP	Общая мощность (вариация мощности)
Pcomp	Мощность гармонической составляющей (вариация частоты)
Pcomp2	Мощность гармонической составляющей (двухсигнальное возбуждение, вариация частоты)
Pcomp2SP	Мощность гармонической составляющей (dBm) (двухсигнальное возбуждение, вариация мощности)
PcompSP	Мощность гармоники (dBm) (вариация мощности)
Pcomp3SP	Мощность гармонической составляющей (dBm) (трехсигнальное возбуждение, вариация мощности)
Pharm	Мощность гармоник в частотной области
Ptime	Мгновенная мощность
Характеристики нелинейных напряжений	
Vcomp	Напряжение гармоники (вариация частоты)
Vcomp2	Напряжение гармоники (двухсигнальное возбуждение, вариация частоты)
Vcomp2SP	Напряжение гармоники (двухсигнальное возбуждение, вариация мощности)
VcompSP	Напряжение гармоники (развертка мощности)
Vharm	Напряжение в частотной области (спектр по напряжению)
Vtime	Напряжение во временной области

7.7.2. Характеристики нелинейного тока

IVCURVE — вольт-амперные I—V характеристики

Расчет вольт-амперных характеристик активных элементов — это специальный расчет, который выполняется элементом IVCURVE в схеме. Элемент IVCURVE используется точно так же, как реальное измерительное устройство для сканирования напряжения и измерения вольт-амперных характеристик. Измерительный прибор IVCURVE имеет две клеммы, одна для свипируемого напряжения, а другая для напряжения изменяющегося ступенчато. Символ схемы для прибора IVCURVE показывается на рис. 7.56.

Это измерение управляется параметрами настройки, связанными с элементом IVCURVE. Для подробной информации относительно параметров настройки, см. документацию для элемента IVCURVE.

Параметры измерения:

P1 — название источника данных (подсхема с 0—1000 портами).

В диалоге «Add Masurement» и «Graf1», в окне выбора подсхемы можно выбрать имя подсхемы.

В результате этого расчета пользователь получает вольт-амперные характеристики по постоянному току. Ось X для этого расчета — напряжение. Этот график может быть выведен только на прямоугольную систему координат (рис. 7.57).

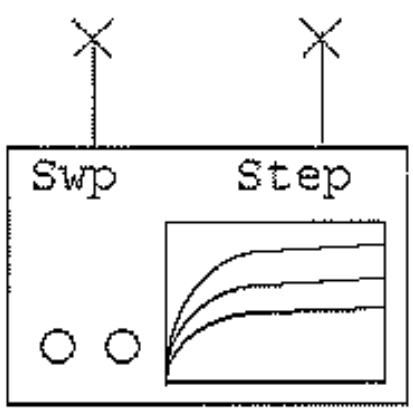


Рис. 7.56. Символ прибора для расчета вольт-амперных характеристик

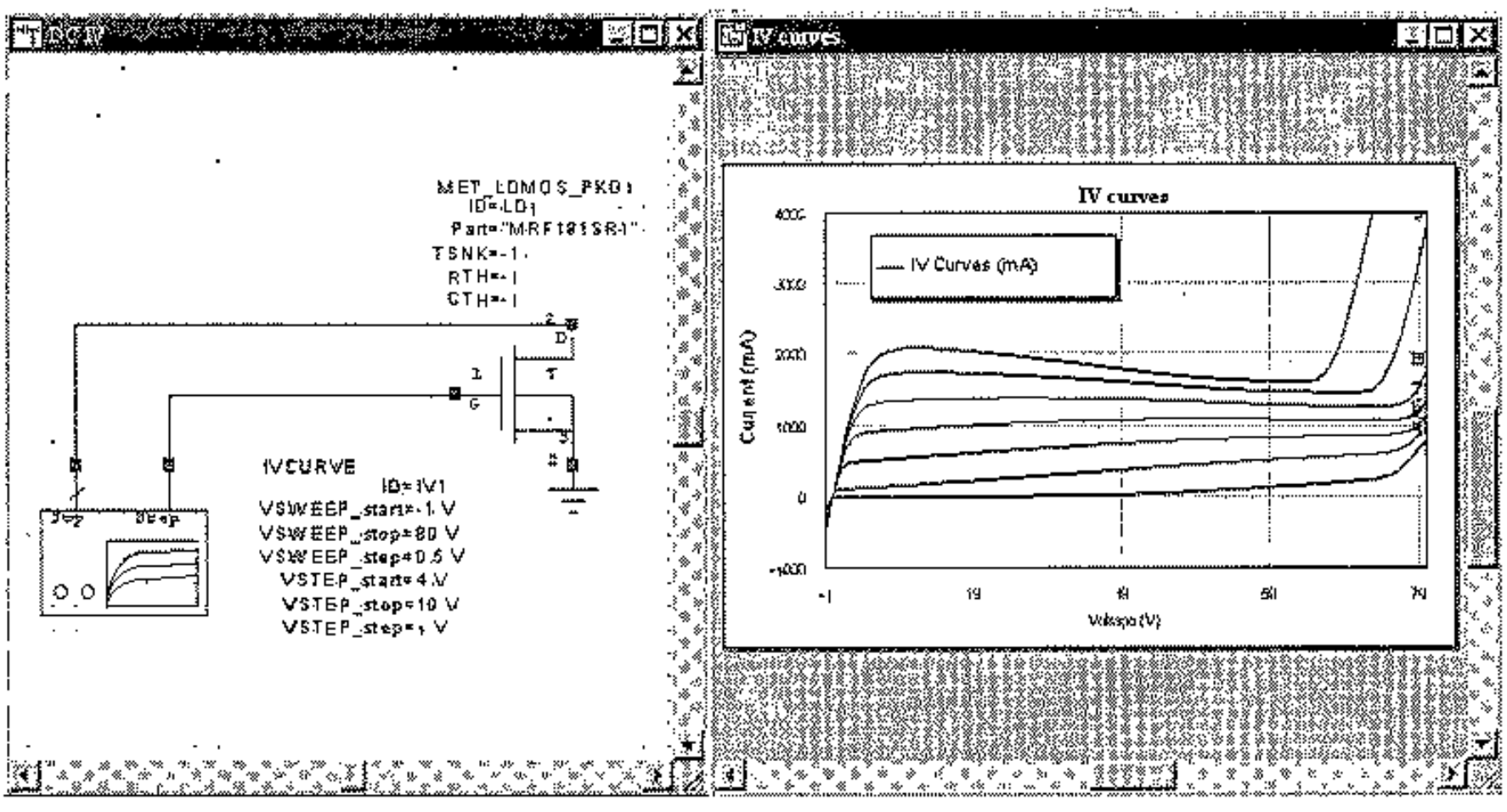


Рис. 7.57. Пример расчета и вывода семейства вольт-амперных характеристик подсхемы, в качестве которой рассматривается биполярный транзистор (слева)

Динамическая нагрузочная линия I—V IVDLL

Этот расчет выводит динамическую нагрузочную линию на прямоугольную вольт-амперная характеристику. Обычно расчет нагрузочной линии используется вместе с расчетом IVCURVE, как показывается на рис. 7.58.

Вольт-амперные характеристики I—V будут рассчитаны схемой, составленной из элемента IVCURVE и активного прибора. Расчет динамической нагрузочной линии будет сделан, используя схему всего проекта (например, схему усилителя мощности), который использует этот же самый прибор. Расчет IVDLL требует спецификации измерителей и портов, используемых для выбора напряжения и тока (рис. 7.59). Помещая характеристику IVCURVE и характеристику IVDLL на

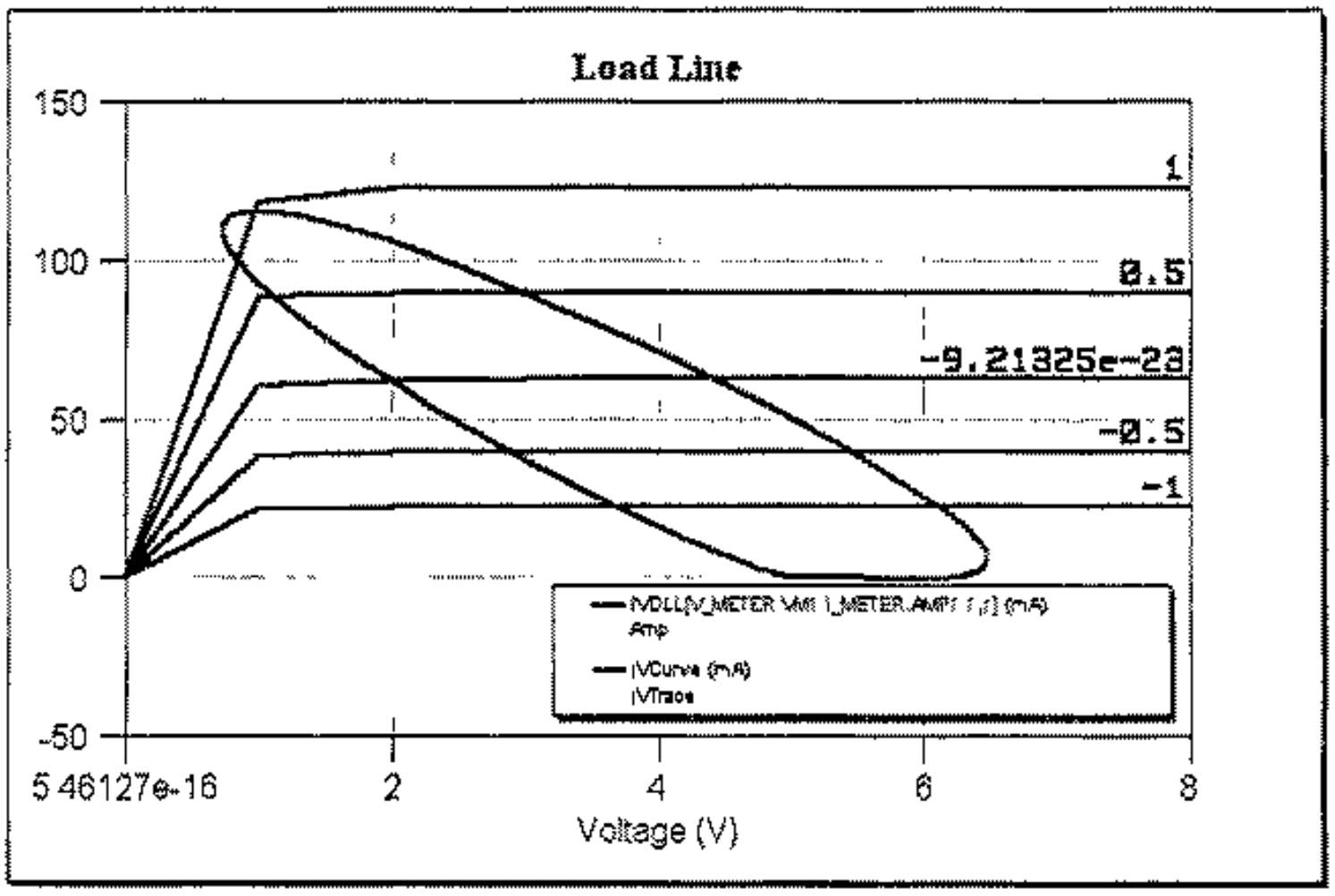


Рис. 7.58. Нагрузочная линия на выходных вольт-амперных характеристиках

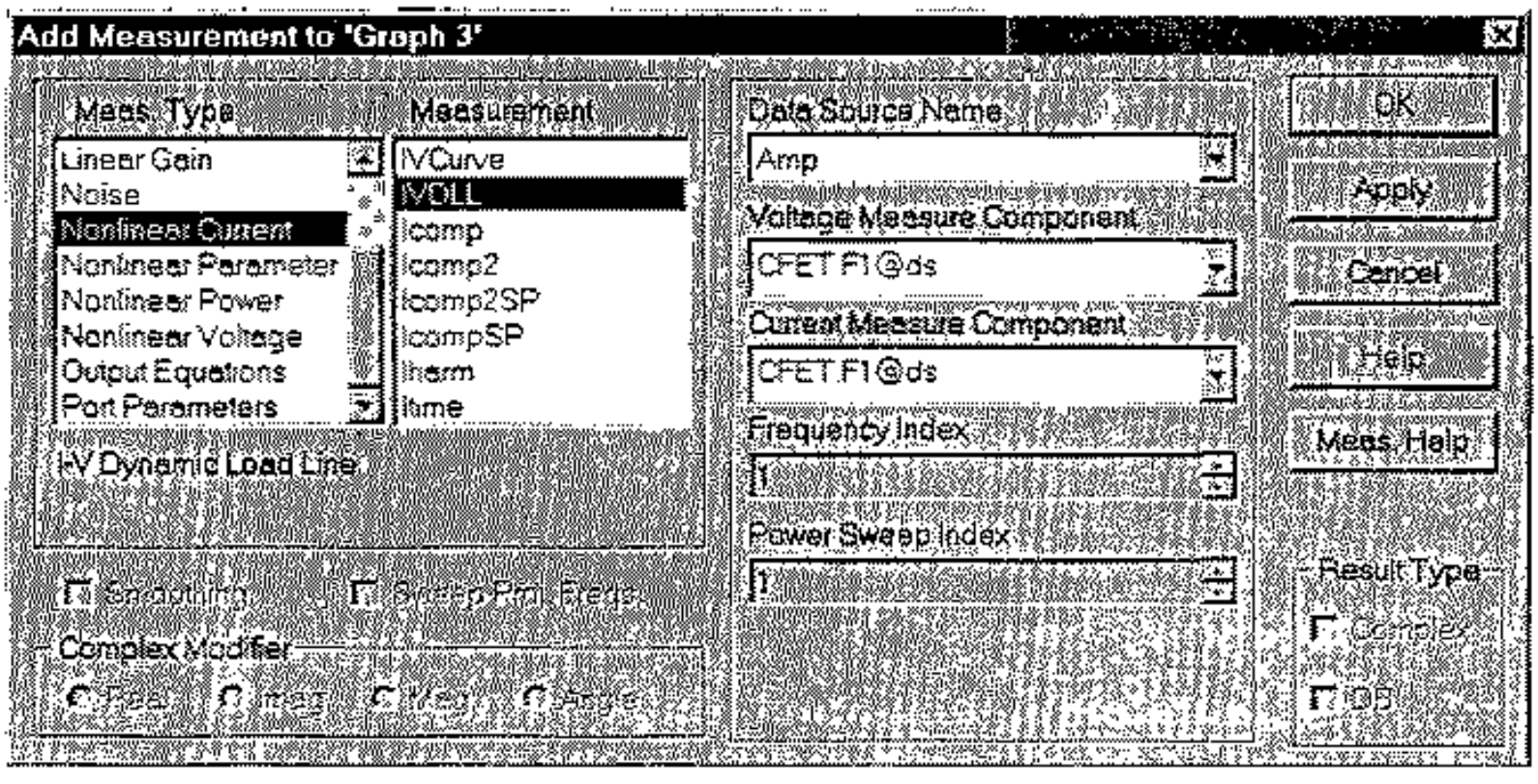


Рис. 7.59. Установка параметров для расчета нагрузочной линии

одном графике, показывается связь между статическими и динамическими I—V характеристиками.

Параметры расчета:

P1 — имя источника данных (подсхема от 0 до 1000 портов);

P2 — компонента рассчитываемого напряжения (напряжение на этом элементе);

P3 — измеряемый ток (ток через элемент);

P4 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000);

P5 — индекс мощности (числа от 1 до 1000).

По оси Y в этих расчетах всегда откладывается реальная величина в единицах тока. Ось X при выводе этой характеристики откладывается в единицах напряжения. Поэтому расчет может быть показан только на прямоугольном графике.

Расчет вольт-амперных характеристик при сканировании данных (IV Delta)

Эта характеристика используется для расчета разницы между двумя вольт-амперными характеристиками: измеренной и полученной в результате моделирования. Эта разница рассчитывается как функция параметра изменяемого напряжения. При каждой величине сканирующего напряжения, рассчитывается величина различия между токами на каждой величине скачкообразно изменяемого напряжения. Это дает общую ошибку между двумя вольт-амперными характеристиками как целевую функцию во время оптимизации. Эти характеристики могут быть рассчитаны используя элемент IVCURVE, или они могут быть получены из файла, структура которого показана на рис. 7.60.

Отметим, что число точек свипирования и точек ступенчатого напряжения, используемые для расчета кривой IV, могут быть одним для обоих источников данных. Если выполняется сравнение рассчитываемых данных с моделируемыми, тогда моделирование будет выполняться в диапазоне свипирования через те же самые точки напряжения как измеряемые данные, а скачки напряжения должны быть установлены больше данных измерения.

Для расчета необходимо задать:

P1 — имя подсхемы с 0—1000 портами;

P2 — имя источника данных (подсхема с 0—1000 портами).

Расчет дает реальную величину. Ось x для этой характеристики — напряжение.

Эта характеристика выводится на прямоугольную систему координат или в таблицу.

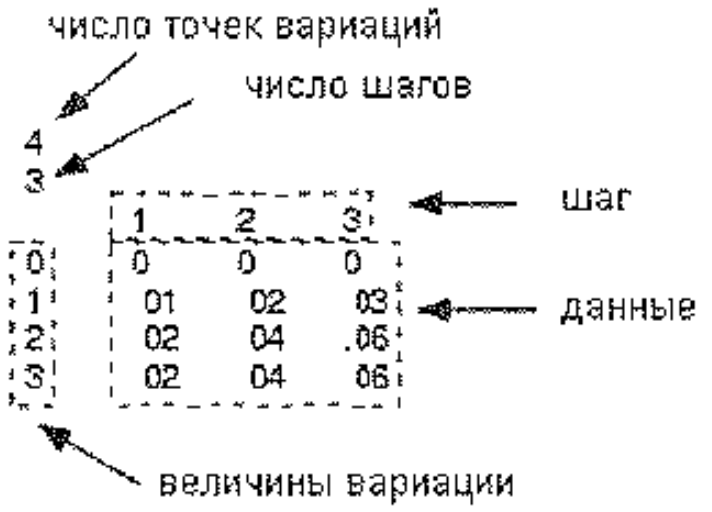


Рис 7 60. Вид файла используемого для управления расчетом вольт-амперных характеристик

Вольт-амперные I—V характеристики при ступенчатом изменении (IVCurve2)

Характеристика I—V — это специфическая характеристика, требуемая для представления одного элемента IVCURVE2 в схеме. Характеристика IVCURVE2 используется для характеристики элемента, используемого как реальный моделя-

тор вольт-амперных характеристик, как в реальном приборе. Это элемент IVCURVE2 имеет два набора данных, один для сканирующего напряжения, другой для ступенчато меняющегося напряжения. Рисунок схемы для элемента IVCURVE показан на рис. 7.57.

Этот расчет управляется при подстановке соответствующих элементов, связанных с IVCURVE2. Эта характеристика отличается от измерения с помощью IV-Curve в том, что показывает ток внутрь.

Эти расчеты дают вольт-амперные характеристики. Ось x измеряется в единицах напряжения. Эта характеристика может быть выведена только на прямоугольную систему координат (рис. 7.61).

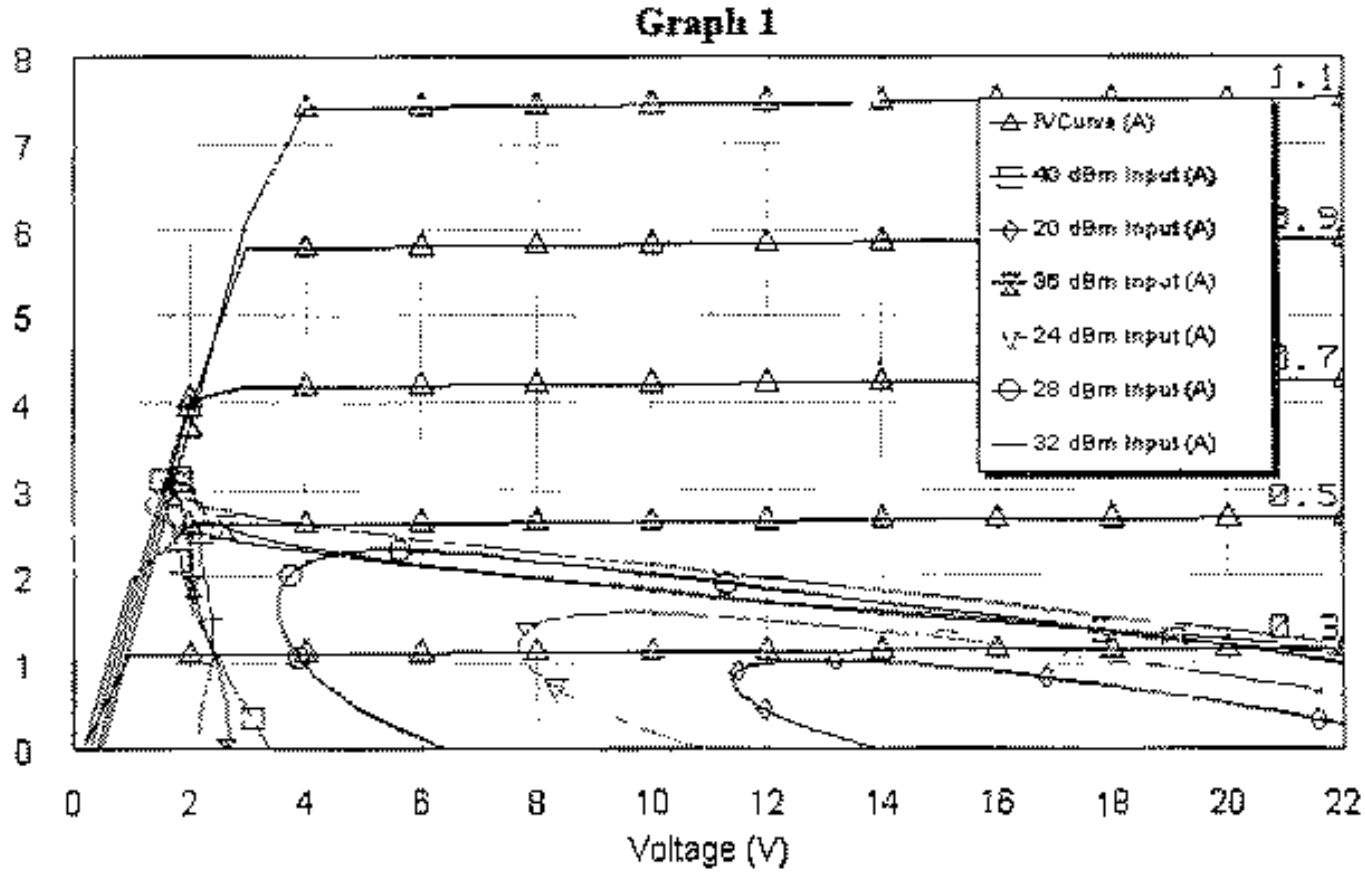


Рис. 7.61. Рассчитанные вольт-амперные характеристики и нагрузочные линии для усилителя мощности

Гармоническая составляющая тока Icomp

Эта характеристика — гармоническая составляющая нелинейного тока, измеряемого через амперметр или в порте. Величина тока является комплексной величиной составляющей тока на частоте гармоники (чтобы получить действующее значение (r.m.s), нужно разделить на $\sqrt{2}$). Чтобы получить постоянную составляющую тока DC, установите гармонический индекс равным нулю. Чтобы получить ток на фундаментальной частоте гармонический индекс устанавливается равным единице (рис. 7.62). Если на входном порту включено несколько источников, то можно рассчитать кратные гармоники.

P1 — имя источника данных (подсхема с от 0 до 1000 портов).

P2 — ID амперметра в схеме, через который рассчитывается ток.

P3 — гармонический индекс (целое число от 0 до 1024) выбирается согласно входной частоте, умноженной на этот индекс.

P4 — индекс мощности (целое число 1—1000) можно установить большим 1 только в том случае, если мы задаем другое значение мощности, равное заданной в схеме и умноженной на индекс.

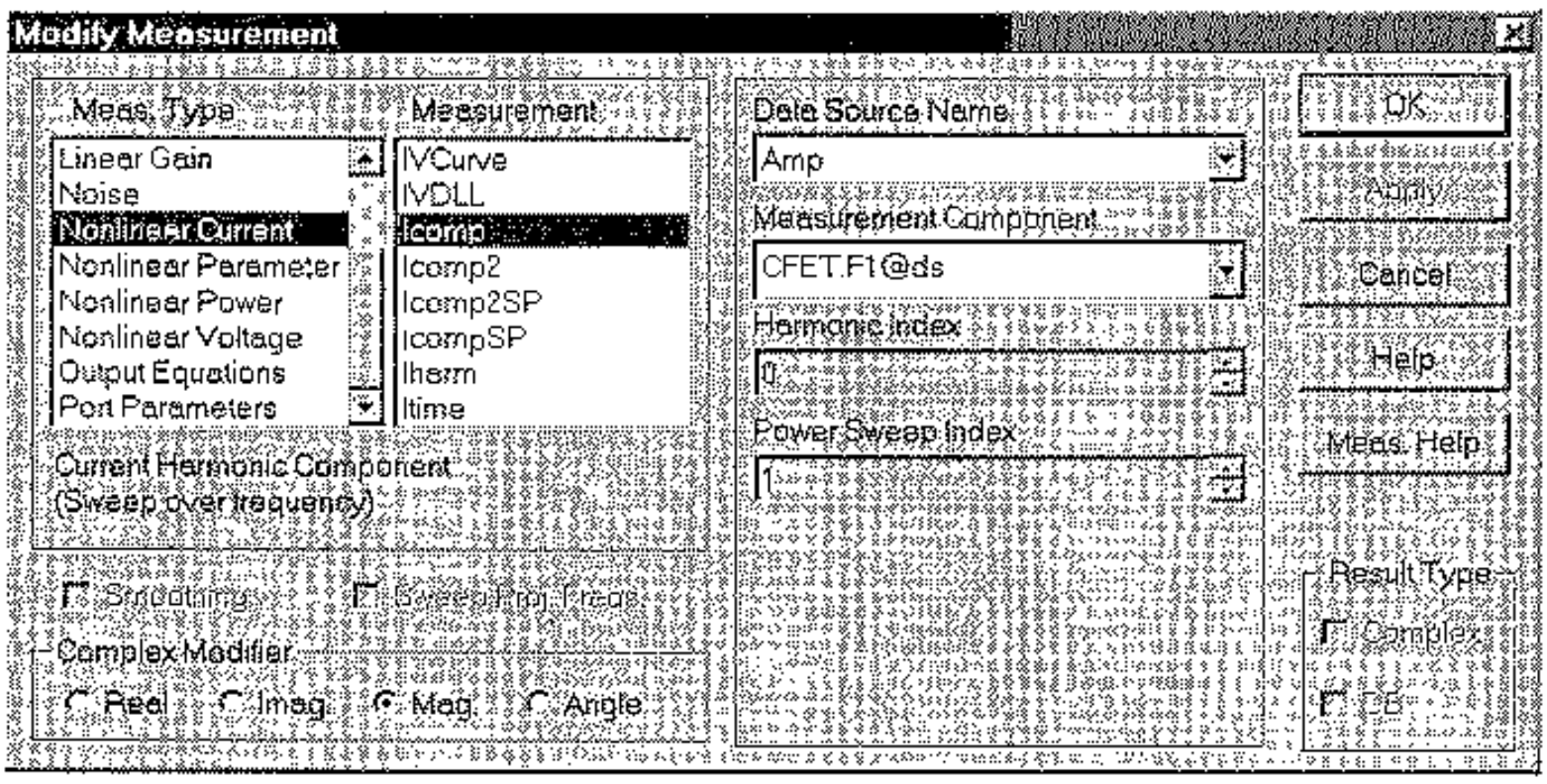


Рис. 7.62. Диалог расчета нелинейного тока

Частоты, показанные на оси X — изменяемые частоты фундаментальной составляющей, а не частотная величина составляющей непосредственно (если гармонический индекс не выбран равным единице). Этот расчет дает комплексное значение тока. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB». По оси X для этой характеристики откладывается частота.

Гармоническая составляющая тока (двухсигнальный режим) (частотная развертка) Icomp2

Этот расчет используется, чтобы получить гармоническую составляющую тока через амперметр или в порте. Величина тока возвращается как комплексная величина составляющей на частоте гармоники (чтобы получить r.m.s. величину, вы должна разделить рассчитанное значение на квадратный корень 2).

Чтобы получать DC ток, нужно задать гармонические индексы (0,0). Чтобы получить ток на фундаментальной частоте первой гармоники, используется индекс (1,0). Чтобы получить ток на основной частоте второй гармоники, используется индекс (0,1).

Параметры для расчета:

P1 — название источника данных (подсхема с 0—1000 портов);

P2 — составляющая измерения (ток через этот прибор);

P3 — гармонические индексы (h1, h2);

P4 — индекс изменения мощности (целое число от 1 до 1000).

Частоты, показанные на оси X — изменяемые частоты фундаментальной компоненты первого тона, а не частота сама по себе (если гармонический индекс не выбран равным единице).

Эта характеристика есть комплексная величина в единицах тока. Комплексное число может быть показано как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB. Ось X для этого расчета — частота.

Гармонический ток (двухсигнальное возбуждение) (развертка по мощности) Icomp2SP

Этот расчет используется, чтобы получить гармоническую компоненту тока, измеряемого амперметром или в порту. Величина тока возвращается как комплексная величина составляющей тока на частоте гармоники.

Чтобы получить ток DC, используйте гармонические индексы (0,0). Чтобы получить ток на фундаментальной частоте первой гармоники используйте индекс (1,0). Чтобы получить ток на фундаментальной частоте второй гармоники используют индекс (0,1).

Параметры расчета:

P1 — название источника данных (подсхема с 0—1000 портов);
P2 — составляющая измерения (ток через этот прибор);
P3 — гармонические индексы (h1, h2);
P4 — индекс охвата частоты (целое число от 1 до 1000).

Ось X для этой характеристики — мощность.

Эта характеристика — комплексная величина в единицах тока. Комплексное число может быть показано как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB».

Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут быть показаны на прямоугольной диаграмме. Эта характеристика может также быть выведена на полярную диаграмму или в таблицу (рис. 7.63).

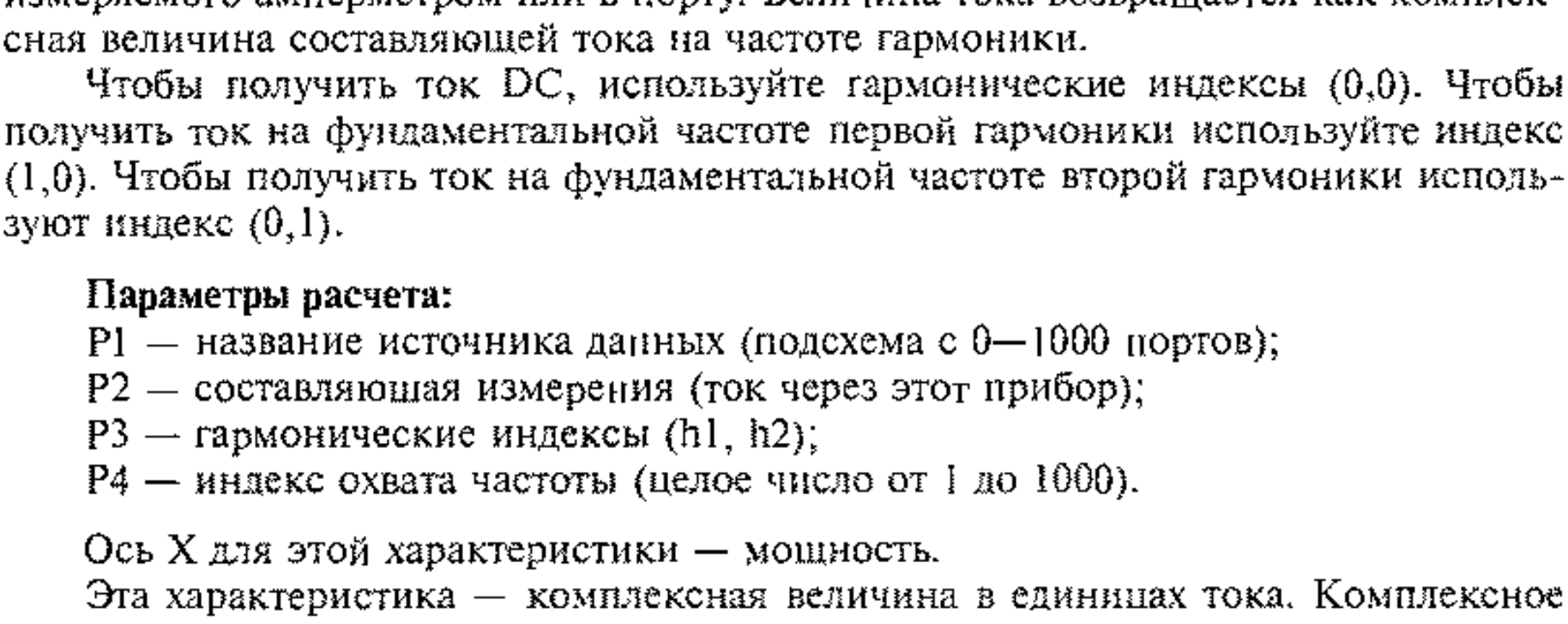


Рис. 7.63. Зависимость гармоники тока полевого транзистора от мощности сигнала на входе

Гармоника тока (развертка по мощности) IcompSP

Эта характеристика — гармоническая составляющая тока, измеряемого амперметром или в порте. Величина тока — комплексная величина составляющей тока на частоте гармоники. Чтобы получить постоянный ток, используйте гармонический индекс, равный нулю. Чтобы получить ток на фундаментальной частоте используют гармонический индекс 1.

Параметры расчета:
P1 — название источника данных (подсхема с 0—1000 портами);
P2 — рассчитываемая составляющая (имя амперметра);
P3 — индекс гармоники (целое число от 0 до 1024);
P4 — индекс изменения мощности (целое число от 1 до 1000).

Ось X для этого расчета находится в единицах мощности. Эта характеристика является комплексной величиной в единицах тока. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию dB. Ось X для этого измерения находится в мощности (dBm).

Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут быть показаны на прямоугольной диаграмме. Эта характеристика может также быть показана на полярной диаграмме или таблице.

Сглаживание не позволяется для этой характеристики. Этот расчет всегда использует только заданные частоты.

Ток в частотной области Iharm

Этот расчет используется, чтобы увидеть спектр тока через амперметр или в порте. Результат возвращается как спектр комплексных величин всех составляющих тока на каждой частоте гармоники (чтобы получить r.m.s., нужно разделить на квадратный корень 2).

Параметры:
P1 — название источника данных (подсхема с 0—1000 портов);
P2 — составляющая измерения (имя амперметра);
P3 — частотный индекс (целое число от 1 до 1000);
P4 — индекс изменения мощности (целое число от 1 до 1000).

Ось X для этого измерения — частота. Частоты на оси X соответствуют гармоникам спектра.

Эта характеристика — комплексная величина в единицах тока. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB.

Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут быть показаны на прямоугольной диаграмме. Эта характеристика может также быть показана на полярной диаграмме или в таблице. Сглаживание не позволяется для этого расчета, в нем всегда используются частоты, точно установленные в проекте.

Ток во временной области Itime

Этот расчет используется, чтобы получить ток во временной области, протекающий через амперметр или в порте. Величина тока рассчитывается как реальная форма волны во времени. Для анализа с одним тоном будут показаны два периода формы волны.

Для расчета необходимо задать:
P1 — название источника данных (подсхема с 0—1000 портов);
P2 — компонента измерения (амперметр);

P3 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000);
P4 — индекс изменения мощности (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика — реальная величина в единицах тока. Характеристика может быть показана в dB, выбирая «dB» опцию в диалоге измерения, ось X для этого измерения находится в единицах времени.

Эта характеристика может быть показано на прямоугольной диаграмме или таблице.

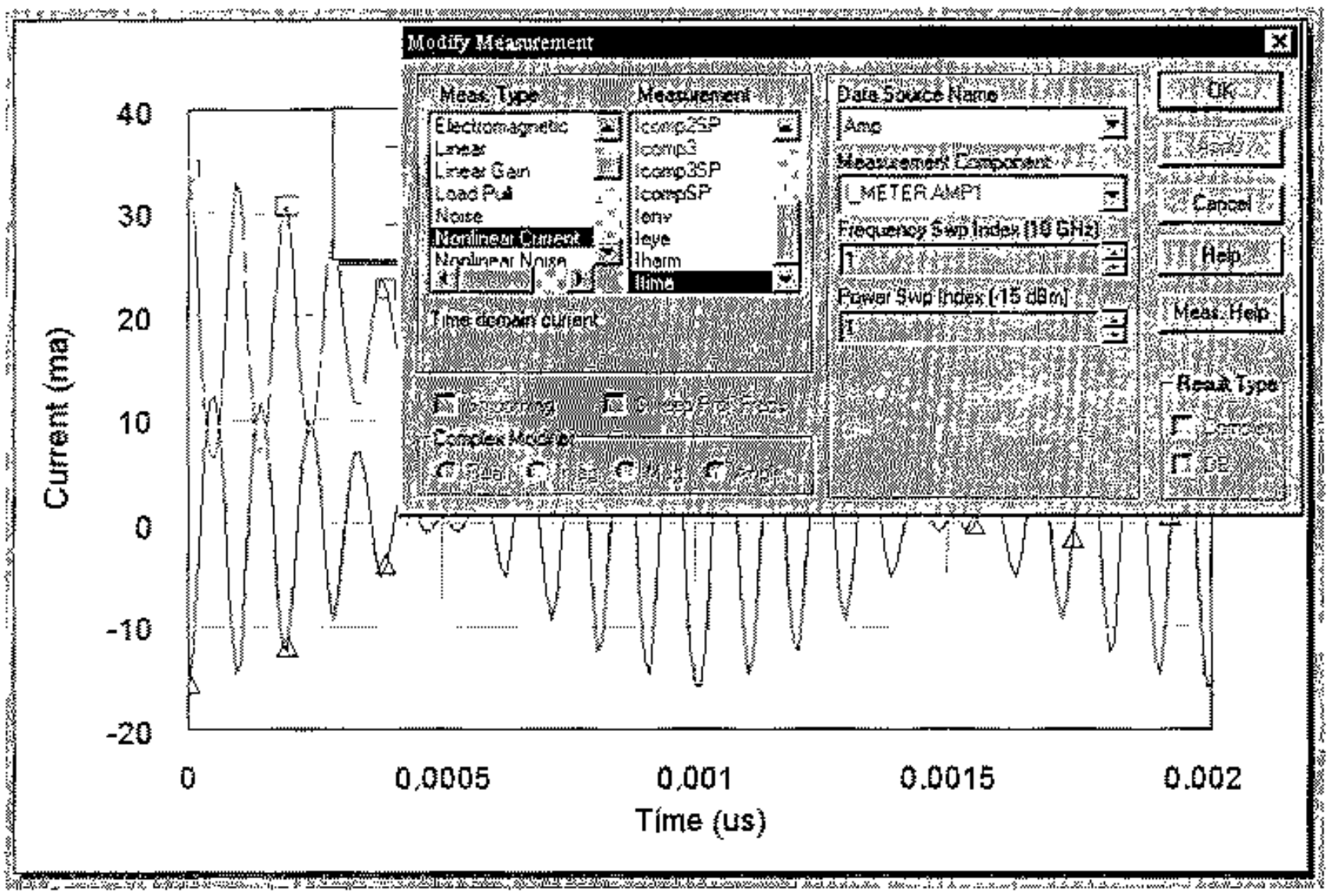


Рис 7.64. Диалог вывода временной зависимости тока нелинейного усилителя

7.8. Моделирование нагрузочных линии с помощью ассистента Load Pull Wizard

Утилита ассистента **Load Pull Wizard**, к которому имеется доступ в дереве проекта, позволяет выполнять моделирование нагрузочных линий схемы. Вы можете моделировать схему в указанных точках коэффициента отражения / полного сопротивления, используя имеющийся набор точек или использовать данные из файлов Focus или Maury. Моделирование схемы с различными нагрузками создает контурные линии указанных характеристик (например, Pcomp, PAE). Microwave Office имеет элементы подстройки LTUNER, LTUNER2, HBTUNER, и HBTUNER2 для использования совместно с Load Pull Wizard.

Откройте **Wizard** его в дереве проекта и сделайте двойной щелчок на пункте **Load Pull Wizard** (рис. 7.65). Рассмотрите пример LoadPullWiz_Example.emp в каталоге /Examples/New Features/Load Pull/Wizard.

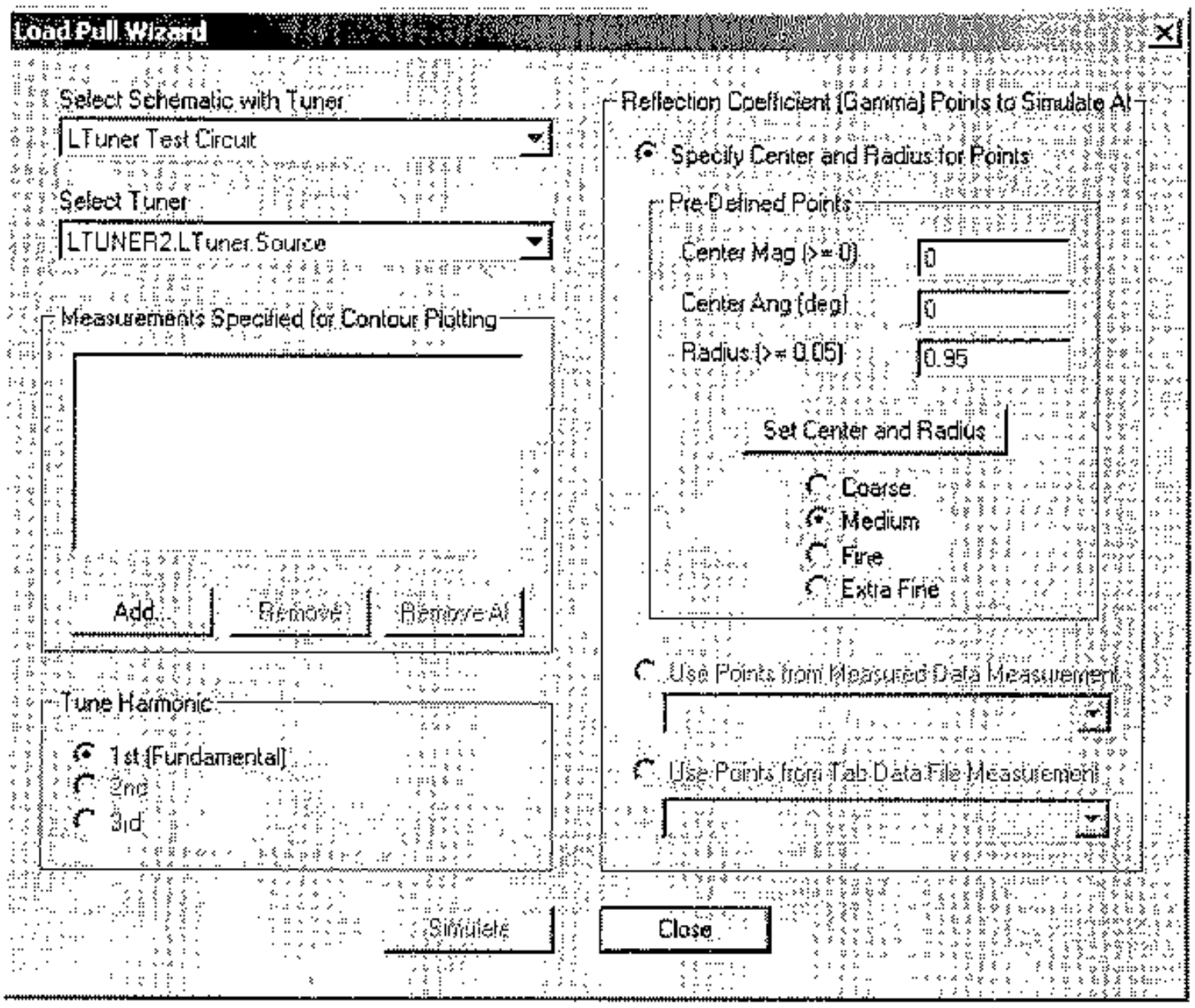


Рис. 7.65. Диалог задания расчета нагрузочных контуров

Просмотр нагрузочных линий на выходе нелинейного четырехполюсника

Microwave Office 2002 может импортировать, файлы Focus (.lpd) и Maury (.lp? и .sp?), с записанными коэффициентами отражения со стороны генератора и нагрузки, как текстовые файлы. В этих файлах, смешение по постоянному току и частота — постоянные, а импеданс переменный.

Чтобы импортировать файл нагрузочных линий, выберите **Project > Add Data File > Import Data File**, и затем определите Text Data File как файл данных.

После загрузки файла нагрузочной линии, вы можете вывести на график следующие характеристики (доступные в диалоговом окне **Add Measurement** в столбце **Measurement** после выбора Load Pull как **Measurement Type**):

LPGPM (Load Pull Gamma Points — Measured Data File). Наносит точки коэффициента отражения или полного сопротивления, в которых рассчитываются нагрузочные линии активного прибора, чаще всего транзистора. Эти данные наносятся на диаграмму Смита. Пример нагрузочных точек при расчете LPGPM[3] транзистора S1F60 на частоте 925 МГц показан на рис. 7.66.

LPCM (Load Pull Contour — Measured). Чертит контуры для указанного столбца измеренных данных. Вы можете определить файл данных, минимальный и максимальный контурный уровень, размер шага контура, столбец данных для чер-

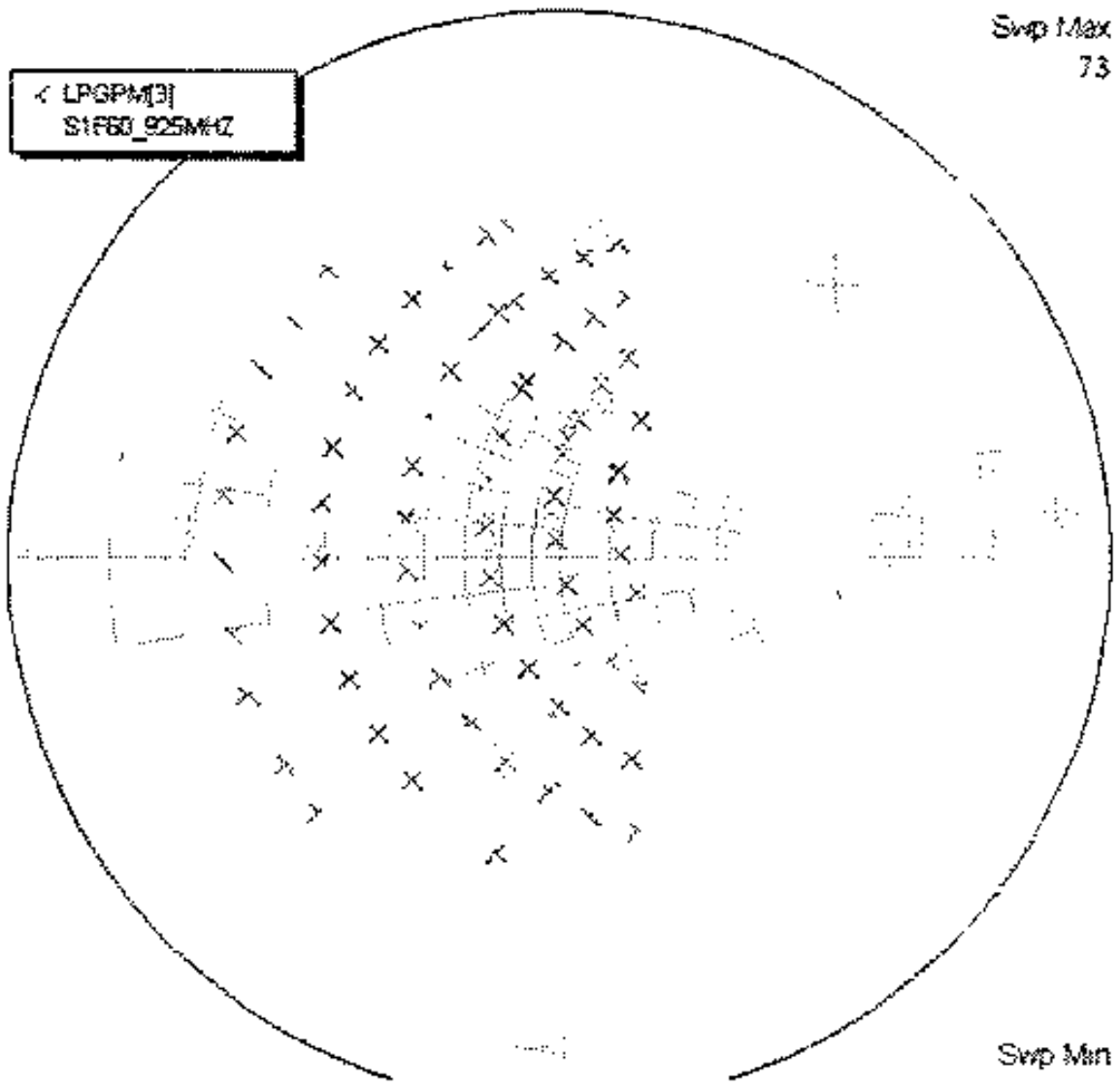


Рис. 7.66. Точки значений нагрузок, в которых выполняется расчет нагрузочных линий

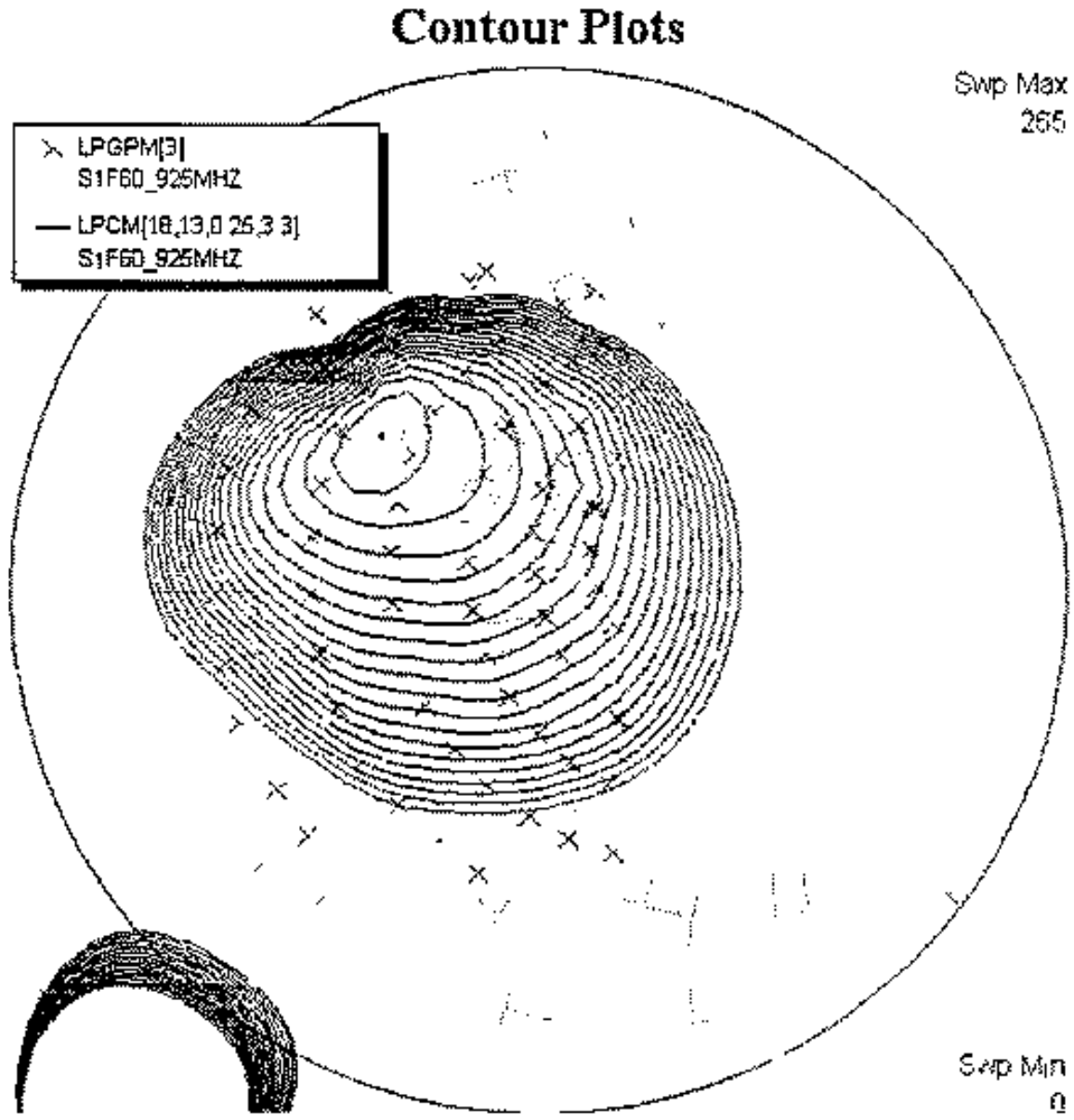


Рис. 7.67. Рассчитанные нагрузочные линии на плоскости коэффициента отражения на выходе активного элемента

чения и характеристический импеданс. Эта характеристика наносится на диаграмму Смита (рис. 7.67).

LPINT (Load Pull Interpolated Data). Позволяет использовать уже рассчитанные или измеренные данные совместно с линейным моделирующим устройством, которое задает импеданс в сечении выходного порта в указанной схеме, файле данных, или структуре EM. Используя алгоритм двумерной интерполяции, утилита Load Pull вычисляет интерполированные значения выбранного параметра в этом диапазоне сопротивлений. LPINT позволяет иметь больше чем один входной порт. Можно оптимизировать схему по данной характеристике. Она обычно выводится на прямоугольный график (рис. 7.68).

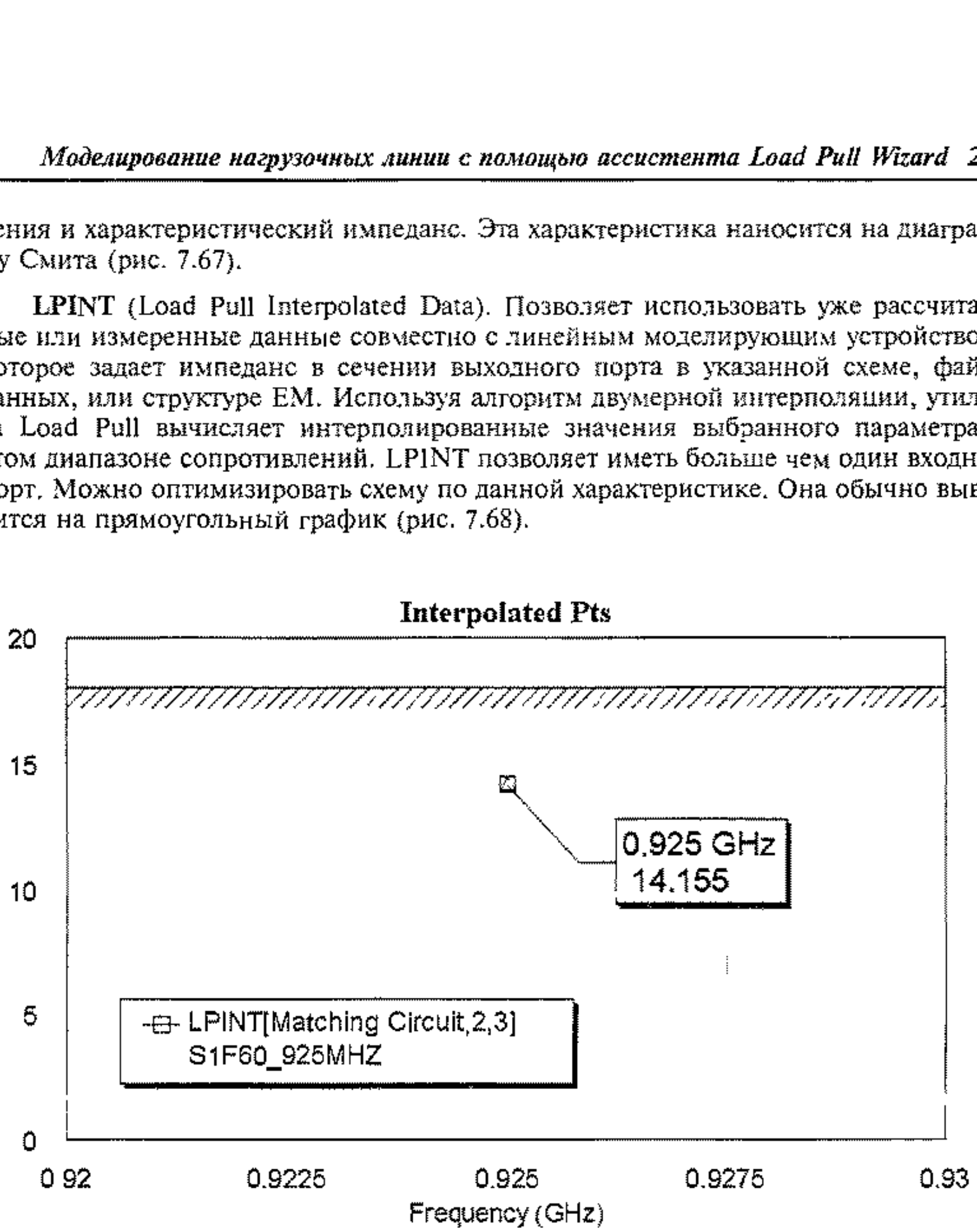


Рис. 7.68. Результаты интерполирования данных расчета нагрузочных линий

LPGPT (Load Pull Gamma Points — Tabular Data File). Показывает выбранный набор коэффициентов отражения (полного сопротивления) как определено в таблице из двух столбцов в текстовом файле данных (.txt). Первый столбец определяет вещественную часть, а второй столбец определяет мнимую часть. Вы можете моделировать Load Pull в этих выбранных точках. Эта характеристика наносится на диаграмму Смита. Следующий график показывает пример точек, описывающий LPGPT (рис. 7.69).

LPCS (Load Pull Contour Simulated). Эта характеристика — контуры из табличного файла, который создан при моделировании в Load Pull Wizard. Вы можете определить файл данных, минимальные и максимальные контурные уровни, и размер шага контура. Следующая диаграмма показывает пример контуров LPCS (рис. 7.70).

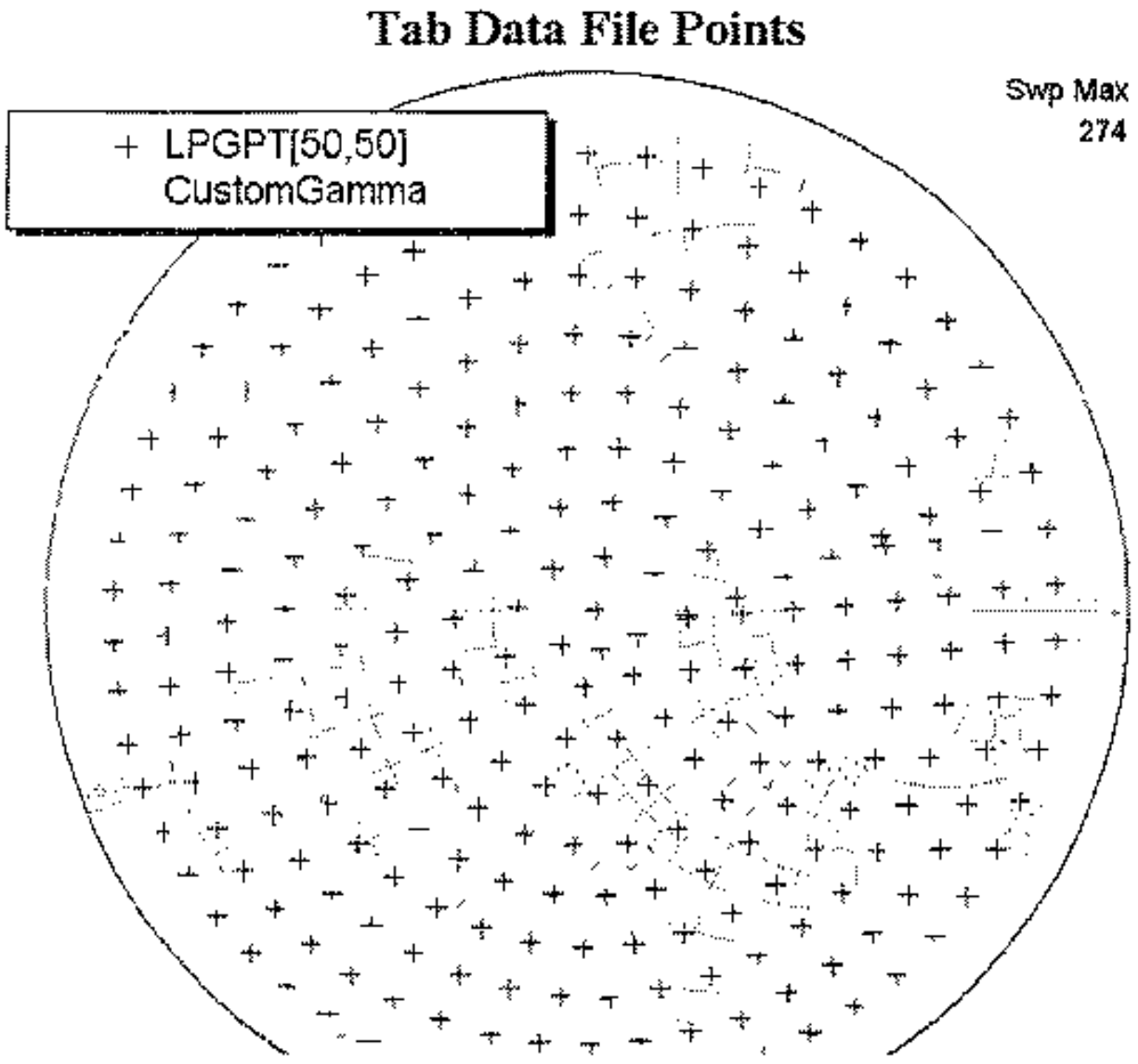


Рис. 7.69. Точки на входной плоскости отражения, в которых рассчитывается нагрузочная линия

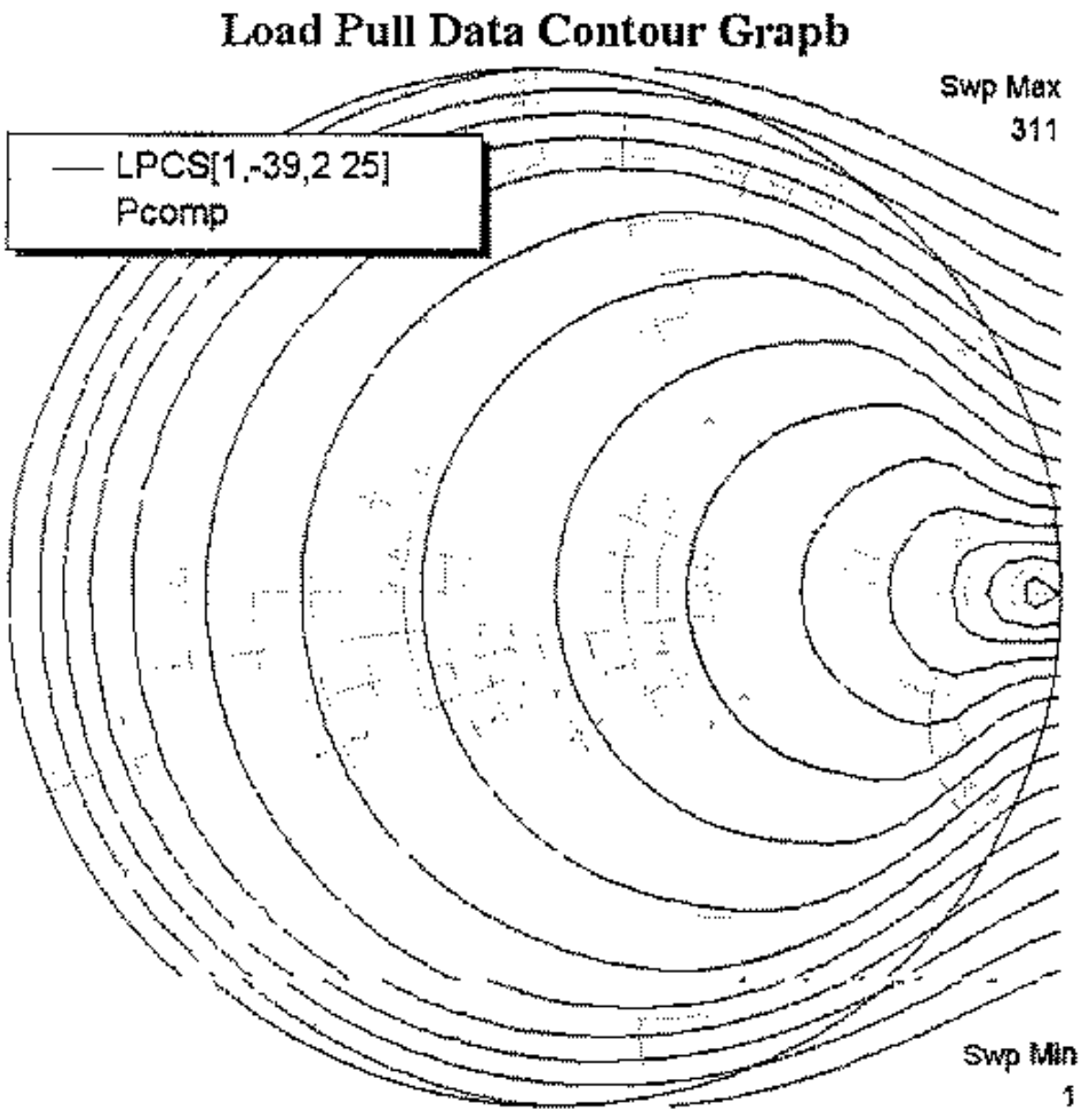


Рис. 7.70. Контуры нагрузочных линий на плоскости выходных нагрузок

Выбор индексов частотной развертки

Большинство нелинейных расчетов требует выбора индекса частотной развертки, индекса развертки мощности, или обоих. Индекс частотной развертки выбирает конкретную частоту, которая будет находиться в диапазоне частот, изменяющегося во время анализа. По умолчанию, все расчеты выберут первую частотную точку развертки. Частота, которая соответствует индексу, может быть определена из списка нелинейных частот, используемых во время анализа (устанавливаемые в пункте Nonlinear Frequencies в разделе Schematics). Например, если частотный индекс развертки 4, то частота, используемая для расчетов соответствует 4-му пункту в списке частот (1-ый пункт — индекс 1).

Индекс развертки мощности подобен индексу развертки частоты. Развертка мощности, используемая во время моделирования, определяет диапазон изменения мощности генератора. Развертка мощности определяет диапазон изменения мощности, а индекс развертки мощности требуется некоторыми характеристиками как индекс в диапазоне развертки мощности.

Когда вы изменяете и мощность и частоту, рассчитываемые величины параметра должны выбрать конкретную величину развертки. Для некоторых расчетов, измеряемая характеристика рассчитывается как функция частоты, а мощность оставляется постоянной (заданной). Большинство зависимостей, которые выводятся в частотном диапазоне, имеют также свою модификацию, которую можно вывести в зависимости от мощности (эти характеристики имеют те же самые имена как частотнозависимые версии за исключением того, что имеется «SP», добавленный к концу имени, что указывает, что изменяется мощность Swept Power). Некоторые характеристики не изменяются в частотном диапазоне или в диапазоне мощностей (например временные зависимости и спектр) и для этих характеристик должен быть задан единственный индекс мощности и индекс частоты.

Односигнальные и двухсигнальные характеристики

Многие из нелинейных характеристик имеют и двухсигнальные и односигнальные версии. Имена двухсигнальных версий оканчиваются на «2» (зависимости от мощности двухсигнальных версий заканчиваются 2SP).

Односигнальные версии требуют спецификации гармонического индекса больше или равного нолю и не большего, чем число гармоник, используемых для моделирования. 0-ая гармоника — это составляющая постоянного тока, и 1-ая гармоника — фундаментальная составляющая.

Двухсигнальные версии требуют выбора двух гармонических индексов, где первый индекс — задает частоту первого тона, а второй — частоту второго тона. В отличие от односигнального случая, гармонические индексы могут быть отрицательны. Например, один из интермодуляционных продуктов третьего порядка двух близко расположенных сигналов может быть задан как $2f_1 - f_2$ (где f_1 — частота первого тона, и f_2 — частота второго тона), это требует задания гармонических индексов 2 и -1 для расчета. Другой важный момент состоит в том, что гармоники, используемые в двухсигнальном моделировании, выбираются на основании максимального числа гармоник, которые были определены в параметрах моделирования. Если вы устанавливаете индексы, которые задают гармонику, которая не моделировалась, то программа сообщит об ошибке.

7.9. Нелинейные характеристики по мощности

Эффективность (кпд) преобразования DC к ВЧ (%) (в диапазоне частот) DCRF

Эта характеристика есть соотношение мощности, потребляемой схемой от источника постоянного напряжения DC и полезной мощности ВЧ. Мощность по постоянному току вычисляется по DC мощностям всех источников в схеме. Мощность ВЧ вычисляется, используя установленные в схему измерители мощности.

Эффективность преобразования DC к ВЧ определяется как

$$DCRF = \left(\frac{P_{out}}{P_{dc}}\right) \cdot 100\,\%, \tag{7.33}$$

где P_{out} — мощность, фиксируемая измерителем мощности, обычно на выходном порту; P_{dc} — общая DC мощность, потребляемая от всех источников постоянного тока в схеме.

Для расчет необходимо задать:

P1 — имя источника данных (подсхема от 0 до 1000 портов);

P2 — измеритель мощности, указанный в схеме;

P3 — индекс мощности (1—1000).

Эта характеристика — реальная величина. Ось X — частота.

Характеристика может быть показана на прямоугольной диаграмме или в таблице (рис. 7.71).

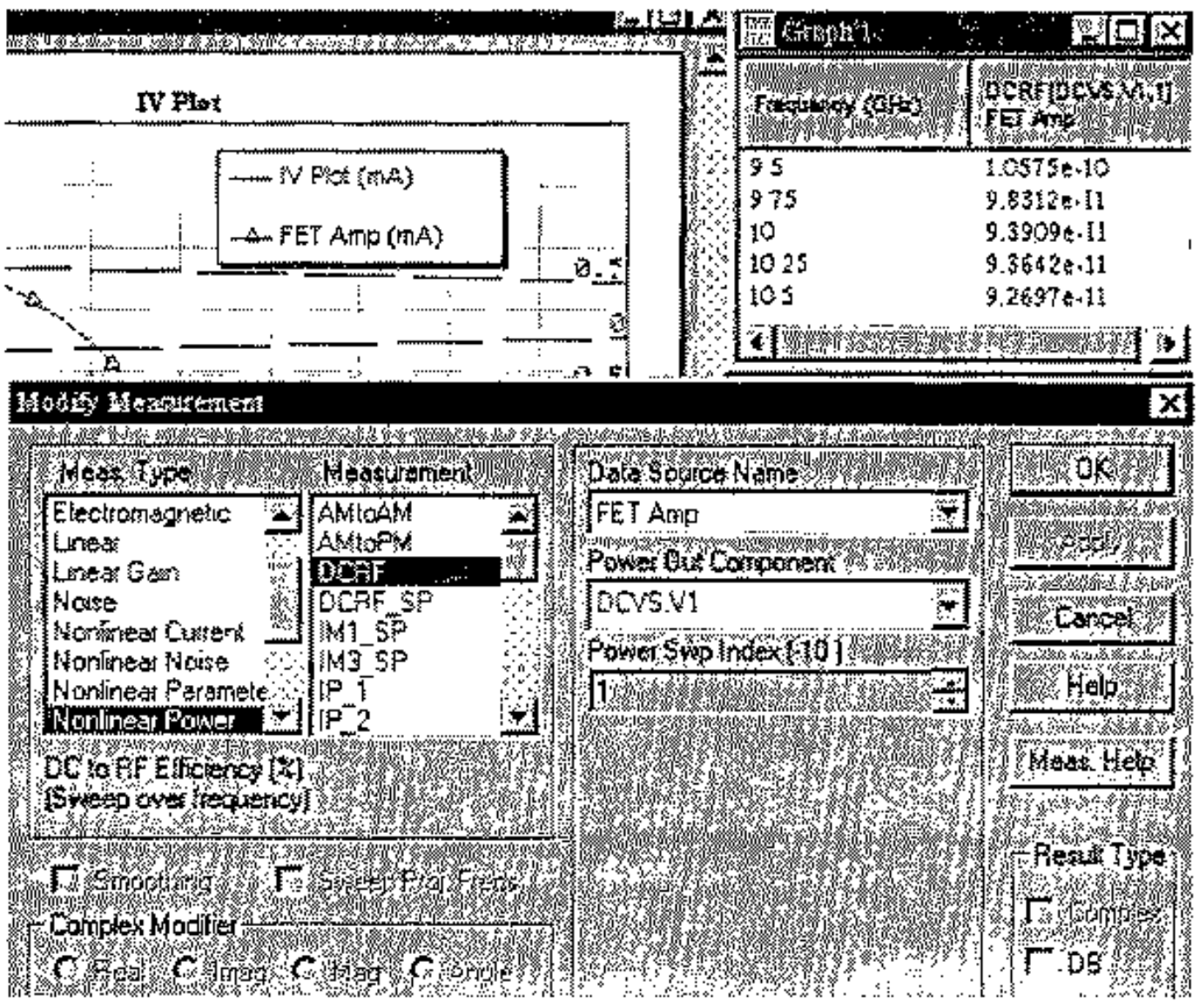


Рис. 7.71. Вывод в таблицу рассчитанного параметра в диапазоне частот

Эффективность (кпд) преобразования DC к ВЧ (%) (развертка по мощности) DCRF_SP

Характеристика DCRF_SP — эффективность преобразования потребляемой мощности DC в полезную мощзность ВЧ. Мощность DC вычисляется как общая мощность, потребляемая от всех источников постоянного тока в схеме. Мощность ВЧ вычисляется, используя установленный измеритель мощности в схеме.

Для расчета DCRF_SP необходимо задать (рис. 7.72):
P1 — имя подсхемы от 0 до 1000 портов;
P2 — элемент, используемый для измерения мощности;
P3 — индекс частоты (целое число 1—1000).

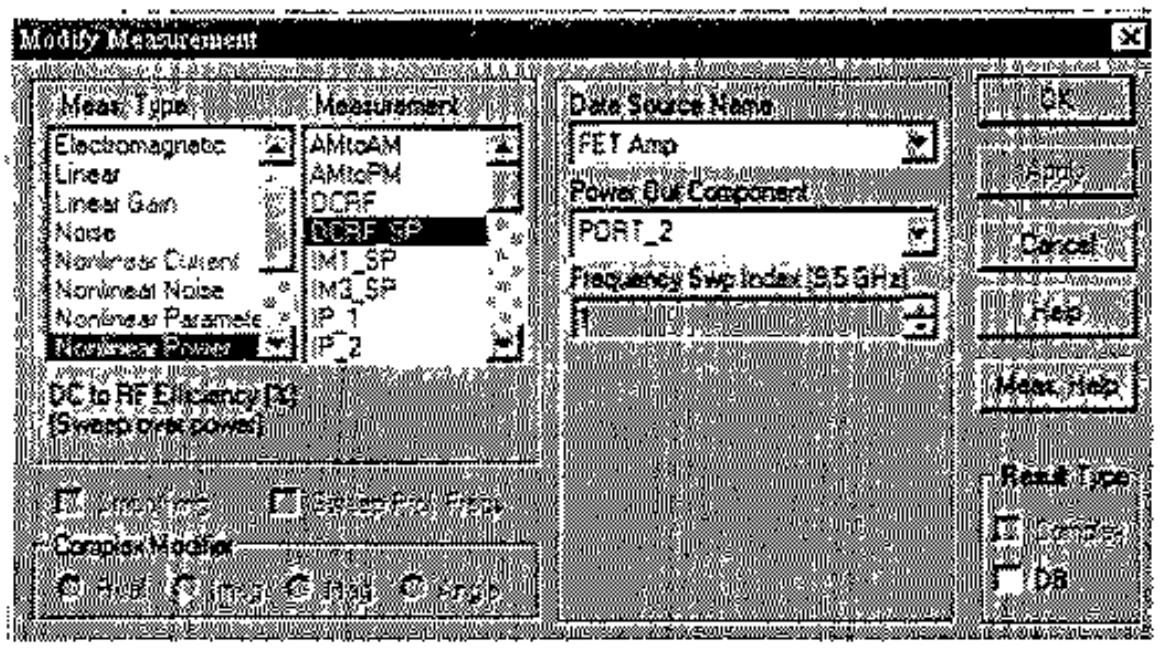


Рис. 7.72. Окно вывода характеристики DCRF_SP

Результатом расчета является реальная величина, зависящая от мощности, которая может быть показана на прямоугольном графике или в таблице (рис. 7.73).

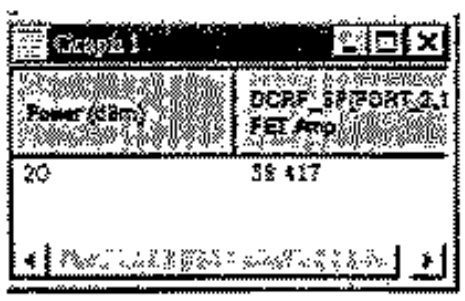


Рис 7.73. Результат расчета, выведенный в таблицу: КПД по добавляемой мощности равен 38,4%

Уровень основного сигнала (dBm) при 2-х сигнальном возбуждении (развертка по мощности) IM1_SP

Эта характеристика вычисляет величину основного сигнала в дБм при двухсигнальном анализе, когда на входе действуют два близко расположенных сигнала. Если мощности сигналов неодинаковые, то возвращается величина большего из двух сигналов. Этот расчет применяется, чтобы упростить расчет фундаментальной составляющей при расчете интермодуляционных характеристик с близко расположенными частотами. Разнос между частотами устанавливается как параметр порта (рис. 7.74).

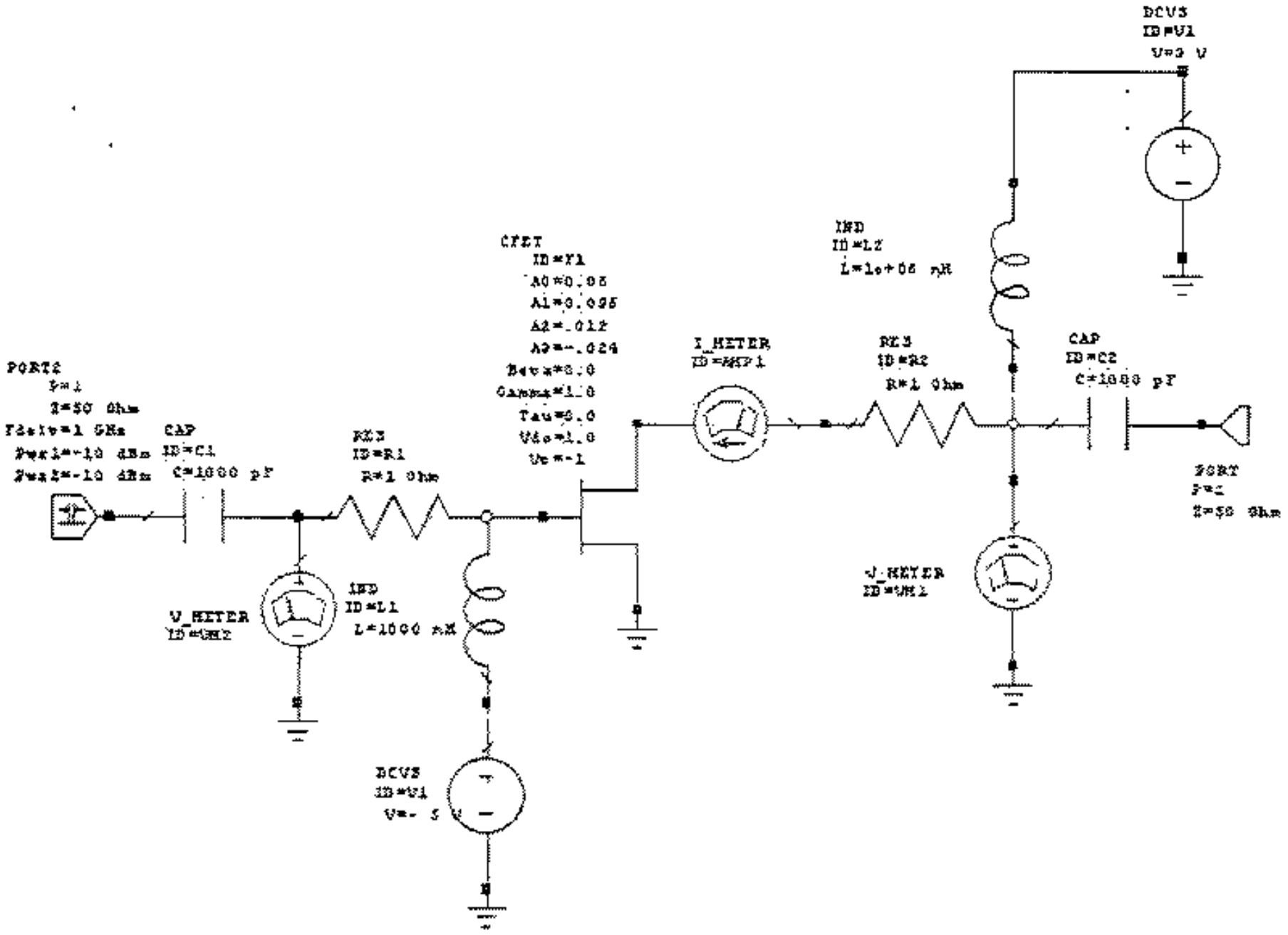


Рис. 7.74. Усилитель мощности с двумя сигналами на входе. Такая схема построения необходима для расчета основных нелинейных характеристик

Параметры для расчета (рис. 7.75):

P1 — имя источника данных (подсхема с 0—1000 портов);

P2 — измеритель мощности (CFET.F1@ds);

P3 — индекс частоты (целое число 1—1000) относительно фундаментальной гармоники.

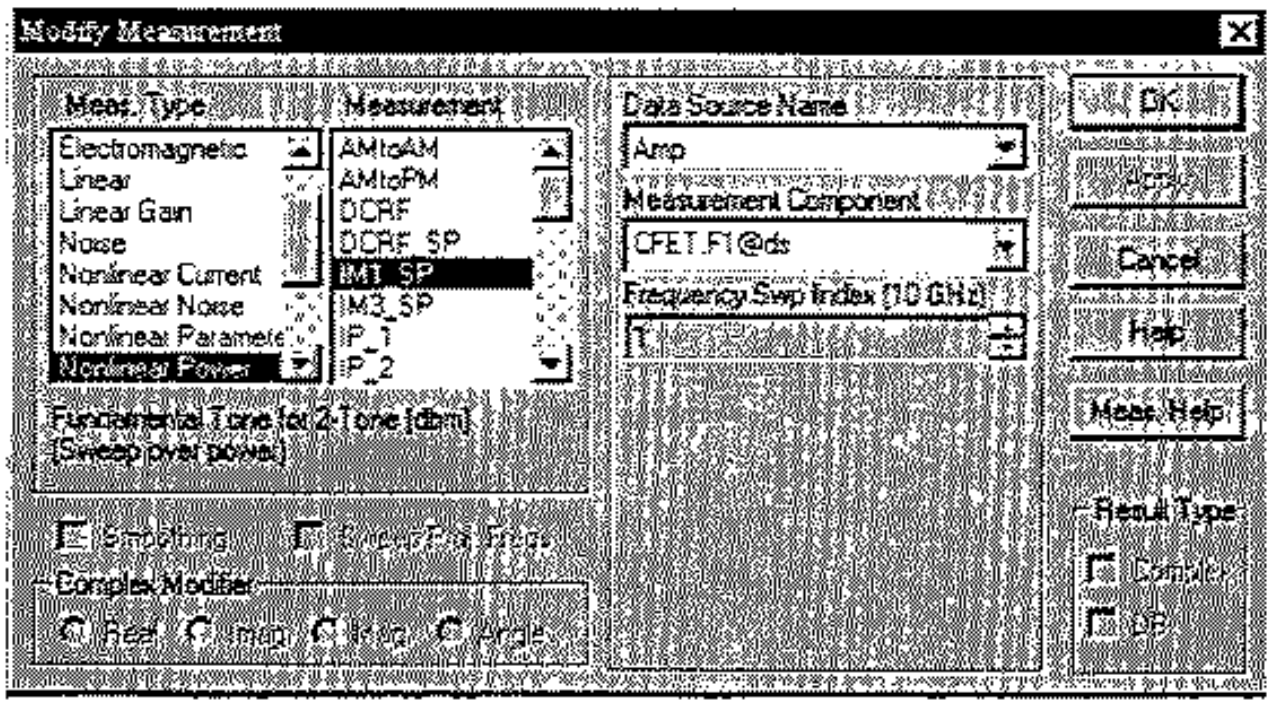


Рис. 7.75. Окно расчета и вывода характеристик

Этот расчет дает реальную величину мощности в dBm. Характеристика может быть показана в dB. выбирая опцию «dB» в диалоге измерения, ось X для этого измерения находится в мощности в dBm.

Эта характеристика может быть показана на прямоугольной диаграмме или таблице.

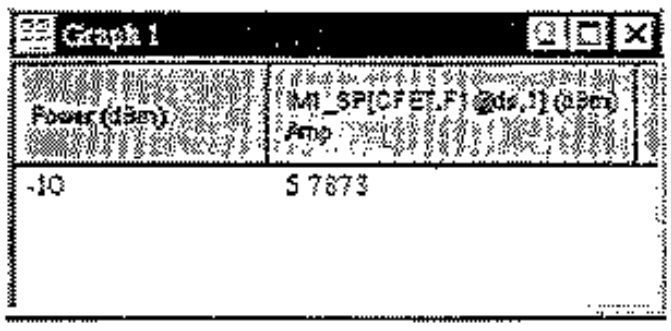


Рис. 7 76. Результат расчета интермодуляционых искажений при мощности −10 dBm

Продукты интермодуляционных искажений 3-го порядка IM (dBm) (развертка по мощности) IM3_SP

Этот расчет вычисляет величину продуктов интермодуляционных искажений третьего порядка, которые сгенерированы из двух сигналов с близко расположенными частотами. В результате расчета выводится больший из продуктов на частотах $2f_1 - f_2$ или $2f_2 - f_1$. Это используется для упрощения расчета уровня продукта интермодуляционных искажений третьего порядка при двухсигнальном возбуждении двумя близко расположенными сигналами.

Параметры для расчета:
P1 — имя подсхемы с 0—1000 портами;
P2 — прибор измерителя мощности;
P3 — индекс частоты (целое число 1—1000).

Эта характеристика — реальная величина мощности в dBm. Результаты расчета могут быть показаны в dB. Ось X для этой характеристики является мощностью в dBm.

Характеристика может быть показана на прямоугольной диаграмме или таблице (рис. 7.76).

Эта характеристика всегда использует частоты, точно установленные в задании.

Точка пересечения IP_1

Эта характеристика является координатой так называемой «точки пересечения» для схемы с единственным сигналом на входе. Точка пересечения находится из пересечения двух характеристик: линии экстраполированной из малосигнальной области зависимости фундаментального сигнала от мощности на входе и линии интерполированной из малосигнальной области зависимости мощности интермодуляционных продуктов (в единицах dBm) от мощности на входе. Пример точки пересечения 3-его порядка для двух возбуждаемых сигналов, показывается на рис. 7.77.

Точка пересечения n-порядка, должна аппроксимироваться по линейным зависимостям, выполенным из малосигнальной рабочей области прибора. В примере на рис. 7.77, точки, отмеченные кружками, были бы хорошим выбором как точки для расчета точки пересечения. Поскольку для конкретного порядка интермодуляционных искажений наклон обеих линий известен, характеристику в единственной точке мощности достаточно определить как точку отрезка, отсекаемого на координатной оси (принимая, что точки находятся в малосигнальной области).

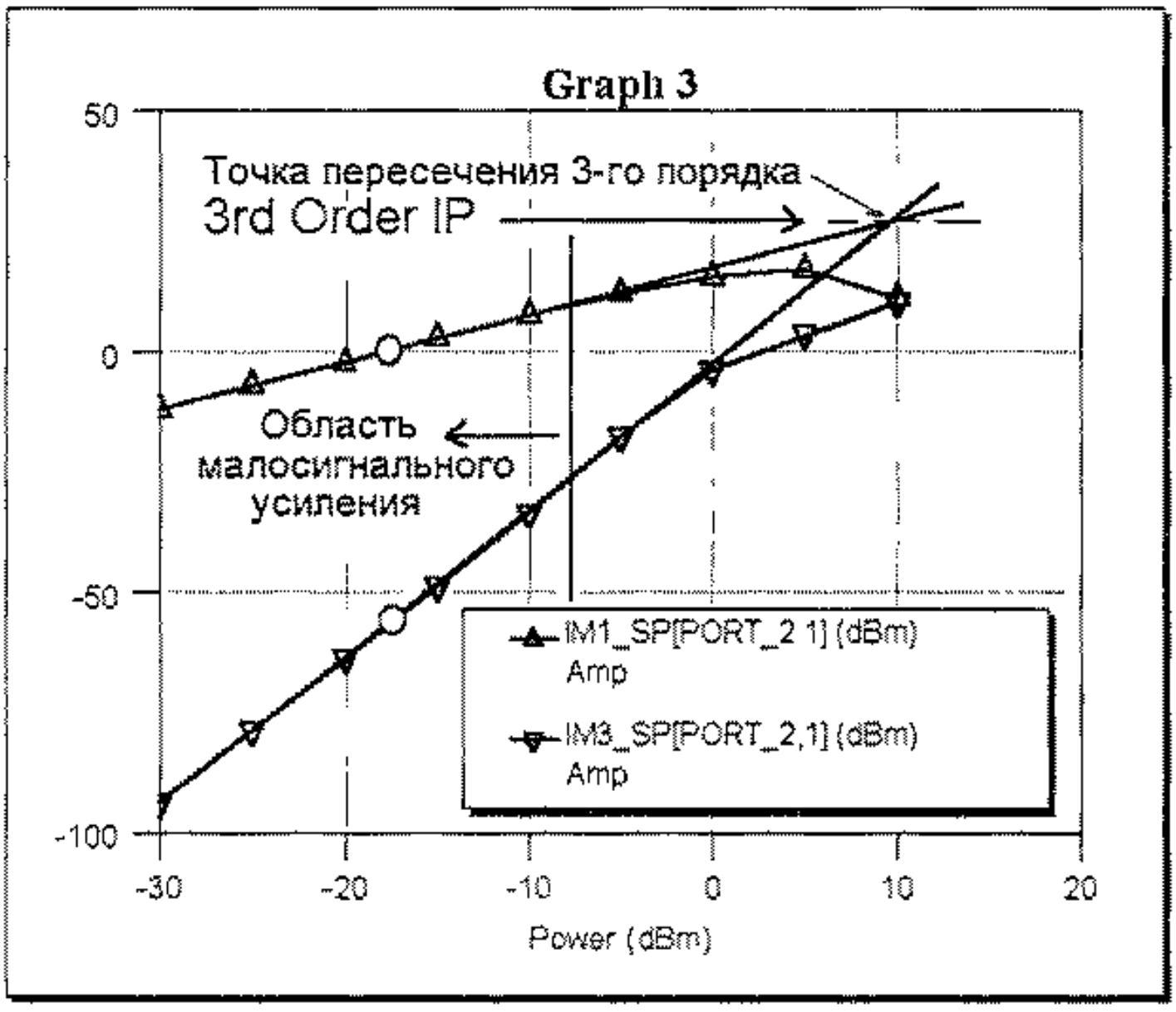


Рис. 7.77. Физическое расположение точки пересечения. Зависимость основной гармоники и продуктов интермодуляционных искажений 3 порядка от мощности на входе и точка пересечения, полученная при пересечении амплитудной характеристики и уровня продуктов интермодуляционных искажений, экстраполированных из линейной области

Точка, в которой две линии пересекаются, задается выражением

$$IP = PF_0 + \left(\frac{PF_0 - PN_0}{n-1}\right), \tag{7.34}$$

где PF_0 — выходная мощность фундаментальной составляющей в dBm; PN_0 — выходная мощность гармоники n-порядка; n — порядок гармоники (для единственного тона порядок равен 2).

Вычисление координаты *точки пересечения*, отсекаемой на координатной оси, основано на графическом построении зависимостей основной гармоники и продуктов интермодуляционных искажений.

Для нелинейной схемы, работающей в малосигнальной области, график выходной мощности на основной частоте и на частотах искажения в зависимости от входной мощности на основной частоте в масштабе dB/dB — являются прямыми линиями с наклоном, равным порядку интермодуляционных искажений.

Точка на этом графике, в которой экстраполируемые линейные части основного несущей и интермодуляционных искажений n-порядков пересекаются, называется точкой пересечения n-порядка (IPn):

$$IP_n = P_o + S / (n-1), \text{ dBm}, \tag{7.35}$$

где P_o — уровень выходной мощности основной частоты (dBm) для малосигнального уровня на входе; S — подавление (dB) искажений n-порядка относительно P_o.

Фундаментальная частота полагается равной F1 (для односигнального, двухсигнального и трехсигнального возбуждения), а порядок частоты интермодуляционных искажения определен из значений x1, x2 и x3 следующим образом:

$$\text{Order (порядок)} = |x1| + |x2| + |x3|. \qquad (7.36)$$

Например: чтобы вычислить интермодуляционные искажения третьего порядка IP с двумя тонами на входе и используя произведенные искажения с частотой 2F1 — F2, получим x1 = 2 и x2 = −1. Заметим, однако, что продукт третьего порядка с двумя тонами IP (x1 = 2, x2 = −1) отличается от третьей гармоники IP (x1 = 3, x2 = 0), хотя они имеют тот же самый порядок.

Определение точки пересечения справедливо только в малосигнальной линейной области передаточной характеристики схемы. Следовательно, IP не является функцией входной мощности, хотя она — функция частоты.

Для расчета необходимо задать:

P1 — имя источника данных (подсхема с 0—1000 портов);
P2 — измеритель мощности;
P3 — продукт IM искажений (h1, целое число от 1 до 1000).

Частоты, показанные на оси X — изменяемая величина частоты фундаментальной компоненты первого тона. Расчет дает реальную величину в единицах мощности. Расчет может быть показан в dB, выбирая опцию «dB».

Точка пересечения двухсигнальная IP_2

Эта характеристика является координатой отрезка, отсекаемого на координатной оси пересечением линейной характеристики и продуктов 2-го-порядка схемы с двухсигнальным возбуждением. Точка отрезка, отсекаемого на координатной оси — точка, в которой линейные экстраполированные зависимости фундаментальной мощности и мощности продуктов интермодуляционных искажений IM пересекают друг друга (на логарифмической плоскости dBm относительного dBm).

Интерполяция зависимостей должна выполняться из малосигнальной области прибора. Поскольку наклон обеих линий известен, для расчета характеристики достаточно приравнять ординаты одной и другой прямой и решить уравнение для точки отрезка, отсекаемого на координатной оси.

Параметры для вывод характеристики

P1 — имя подсхемы от 0 до 1000 портов, для которой рассчитывается характеристика;

P2 — выходная мошность, соответствующая показанию измерителя мощности;

P3 — индекс продукта IM (h1, h2) (целые числа от 1 до 1000).

Частоты по оси X — изменяемые частоты величины фундаментальной составляющей первого тона.

Большесигнальные S-параметры на гармонике (развертка по частоте) LSSnm

Большесигнальные S-параметры используется, чтобы вычислить эквивалентные S-параметры ниже состояния большесигнального возбуждения. Вычисление требует, чтобы порты «From (из)» были портами возбуждения, а все другие порты

были нагружены на опорные нагрузки. Например, расчет полной системы S-параметров для четырехполюсника требует двух отдельных (независимых) моделирований, где в одном случае возбуждение выполняется на порте 1 (для расчета S_{21} и S_{11}), а во втором случае возбуждение на порте 2 (для расчета S_{12} и S_{22}). Эти расчеты также требуют выбор гармонической частоты, а также задания портов: порта «From (Из)» и порта «To (К)», рис. 7.78. Это допускает расчет величин потерь на преобразование или коэффициента усиления в смесителях и умножителях.

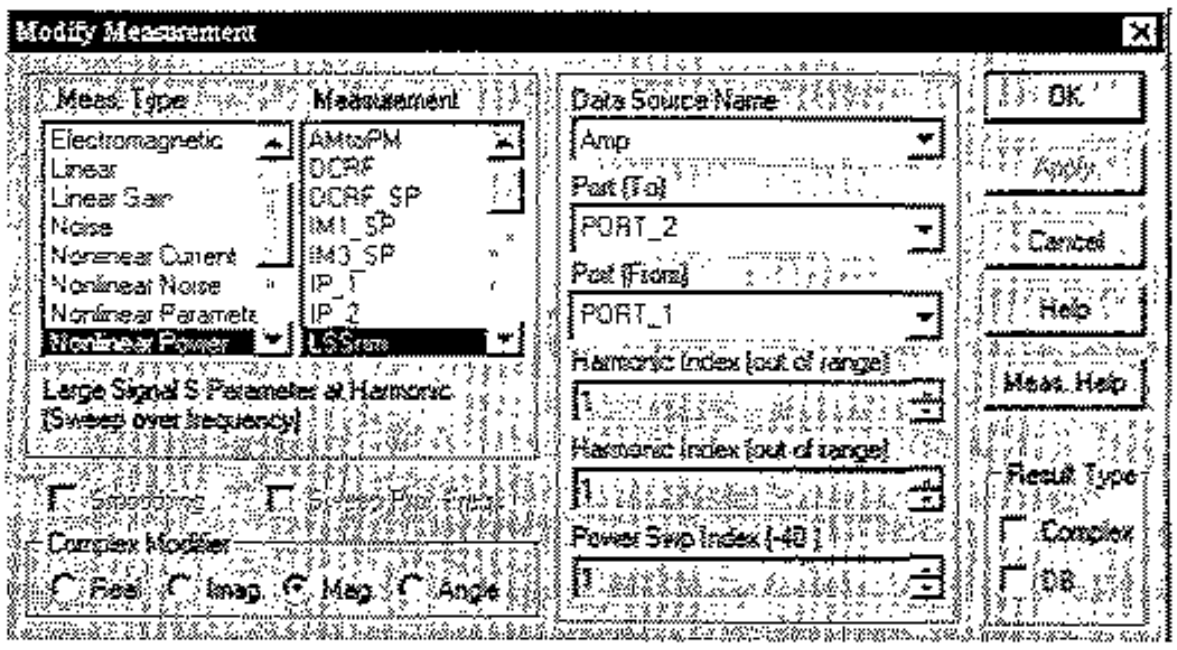


Рис 7.78. Вывод и индексация большесигнальных S-параметров

Параметры для расчета:

P1 — имя источника данных (подсхема с от 0 до 1000 портов);
P2 — порт (К) прибора, используемого, чтобы измерить мощность;
P3 — порт (Из) прибора, используемого, чтобы измерить мощность;
P4 — индекс гармоники (К) (целое число от 0 до 1024);
P5 — индекс гармоники (Из) (целое число от 0 до 1024);
P6 — индекс мощности (целое число от 1 до 1000).

Частоты, показанные на оси X — сканируемые частоты фундаментальной составляющей первого тона, а не частота непосредственно (если гармонический индекс не выбран равным 1).

Большесигнальные S-параметры являются комплексными величинами. Комплексная характеристика может быть показана на диаграмме Смита, а также на графике или в таблице, отдельно определяя модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения (рис. 7.79). Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB».

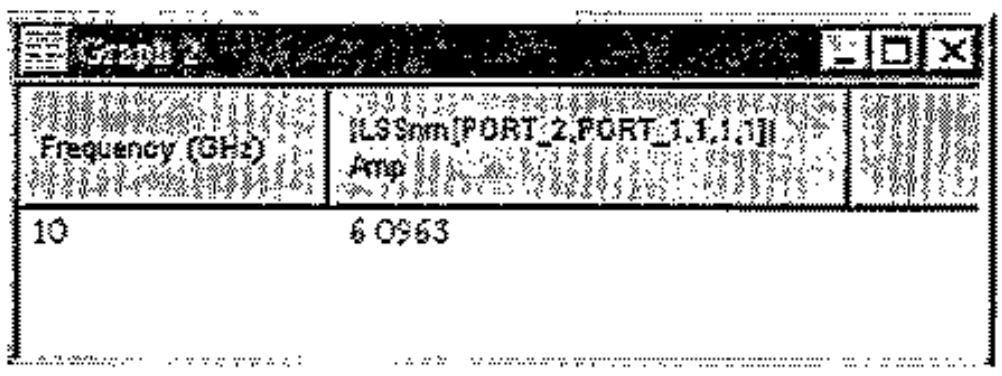


Рис. 7.79. Рассчитанный модуль большесигнального коэффициента передачи

Большесигнальные S-параметры на гармонике (с 2 тонами, развертка по частоте) LSSnm2

Большесигнальные S-параметры используются для оценки усилительных свойств устройства при воздействии на него мощности, по уровню большей, чем мощность, при которой нелинейные искажения несущественные. Вычисление требует, чтобы порт «Из» был портом возбуждения и что все другие порты нагружены на опориые сопротивления.

Этот расчет также требует выбора гармонической частоты, используемой для порта «Из» и порта «К». Это допускает расчет величин потерь преобразования или коэффициента усиления в смесителях и умножителях.

Параметры расчета:

P1 — имя подсхемы с 0 до 1000 портов;
P2 — 1D измерителя мощности, подключенного к порту (К);
P3 — 1D измерителя мощности, подключенного к порту (Из);
P4 — гармонические индексы на порту (К);
P5 — гармонические индексы на порту (Из);
P6 — индекс изменения мощности (1—1000).

Частоты, показанные на оси X — изменяемая фундаментальная частота первого тона.

Эти характеристики — комплексные величины и могут быть показаны на диаграмме Смита, полярной диаграмме или таблице. Величина, утол, реальные или мнимые составляющие могут также быть показаны на прямоугольном графике.

Большесигнальные S-параметры (два сигнала на входе) LSSnm2SP

Большесигнальные S-параметры используются, чтобы вычислить эквивалентные S-параметры ниже состояния большесигнального возбуждения. Вычисление требует, чтобы порты «Из» были портами возбуждения, а все другие порты нагружены на опорные нагрузки. Например, расчет полной системы S-параметров для четырехполюсника требует двух отдельных (независимых) моделирований, где в одном случае возбуждение выполняется на порте 1 (для расчета S_{21} и S_{11}) и во втором случае возбуждение на порте 2 (для расчета S_{12} и S_{22}). Эти расчеты также требуют выбора гармонической частоты, а также задания портов: порта «Из» и порта «К». Это допускает расчет характеристик потерь преобразования или коэффициента усиления в смесителях и умножителях.

Параметры расчета:

P1 — название источника данных (подсхема с от 0 до 1000 портов);
P2 — 1D измерителя мощности, подключенного к порту (К);
P3 — 1D измерителя мощности, подключенного к порту (Из);
P4 — гармонические индексы (К);
P5 — гармонические индексы (Из);
P6 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000).

Эти характеристики — комплексные величины. Комплексная характеристика может быть показан как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «DB». Ось X для этих расчетов — в единицах мощности.

Большесигнальные S-параметры могут быть показаны на диаграмме Смита, полярной диаграмме или таблице. Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие может также быть показаны на прямоугольном графике.

Эффективность по добавляемой мощности (кпд) (%) (развертка по частоте) PAE

Эффективность по добаваленной мощности схемы определяет эффективность преобразования мощности, потребляемой схемой от источника постоянного напряжения. DC мощность вычисляется из общего количества DC мощности всех источников в схеме. Мощность ВЧ вычисляется, используя установленный в схеме измеритель мощности.

Эффективность по добавляемой мощности определяется как

$$PAE = \left(\frac{|P_{out}| - |P_{in}|}{P_{dc}} \right) \cdot 100\,\%, \qquad (7.37)$$

где P_{out} — выходная мощность, измеряемая выходным прибором измерения (обычно выходной порт); P_{in} — входная мощность, измеряемая входным прибором измерения (обычно входной порт); P_{dc} — общее количество DC мощности, поставляемой всеми источниками в схеме.

Параметры расчета:

P1 — имя источника данных (подсхема 0—1000 портов);

P2 — мощность, поступающая в схему (рассчитываемая измерителем мощности);

P3 — полезная мощность из схемы (рассчитываемая измерителем мощности);

P4 — индекс мощности (целое число 1—1000).

Этот расчет дает реальную величину. Ось X для этой характеристики — частота.

Характеристика может быть показана на прямоугольной диаграмме или таблице.

Эффективность по добавляемой мощности (%) (развертка по мощности) PAE_SP

Эффективность по добаваленной мощности схемы определяет эффективность преобразования потребляемой мощности от источника постоянного напряжения в мощность ВЧ сигнала (7.37). Потребляемая от источника постоянного напряжения мощность вычисляется по общему количеству DC мощности всех источников в схеме. Мощность ВЧ вычисляется, используя установленный в схеме измеритель мощности (рис. 7.80).

Параметры для расчета:

P1 — имя источника данных (подсхема 0—1000 портов);

P2 — мощность, поступающая в схему (рассчитываемая измерителем мощности);

P3 — мощность выходящая из схемы (рассчитываемая измерителем мощности);

P4 — индекс изменения мощности (целое число 1—1000).

Ось X, в случае вывода этой характеристики на прямоугольную систему координат, находится в единицах мощности. Эта характеристика может быть показана на прямоугольном графике или в таблице.

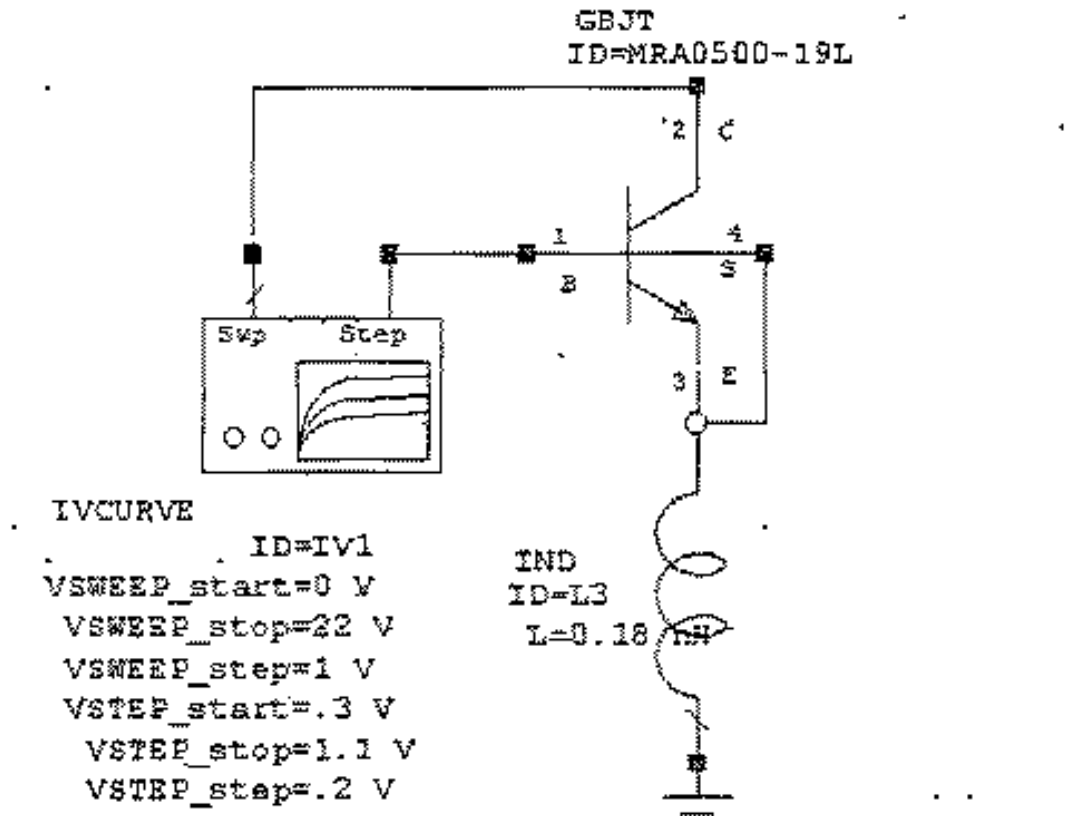


Рис. 7.80. Схема измерения и расчета входных характеристик транзистора

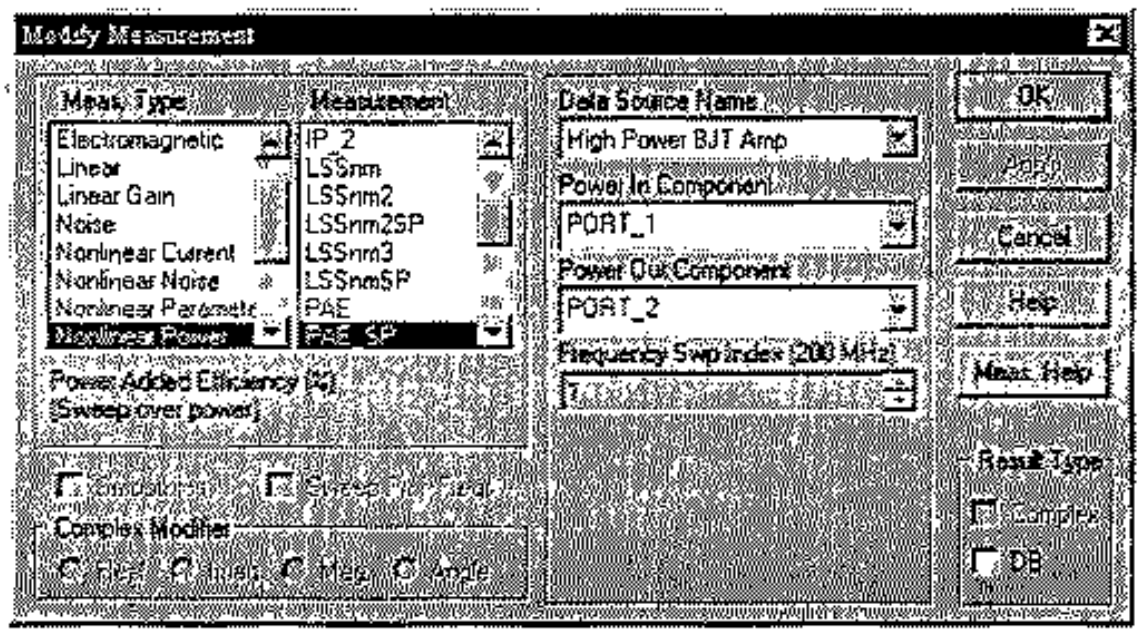


Рис. 7.81. Окно вывода энергетических характеристик усилителя мощности

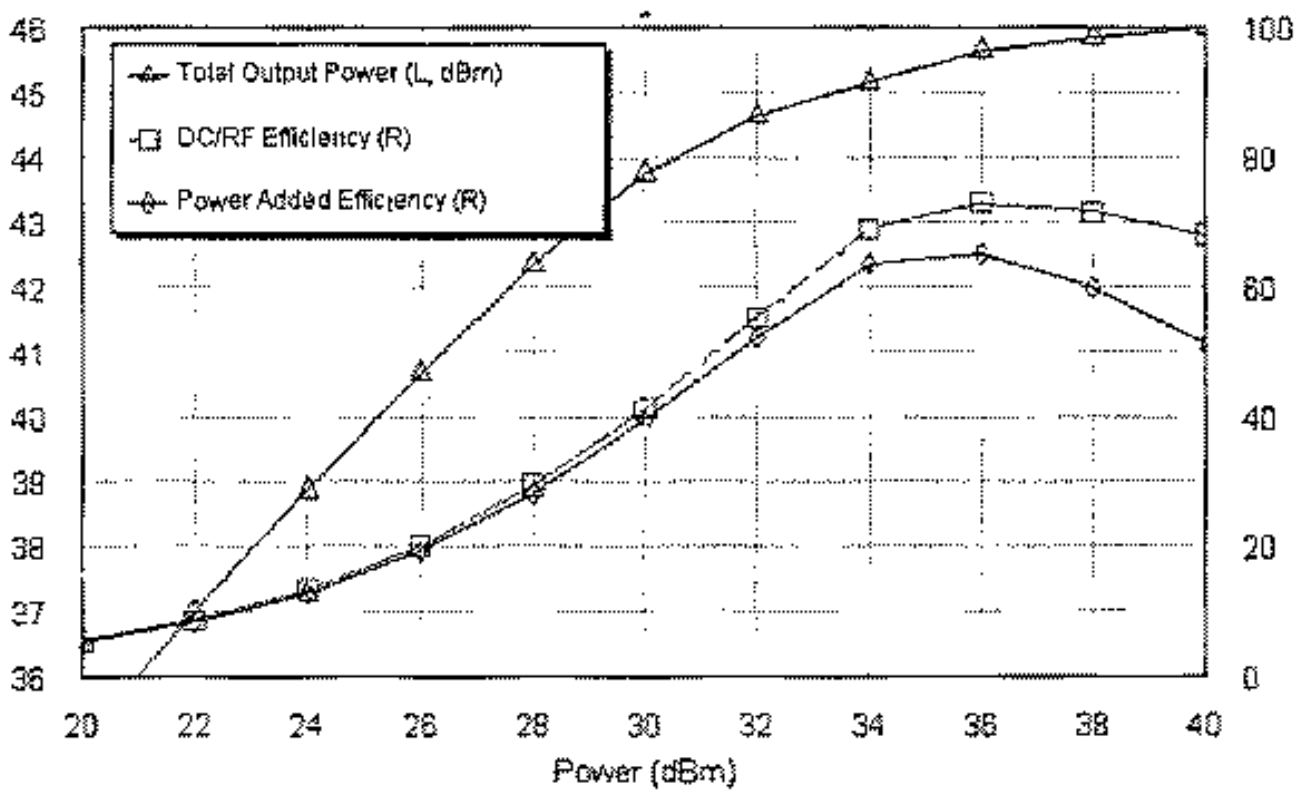


Рис. 7.82. Зависимости энергетических характеристик от мощности на входе

Коэффициент усиления мощности на фундаментвльной частоте (развертка над частотой) PGAIN

Эта характеристика рассчитывает коэффициент преобразования смесителя и эквивалентна большесигнальному усилению GT. Коэффициент усиления по мощности преобразователя равен отношению мощности, поглощенной в нагрузке к номинальной мощности источника:

$$G_T = \frac{P_{\text{погл нагр}}}{P_{\text{ном ист}}}, \tag{7.38}$$

где входная и выходная мощности измеряются (рассчитываются) на фундаментальной частоте.

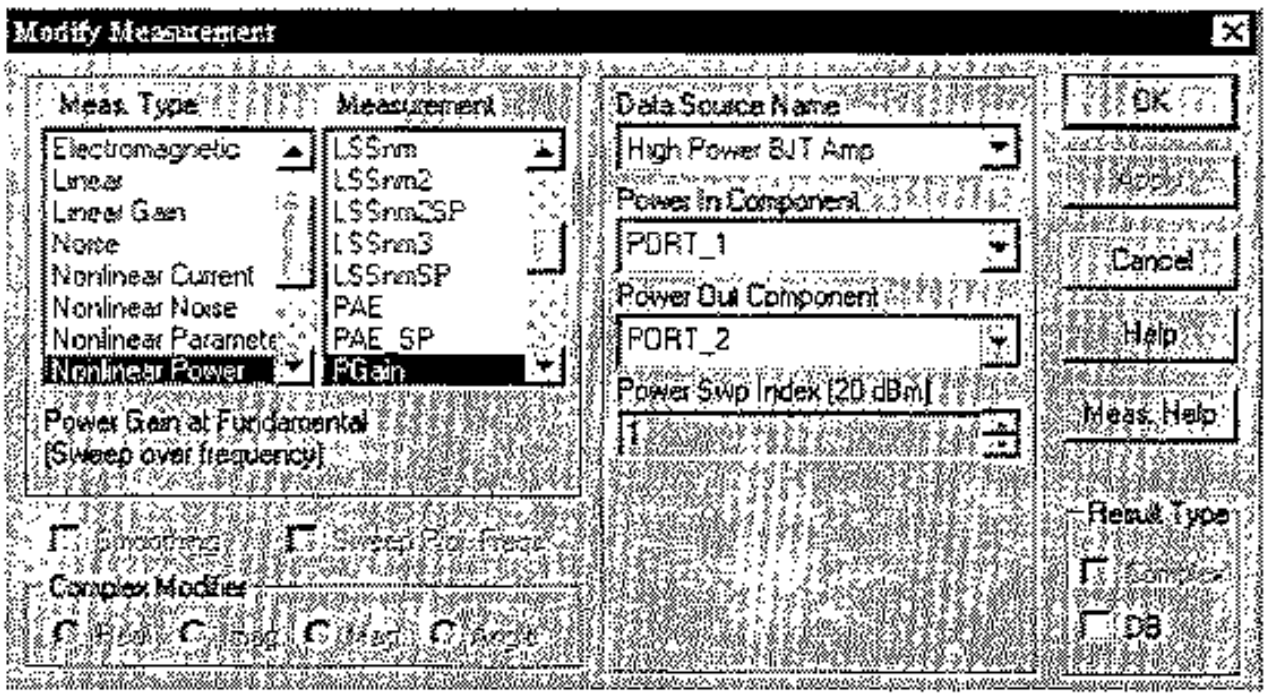


Рис. 7.83. Окно вывода характеристики PGain усилителя

Параметры расчета:

P1 — имя источника данных (подсхема 0—1000 портов);

P2 — мощность, поступающая в схему (рассчитываемая измерителем мощности);

P3 — мощность выходящая из схемы (рассчитываемая измерителем мощности);

P4 — индекс мощности, по которому можно найти мощность (целое число 1—1000).

Эта характеристика — реальная величина. Ось X — частота.

Характеристика может быть показана на прямоугольном графике (рис. 7.84) или в таблице.

Сглаживание не позволяется для этого измерения. Этот расчет всегда использует заданные в проекте частоты.

Общая мощность (развертка по частоте) PT

Это характеристика используется, чтобы измерить общую мощность, поставленную измерителю мощности, включая мощность на DC и всех гармониках. Общая мощность равна

$$PT = \sum_h P(f_h). \tag{7.39}$$

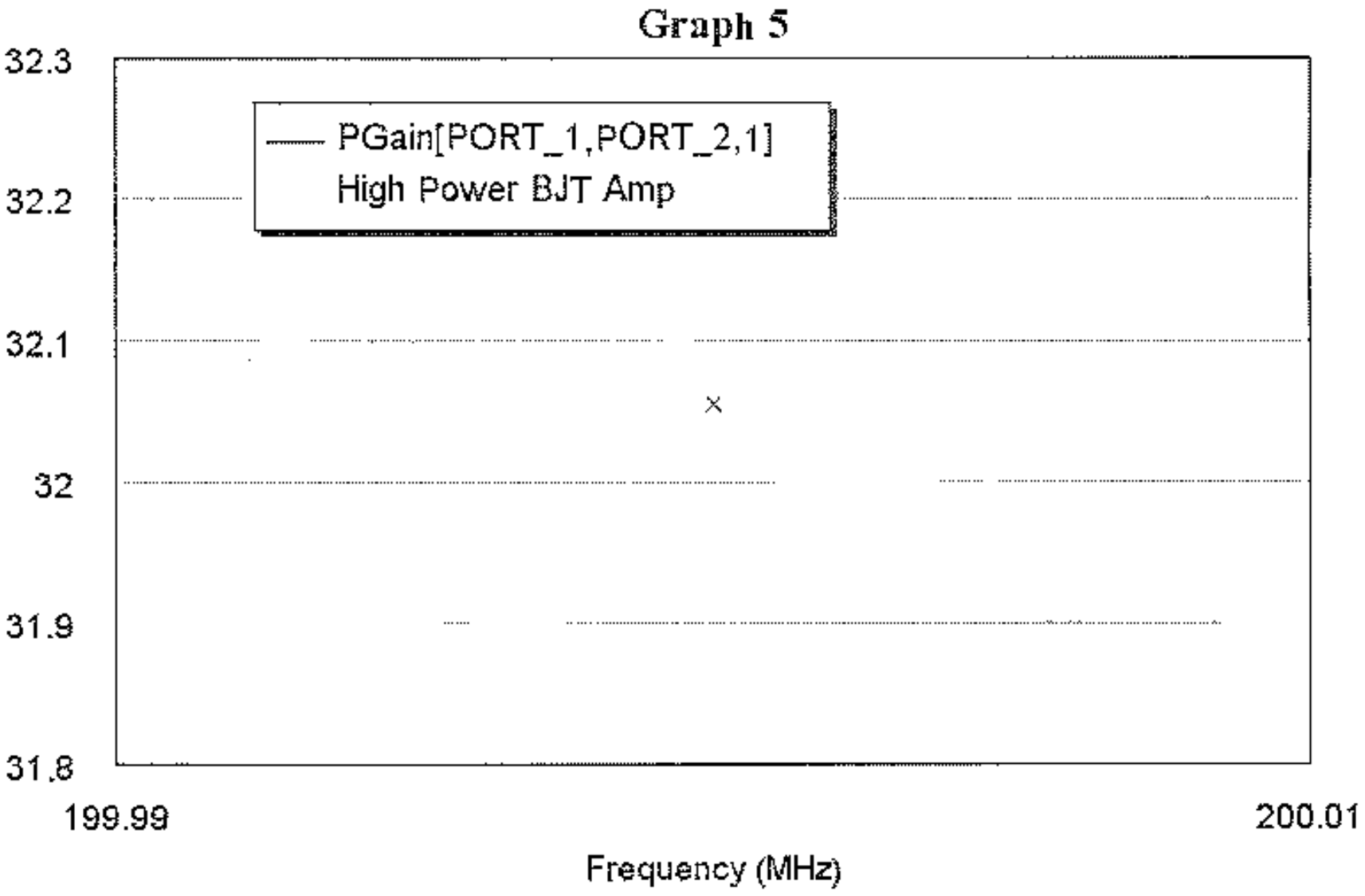


Рис 7.84. Значение усиления по мощности нелинейного усилителя в одной частотной точке

Исходные данные для расчета:

P1 — имя источника данных;

P2 — 1D измерителя мощности;

P3 — индекс мощности (целое число от 1 до 1000).

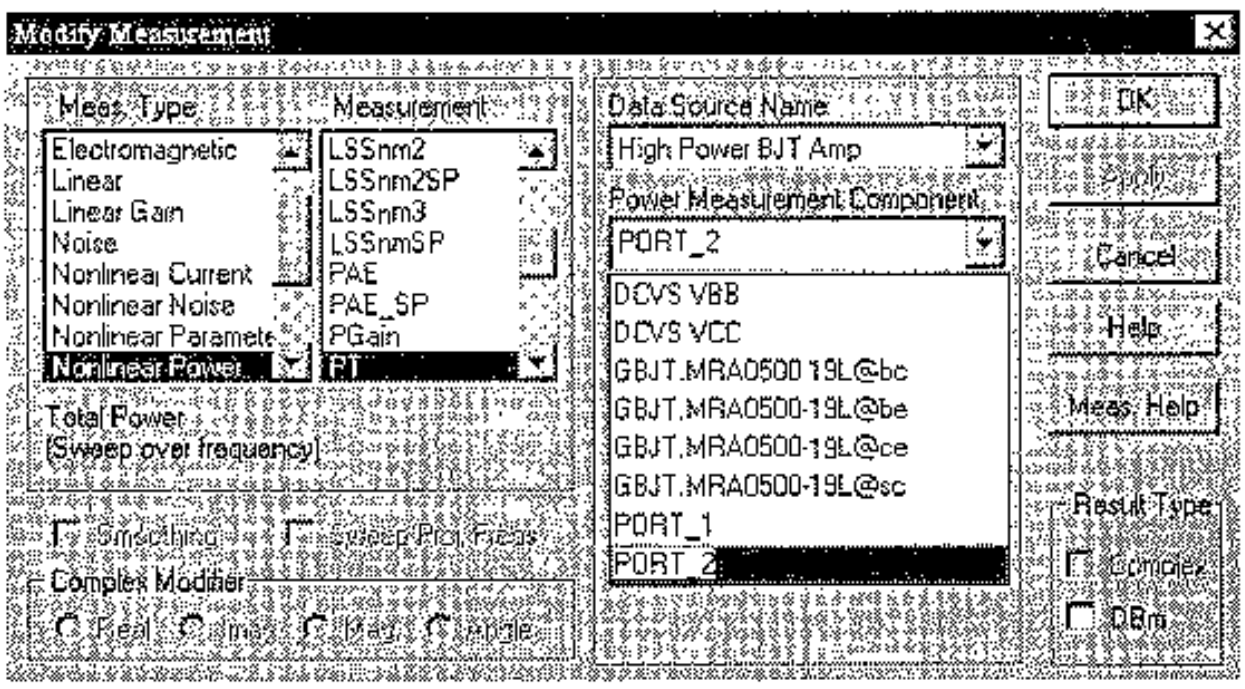


Рис. 7 85. Выбор компоненты для вывода общей выходной мощности в окне 1D измерителя мощности

Эта характеристика — реальная величина, измеряемая в единицах мощности. Характеристика может быть показана в dB, выбирая опцию «dB» в диалоге измерения. Ось X для этого измерения находится в единицах частоты. Эта характеристика может быть показана на прямоугольном графике или в таблице (рис. 7.86).

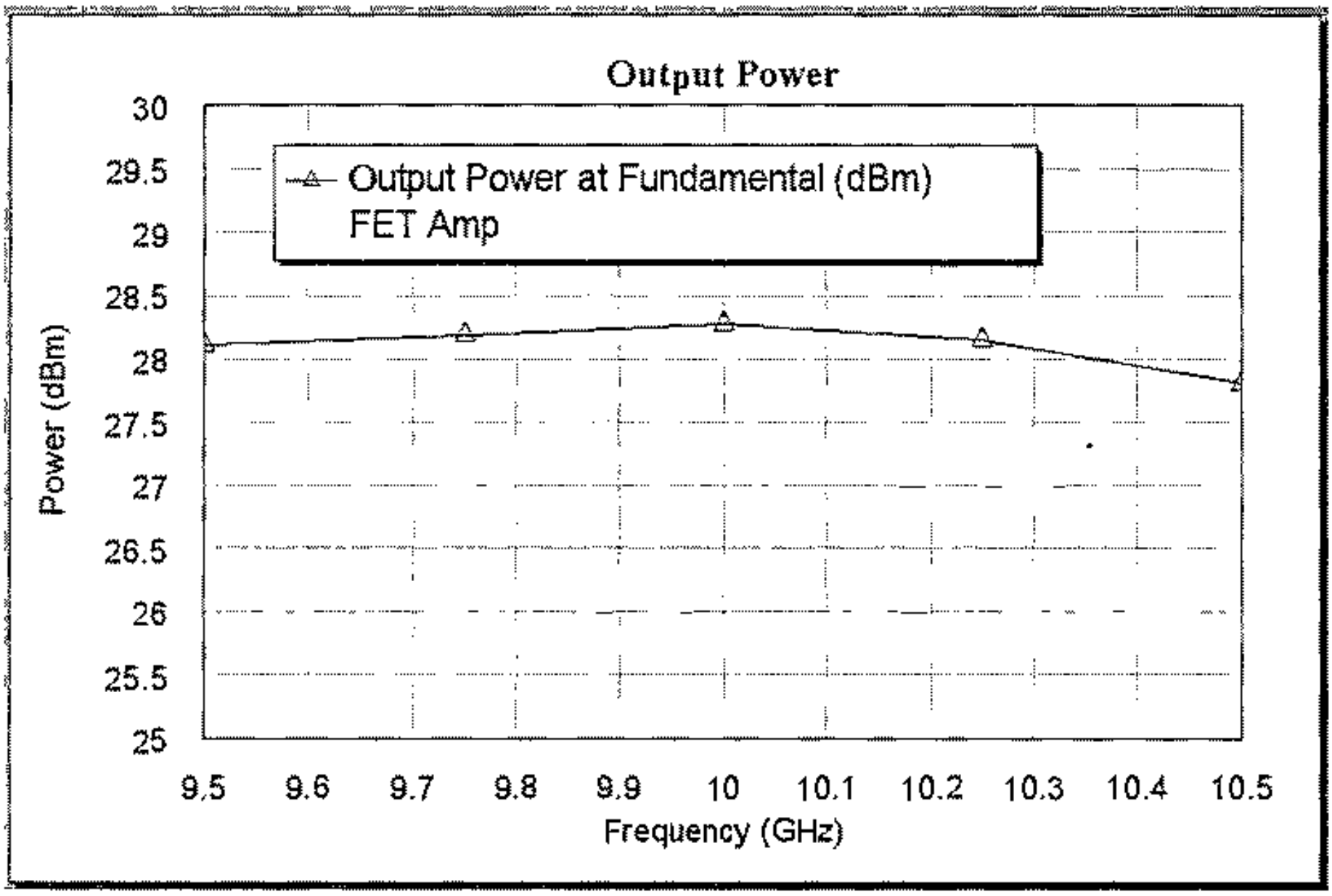


Рис. 7.86. Выходная мощность на выходе усилителя мощности при входной мощности равной 20 mW

Общая мощность (развертка по мощности) PTSP

Эта характеристика рассчитывает общую мощность, поглощаемая компонентой, включая мощность на DC и всех гармониках. Общая мощность дана

$$PT = \sum_{h} P(f_h). \tag{7.40}$$

Параметры для расчета:

P1 — имя источника данных (подсхема с от 0 до 1000 портов);
P2 — измеряемая мощность (измеритель мощности);
P3 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000).

Этот расчет возвращает реальную величину в единицах мощности. Характеристика может быть выведена в dB. Ось X для этой характеристики находится в единицах мощности.

Эта характеристика может быть показана на прямоугольном графике или в таблице.

Мощность гармонической составляющей (развертка по частоте) Pcomp

Этот расчет используется, чтобы получить мощность гармонической составляющей, измеряемой измерителем мощности или в порте. Величина мощности возвращается как комплексная величина в единицах мощности.

Чтобы получить DC мощность, задается гармонический индекс равный нулю. Получить мощность на фундаментальной частоте можно, задав гармонический индекс равный единице.

Параметры для расчета:

P1 — название источника данных (подсхема с от 0 до 1000 портов);

P2 — составляющая измерения (измеритель мощности);

P3 — индекс гармоники (0—1024);

P4 — индекс мощности (1...1000).

Частоты, показанные на оси X — изменяемые компоненты фундаментальной частоты, а не частотная величина компонента непосредственно (если гармонический индекс не выбран равным единице).

Этот расчет возвращает комплексную величину в единицах мощности (например, модуль и фазу гармоники). Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB».

Ось X для этого измерения находится в частотных единицах.

Мощность гармонической составляющей (при 2 сигнальном возбуждении) (развертка по частоте) Pcomp2

Эта характеристика используется, чтобы рассчитать мощность гармонической составляющей, измеряемой измерителем мощности или в порте. Величина мощности возвращается как комплексное значение r.m.s. от мощности гармоники.

Чтобы получить мощность компоненты постоянного тока DC, используйте индексы (0,0). Чтобы получить мощность на фундаментальной частоте тона, используется индекс гармоники (1,0). Чтобы получить мощность на фундаментальной частоте второго тона используют индекс (0,1).

Параметры расчета:

P1 — имя источника данных (подсхема с 0—1000 портов);

P2 — ID измерителя мощности;

P3 — индексы гармоник (h1, h2);

P4 — индекс изменения мощности (1—1000).

Частоты, показанные на оси X — изменяемые частоты фундаментальной компоненты первого тона.

Эта характеристика — комплексная величина в единицах мощности. Комплексное число может быть показано как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющие в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB».

Мощность гармонической составляющей (dBm) (с 2 тонами, развертка по мощности) Pcomp2SP

Эта характеристика рассчитывает мощность гармонической составляющей, измеряемой измерителем мощности или в порте. Величина мощности возвращается как комплексное значение r.m.s. от мощности гармоники.

Чтобы получить мощность DC, используйте индексы (0,0). Чтобы получать мощность на фундаментальной частоте первой гармоники, устанавливаются индексы (1,0). Чтобы получить мощность на фундаментальной частоте второй гармоники, устанавливаются индексы (0,1).

Параметры расчета:
P1 — имя источника данных (подсхема от 0 до 1000 портов);
P2 — составляющая измерения (измеритель мощности);
P3 — гармонические индексы (h1, h2);
P4 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика — комплексная величина в мощности (dBm). Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB». Ось X для этой характеристики — мощность (dBm).

Мощность гармонической составляющей (dBm) (развертка по мощности) PcompSP

Расчет используется, чтобы получить гармоническую составляющую мощности, измеряемой измерителем мощности или в порте. Величина мощности возвращается как комплексная величина r.m.s. мощности на частоте гармоники.

Чтобы получать DC мощность, используйте гармонический индекс ноль. Чтобы получить мощность на фундаментальной частоте установите индекс гармоники, равный единице.

Параметры измерения:
P1 — имя источника данных (подсхема от 0 до 1000 портов);
P2 — ID измерителя мощности;
P3 — гармонический индекс (0—1024);
P4 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика — комплексная величина в мощности (dBm). Комплексная величина может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB».

Ось X для этого измерения — мощность в dBm.

Мощность в частотной области Pharm

Эта характеристика — спектр мощности, измеряемый измерителем мощности или в порте. Величины мощности рассчитываются как среднеквадратичное значение мощности каждой гармоники.

Параметры для расчета:
P1 — имя источника данных;
P2 — ID измерителя мощности;
P3 — индекс охвата частоты (целое число от 1 до 1000);
P4 — индекс охвата мощности (целое число от 1 до 1000).

Результат

Эта характеристика — комплексная величина в единицах мощности. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB».

Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут быть показаны на прямоугольном графике. Эта характеристика может также быть показано на полярной диаграмме или в таблице. Ось X для этой характеристики — частота. Значения частот на оси X соответствуют гармоникам спектра.

Мгновенная мощность Ptime

Этот расчет выводит мгновенную мощность во временной области, используя измеритель мощности или на порту. Величина мощности выводится как реальное среднеквадратичное значение мощности временного сигнала. Для анализа с одним тоном, будут показаны два периода сигнала.

Параметры измерения:

P1 — имя источника данных;

P2 — ID измерителя мощности;

P3 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000);

P4 — индекс мощности (целое число от 1 до 1000).

Результат

Эта характеристика выводится как реальная величина в единицах мощности. Измерение может быть показано в dB, выбирая опцию «dB» в диалоге измерения. Ось X для этой характеристики измеряется в единицах времени.

Эта зависимость может быть показана на прямоугольном графике или в таблице.

7.10. Нелинейные характеристики по напряжению

Напряжение гармонической составляющей (развертка по частоте) Vcomp

Эта характеристика — гармоническая составляющая напряжения, измеряемого вольтметром на узле или в порте. Величина напряжения возвращается как комплексная величина напряжения на частоте гармоники.

Чтобы получить постоянную составляющую напряжения, используется **Harmonic Index = 0**. Чтобы получить напряжение на фундаментальной частоте, установите гармонический индекс 1.

Параметры, устанавливаемые в диалоге вывода характеристики (рис. 7.87):

P1 — имя подсхемы или схемы;

P2 — измерительный прибор (вольтмегр);

P3 — гармонический индекс (целое число от 0 до 1024);

P4 — индекс мощности (целое число от 1 до 1000). Если мощность задана постоянной, то этот индекс должен быть всегда установлен равным единице.

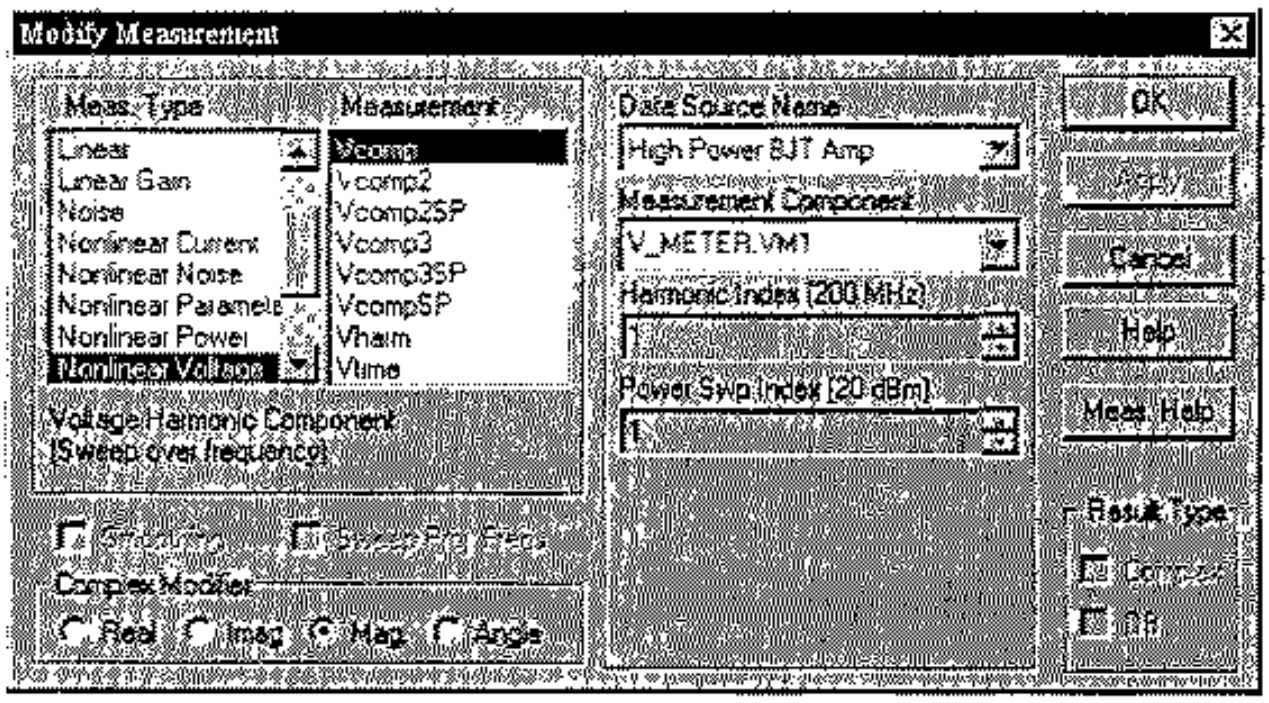


Рис. 7.87. Вывод нелинейного напряжения на заданном вольтметре

Частоты, показанные на оси X — индексы от фундаментальной частоты, а не значение частоты непосредственно (если гармонический индекс не выбран равным единице).

Эти расчеты дают комплексные величины в единицах напряжения. Комплексная величина может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в дивлоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB.

Напряжение гармонической составляющей (с 2 тонами) (развертка по частоте) Vcomp2

Этот расчет дает гармоническую компоненту напряжения, измеряемого вольтметром на узле или в порте. Величина напряжения возвращается как комплексная величина на частоте гармоники (чтобы получить r.m.s, вы должны разделить рассчитанную величину на квадратный корень 2).

Чтобы получить постоянную составляющую напряжения, используйте гармонические индексы (0,0). Чтобы получить напряжение на фундаментальной частоте первого тона выберите индекс (1,0), а для второго тона нужно установить индекс (0,1).

Параметры расчета:

P1 — имя подсхемы;

P2 — вольтметр, измеряющий напряжение;

P3 — индексы гармоник (h1, h2);

P4 — индекс мощности (от 1 до 1000).

Этот расчет возвращает комплексную величину в единицах напряжения. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге расчета. Реальная величина может также быть показана в dB. Ось X для этого измерения находится в частотных единицах.

Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут быть показаны на прямоугольном графике. Эта характеристика может также быть показана на полярной диаграмме или в таблице.

Напряжение гармоники (с 2 тонами на входе) (развертка по мощности) Vcomp2SP

Этот расчет используется, чтобы получить напряжение гармоники, измеряемой вольтметром или в порте. Величина напряжения возвращается как комплексная величина напряжения на частоте гармоники.

Чтобы получить постоянную составляющую напряжения, используйте гармонические индексы (0,0). Чтобы получать напряжение на фундаментальной частоте, используйте индекс (1,0). Чтобы получить напряжение на фундаментальной частоте, используется индекс двух гармоник (0,1).

Параметры расчета (указываются на графике вывода):

P1 — имя источника данных;

P2 — вольтметр;

P3 — индексы гармоник (h1, h2);

P4 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000).

Ось X для этого измерения находится в единицах мощности.

Расчет возвращает комплексную величину в единицах напряжения. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющая в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB».

Характеристика может также быть показана на полярной диаграмме или в таблице.

Сглаживание не позволяется для этого расчета. Такой расчет всегда использует только заданные частоты.

Напряжение гармонической составляющей (развертка по мощности) VcompSP

Этот расчет используется, чтобы получить напряжение гармонической компоненты, измеряемого вольтметром или в порте. Величина напряжения возвращается аналогично комплексной величине компоненты тока на частоте.

Чтобы получать DC напряжение, используйте гармонический индекс ноль. Чтобы получить напряжение на фундаментальной частоте используйте гармонический индекс 1.

Параметры расчета:

P1 — имя источника данных;

P2 — компонента, которая измеряет напряжение;

P3 — индекс гармоники (целое число от 0 до 1024);

P4 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика является комплексной величиной в единицах напряжения. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB. Ось X для этого расчета — мощность в dBm.

Напряжение в частотной области Vharm

Этот расчет используется, чтобы получить спектр напряжения, измеряемый вольтметром в узле или в порте. Величина напряжения возвращается как спектр комплексных величин всех компонентов напряжения на каждой частоте гармоники.

Параметры расчета:
P1 — имя источника данных;
P2 — характеристика (напряжение на элементе или в узле);
P3 — индекс изменения частоты (1—1000);
P4 — индекс мощности (1—1000).

Ось X для этого измерения находится в частотных единицах. Частотные величины на оси X соответствуют гармоническим частотам спектра.

Эта характеристика — комплексное значение в единицах напряжения. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, определяя модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB.

Результаты, показанные на рис. 7.88, 7.89, относятся к анализу усилителя в диапазоне частот от 1 до 20 ГГц через 1 ГГц, с двумя генераторами на входе с мощностью 0,1 мВт.

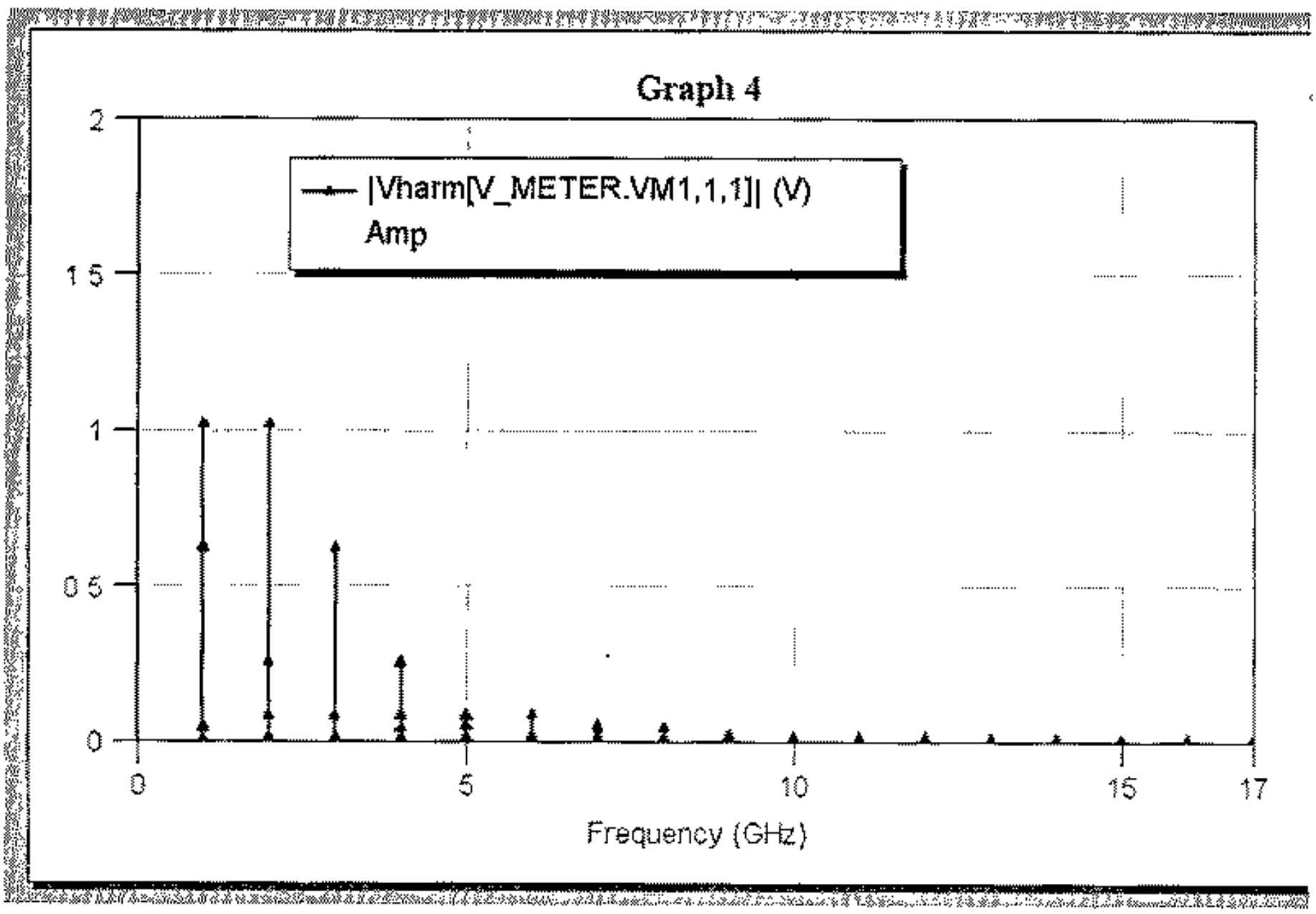


Рис 7.88. Спектр на выходе усилителя при частотном индексе, равном 1

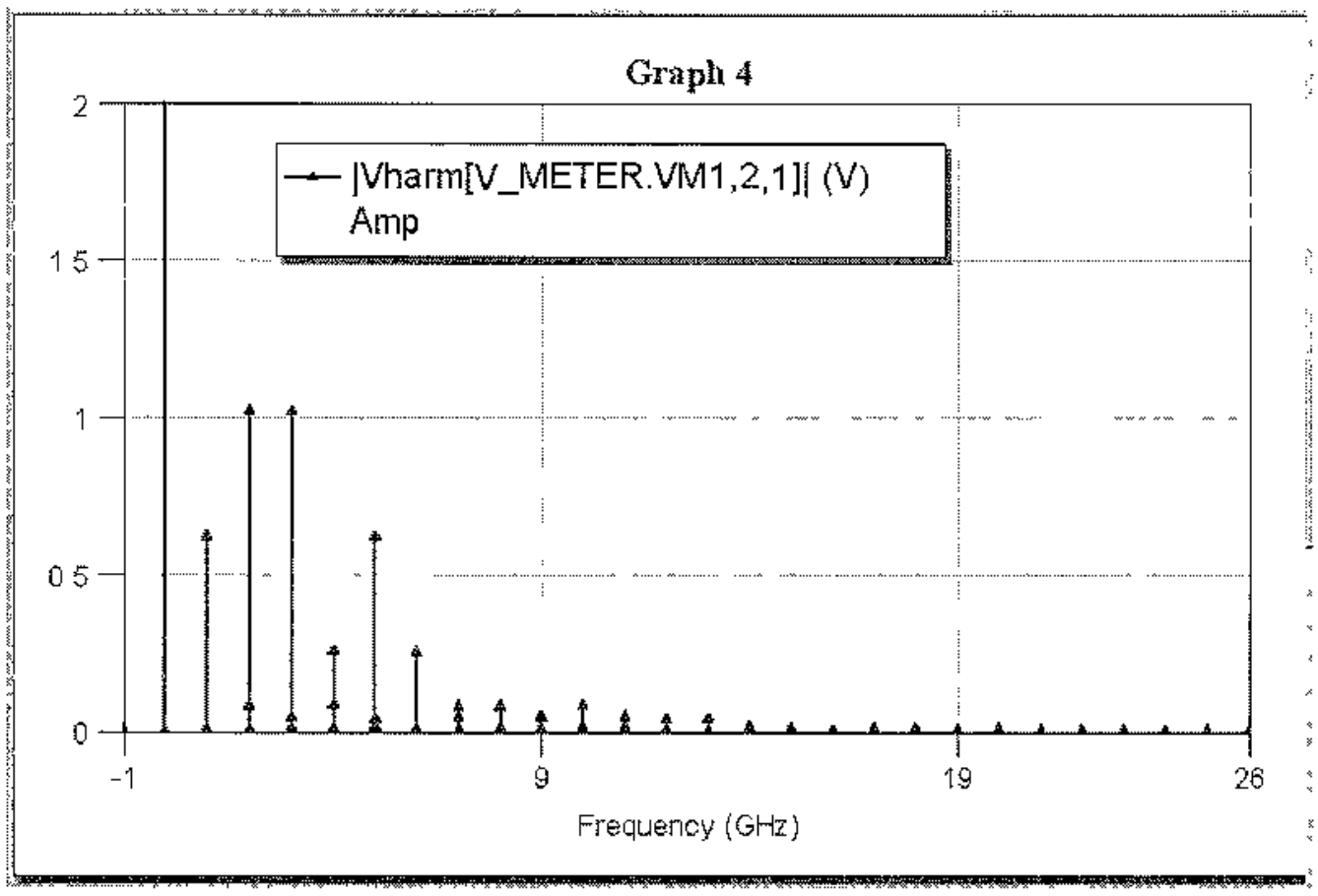


Рис. 7.89. Спектр на выходе усилителя при частотном индексе равном 2,1

Напряжение во временной области Vtime

Эта характеристика — напряжение во временной области, рассчитывается, используя вольтметр или порт. Величина напряжения выводится как реальная рассчитанная форма волны напряжения сигнала во временной области. Для анализа с одним тоном, будут показаны два периода сигнала.

Параметры для расчета:
P1 — имя подсхемы;
P2 — вольтметр, измеряющий напряжение;
P3 — частотный индекс (целое число от 1 до 1000);
P4 — индекс мощности (целое число от 1 до 1000).

Эти расчеты возвращают реальные величины в единицах напряжения. Измерение может быть показано в dB, выбирая опцию «dB» в диалоге измерения. Ось X для этой характеристики в единицах времени.

Сглаживание не позволяется для этой характеристики. Характеристика всегда использует частоты, установленные в проекте.

Выбор файла для вывода нелинейных характеристик

Чтобы модифицировать выходной файл, щелкните правой кнопкой мыши на выходном файле в дереве проекта и выберите параметры редактирования, чтобы открылся диалог **Output Data File** (файл выходных данных, рис. 7.90).

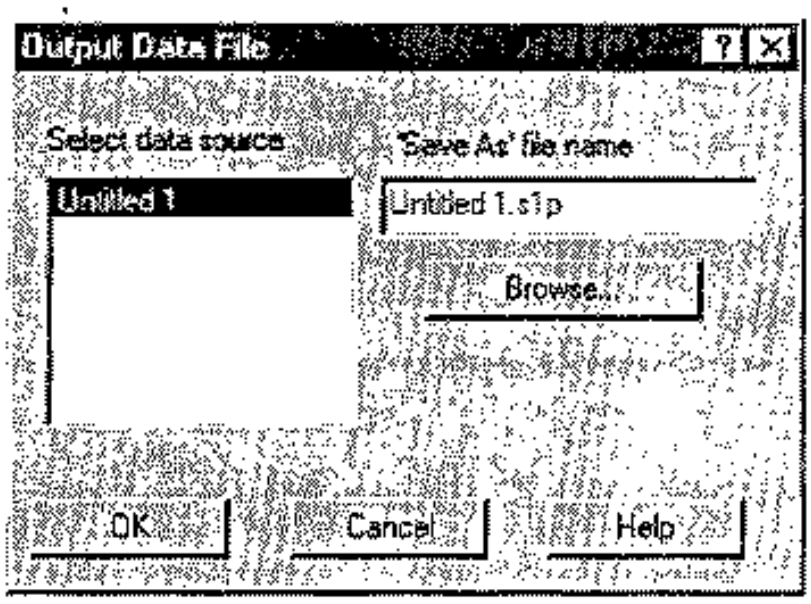


Рис. 7.90. Диалоговое окно **Output Data File**

Вывод характеристик в виде файла применяется часто при анализе нелинейных схем, поскольку рассчитанные данные в виде AM/AM и AM/PM характеристик можно использовать для анализа на системном уровне (глава 10).

7.11. Большесигнальные нелинейные характеристики

Большесигнальный коэффициент отражения (Gcomp)

Этот коэффициент отражения есть нелинейный параметр в состоянии большесигнального возбуждения, т. е. при уровне сигнала, при котором появляются существенные нелинейные искажения на активных элементах схемы. Коэффициент отражения может быть определен на любой из гармонических частот, хотя наиболее общий случай рассматривается на фундаментальной частоте. Расчет принимает, что не имеется никаких источников в той части схемы, которая расположена правее сечения Gamma (Г) (рис. 7.91).

Например, большесигнальный Г для схемы 7.92 равен $\Gamma = (R - Z) / (R + Z) = (150 - 50) / (150 + 50) = 0{,}5$ для Г, рассчитываемого в порте 1 на фундаментальной частоте.

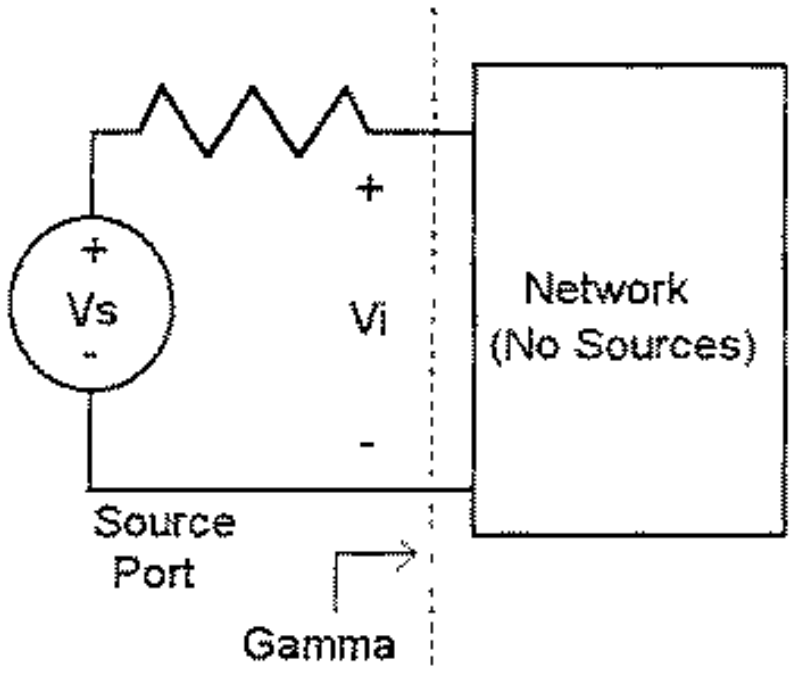


Рис. 7.91. Схема определения большесигнального коэффициента отражения

Измеритель мощности также может использоваться, чтобы определить коэффициент отражения. Расчет большесигнального Г обычно используется с портом возбуждения и так как положительные токи текут в порт, при расчете автоматически изменяет направление тока для вычисления (который требует, чтобы ток был определен как вытекающий из порта). В результате при использовании измерителя мощности, чтобы измерить большесигнальное Г, амперметр должен быть помещен так, что направление тока — противоположно фактическому направлению тока, текущему в

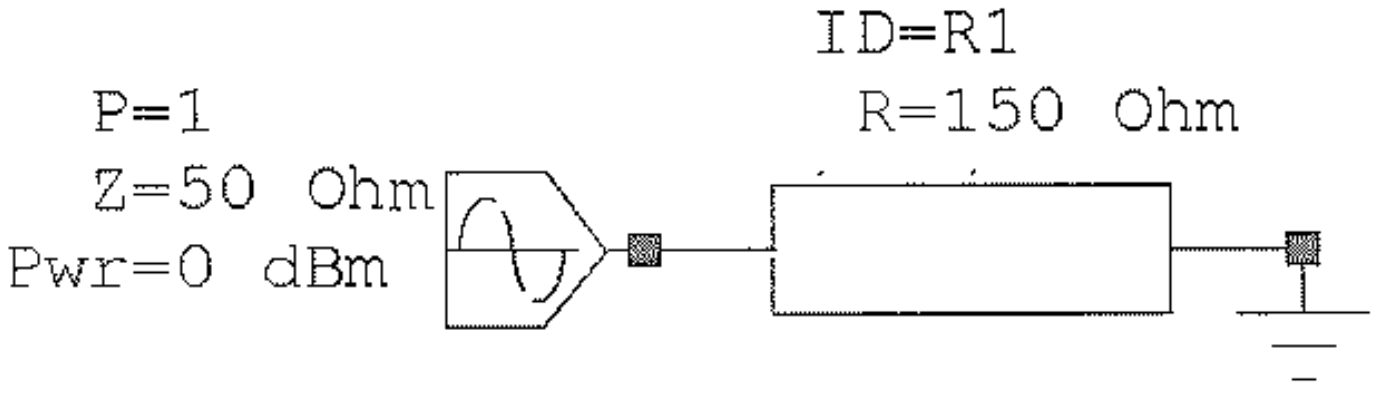


Рис. 7.92. Пример нагрузки 150 Ом

схему. Пример показывается ниже, где большесигнальный коэффициент отражения, рассчитываемый с помощью амперметра, равен 0,5.

Величина Г — это параметр S_{11} двухполюсника. Рассмотрим рис. 7.93. Программа рассчитывает токи и напряжения на входе следующим образом:

$$I = \frac{E}{Z_0 + Z_н}. \tag{7.41}$$

$$U = \frac{EZ_н}{Z_0 + Z_н}. \tag{7.42}$$

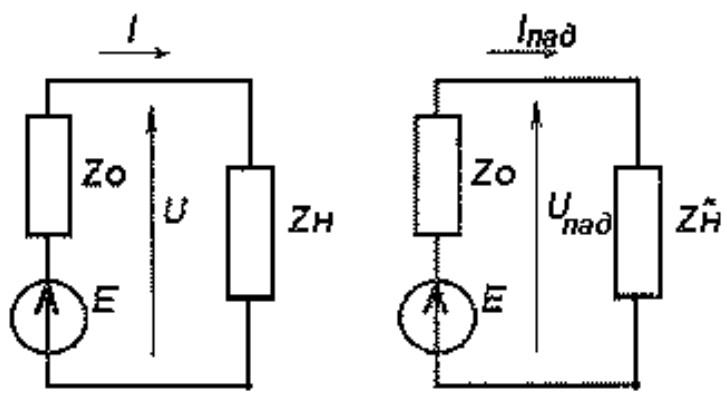


Рис. 7.93. Связь тока, напряжения и параметров рассеяния нагрузки $Z_н$

Для определения падающих волн используется режим комплексного сопряжения, при котором в нагрузку поступает максимальная мощность. В этом случае

$$I_{пад} = \frac{E}{Z_0 + Z_0^*} = \frac{E}{2\,\mathrm{Re}\,Z_0}. \tag{7.43}$$

$$U_{пад} = \frac{EZ_0^*}{Z_0 + Z_0^*} = \frac{EZ_0^*}{2\,\mathrm{Re}\,Z_0}. \tag{7.44}$$

Отраженные компоненты рассчитываются из выражений

$$I = I_{пад} - I_{отр}, \tag{7.45}$$

$$U = U_{пад} + U_{отр}. \tag{7.46}$$

Подставляя (7.41) и (7.43) в (7.45), получаем выражение для «отраженного» тока

$$I_{отр} = I_{пад} - I\left(\frac{Z_н - Z_0^*}{Z_н + Z_0}\right)I_{пад} = S^I I_{пад}, \tag{7.47}$$

где S^I — параметр рассеяния тока для двухполюсника.

Аналогично, подставляя (7.42) и (7.44) в (7.46), получаем:

$$U_{отр} = U - U_{пад} = \frac{Z_0}{Z_0^*}\left(\frac{Z_н - Z_0^*}{Z_н + Z_0}\right)U_{пад} = \frac{Z_0}{Z_0^*}S^I U_{пад} = S^U U_{пад}. \qquad (7.48)$$

Очень часто Z_0 является чисто активным. В этом случае

$$Z_0 = R_0 \quad Z_0^* = R_0 \qquad (7.49)$$

и тогда

$$S^I = S^U = \frac{Z_н - R_0}{Z_н + R_0}. \qquad (7.50)$$

Это коэффициент отражения в линии передачи (**Gamma** на рис. 7.94) с характеристическим сопротивлением R_0 (Z на рисунке), подключенной к нагрузке Z_0 (R на рисунке).

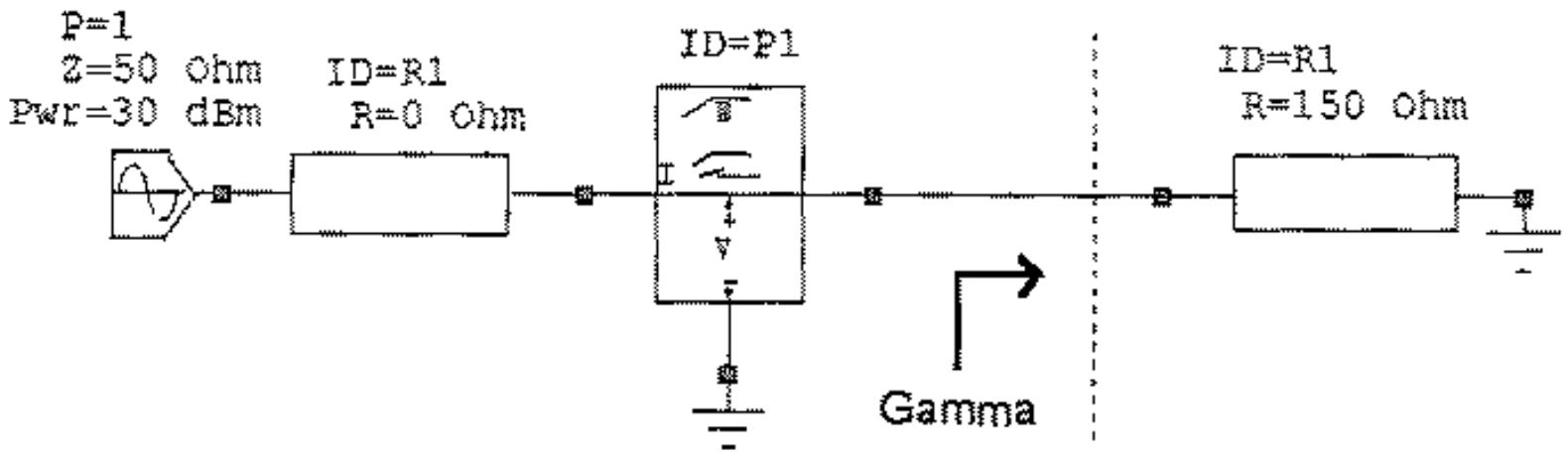


Рис. 7.94. Схема измерения (расчета) большесигнального коэффициента отражения

Параметры расчета (рис. 7.95):

P1 — имя источника данных (подсхема с 0—1000 портов);
P2 — прибор измерения отраженной составляющей (измеритель мощности);
P3 — гармонический индекс, от 0 до 1024;
P4 — индекс мощности, от 1 до 1000.

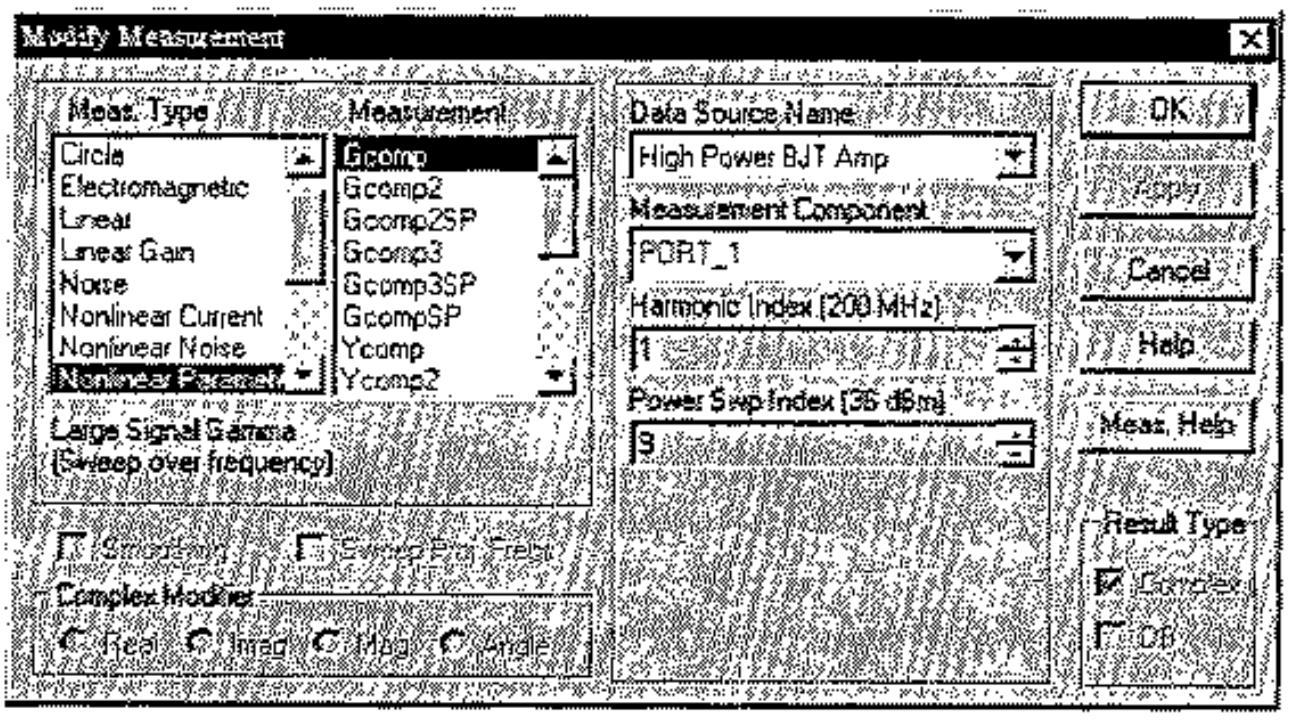


Рис. 7.95. Окно вывода нелинейной характеристики Gcomp

Эта характеристика — комплексная величина и может быть показана на диаграмме Смита, полярной диаграмме или в таблице. Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут также быть показаны на прямоугольном графике. Интерполяция не позволяется для этой характеристика. Эта характеристика использует только частоты, точно установленные в задании.

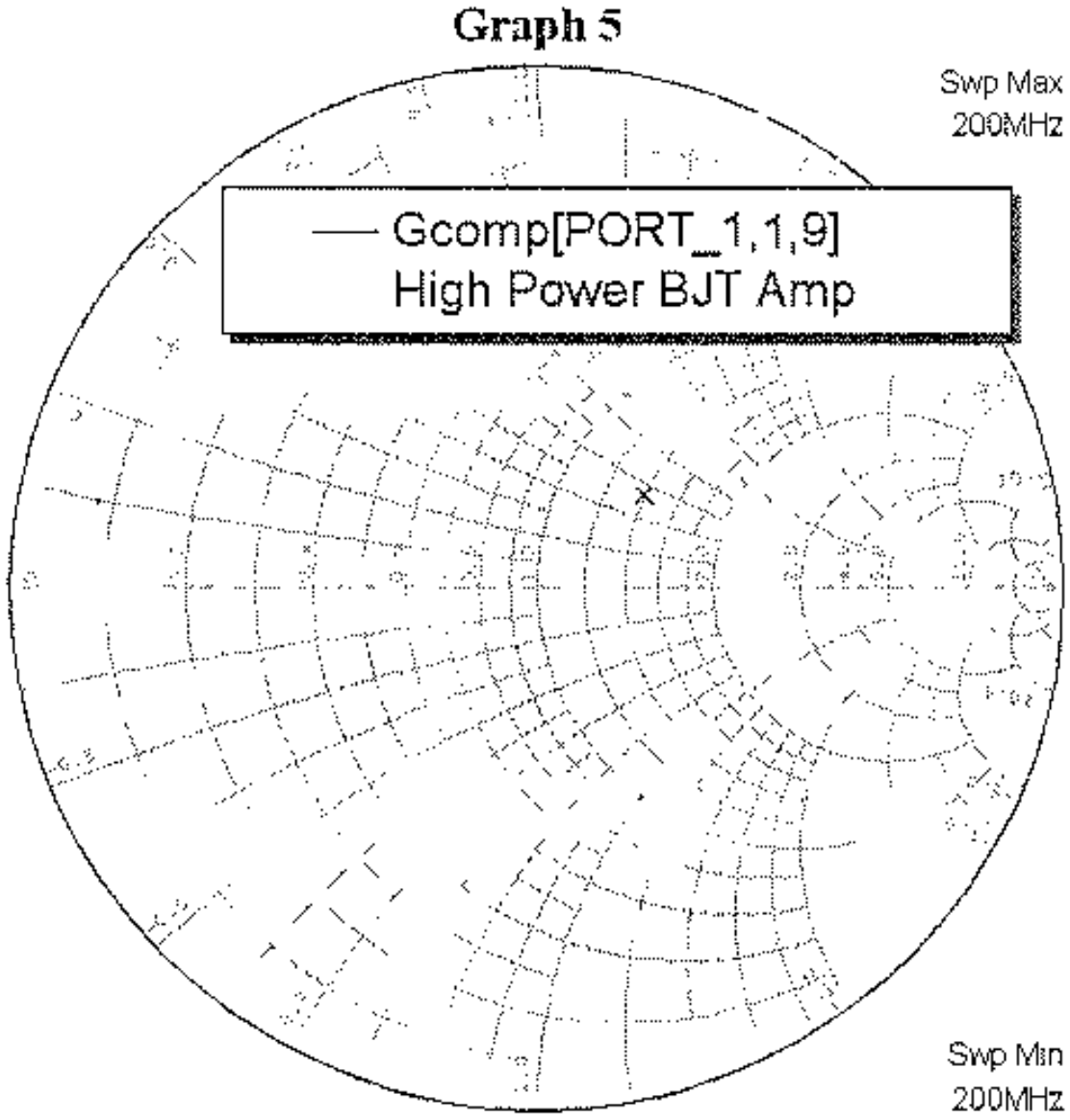


Рис. 7.96. Результат расчета большесигнального коэффициента отражения усилителя мощности

Большесигнальный коэффициент отражения (двухсигнальный) (развертка по частоте) Gcomp2

Эта характеристика — коэффициент отражения на сигналах большой мощности, но ниже состояния возбуждения. Эта характеристика — точно такая же, как Gcomp, за исключением того, что большесигнальный Г рассчитывается на точно установленных частотах при двухсигнальном моделировании.

Параметры расчета:

P1 — имя подсхемы с 0—1000 портами;
P2 — 1D измерителя мощности;
P3 — гармонические индексы (h1, h2);
P4 — индекс мощности (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика — комплексная величина. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB». Ось X для этого измерения находится в частотных единицах.

Характеристика выводится на диаграмму Смита, полярную диаграмму или таблицу. Модуль, угол, реальная или мнимая составляющие могут также показаны на прямоугольном графике.

Сглаживание не выполняется для этого расчета, расчет выполняется только на заданных частотах.

Большесигнальный коэффициент отражения (с 2 тонами) (развертка по мощности) Gcomp2SP

Эта характеристика — коэффициент отражения ниже состояния большесигнального возбуждения. Данная характеристика точно такая же как Gcomp, за исключением того, что большесигнальный Г должен рассчитываться на точно установленных частотах при двухсигнальном моделировании и вместо частоты изменяется мощность. Для расчета этой характеристики на входе должен быть установлен источник с двумя гармониками.

Параметры расчета:
P1 — имя подсхемы с 0—1000 портами;
P2 — ID измерителя мощности;
P3 — гармонические индексы (h1, h2);
P4 — частотный индекс (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика — комплексная величина и может быть показана на диаграмме Смита, полярной диаграмме или в таблице. Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут быть также показаны в прямоугольной системе координат.

Сглаживание не допускается для этого расчета, в расчетах всегда используются частоты, точно заданные в проекте.

Большесигнальный коэффициент отражения (развертка по мощности) GcompSP

Эта характеристика аналогична **Gcomp**, за исключением изменения мощности вместо частоты.

Параметры расчета (рис. 7.97):
P1 — имя подсхемы от 0 до 1000 портов;
P2 — ID измерителя мощности;

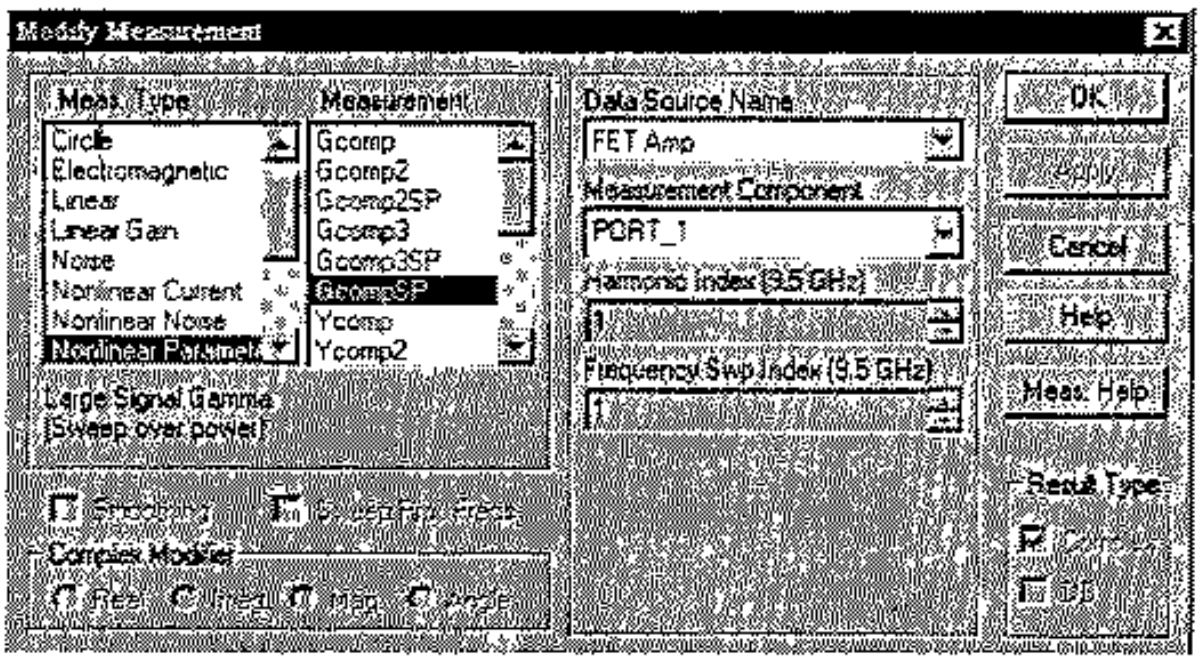


Рис. 7.97. Вывод на график большесигнального коэффициента отражения на частоте 9,5 ГГц

P3 — гармонический индекс (целое число от 0 до 1024);
P4 — частотный индекс (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика — комплексная величина, которая может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая «dB» опцию. Ось X для этого расчета — мощность (dBm).

Эта характеристика может быть показана на диаграмме Смита, полярной диаграмме или в таблице. Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут также быть показаны на прямоугольном графике. Интерполяция не позволяется для этого расчета. Расчет всегда использует частоты, установленные в проекте.

Большесигнальная полная проводимость (развертка по частоте) Ycomp

Этот расчет используется чтобы получить полную проводимость в условиях действия большого сигнала. Полная проводимость может быть определена на любой из гармонических частот, хотя наиболее общий случай соответствует расчету на фундаментальной частоте. При расчете принимается, что не имеется никаких источников в направлении, в котором рассчитывается полная проводимость как показано на рис. 7.98.

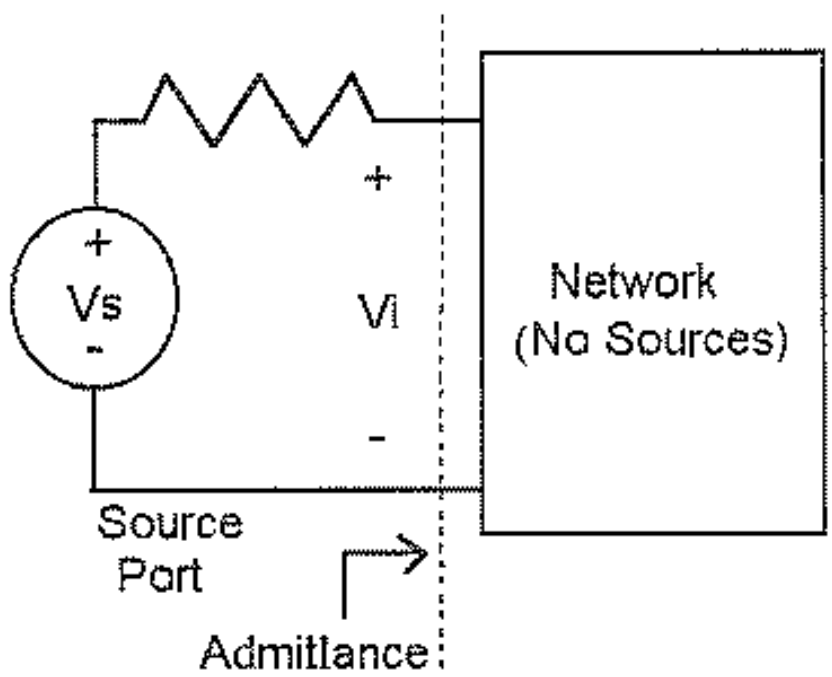


Рис. 7.98. Определение входного адмитанса на входе схемы

Например, большесигнальная полная проводимость для схемы рис. 7.99 равна Y = 1/150 (См), для полной проводимости, измеряемой в порте и на фундаментальной частоте.

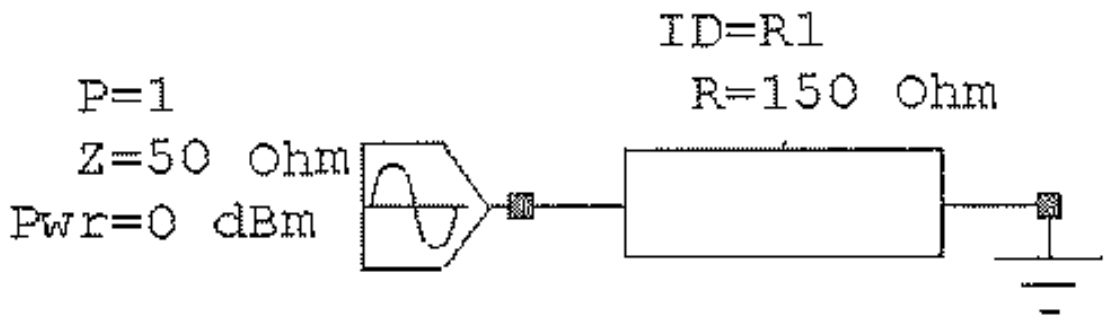


Рис. 7.99. Подключение к порту сопротивления 150 Ом

Измеритель мощности может также использоваться, чтобы рассчитать полную проводимость.

Параметры расчета (рис. 7.100):
P1 — имя источника данных;
P2 — 1D измерителя мощности;
P3 — гармонический индекс (целое число от 0 до 1024);
P4 — индекс мощности (целое число 1—1000).

В результате расчета получается комплексная величина в единицах проводимости, которая может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол,

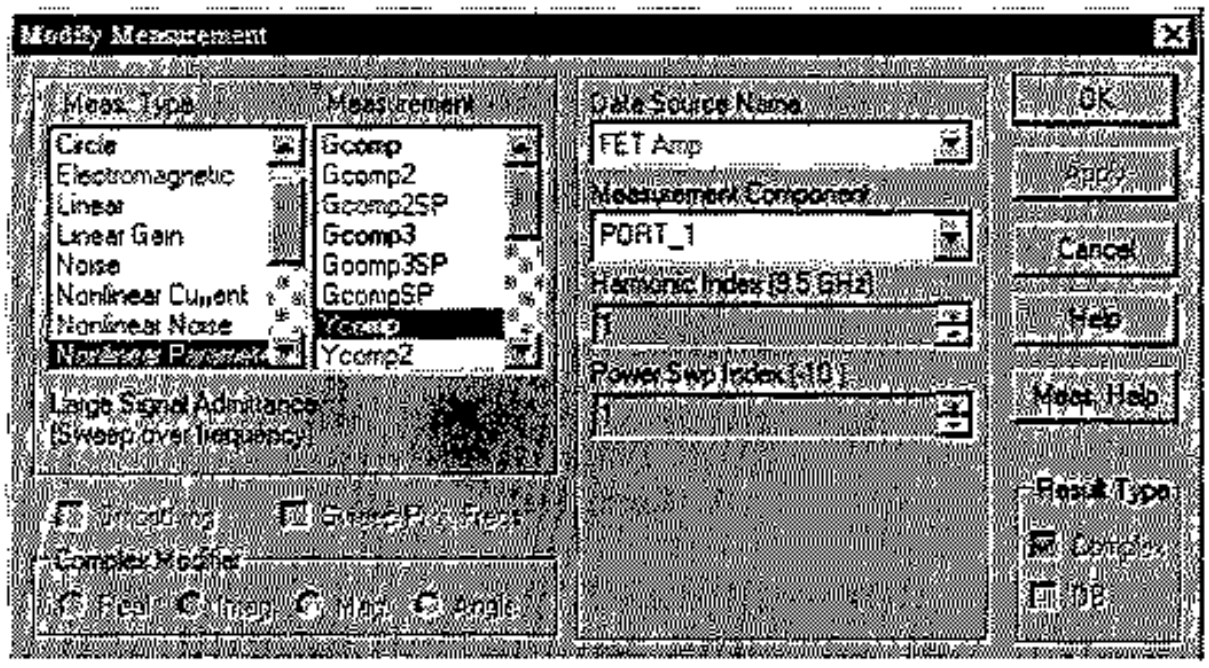


Рис. 7.100. Вывод нелинейной проводимости

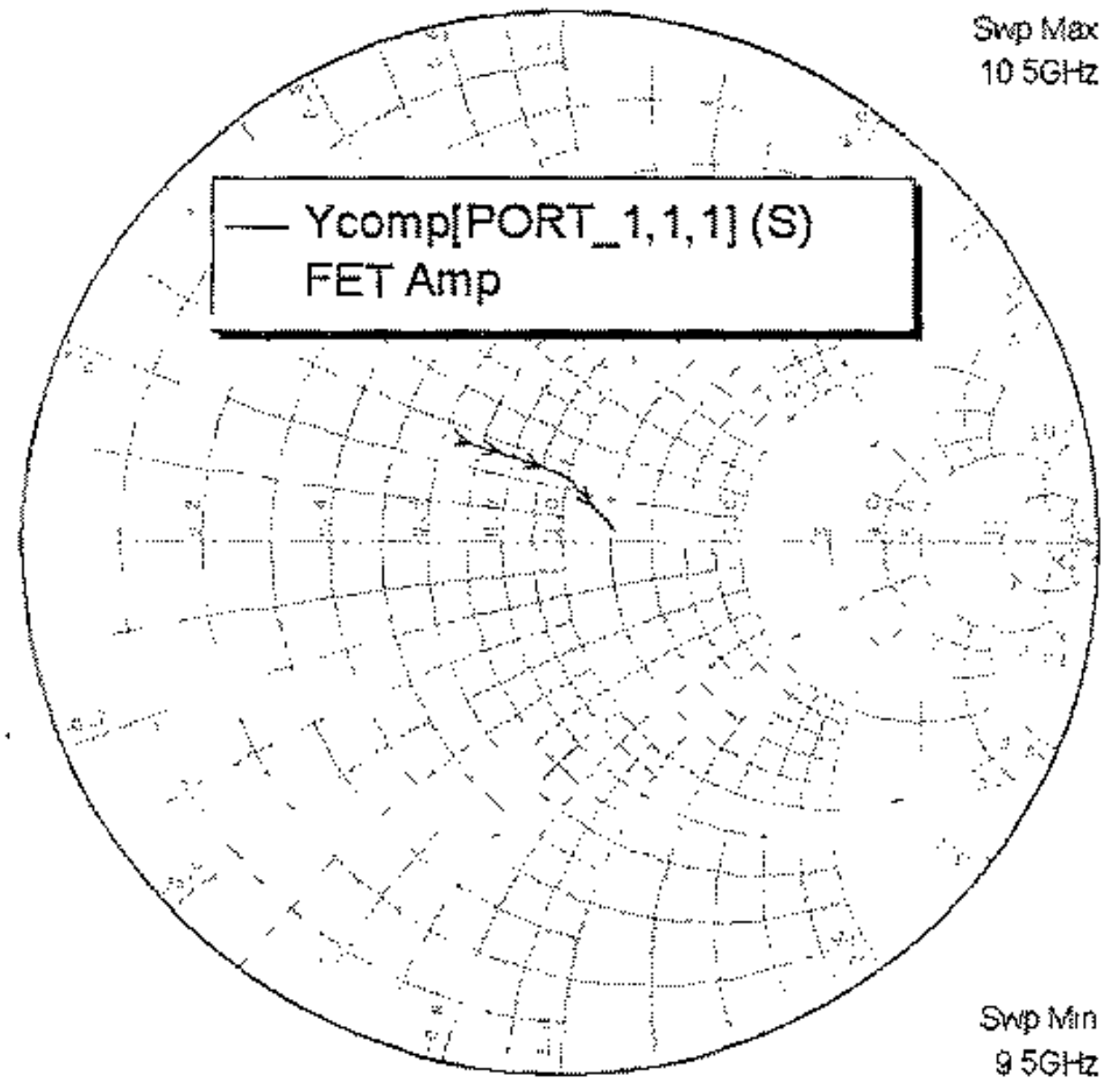


Рис. 7.101. Входная проводимость в условиях воздействия большого сигнала

реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB». Ось X для этой характеристики — частота.

Результаты выводятся на диаграмму Смита (рис. 7.101), полярную диаграмму или в таблицу. Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут также быть показаны на прямоугольном графике.

Большесигнальная полная проводимость (с 2 тонами) (развертка по частоте) Ycomp2

Этот расчет дает полную проводимость при уровне сигнала ниже большесигнального состояния возбуждения. Эта характеристика рассчитывается аналогично Ycomp за исключением того, что большесигнальная полная проводимость сигнала рассчитывается на точно установленных гармониках при двухсигнальном возбуждении.

Параметры расчета:

P1 — имя источника данных (подсхема с от 0 до 1000 портов);

P2 — составляющая расчета (используемый прибор, чтобы измерить мощность);

P3 — гармонические индексы (h1, h2);

P4 — индекс выбора мощности (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика — комплексная величина в единицах проводимости, которую можно вывести на диаграмму Смита, а также на график, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB». Ось X для этой характеристики — частота.

Большесигнальная полная проводимость (с 2 тонами) (развертка по мощности) Ycomp2SP

Этот пункт расчета может использоваться, чтобы получить полную проводимость на больших уровнях сигнала. Эта характеристика аналогична Ycomp, за исключением того, что большесигнальная полная проводимость должна рассчитываться на точно установленных гармониках при двухсигнальном моделировании, и изменяется мощность, вместо частоты.

Параметры измерения:

P1 — название источника данных (подсхема с от 0 до 1000 портов);

P2 — ID измерителя мощности;

P3 — гармонические индексы (h1, h2);

P4 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000).

Этот расчет дает комплексную величину в единицах проводимости. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге расчета. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB». Ось X для этого измерения находится в мощности (в dBm). Характеристика выводится на диаграмму Смита, полярную диаграмму или в таблицу. Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут быть показаны на прямоугольном графике.

Большесигнальная полная проводимость (развертка по мощности) YcompSP

Этот расчет дает полную проводимость ниже большесигнального возбуждения. Эта характеристика аналогична Ycomp, за исключением того, что изменяемая переменная — мощность, вместо частоты.

Для расчет необходимо задать:
P1 — имя источника данных;
P2 — 1D прибора для измерения мощности;
P3 — гармонический индекс (целое число от 0 до 1024);
P4 — индекс охвата частоты (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика — комплексная величина в единицах проводимости. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющие в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB». Ось X для этого измерения мощность (в dBm). Эта характеристика может быть показана на диаграмме Смита (рис. 7.102), полярной диаграмме или в таблице. Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут также быть показаны на прямоугольном графике.

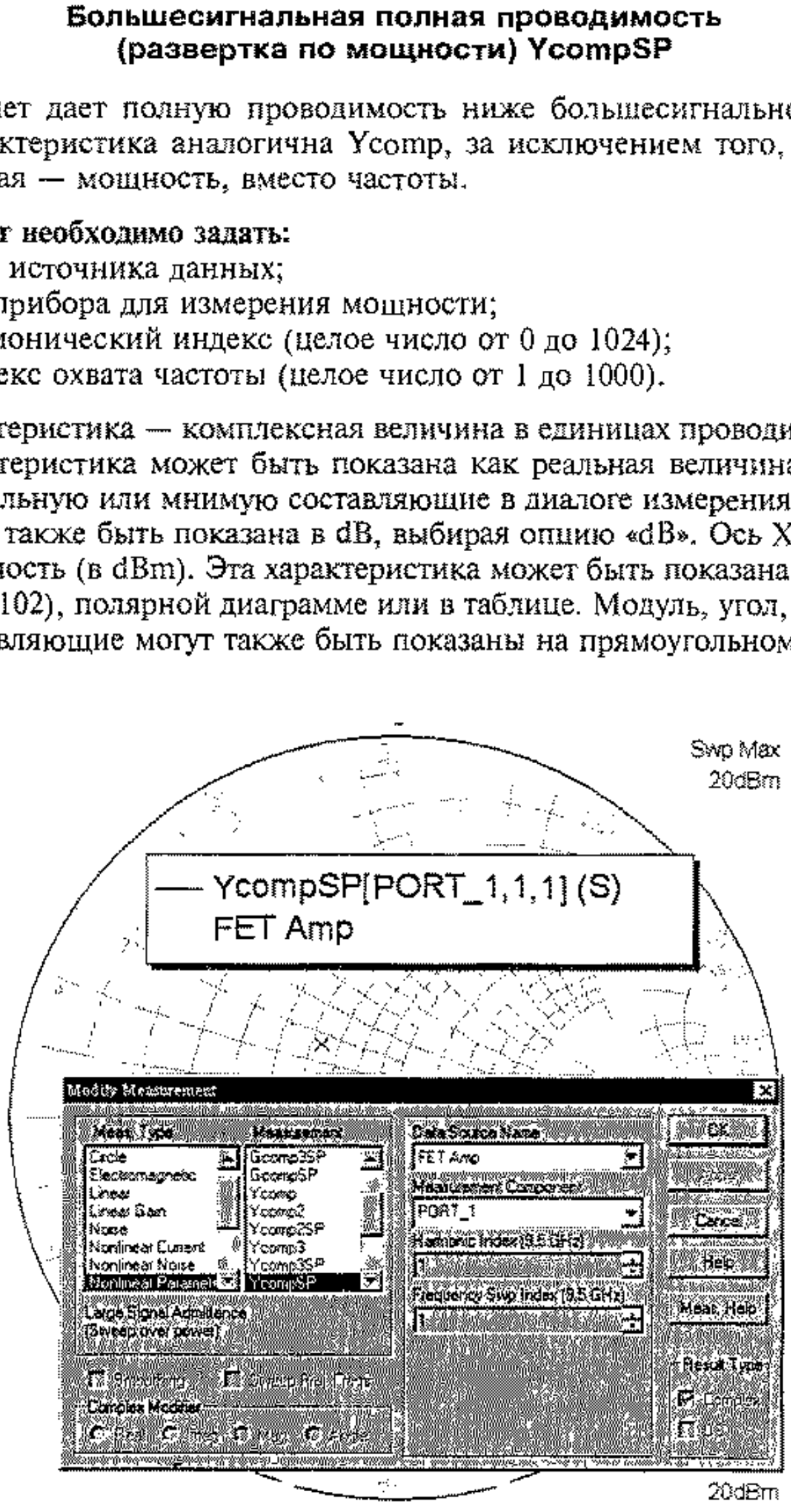


Рис. 7.102. Диалог вывода и характеристика YcompSP

Большесигнальное полное сопротивление Zcomp

Этот пункт расчета может использоваться, чтобы получить большесигнальное полное сопротивление. Полное сопротивление может быть определено на любой из частот, хотя наиболее общий случай будет на фундаментальной частоте. При

расчете считается, что не имеется никаких источников, смотрящих в направлении, в котором рассчитывается полное сопротивление, как показано на рис. 7.103.

Например, большесигнальное полное сопротивление для схемы рис. 7.104, дает Z = 150 Ом для полного сопротивления, измеряемого в порте 1 на фундаментальной частоте.

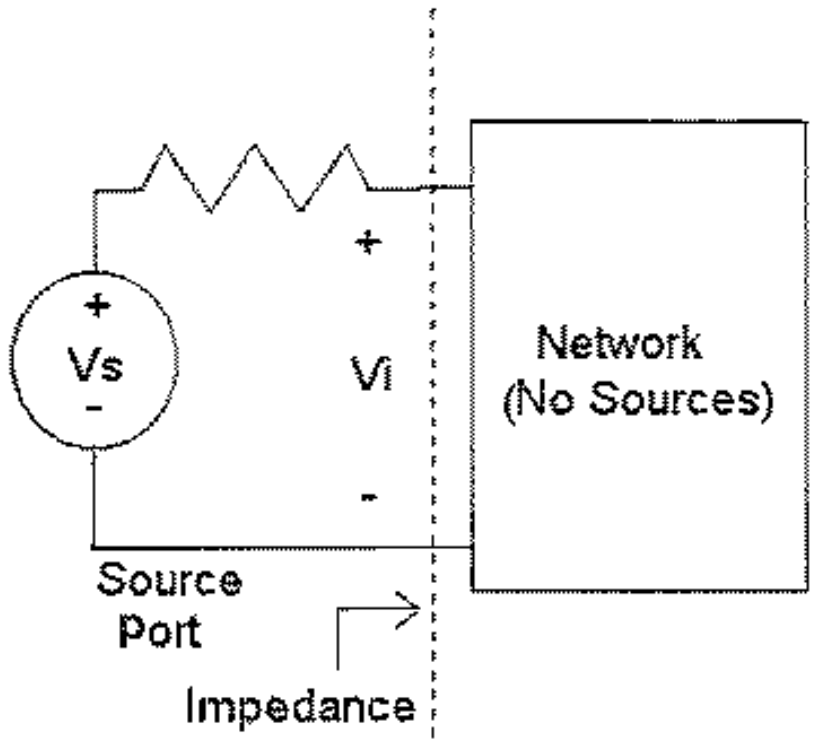


Рис. 7.103. Определение входного импеданса схемы

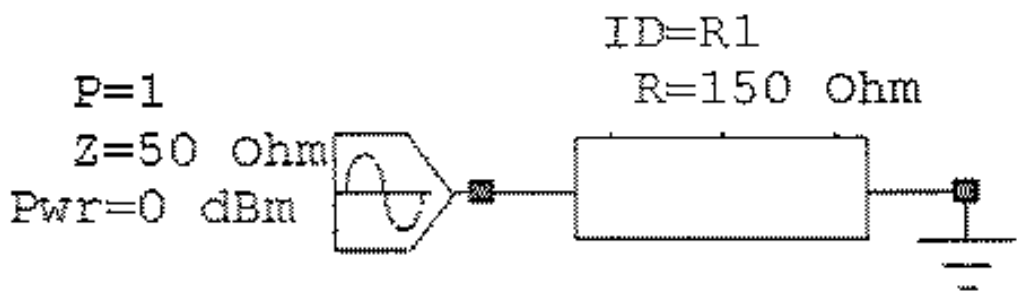


Рис. 7.104. Подключение сопротивления 150 Ом

Измеритель мощности может также использоваться, чтобы измерить полное сопротивление, см. расчет Gcomp.

Параметры расчета:

P1 — название подсхемы;

P2 — измеритель мощности, требуемый, чтобы рассчитать импеданс;

P3 — гармонический индекс (целое число от 0 до 1024);

P4 — индекс мощности (целое число от 1 до 1000).

В результате этого расчета получаются комплексные величины в единицах сопротивления. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую. Реальная величина может также быть показана в dB. Ось X для этого измерения находится в частотных единицах.

Эта характеристика может быть показана на диаграмме Смита (рис. 7.105), полярной диаграмме или в таблице. Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут также быть показаны на прямоугольном графике.

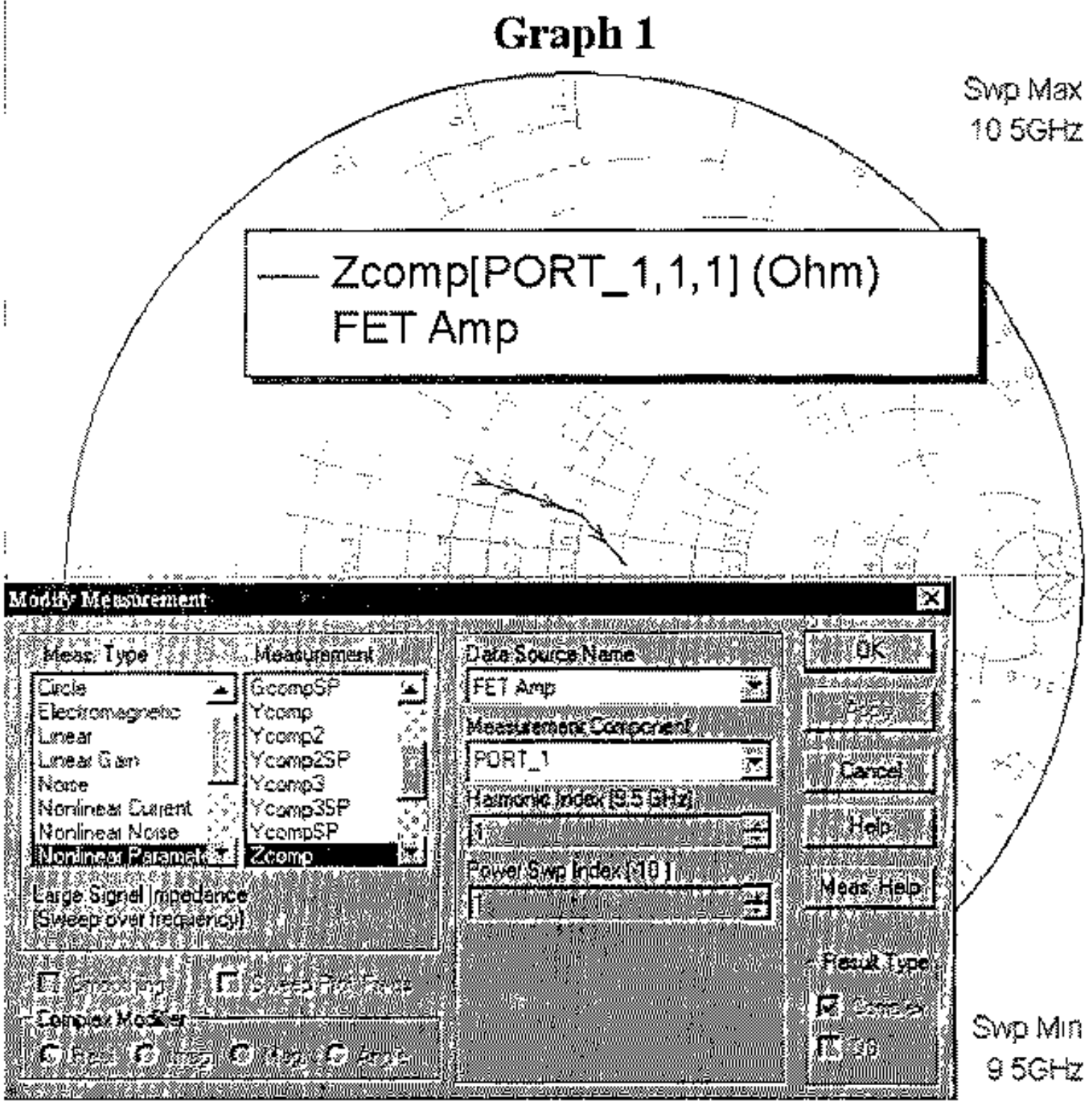


Рис. 7.105. Вывод входного импеданса в условиях большого сигнала

Большесигнальное полное сопротивление (двухсигнальное) (частотная развертка) Zcomp2

Этот расчет используется, чтобы получить полное сопротивление при больших мощностях, но ниже состояния возбуждения сигнала. Эта характеристика аналогична Zcomp, за исключением того, что большесигнальное полное сопротивление измеряет на точно заданных гармониках при двухсигнальном моделировании.

Задаваемые параметры:

P1 — имя подсхемы;
P2 — компонента расчета (измеритель мощности);
P3 — гармонические индексы (h1, h2);
P4 — индекс мощности (целое число от 1 до 1000).

Расчет даст комплексную величину в единицах сопротивления. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, определяя модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге расчета. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB». Ось X для этой характеристики — частота.

Большесигнальное полное сопротивление (с 2 тонами) (развертка по мощности) Zcomp2SP

Этот пункт расчета может использоваться, чтобы получить полное сопротивление ниже состояния большесигнального возбуждения. Характеристика —аналогична Zcomp за исключением того, что большесигнальное полное сопротивление рассчитывается на точно установленных гармониках при двухсигнальном моделировании, и изменяется мощность, вместо частоты.

Параметры расчета:
P1 — имя источника данных (подсхема с от 0 до 1000 портов);
P2 — компонента расчета (измеритель мощности);
P3 — гармонические индексы (h1, h2);
P4 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000).

Эта характеристика — комплексная величина в единицах сопротивления, которая может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB, выбирая опцию «dB». Ось X для этого расчета является мощностью (в dBm).

Характеристика выводится на диаграмму Смита, полярную систему координат или в таблицу. Модуль, угол, реальные или мнимые составляющие могут также быть показаны на прямоугольной диаграмме.

Большесигнальный импеданс (зависящий от мощности) ZcompSP

Расчет дает большесигнальное полное сопротивление со стороны заданного порта. Характеристика точно такая же, как **Zcomp** за исключением того, что вместо частоты изменяется мощность.

Параметры расчета:
P1 — имя подсхемы или схемы;
P2 — ID прибора, используемого для измерения мощности;
P3 — гармонический индекс (целое число от 0 до 1024);
P4 — индекс частоты (целое число от 1 до 1000).

Этот расчет возвращает комплексную величину в единицах сопротивления. Комплексная характеристика может быть показана как реальная величина, задавая модуль, угол, реальную или мнимую составляющую в диалоге измерения. Реальная величина может также быть показана в dB. Ось X для этого измерения является мощностью (в dBm).

Глава 8
Анализ нелинейных шумов

MWO позволяет рассчитать шумовые характеристики в нелинейных устройствах. Типичные примеры: расчет коэффициента шума смесителя, моделирование спектра шума в усилителях и генераторах.

Как известно, линейный шум связан с тепловыми шумами в резисторах. Нелинейный шум связан с нестационарными процессами в нелинейных приборах. Главными источниками шума в полупроводниковых приборах являются:

- **тепловой шум**, благодаря эффекту Джонсона из-за омических потерь. Он практически не зависит от частоты.
- **ударный** (shot) шум, благодаря диффузии и прохождению зарядов через барьер. Этот шум может быть представлен как независимые случайные события. Его спектральное распределение зависит от тока смещения и не зависит от частоты.
- **фликкер-шум**, также называемый 1/f шумом. Этот шум объясняется поверхностной рекомбинацией из-за скачков (traps) и дефектов в кристалле.
- шум **взрывного** (burst) характера (вспышки), из-за захвата и эмиссии зарядов в локальных ловушках (traps) которые появляются из-за флуктуаций между уровнями токов. Этот эффект обычно присутствует в приборах Si-SiO2 (типа MOS-транзисторах).

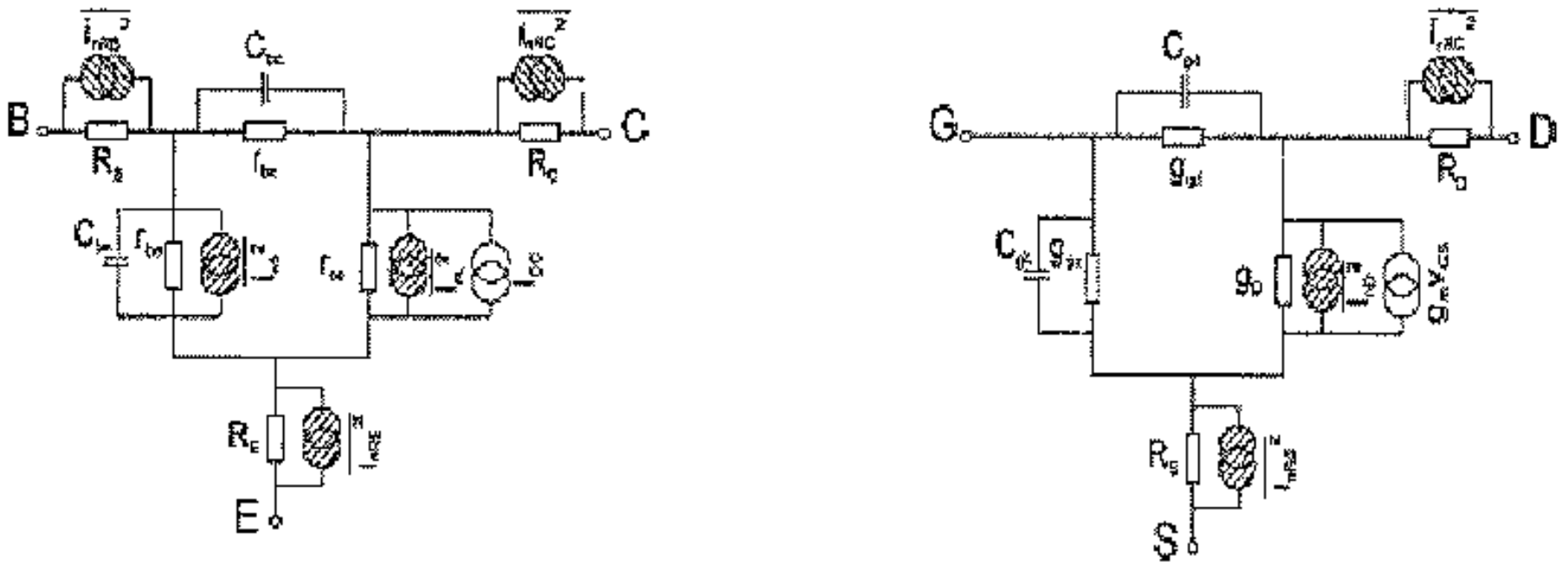


Рис. 8.1. Моделирование шума типа 1/f в биполярном и полевом транзисторе

Из-за широкополосного спектрального распределения, тепловой и ударный (shot) шум вносят вклад в коэффициент шума схемы.

8.1. Шум в нелинейных устройствах

Шум в электронных схемах существует в различных формах, таких как в виде теплового шума, фликкер-шума и дробового шума. Шумовая спектральная плотность в произвольном узле нелинейной схемы обычно имеет спектральное распределение, показанное на рис. 8.2.



Рис. 8.2. Спектральное распределение шума в диапазоне частот

Низкочастотная часть представляет низкочастотный 1/f шум, типа фликкер-шума, а плоская часть описывает вклад тепловых и дробовых шумов.

При моделировании, спектр шума разделяется на конечное число интервалов в частотном диапазоне, как показывается на рис. 8.3.

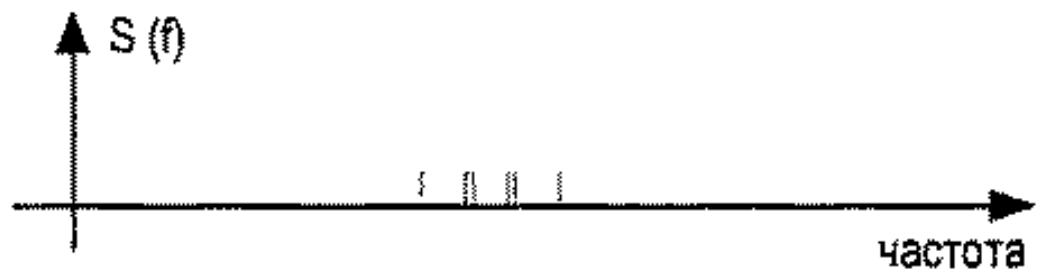


Рис. 8.3. Выделение узкополосных шумовых сигналов в шумовой полосе

Каждый шумовой «отсчет» представляет мощность шума, в полосе шириной 1 Гц.

Если схема ведет себя линейно, шумовой отсчет в некоторой частоте преобразуется только на одну частоту и в полосу, как показано на рис. 8.4.

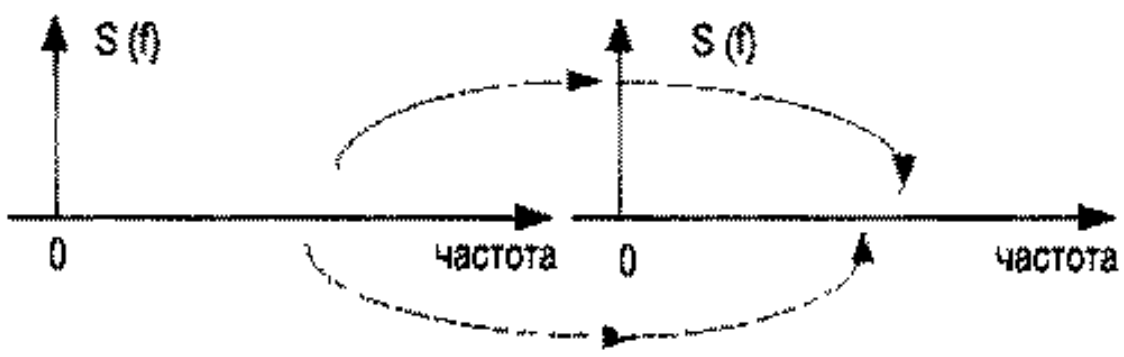


Рис. 8.4. Преобразование шумов в линейном устройстве

Связанные шумом характеристики, типа коэффициент шума и шумовой температуры, вычисляются по корреляционной шумовой матрице [1].

Ситуация более сложная в присутствии сигнала большой мощности, например гетеродина LO, подключенного к смесителю. Если уровень шума считается маленьким по сравнению с большим сигналом LO — можно считать преобразованием частоты умножение шумовых выборок на частоту LO, что иллюстрируется на рис. 8.5.

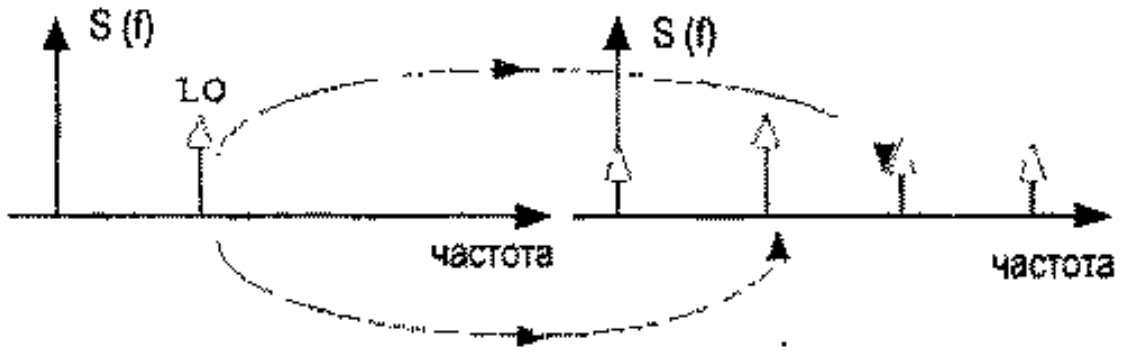


Рис. 8.5. Преобразование шумового спектра в нелинейной схеме

Шумовые выборки в нелинейном устройстве, управляемом сигналом с большой амплитудой, обычно называются сигналом в шумовой боковой полосе. Как показывается на рис. 8.4. 8.5, преобразование шумовых боковых полос аналогично преобразованию ВЧ и ПЧ сигналов в смесителе. Фактически, математический аппарат, который лежит в основе моделирования нелинейного шума, очень похож на классический метод «малый сигнал на фоне большого сигнала» [3], также известный как анализ смесителя с помощью *конверсионной матрицы*.

Схема сначала моделируется с исключенными источниками шума, рассчитывая только одно действие большого сигнала. Затем источники шума вводятся в портах, подключающих нелинейные элементы к остальной части сети, как показывается на рис. 8.6.

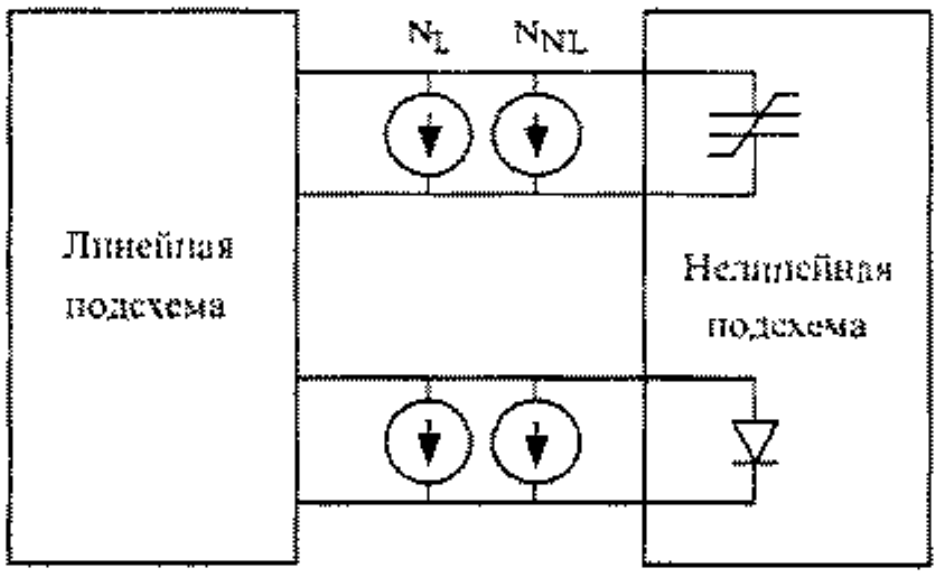


Рис. 8.6. Линейные и нелинейные источники шумового тока

N_L и N_{NL} — комплексные амплитуды случайных шумовых токов, рассчитываемые в каждой из шумовых боковых полос. N_L — представляет эквиваленты Нортона всех независимых от смещения источников шума, типа источников теплового шума, находящихся внутри линейной подсхемы; N_{NL} — представляет источники шума смещения, произведенными нелинейными компонентами. Среднеквадратичное значение комплексной амплитуды шумов является спектральной плотностью. В случае дробового шума, например,

$$(N_{NL}N_{NL}^{*})_{shot} = 2qI_{DC}, \tag{8.1}$$

где q является зарядом электрона; I_{DC} — ток смещения прибора, генерирующий дробовой шум.

Конверсионные матрицы связывают комплексные амплитуды боковой полосы маленьких возбуждений токов, типа N_L и N_{NL} к соответствующим портовым векторам напряжения. Формально, это отнотение может быть выражено как

$$V = T^{-1}N, \tag{8.2}$$

где T — конверсионная матрица; V, N — векторные амплитуды шумового напряжения (тока) в боковой полосе при соединении портов. Операция со среднеквадратичными значениями выдает значения спектральных плотностей шумового напряжения в терминах отсчетов известных спектральных плотностей тока. Большесигнальный ток через устройство «модулирует» источник шума. В [2] описываются соответствующие изменения спектральной плотности в присутствии модуляции большим сигналом.

8.2. Моделирование шумовых характеристик

Анализ шумов лучше проиллюстрировать, используя простой пример.

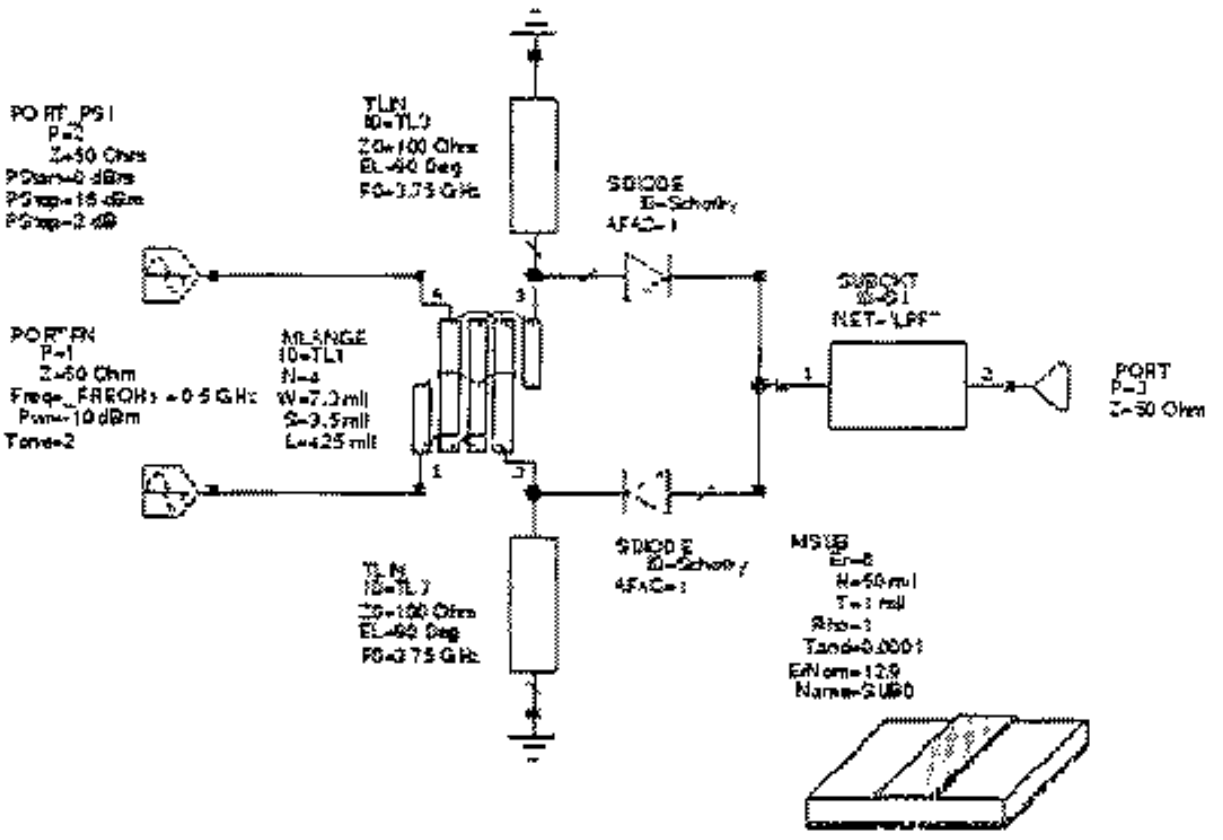


Рис. 8.7. Схема балансного смесителя на мосте

Смеситель, показанный в схеме работает как преобразователь с понижением частоты, с частотой IF в диапазоне 0.5—0.6 GHz. Частота LO равна 3.5 GHz.

Анализ нелинейных шумов выполняется, если в схему помещен элемент MeasDevice\Controls\NLNOISE. Символ элемента NLNOISE и его параметры показываются на рис. 8.8.

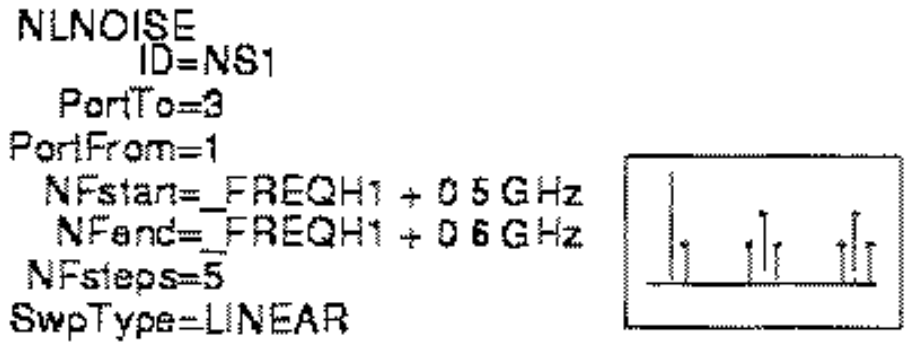


Рис. 8.8. Символ и параметры моделятора нелинейных шумов

Элемент NLNOISE имеет следующие параметры:

PortTo — индекс выхода. В примере, вывод — порт IF, и **PortTo** = 3.

PortFrom — индекс входа. В примере, **PortFrom** = 1 (RF).

NFstart, NFend, и **NFsteps** определяют диапазон шумовых частот, в котором выполняется анализ.

SwpType определяет тип изменения шумовой частоты (линейное или логарифмическое сканирование).

На рис. 8.9 показаны шумовые частоты, определенные **NFstart, NFend** и **NFsteps**.

Повторный анализ шума состоит в том, что шум рассчитывается относительно всех однотипных наборов LO.

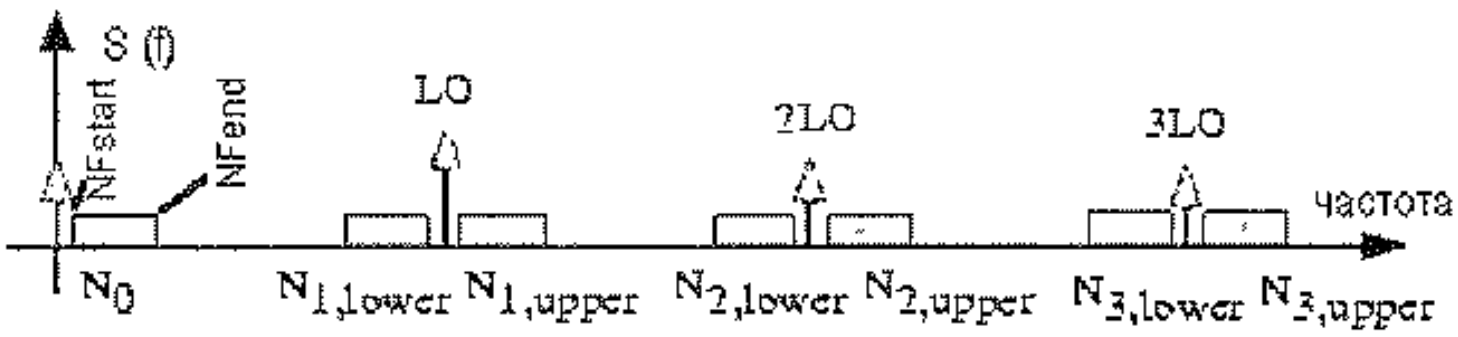


Рис. 8.9. Нелинейное преобразование шума

Если вам необходимо рассчитать коэффициент шума смесителя с преобразованием частоты вниз, наиболее естественный способ задавать шумовые частоты состоит в том, чтобы определить границы диапазона шума верхней боковой полосы ($N_{1,upper}$), который в примере равен 4.0—4.1 GHz. Однако любой другой частотный диапазон приемлем также, поскольку иммитатор автоматически учитывает остающиеся боковые полосы. Поэтому «диапазон шумовых частот» должен интерпретироваться как ширина любой из боковых полос, показанных на рис. 8.9.

Ограничение возбуждения с одиночным тоном

В данной версии MWO, анализ нелинейных шумов может быть выполнен в присутствии возбуждения *только с одним тоном*. В смесителях наиболее сигнальный сигнал — это сигнал гетеродина LO; в случае усилителей, — обычно входной сигнал. Значение этого состоит в том чтобы при моделировании RF (или IF) определить, какой порт должен быть нагружен.

Вы можете вычислить коэффициент шума, шумовую температуру и спектральную плотность на выходе шумящей схемы. Большесигнальное возбуждение можно изменять по мощности и—или по частоте, в дополнение к изменению шумовой частоты.

Предположим, что в примере смесителя вы хотите вычислить коэффициент шума и спектральную плотность на выходе. С нагруженным портом RF и элементом NLNOISE, должным образом заданным, схема смесителя имеет следующий вид (рис. 8.10).

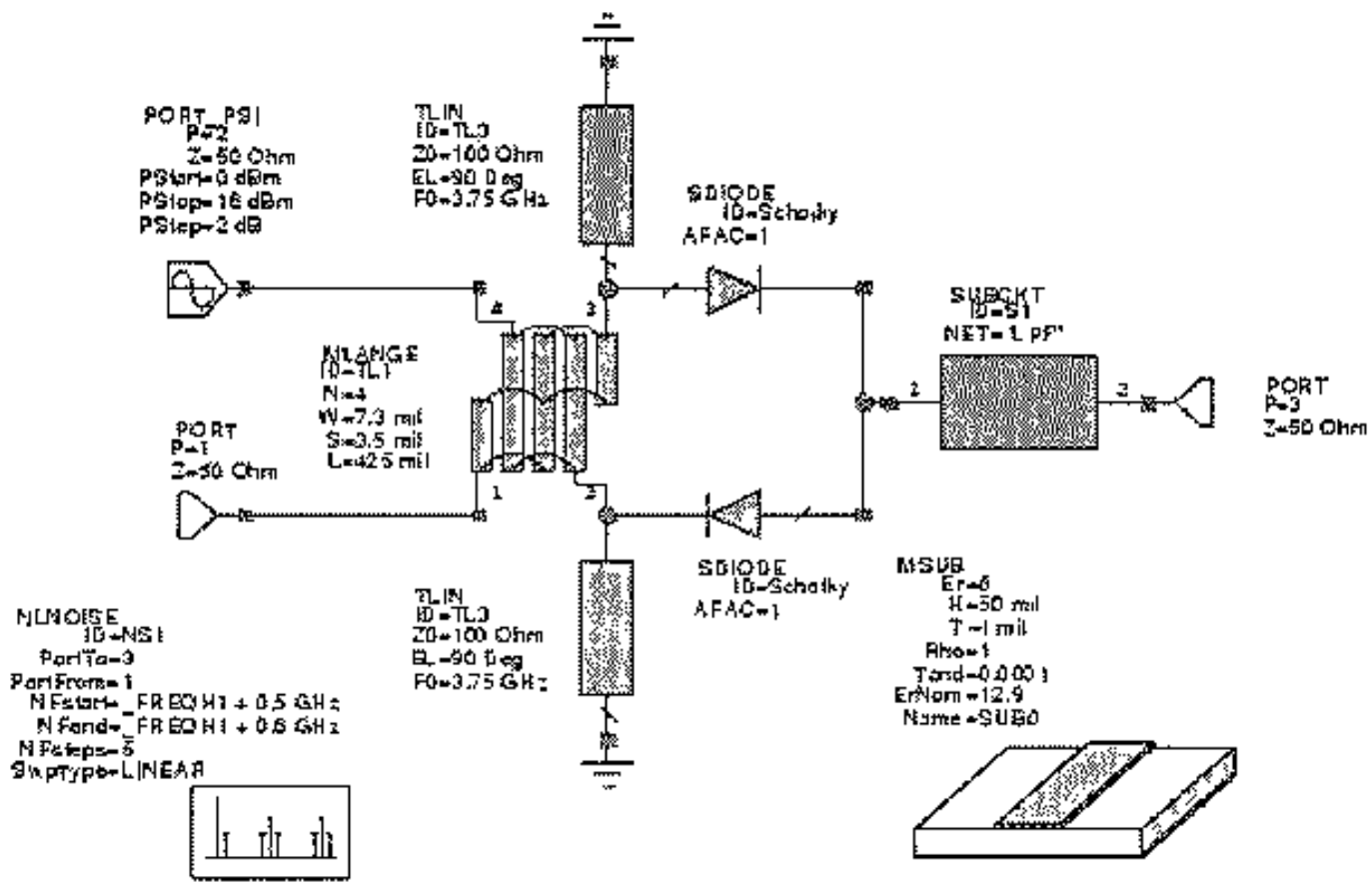


Рис. 8.10. Смеситель на мосте Ланге

Чтобы вычислить коэффициент шума, вы должны определить соответствующие шумовые частоты на входе и на выходе. В смесителе с преобразованием частоты вниз, соответствующие полосы лежат в диапазоне IF на выходе и в верхней боковой полосе RF на входе.

Диалоговое окно **Modify Measurement**, при расчете коэффициента шума (рис. 8.11) позволяет вам выбрать соответствующие частоты, используя частотные индексы. Чтобы понять использование этих индексов, заметим, что вы можете выразить все частотные компоненты, показывая диапазон анализа шумов:

$$h_1 f_{LO} + h_2 f_{noise}, \tag{8.3}$$

где f_{LO} — частота LO; f_{noise} — одна из частот в диапазоне **NFstart, NFend**; h_1 и h_2 — целые числа — индексы частот.

В этом случае f_{noise} является частотой верхней боковой полосы, так, чтобы $h_1 = -1$, $h_2 = 1$ для определения частоты IF (на выходе), и $h_1 = 0$, $h_2 = 1$ для задания частоты RF (на входе).

Тогда диалоговое окно Measurement для расчета коэффициента шума с изменением LO (Nonlinear Noise\NF_NL_SP) соответствует рис. 8.11.

Рис. 8.12 показывает коэффициент шума, а рис. 8.13 спектральную плотность мощности (Nonlinear Noise\NPo_NL) на выходе.

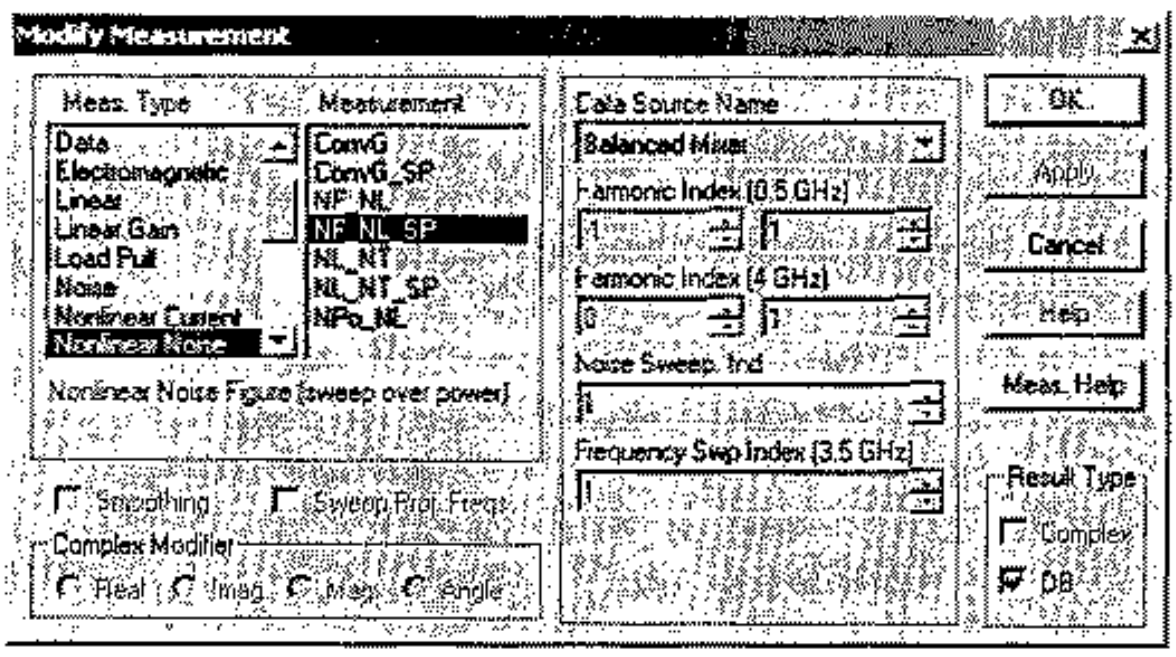


Рис. 8.11 Расчет и вывод характеристик нелинейного шума

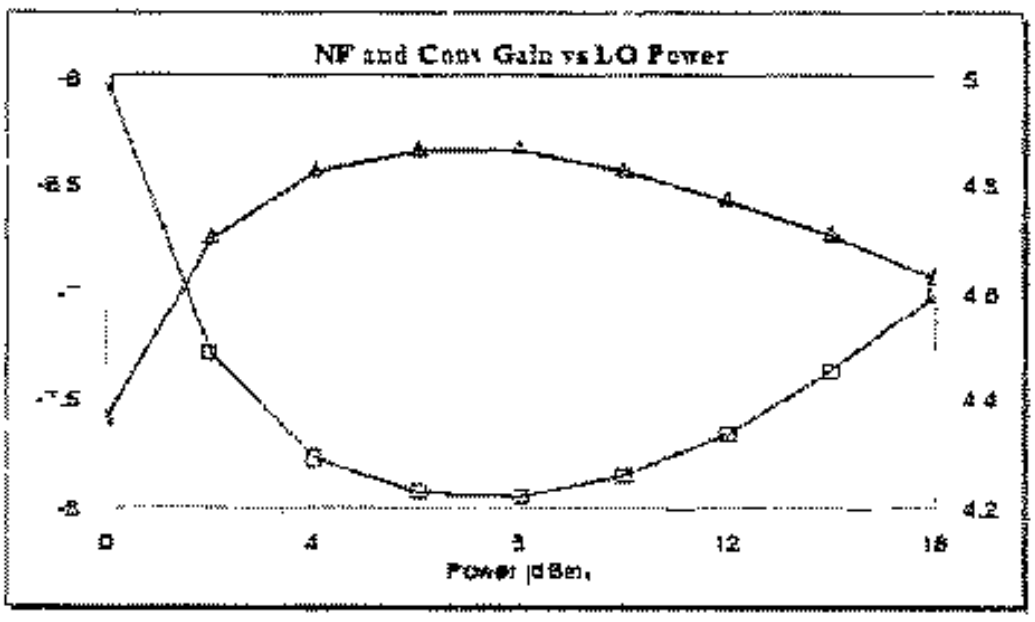


Рис. 8.12. Коэффициент шума и коэффициент преобразования смесителя

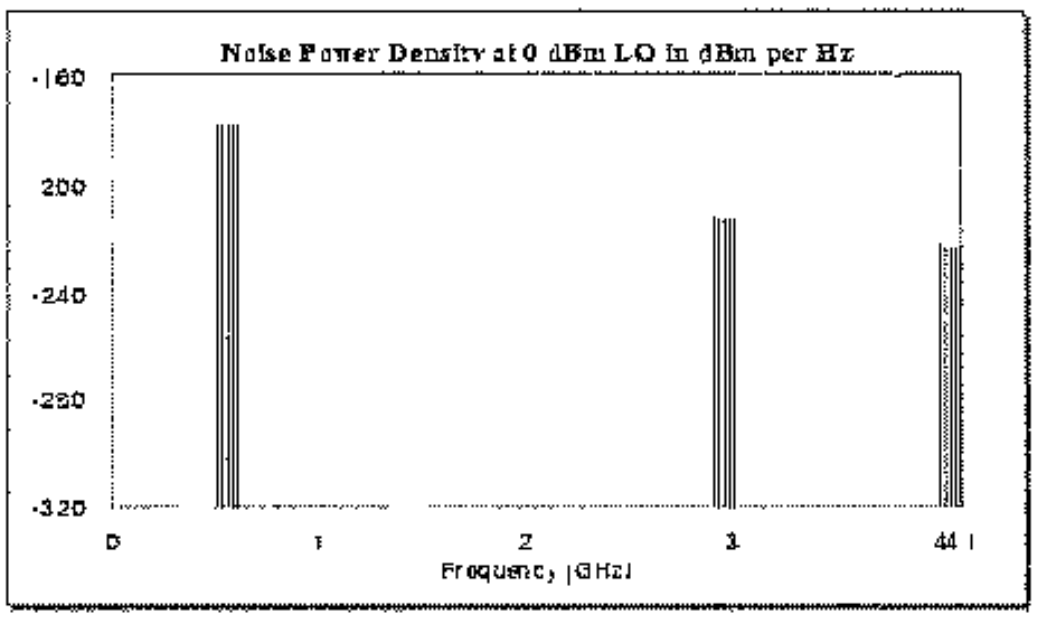


Рис. 8.13. Спектральная плотность нелинейного шума

Вы можете вычислять коэффициент преобразования смесителя стандартным способом, используя двухсигнальные большесигнальные S-параметры. Коэффициент передачи преобразователя может быть рассчитан с помощью характеристики **Nonlinear Noise\Conv_G_SP**. Эта характеристика есть коэффициент передачи преобразователя, который вычисляется в дополнение к шумовому моделированию. Это — «малосигнальное» значение коэффициента передачи преобразователя, более точное, когда уровень входной мощности намного ниже (скажем на 15 dB или больше), чем мощность LO.

Управления процессом расчета

Конверсионное матричное исчисление, которое является основным для нелинейного шумового моделирования, требует задания равного числа гармоник LO и шумовых боковых полос. Чтобы выполнить анализ, который принимает во внимание шумовые боковые полосы в диапазоне анализируемых шумов, нужно, например, чтобы большесигнальная характеристика была вычислена на 7 гармониках LO (включая DC).

Для шумового моделирования, число (**tone-1**) гармоник в методе гармонического баланса учитывают значение (**tone-1**) гармоник с учетом боковых полос, содержащих нелинейных шум. Большесигнальное моделирование, очевидно, выполняется на большем числе гармоник, чем требуется для конверсионного анализа шумов.

Все другие опции гармонического баланса относятся к большесигнальному анализу.

8.3. Нелинейный анализ генераторов

MWO позволяет выполнить анализ генераторов методом гармонического баланса, в частности:

- определить частоту колебаний генератора;
- вычислить спектр генератора, включая побочные гармонические продукты;
- выполнить анализ фазового шума.

Вообще, генераторы могут быть проанализированы в частотной области (с помощью метода гармонического баланса) или во временной области (с помощью

программы SPICE или аналогичной). MWO использует метод гармонического баланса со следующими особенностями:

- установившееся состояние вычисляется сразу, без расчета переходного процесса;
- анализ в частотной области использует результаты EM моделирования, измеренные или рассчитанные S-параметры.

Чтобы решать такие задачи MWO использует специальное устройство, называемое «генераторный зонд» [1].

8.3.1. Генераторный зонд

Рассмотрим генератор, работающий в установившемся режиме. К узлу X приложим источник синусоидального напряжения (рис. 8.14).

Полное сопротивление источника равно

$$Z(\omega) = 0,\ \omega = \omega_p \qquad (8.4)$$

$$Z(\omega) = \infty,\ \omega \neq \omega_p,$$

то есть зонд выполняет короткое замыкание на частоте генерации и размыкает цепь на всех других частотах. Комбинация источника и идеального элемента $Z(\omega)$ называется генераторным зондом.

Теперь предположим, что напряжение зонда точно равно напряжению установившегося режима в узле *X*. Тогда никакие токи не текут через зонд на частоте ω_p. Кроме того, согласно определению $Z(\omega)$, ток не течет через зонд на любой другой гармонике. Зонд не нарушает схему, его частота равняется частоте колебаний ω_p, и его амплитуда равняется амплитуде в узле, с которым генератор связан первоначально с разъединенным генератором и зондом.

Итак, задачу достижения установившегося режима работы генератора можно сформулировать следующим образом:

1. Подключаем генераторный зонд к подходящему узлу на схеме.
2. Находим амплитуду и частоту, при которых ток через зонд равен нулю.

Таким способом анализ генератора сводится к стандартному гармоническому балансу, имеющему подпрограмму поиска состояния параметров зонда (амплиту-

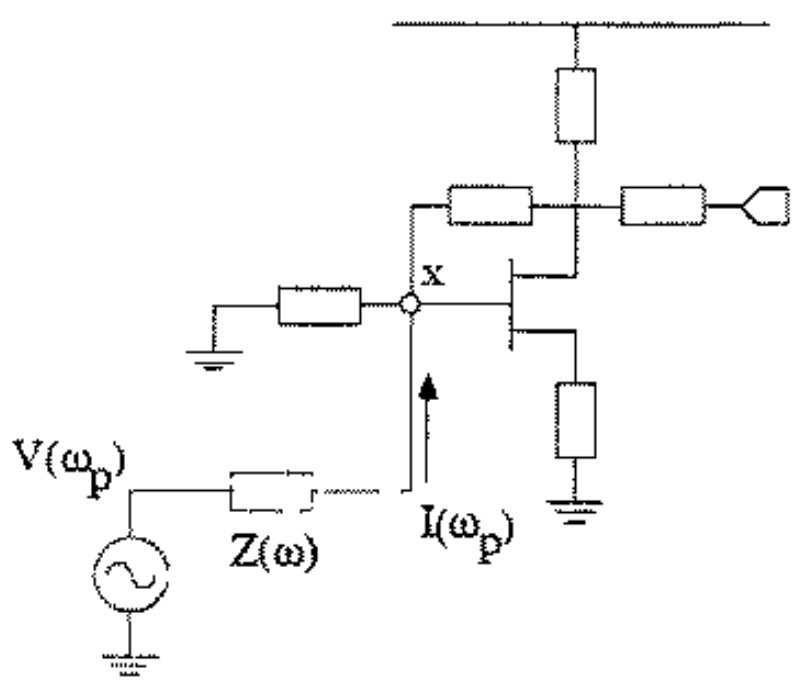


Рис. 8.14. Подключение генераторного зонда ко входу каскада

ды и частоты), при котором ток через его зажимы равен нулю. Выделенная процедура — основа для моделирования генератора в MWO.

Анализ генератора состоит из трех шагов, которые показаны на рис. 8.15.

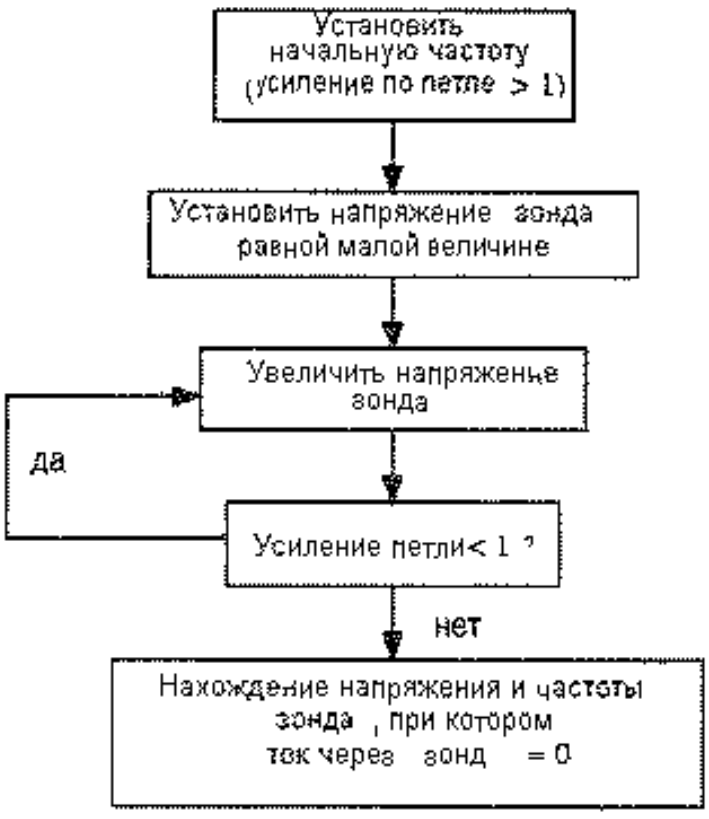


Рис. 8.15. Алгоритм работы генераторного зонда

На первом шаге, программа находит начальные частоты, согласно условию, связанному с известным критерием коэффициента усиления по петле. Зная, что коэффициент усиления насыщения по петле равен единице в условии большого сигнала в установившемся режиме, генераторный зонд пытается обнаружить насыщение коэффициента усиления по петле. Коэффициент усиления, при котором появляется насыщение, используется как исходная точка для анализа, после чего напряжение и частота зонда регулируется так, чтобы уменьшить до нуля ток зонда.

8.3.2. Моделирование генератора

Два условия должны быть удовлетворены для моделирования генератора:

- повторный вызов, когда MWO вызывает те имитаторы, которые рассчитывают соответствующие требуемые характеристики. Анализ генератора возможен, когда есть возможность рассчитать любую нелинейную характеристику генератора. Эти характеристики имеются в категории Nonlinear Power, Nonlinear Voltage, Nonlinear Current and Oscillator;
- генераторный зонд должен быть связан с генератором. OSCAPROBE находится в закладке **Elem** в категории **MeasDevice** в разделе **Probes**.

Например, предположим что для схемы на рис. 8.16 задан расчет спектра (Nonlinear Power/Pharm).

Элемент **OSCAPROBE** вводится между резонатором и активным устройством. Когда моделирование выполнено, MWO автоматически выполняет анализ генератора, выполняя шаги, показанные в блок-схеме анализа.

Параметры зонда влияют на скорость и, в конечном счете, на сходимость анализа генератора. Хотя большинство пользователей найдет анализ генератора быстрым и простым, полезно знать, как выбирать параметры зонда, чтобы избежать ошибки.

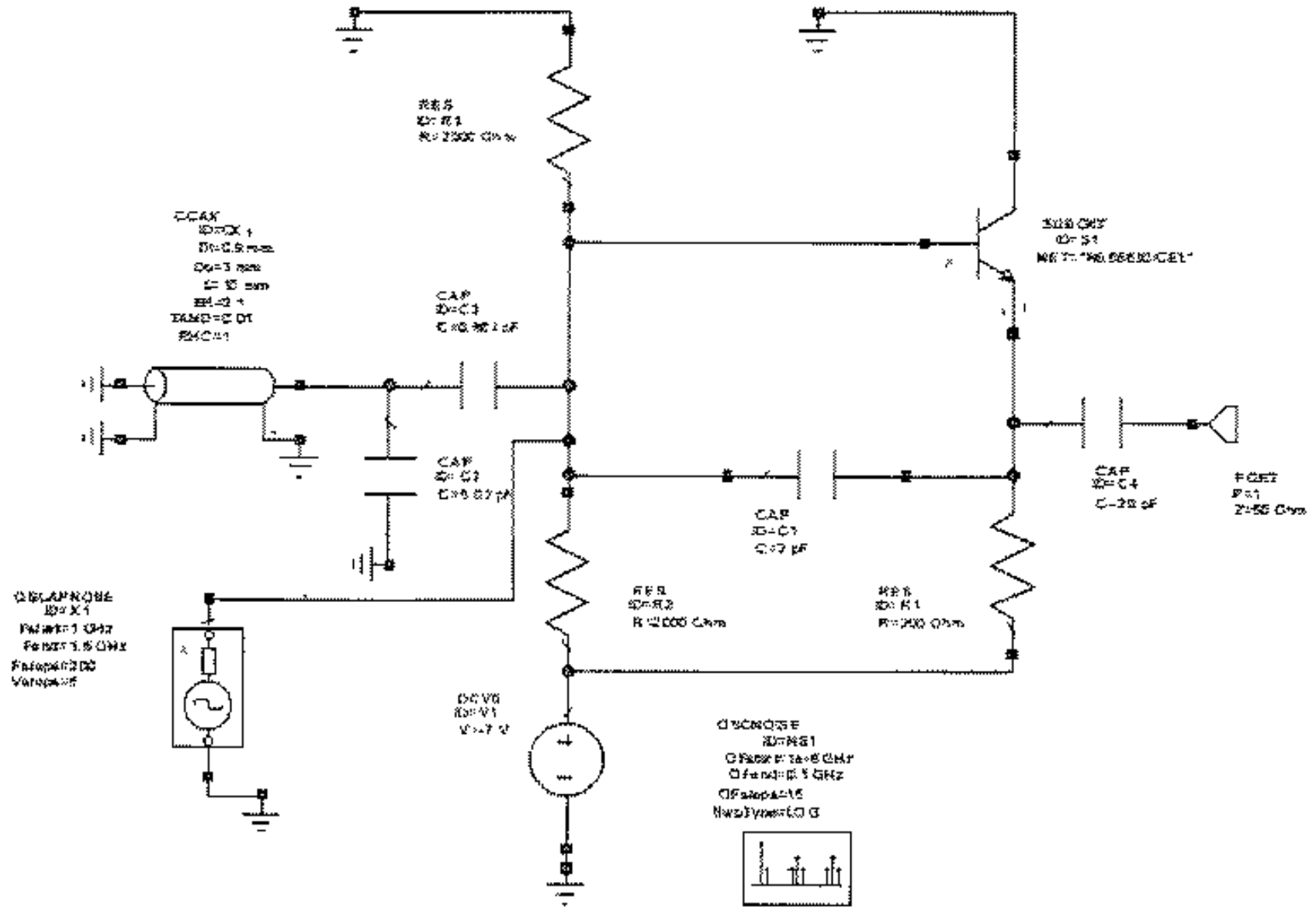


Рис. 8.16. Схема генератора с включенным зондом генератора OSCAPROBE

Символ генераторного зонда генератора имеет вид, показанный на рис. 8.17.

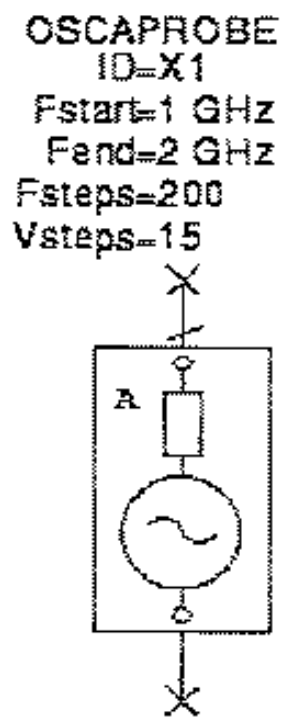


Рис. 8.17. Символ генераторного зонда

Наиболее важные параметры зонда *Fstart* и *Fend*.

Эти два параметра задают диапазон поиска частоты генерации. Обычно достаточна полоса ±25 % от центральной частоты резонатора. **Fsteps** — число частотных точек, используемых в поиске частоты генерации и его можно оставить значением по умолчанию. Исключения могут быть в случаях чрезвычайно высокой добротности резонатора, когда **Fsteps** нужно увеличить, или сузить диапазон частотного поиска.

Зонд имеет ряд вторичных параметров, которые используются для улучшения сходимости или увеличения скорости моделирования (их лучше всего оставить значениями по умолчанию): VpMax, Vsteps.

Управляющее напряжение зонда пошагово изменяется. Напряжение зонда меняется от маленького значения до *VpMax* с шагом *Vsteps*, для нахождения точки генерации для последующего строгого анализа генератора. Если имитатор возвращается с сообщением «Невозможно найти исходную точку для анализа генератора», вам нужно увеличить *Vsteps* и/или *VpMax*.

Менее значимые параметры: *Iter*, *Damp*.

Iter — общее количество итераций анализа, *Damp* — параметр для так называемого демпфирования итераций Ньютона. Уменьшение *Damp* или увеличение *Iter* от значений «по умолчанию» может улучшить сходимость.

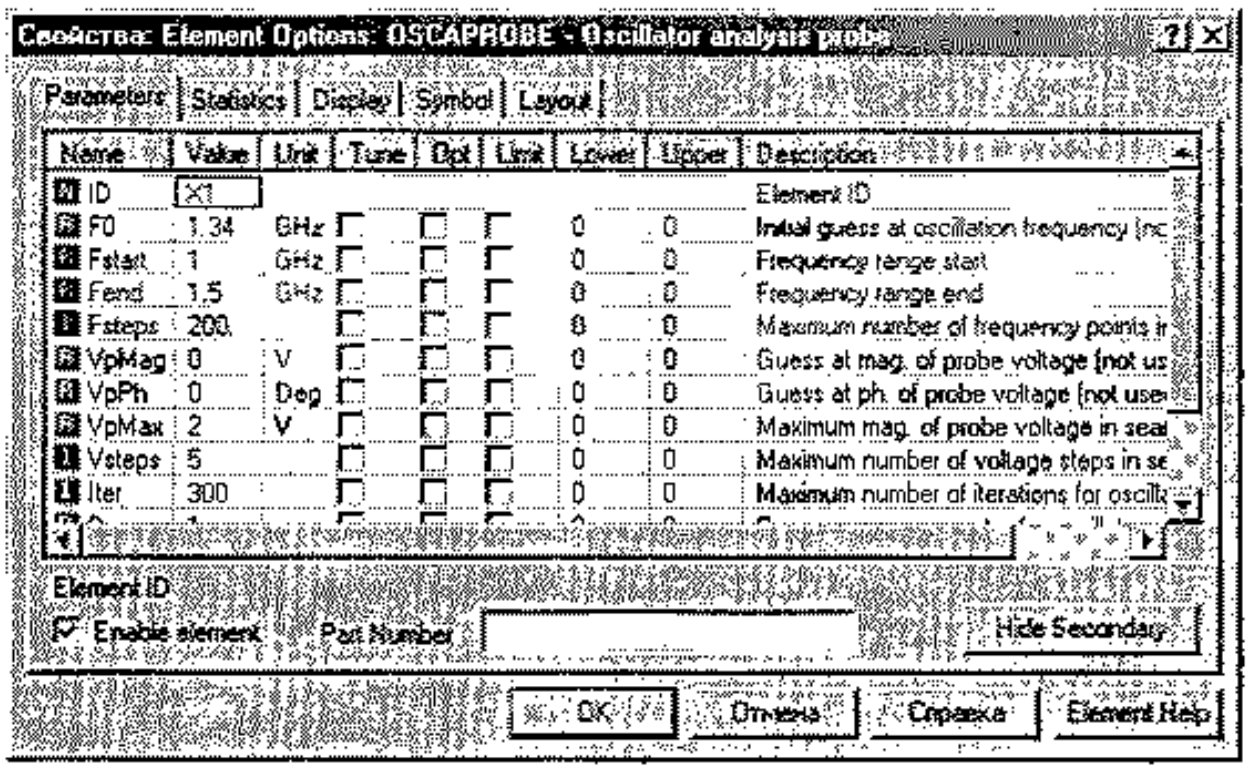


Рис 8.18. Установки свойств генераторного зонда

Заметим, что в добавление к упомянутым параметрам, несколько из вторичных параметров зонда обозначены как «not used (не используемый)». Эти параметры управляются внутреним имитатором, и вероятно, будут удалены в будущих версиях MWO.

8.3.3. Параметры гармонического баланса при анализе генератора

Стандартный гармонический баланс прогоняет моделирование во внутреннем цикле анализа генератора. По этой причине, параметры гармонического баланса применяются как обычно, управляя числом гармоник и точностью моделирования. Кнопка **For Oscillator Analysis** устанавливает параметры, рекомендуемые при моделировании генератора.

Место размещения зонда играет важную роль в моделировании генератора. Рекомендуется помещать его в узле, подключающем резонатор и активный при-

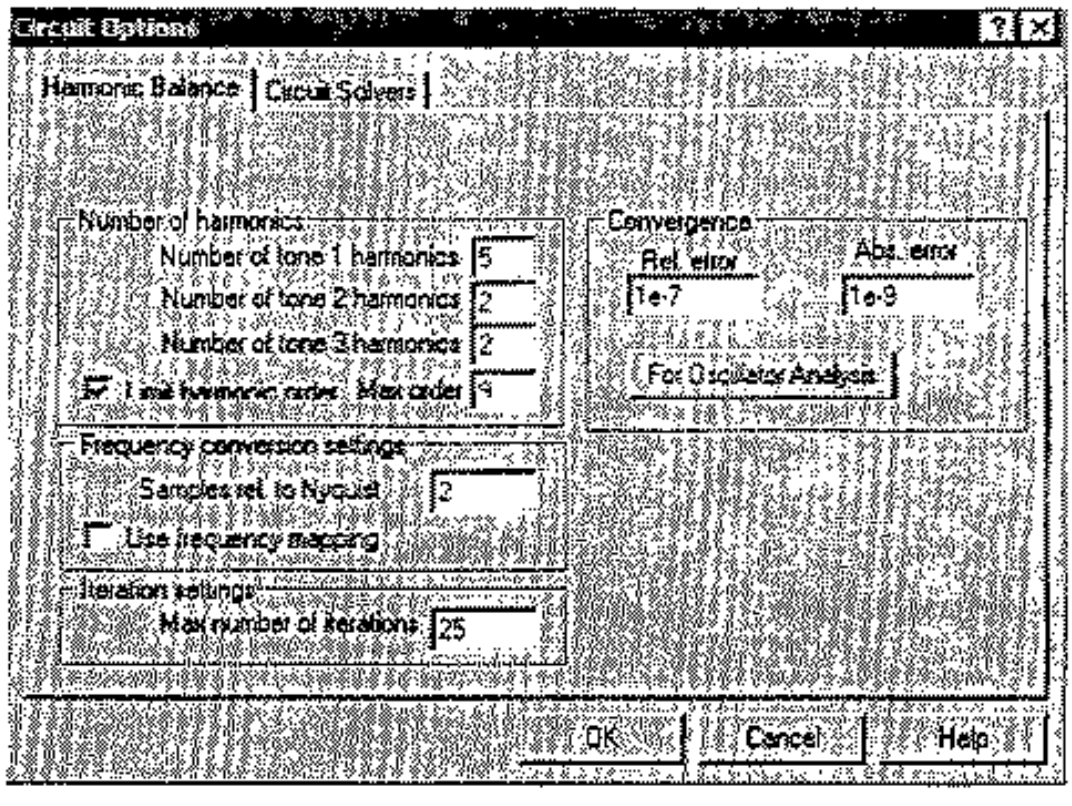


Рис. 8.19. Опции гармонического баланса и опции установки режима сходимости

бор (транзистор). Во многих случаях другое положение зонда приведет к успеху и к более быстрому моделированию. Однако пользователю лучше применять рекомендуемое размещение зонда.

Возможности постпроцессорной обработки

Все нелинейные характеристики рассчитываются при анализе генератора обычным способом. Пользователь может рассматривать напряжения, токи и мощность в любом порте или измерителе, во времени или частотной области. Линии динамической нагрузки и кпд могут быть исследованы для генератора таким же образом, как в усилителях.

Одна дополнительная характеристика Oscillator\OSC_FREQ, может использоваться, чтобы отобразить частоту колебаний. В случае, когда смещение изменяется как в случае VCO, ось X отображает значение напряжения настройки. Если в схеме генератора нет изменяемого напряжения, характеристика OSC_FREQ отображает частоту колебаний в зависимости от обоих параметров.

8.3.4. Ограничения и особенности анализа генератора

MWO проводит исследования генераторов только с генерацией одиночным тоном (но возможно управляемым напряжением). Это означает, что автоколебательные смесители и синхронизированные генераторы не анализируются в данной версии MWO2002.

Зонд должен быть помещен в схему верхнего уровня.

Если частотная характеристика, типа Vcomp или Pcomp, определена до моделирования генератора, частота колебаний вначале не известна. По этой причине, **Harmonic Index** в диалоговом окне Measurement отображает множитель произвольно выбранного фундаментального сигнала, равного 1 ГГц. После завершения расчета индексы относятся к реальной частоте колебаний. Заметьте, что произвольно выбранная частота влияет на вид диалогового окна Measurement, но не на верность результатов расчета.

8.3.5. Пример генератора, управляемого напряжением

В этом примере рассматриваются следующие вопросы проектирования генератора:

- выбор нелинейной модели активного элемента в библиотеке;
- составление графика отрицательного сопротивления двухпортовой линейной цепи;
- обнаружение условия возбуждения генератора, используя линейный имитатор;
- использование элемента OSCAPROBE;
- составление графика частоты колебаний;
- анализ фазового шума генератора, используя элемент OSCNOISE;
- составление графика Vtune относительно частоты генератора, управляемого напряжением (VCO).

Окончательный проект Infineon VCO Ideal.emp, со всеми характеристиками и схемными решениями имеется в директории \Examples\New Features\Phase Noise.

Рассмотрим пример, в котором используются линейные и нелинейные компоненты. В MWO нелинейные модели могут использоваться в и линейных и нелинейных схемах. Нелинейная модель линеаризируется относительно точки смещения, если она используется в линейной схеме. Нелинейные модели находятся в закладке **Elem** в категории **Library** под **Nonlinear\INFINEON**.

Для создания и анализа генератора необходимо:

1. Создать схему по имени BFR360F.
2. В закладке **Elem**, в категории **Library** под **Nonlinear\INFINEON**, выберите GBJT. Поместите BFR360 элемент в схему.
3. Поместите конденсаторы и индуктивности как показано на рис. 8.20, чтобы добавить паразитные элементы корпуса прибора.

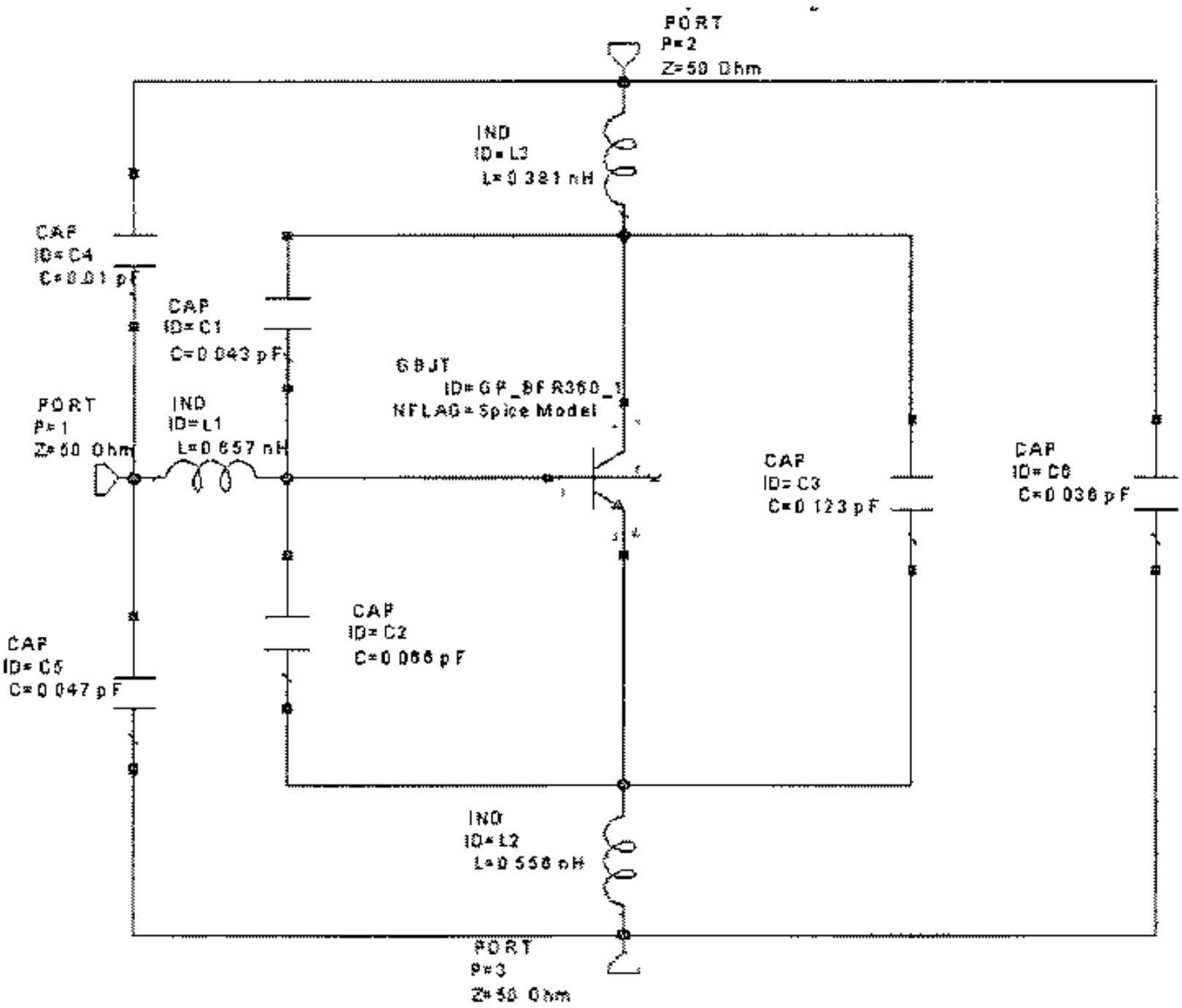


Рис. 8.20. Эквивалентная схема биполярного транзистора

Пассивные элементы корпуса, приведенные на рис. 8.20, даются изготовителем прибора.

4. Создайте схему по имени **Linear Osc** следующим образом. Поместите подсхему BFR360F в схему и измените символ на символ **BJT3**. Создайте схему, используя индуктивности Coilcraft и конденсаторы DLI, имеющиеся в библиотеках XML в закладке **Elem**.
5. Создайте схему варактора, показанную на рис. 8.22. Модель Sdiode D353 находится в нелинейной библиотеке **infineon**.

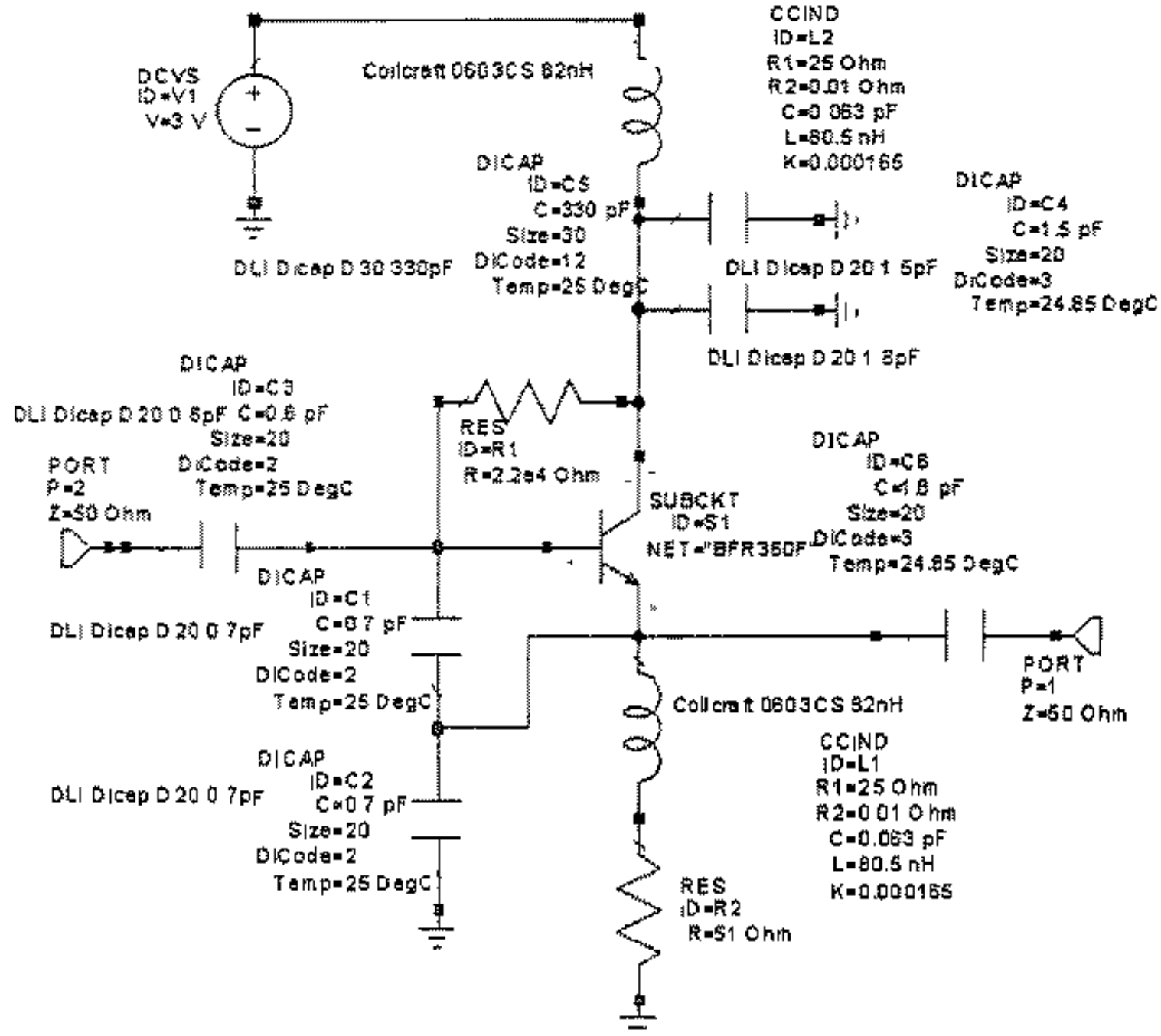


Рис. 8.21. Усилитель мощности, созданный для генератора

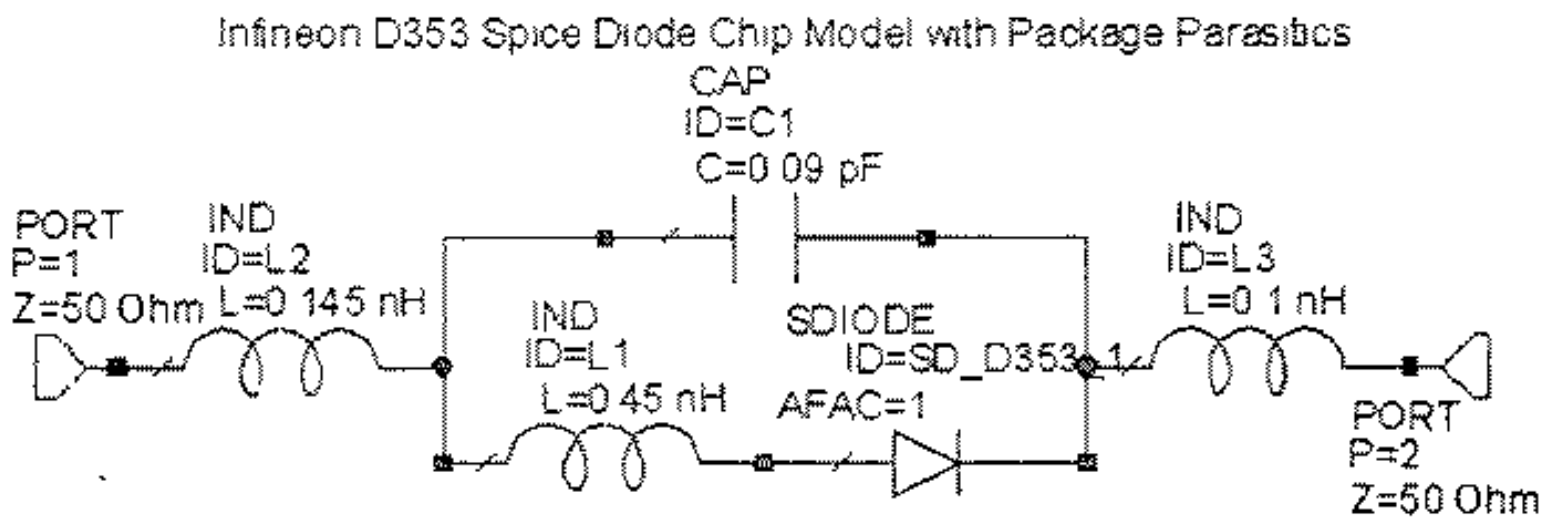


Рис. 8.22. Модель варактора, используемого для подстройки частоты генератора

Составление графика отрицательного сопротивления линейного четырехполюсника

Как правило, на СВЧ частотах генераторы состоят из схемы с отрицательным сопротивлением и пассивного резонансного контура, который задает частоту колебаний. Отрицательное сопротивление эквивалентно $|S11| > 1$ и легко составляется график на сжатой диаграмме Смита. Для этого:

1. Создайте диаграмму Смита. Выберите **Graph > Properties**. Нажмите закладку **Grid** на диалоговое окно Smith Chart Format Options. Под **Size**, очистите флажок **Auto Size** и выберите **Compressed** как **Size**.
2. Прибавьте характеристику S22 для вывода на диаграмму Смита (рис. 8.23).

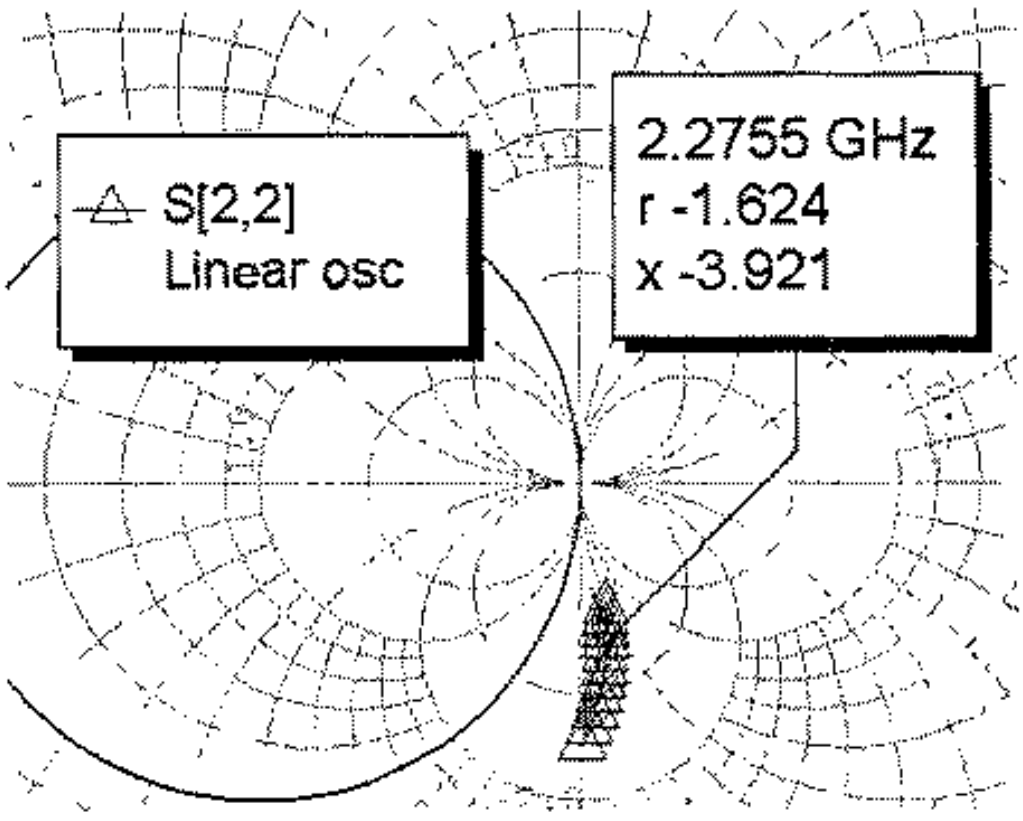


Рис. 8.23. Сопротивление активной части схемы имеет отрицательную величину −1,624 Ом на частоте 2,2755 ГГц

Нахождение условий начала возбуждения генератора, используя линейное моделирование

1. Создайте схему четырехполюсника **Tank** следующим образом. Используйте вспомогательную цепь варактора и измените символ этой подсхемы на изображение диода.



Рис. 8.24. Пассивная часть генератора, которую составляет эквивалентная схема резонансного контура и пассивная часть варактора

Реактивное сопротивление резонансного контура наносится на той же самой диаграмме Смита, чтобы определить условие для колебания:

$$Re[Zin] < 0 \text{ и } Im[Zin] = -Im[Zin, tank]. \quad (8.5)$$

2. Прибавьте характеристику и поместите на нее маркеры.

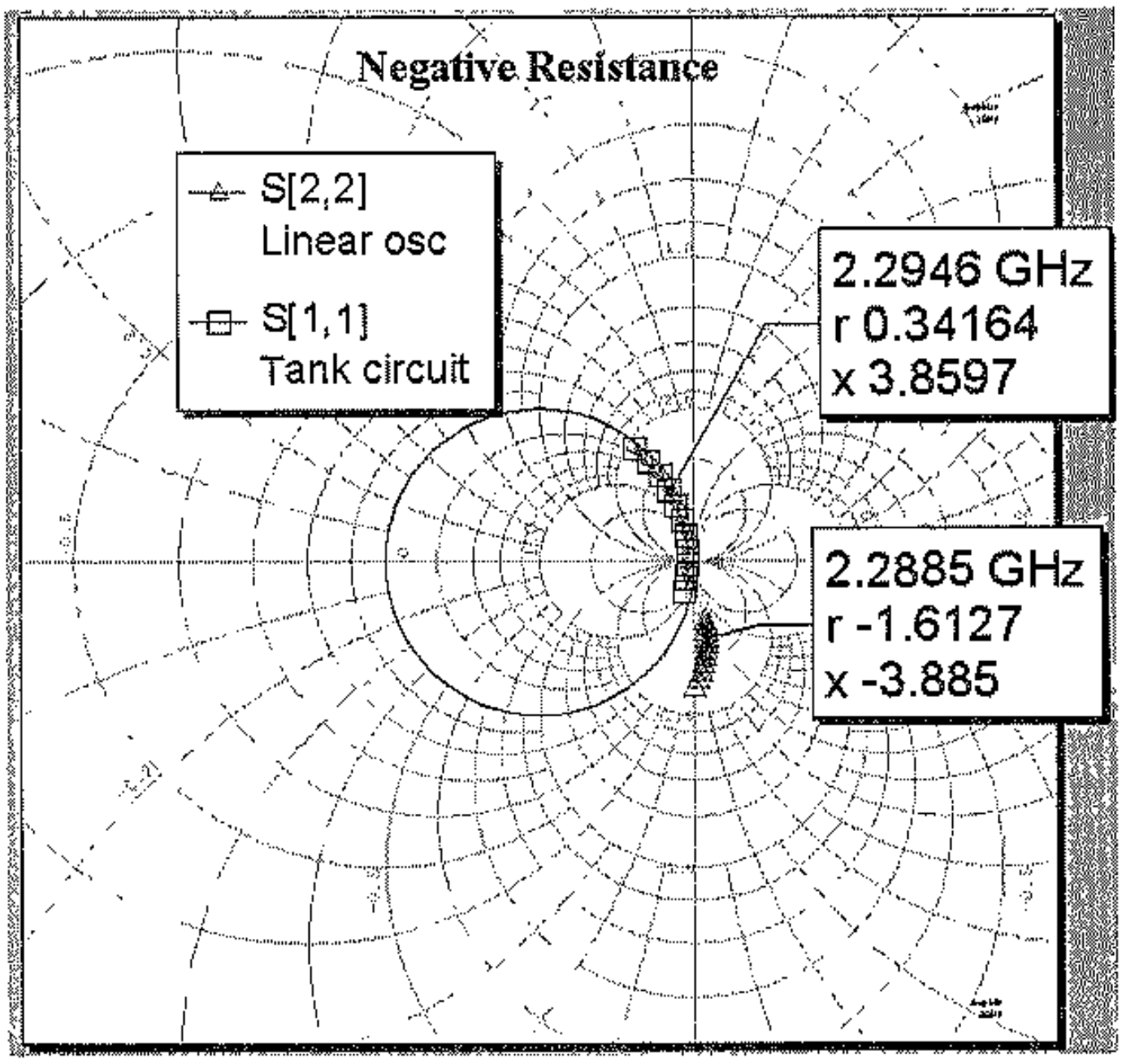


Рис. 8.25. Расчет параметров усилителя с отрицательным входным сопротивлением

Передвигая маркер, найдите то его значение, когда схема **Tank** (резонансный контур) и **Linear osc** имеют одинаковые, но разные по знаку реактивные сопротивления, что соответствует условию генерации на частоте 2,29 ГГц.

8.3.6. Использование элемента OSCAPROBE

Элемент **OSCAPROBE** дает возможность определить частоту колебания генератора, используя метод гармонического баланса. Элемент OSCAPROBE должен находиться в схеме верхнего уровня в схемной иерархии.

1. Создайте схему генератора с именем «Ideal Osc» и включите схему резонансного контура **Linear Osc**. Поместите элемент OSCAPROBE между резонансным контуром и схемой **Linear Osc**. Этот элемент имеется в закладке **Elem** в категории MeasDevice\Controls. Отредактируйте элемент OSCAPROBE (рис. 8.26).

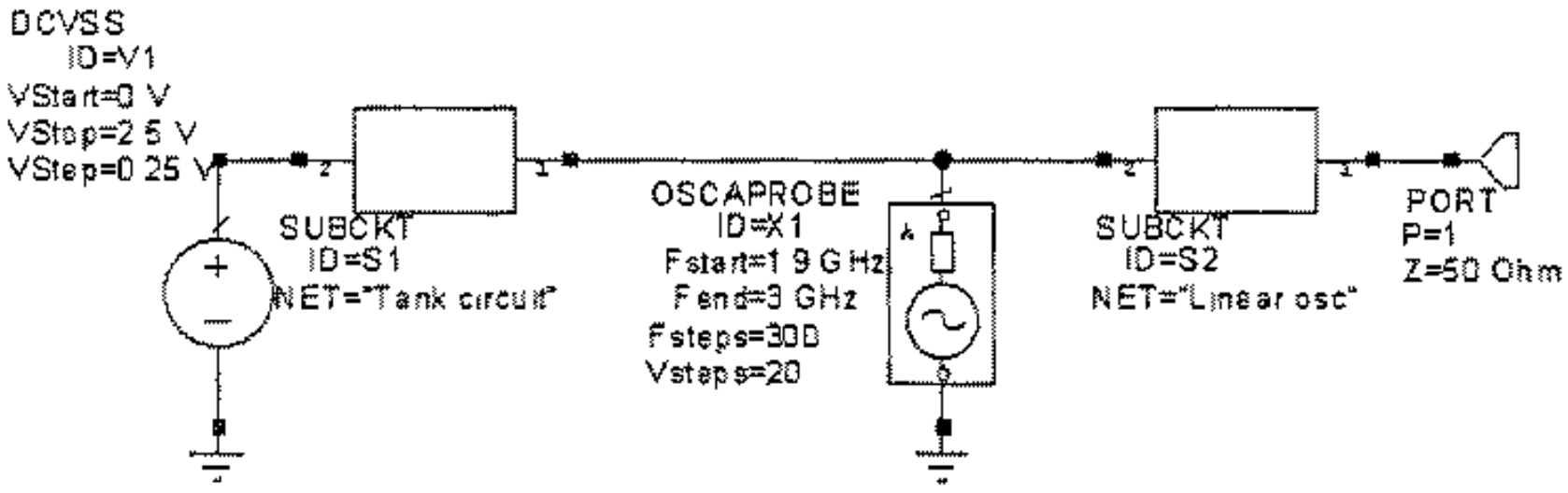


Рис. 8.26. Генератор, составленный из усилительного каскада и резонансной системы

2. Создайте прямоугольный график с именем «osc freq». Добавьте характеристику PHARM и выполните моделирование. Поместите маркер на основную гармонику в спектре, как показано на рис. 8.27.

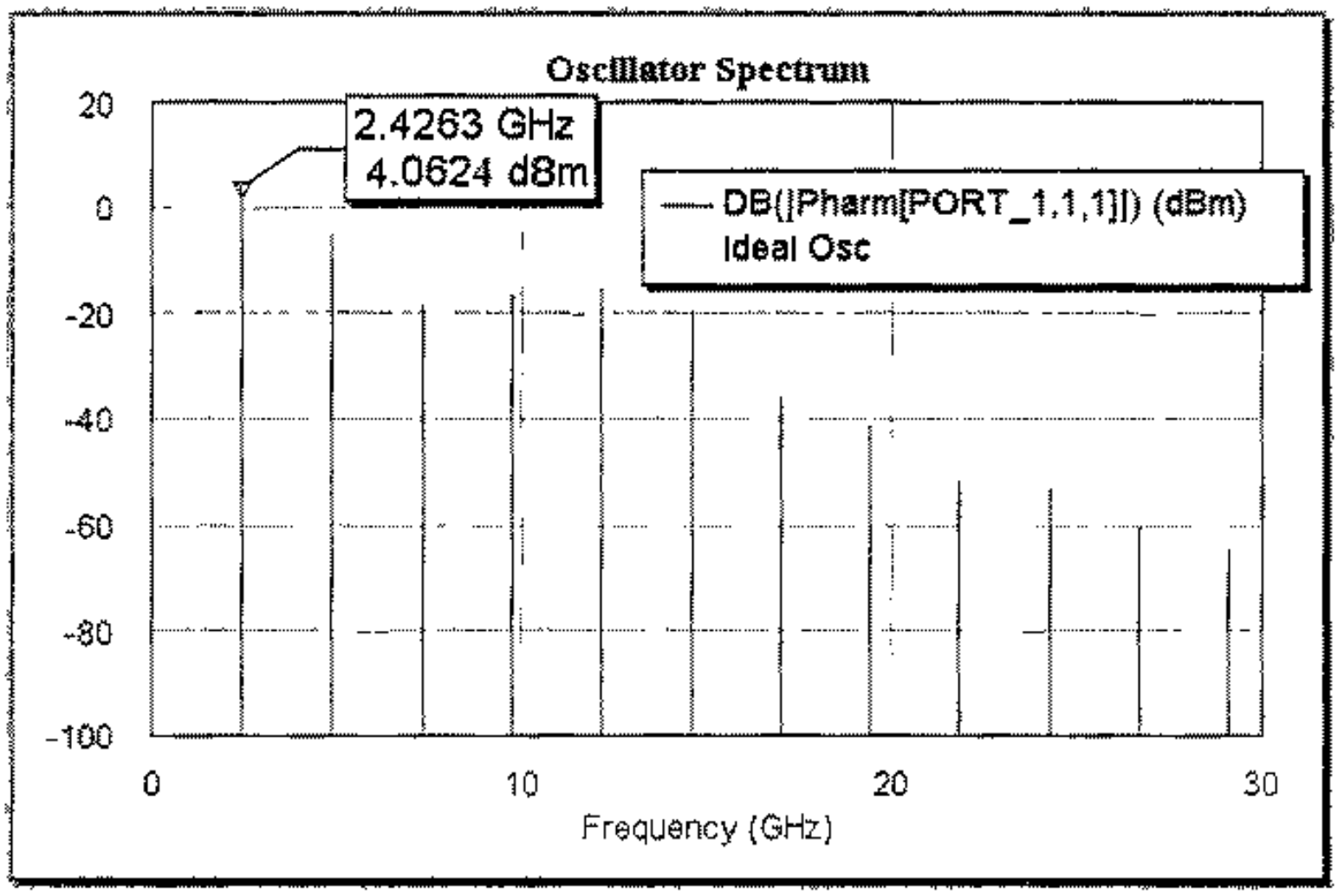


Рис. 8.27. Спектр выходного сигнала генератора

Составление графика vtune относительно частоты

Обычно генератор устроен так, что его частота перестраивается с помощью варактора, в зависимости от напряжения VCO. В MWO можно вывести график, изменяя напряжение управления частотой генератора.

1. Создайте схему с именем «VCO» следующим образом. Скопируйте и вставьте элементы из схемы Ideal Osc, чтобы создать новую VCO схему. Измените генератор напряжения DC, DCVS, на генератор перестраиваемый напряжением, DCVSS. Отредактируйте параметры для перестраиваемого генератора, DCVSS показывается следующим образом.
2. Создайте прямоугольный график с именем «Vtune vs Freq». Добавьте характеристику OSC_FREQ из Generator Meas. Type. Промоделируйте схему. В результате получаем рис. 8.28.

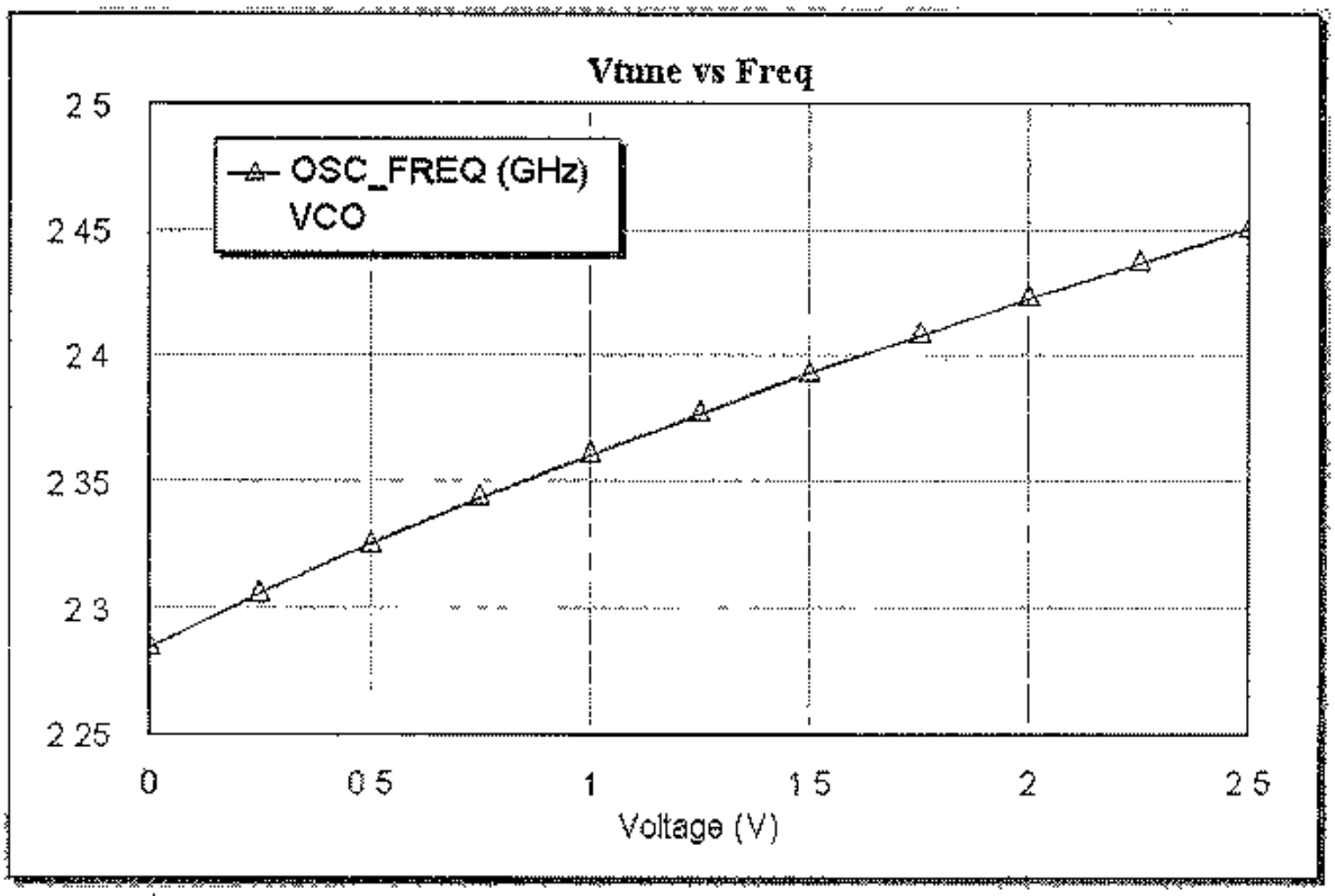


Рис. 8.28. Зависимость частоты генератора от напряжения подстроики

8.3.7. Решение проблем при проектировании генератора

Приведем список встречающихся трудностей при проектировании генераторов и возможные решения.

Проблема 1

Имитатор возвращается с сообщением *Could not detect start-up conditions in the specified frequency range.*

Решение

Убедитесь, что схема удовлетворяет условию запуска в части коэффициента усиления по петле или отрицательного сопротивления.

Поместите зонд как предложено в разделе 8.3.1.

Проверьте, что параметры зонда **Fstart** и **Fend**, находятся вблизи частоты резонатора, как предложено в разделе 8.3.2.

Как последний шанс, увеличьте **Fsteps**.

Проблема 2

Иммитатор выдает сообщение «*Could not find an initial guess for oscillator analysis*».

Решение

Увеличьте параметры VMax и Vsteps.

Проблема 3

Имитатор возвращает сообщение «*Oscillator simulation falled to converge*».

Решение

Увеличьте параметр **Vsteps**.

Проблема 4

Отсутствует сходимость в процессе моделирования.

Решение

Увеличьте число шагов в установках гармонического баланса..

Проблема 5

Иммитатор возвращается с несходимостью метода гармонического баланса.

Решение

Увеличьте число **(tone-1)** гармоник в параметрах гармонического баланса.

Проблема 6

Зонд был помещен в схему, но моделирование не выполняется.

Решение

Определите нелинейную характеристику типа Pharm, Pcomp, Vtime, и т. д., или характеристику Oscillation Frequency, OSC_FREQ.

Увеличение скорости сходимости

Обычно генератор моделируется за секунды, в зависимости от числа гармоник, выходной мощности, добротности генератора, числа активных приборов в схеме и уровня сложности линейных моделей.

Чтобы увеличить скорость расчета вы должны пытаться уменьшать значение параметров **VMax** и **Vsteps**. Число гармоник значительно влияет на скорость моделирования, но уменьшение их меньше 5 не рекомендуется. Параметры настройки точности имеют относительно небольшое влияние на время анализа, их не нужно изменять в попытке ускорить моделирование.

Настройка генератора

Настройка генератора — это тип анализа генератора, после чего пользователь определяет желательную частоту и определяет параметр схемы, который будет подстроен программой, чтобы получить указанную частоту колебания. Поэтому, режим настройки можно считать как тип параметрической оптимизации.

Хотя можно использовать оптимизацию чтобы получить желательную частоту, режим настройки обычно быстрее и более прост. Ограничение настройки генератора, по сравнению с оптимизацией. — то, что только один параметр можно изменять, для получения желаемой частоты колебания.

Как в анализе генератора, соответствующая характеристика должна быть определена и элемент зонда соединен, чтобы запустить настройку генератора. Характеристика — любая из категории Nonlinear, или характеристика Oscillator\OSC_PARAM которая показывает значение регулируемого параметра при желательной частоте колебания.

8.3.8. Настраиваемый зонд (пробник) OSCTPROBE

Зонд **OSCTPROBE**, используемый в настройке генератора, находится в категории **MeasDevice** в разделе **Probes**. Эквивалентная схема OSCTPROBE, правила его размещения, также как и принцип работы, очень похожи на элемент OSCAPROBE. Программа изменяет напряжение OSCTPROBE и значения обозначенного параметра схемы, пока ток будет равен нулю через него на желаемой основной частоте.

Символ зонда настройки и его параметры показан на рис. 8.29.

Основные параметры:

Freq — определяет желательную частоту колебаний;

Par — определяет параметр, который будет изменен.

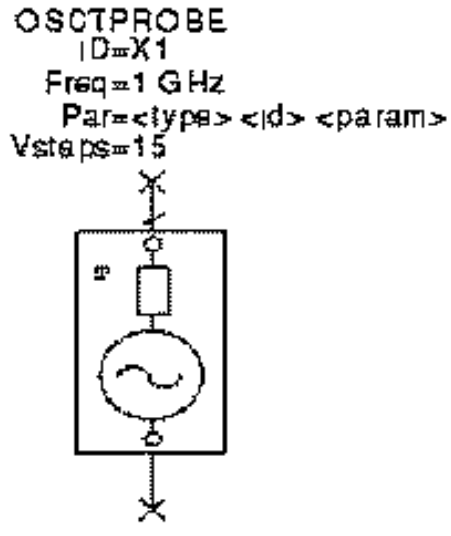


Рис. 8.29. Символ и параметры компоненты OSCPROBE

Заметим, что формат **Par** — это спецификация параметра. Например, чтобы изменить длину коаксиальной линии, обозначенной в схеме CX1, **Par** необходимо задать как COAX.CX1.L.

Как в случае зонда анализа, зонд **OSCTPROBE** имеет ряд вторичных параметров: **Par_low, Par_high, VpMax, VpSteps, Iter, Ftol.**

Par_low и **Par_high** установливают пределы значений параметра элемента, который будет оптимизирован. Если какой либо из них не задан, то пределы устанавливаются равными ±30 % от номинального значения. Остальные параметры имеют те же самые значения, как и их аналоги OSCAPROBE.

Пример настраиваемого генератора

Предположим, что вы хотите найти значение напряжения настройки в схеме генератора, который генерирует частоту 2,4 GHz. Для этой цели зонд анализа был заменен зондом настройки, как показано на рис. 8.30.

В этой схеме параметр Freq = 2.4 GHz, и Par = DCVS.V1. V, инструктируя имитатор изменять напряжение источника смещения.

Характеристика OSC_PARAM была задана, чтобы вывести напряжение источника смещения к желательной частоте колебаний. Когда моделирование выполнено, характеристика OSC_PARAM (рис. 8.31) показывает, что напряжение смеще-

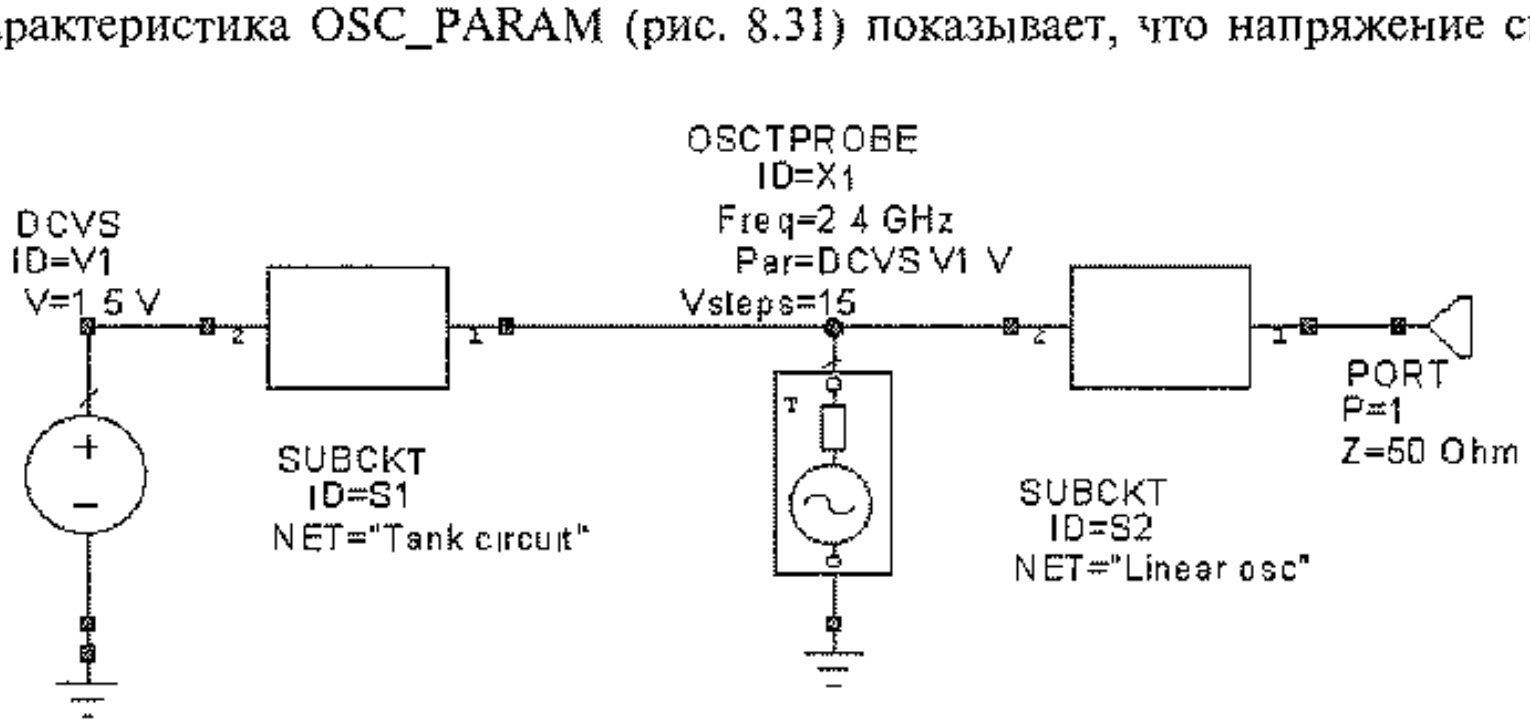


Рис. 8.30. Схема генератора, в которой элемент OSCAPROBE заменен на элемент OSCTPROBE

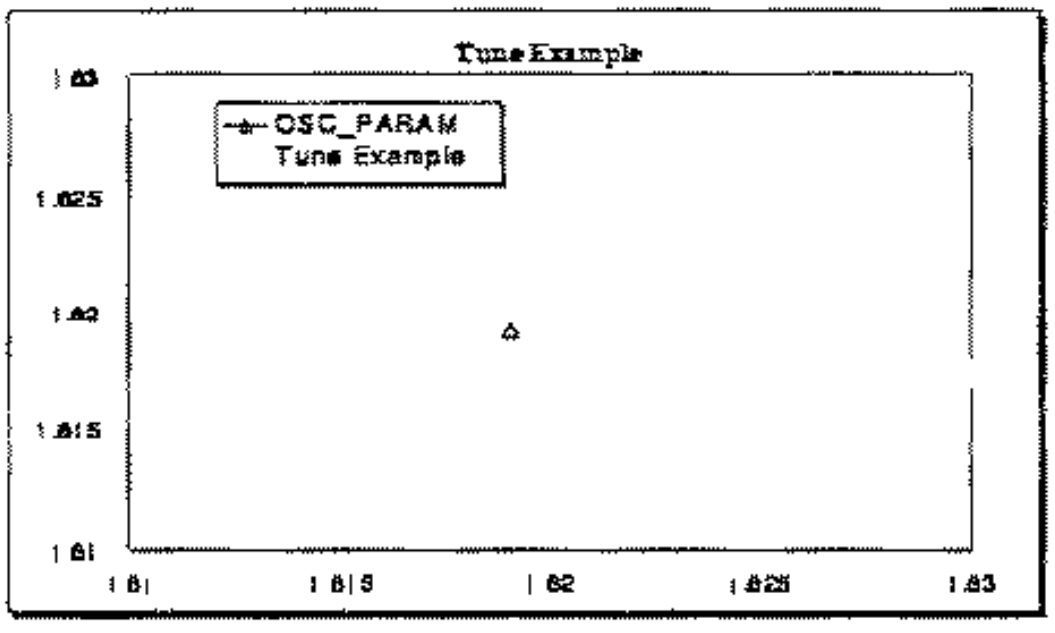


Рис 8.31. Результат расчета подстраиваемого генератора. Для получения частоты 1,62 ГГц необходимо задать напряжение на варакторе 1,82 вольт

ния должно быть установлено приблизительно равной 1,82 вольта для получения частоты колебаний 1,62 ГГц. Следовательно, необходимо увеличить пределы изменения напряжения подстройки.

8.4. Фазовый шум генератора

Анализ шумов генератора связан с нелинейным анализом шумов, описанным ранее. Шум в форме шумовых токов влияет на установившийся режим генератора, создавая шумы на выходе. Отношение между боковыми полосами источников шума и шумовых боковых полос выходного сигнала описывается конверсионной матрицей схемы, как упоминалось ранее. В свою очередь, шумовые напряжения в боковых полосах связаны с фазовым шумом [2].

Анализ фазовых шумов

Анализ фазовых шумов выполняется с помощью элемента OSCNOISE (Meas-Device\Controls\OSCNOISE) в схеме генератора. Символ элемента OSCNOISE показан на рис. 8.32.

Параметры OFstart, OFend и OFsteps определяют частотный диапазон в котором рассчитывается шум, пропорциональный смещению частоты от несущей. Параметр **SwpType** выбирает между линейной и логарифмической характеристикой.

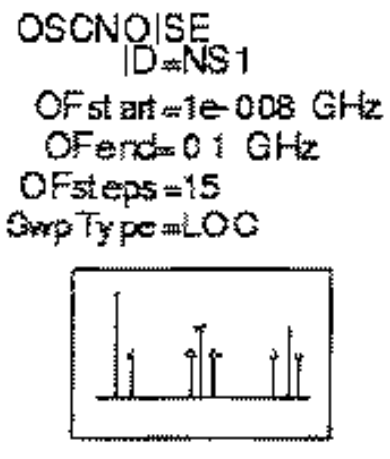


Рис. 8.32. Компоненты расчета шумов генератора

Задавая расчет шумов, автоматически выполняется анализ фазового шума с учетом нелинейных искажений в условиях большого сигнала.

Рассмотрим пример анализа фазового шума генератора.

Заметим, чтобы учесть фликкер-шум генератора, обычно требуется задать параметры **KF** (коэффициент фликкер-шума) и **AF** (экспонента фликкер-шума) в нелинейной модели транзистора. Значения AF и KF для модели GBJT BRF360 устройства в этом примере получены путем синтеза на основании многочисленных измерений.

1. В закладке **Elem**, категории **Meas. Device** и папке **Controls**, выберите элемент **OSCNOISE**, и поместите его в схему Ideal Osc. Измените напряжение настройки V = 2 вольта.
2. Отредактируйте элемент OSCNOISE, используя следующие параметры:

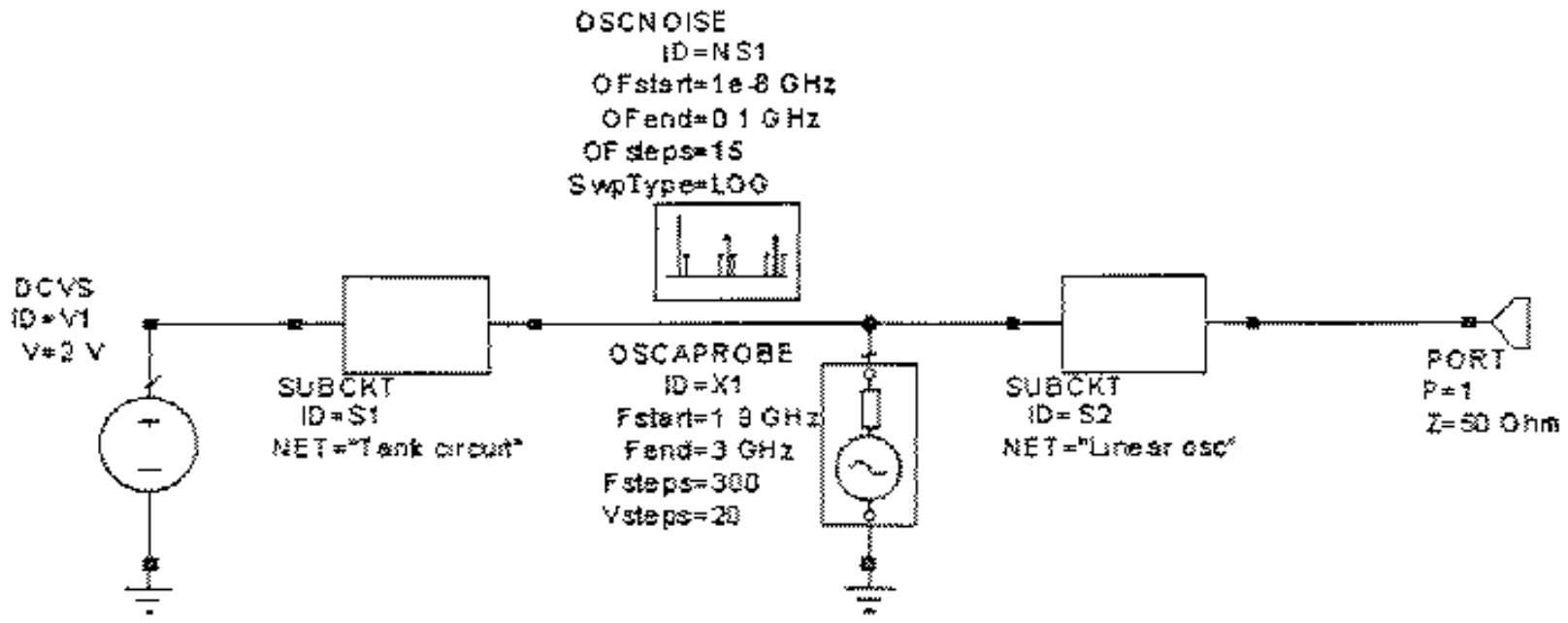


Рис. 8.33. Помещение элемента OSCNOISE на схему дает инструкцию расчета фазового шума

Фазовый шум измеряется в Db/Hz (дБ/Гц), где Hz есть смещение от несущей и откладывается по оси x в логарифмической шкале частот. Для данного примера выберите OFstart=10Hz (1e-008 Ghz) и OFend =100MHz (0,1Ghz). Чтобы вывести фазовый шум, вы должны создать график и вывести на него характеристику PH_NOISE.

3. Выведите характеристику PH_NOISE в окне **Oscillator Meas. Type**. Установите логарифмический масштаб по оси X. Запустите моделирование, чтобы получить график фазового шума (рис. 8.34).

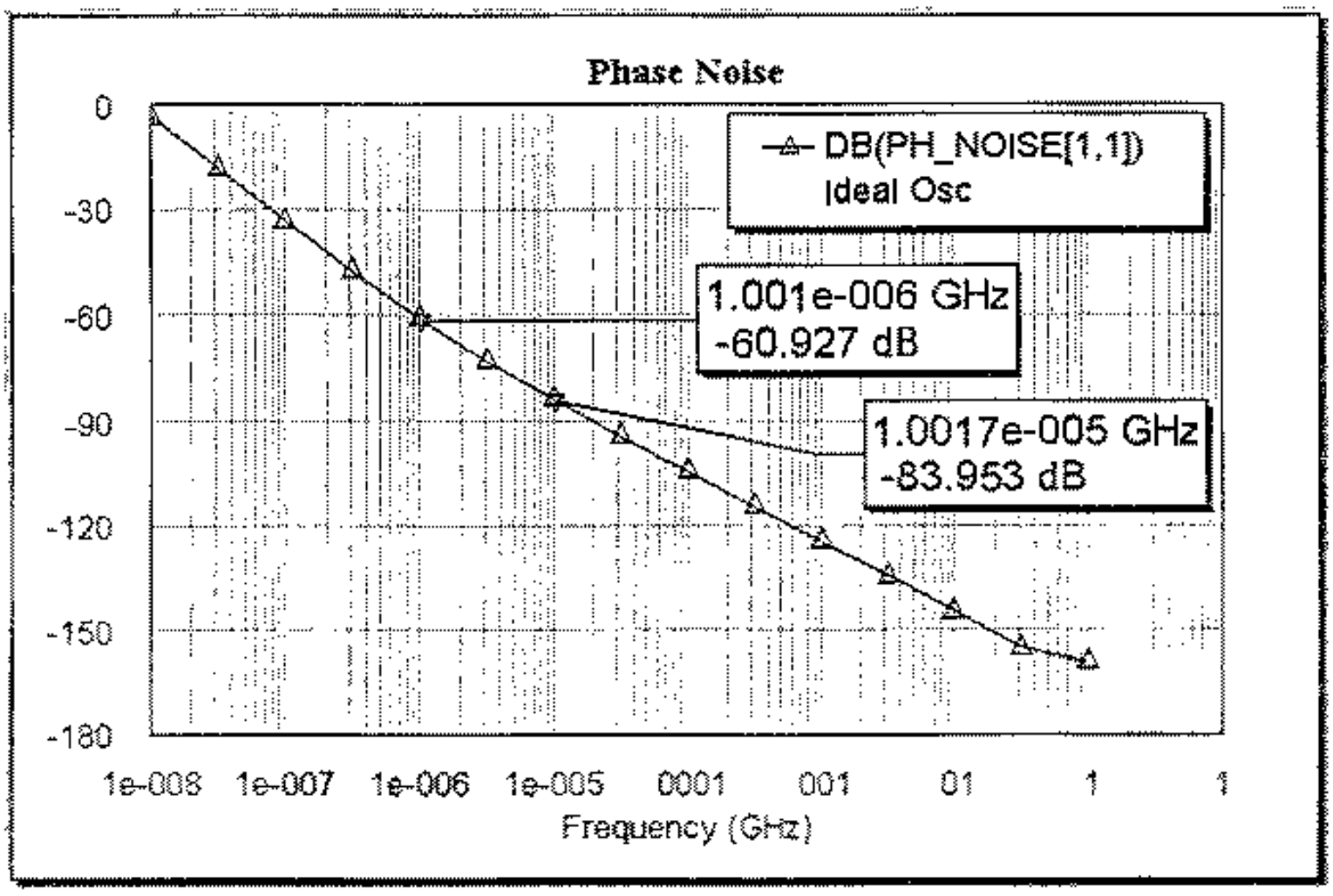


Рис. 8.34. Фазовый шум генератора

Глава 9
Модуль топологического анализа Layout

Модуль **LAYOUT** (программа Aristan) используется для проектирования топологии СВЧ устройства и управлением связью между электрической схемой и топологией. Он служит для контроля физической реализуемости проектируемого устройства и для создания конструкторской документации. Каждый элемент в электрической схеме может быть представлен своим топологическим аналогом. Топологическое представление (рис. 9.1) используется, чтобы создать физическое отображение электрического компонента. Так как электрический символ и представление в виде топологии обрабатываются как один и тот же объект, любое изменение в электрической схеме немедленно отражается в топологии и наоборот.

Жесткая зависимость между электрическим компонентом и топологическим представлением устраняет затраты времени и ошибки при обратном контроле, который обычно требуется, чтобы синхронизировать схему и топологию в других системах анализа электронных схем.

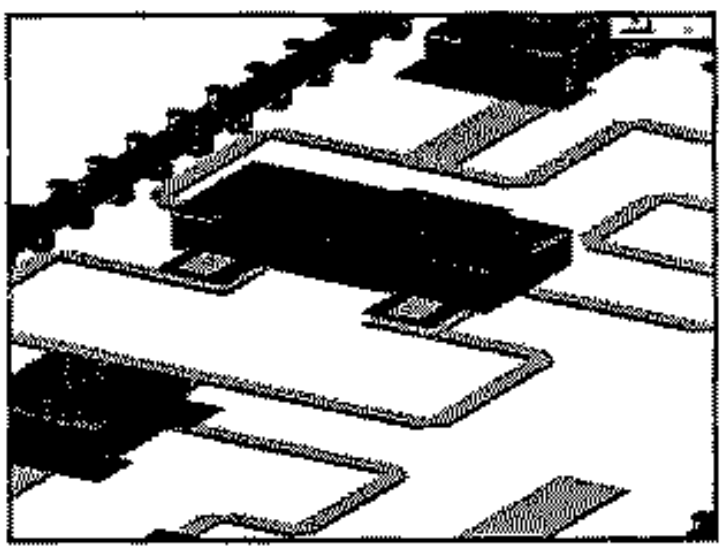


Рис. 9.1. Топологическое представление схемы в модуле Layout

Схема и топология — это два представления *одной и той же базы данных*. Любое изменение схемы или топологии, а также ввод нового элемента, либо в топологии, будет немедленно отражено в другом представлении. Многие схемные элементы имеют топологическое представление, но некоторые не имеют. Поэтому при генерировании топологии часть схемы не будет выводиться в топологическом представлении.

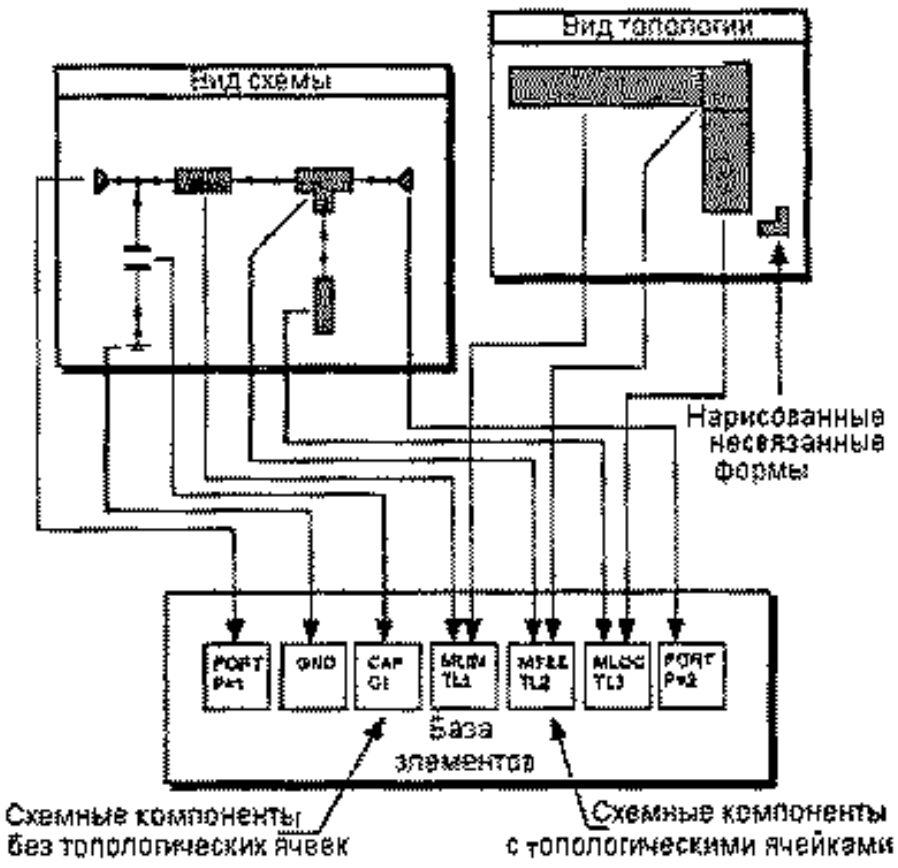


Рис. 9.2. Связь элементов в топологии и электрической схемы

Формы (элементы рисунка), которые не связаны с элементом схемы, например надписи, реперные знаки, могут также быть добавлены в топологию. Активизация слоя рисования, выбранного в окне топологического проектирования, позволяет добавлять и изменять формы рисунка (рис. 9.2). Команды рисования для добавления «несвязанных» форм могут быть выполнены из меню **LAYOUT** или из панели инструментов (полигон, прямоугольник, эллипс, путь и т. д.).

9.1. Основы построения топологии

Топология устройства автоматически создается, когда дается команда для вывода изображения топологии из окна редактирования схемы (**Schematic > View Layout**). Однако прежде мы должны иметь принципиальную схему (рис. 9.3).

Создадим новую схему в проекте правой кнопкой, нажимая на папку **Schematics** или выбором **New Schematic** из меню. Весь монтаж будущего топологического решения (рис. 9.4) выполняется через схему. В папке **Schematics** представлена база

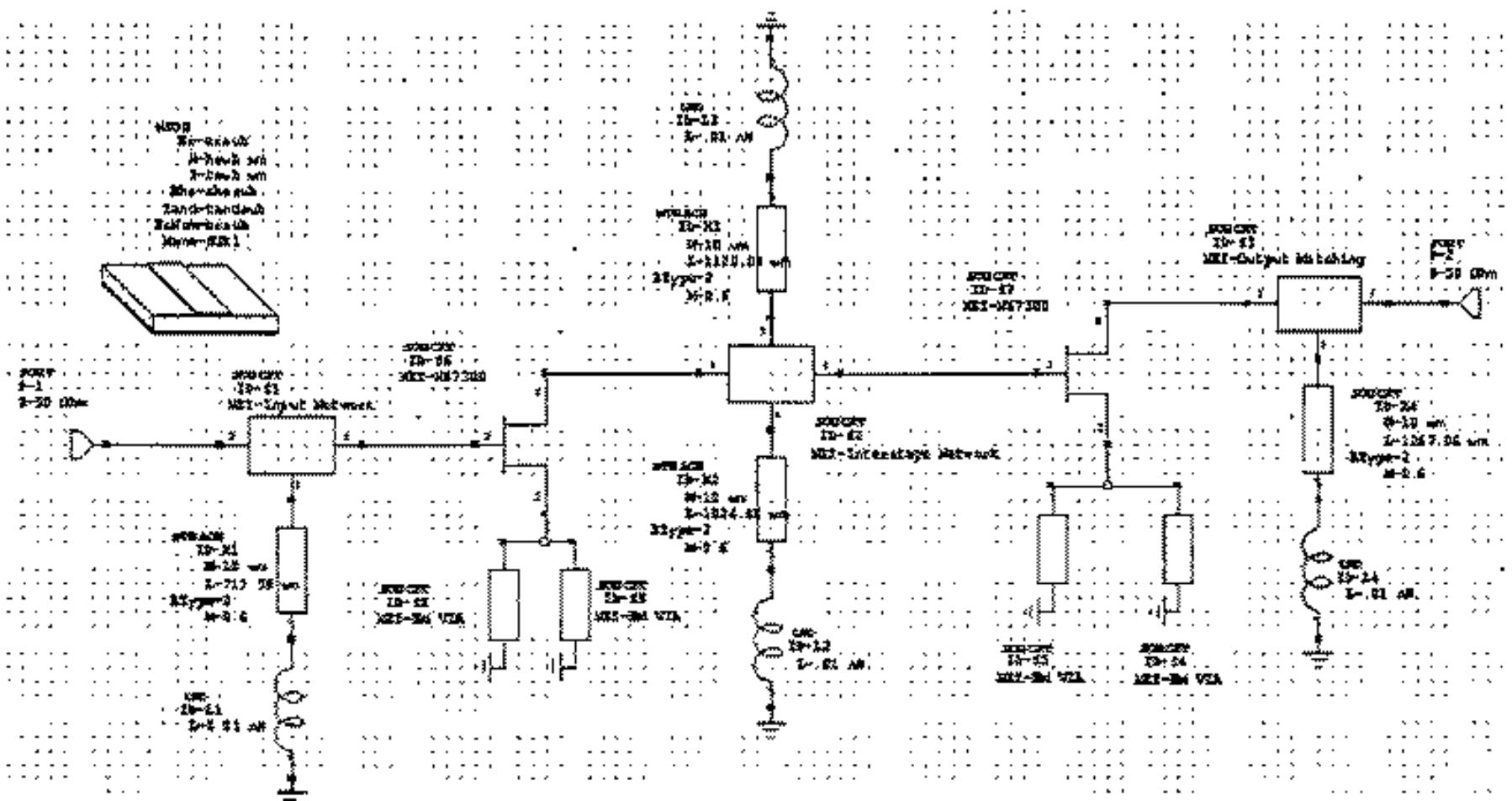


Рис. 9.3. Схема усилителя, в которую входят микрополосковые линии и дискретные элементы

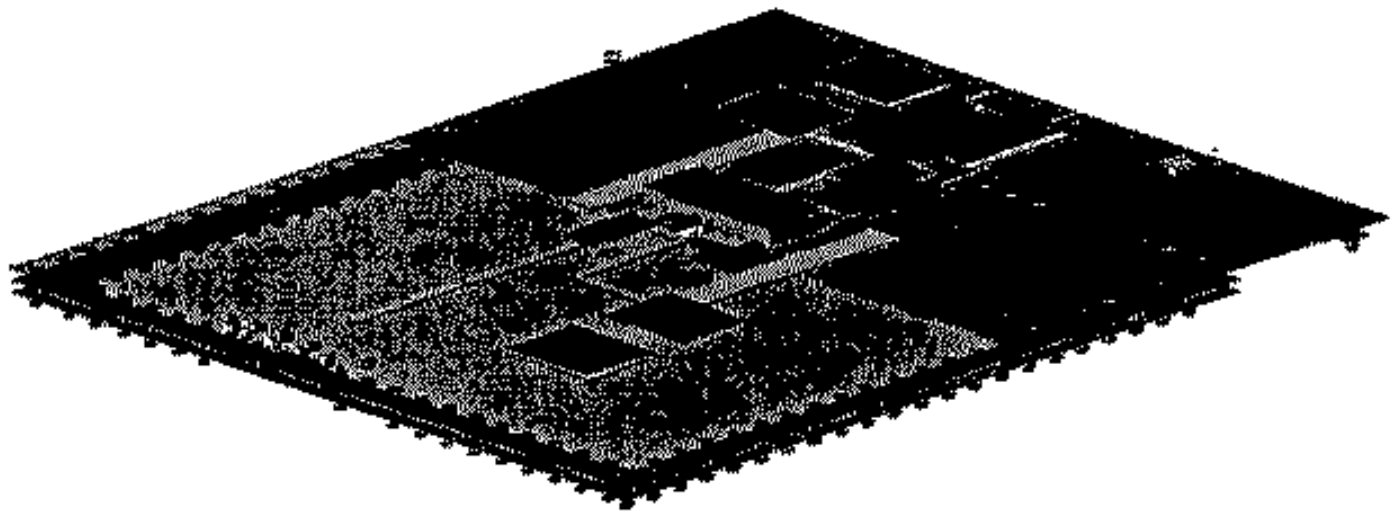


Рис. 9.4. Топология схемы с навесными элементами и площадками произвольной формы

данных по электрической схеме (она содержит все конкретные объекты, которые отображены в схеме). Если к схеме добавляются элементы, то это тут же отразится на топологии.

Топология (рис. 9.4) генерируется командой **Schematic > View Layout** из меню, а также, используя кнопку **View Layout** на панели инструментов (рис. 9.5).



Рис 9.5. Команда Open Layout View преобразует схему в топологию

Когда открывается закладка **Layout**, объекты топологии будут автоматически созданы для всех элементов схемы, которые имеют топологическую форму. Объекты в топологическом представлении непосредственно связаны с соответствующими элементами схемы в схематической базе данных. Если навесные элементы, например конденсаторы не имеют готовой топологической ячейки, но для топологии усилителя, показанной на рис. 9.6 автоматически топологические объекты конденсаторов не создаются. На топологии будут видны только две микрополосковые линии.

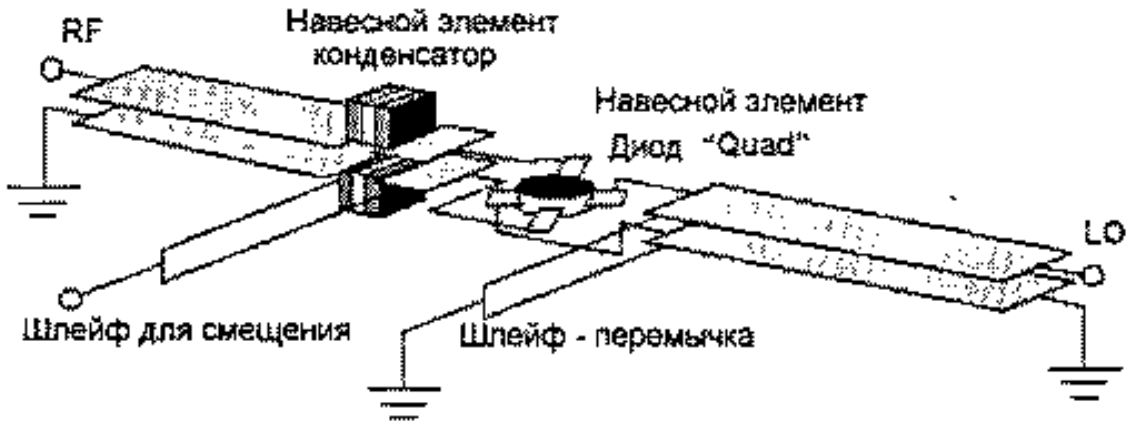


Рис. 9.6. Конструкция смесителя, включающая различного типа топологические элементы: навесные конденсаторы, диод и полосковые линии

Связи между элементами схемы используются, чтобы связать топологические объекты по слоям. Если точки соединения (стыковочные грани) объектов топологии не сливаются вместе, но на схеме соединение есть, то будет начерчена линия связи, указывая связь между этими двумя объектами. Элементы топологии, обыч-

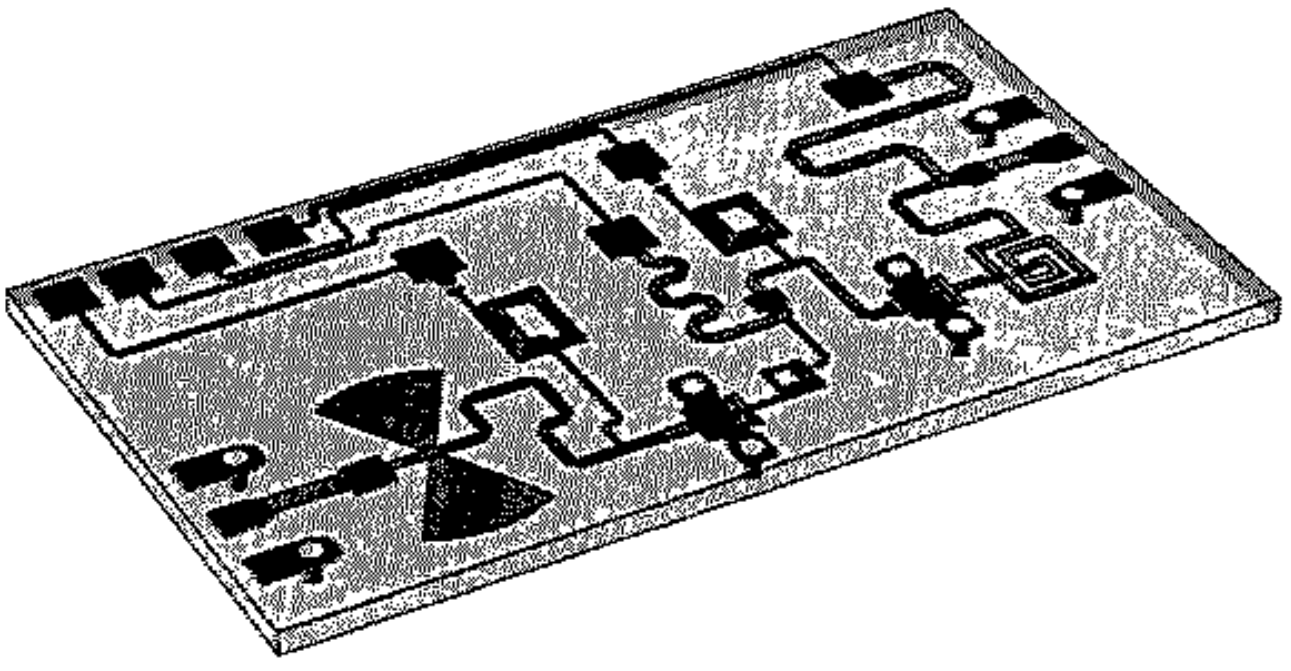


Рис. 9.7. Общий вид топологии в трехмерном представлении, которую можно вращать и рассматривать со всех сторон, что реализовано в MWO

но связываются так, чтобы их стыковочные грани соприкасались друг с другом и сливались.

Это выполнятся командой **Edit > Snap Together** из меню или инструментальной панели.

Формы топологии, например надписи, площадки, которые не связаны с элементами схемы, могут также быть добавлены непосредственно к топологии. Такие добавления важны при создании чертежей и конструкторской документации, обозначений и реперных знаков на фотошаблонах.

Например, чтобы начертить форму многоугольника, выберите **Layout > Polygon** из меню или инструментальной панели. Полигон чертится, нажимая кнопку мыши в каждой точке ломаного многоугольника. Двоиное нажатие или щелчок по вершине первой точки многоугольника заставит его замкнуться и превратиться в заполненную форму. Нарисованная форма сохраняется в базе данных вместе с остальной частью топологических объектов, но она не имеет никакой связи ни с одним из объектов схемы, сохраненных в схематической базе данных. Возможность смешивать связанные и несвязанные объекты обеспечиваст большую гибкость при создании топологии.

Имеются два типа топологических ячеек. Один тип, показанный на рис. 9.8 — параметризированная ячейка топологии, которая использует параметры, чтобы автоматически генерировать формы топологии, связанные с этой топологической ячейкой. Другой тип — ячейка трафарета (Artwork cells), необходима для топологического представления навесных элементов C1, C2 и неизменяемых объектов. Такая ячейка имеет фиксированное геометрическое представление, которое не меняет размеры. Трафареты сохраняются в библиотеках GDSII или DXF.

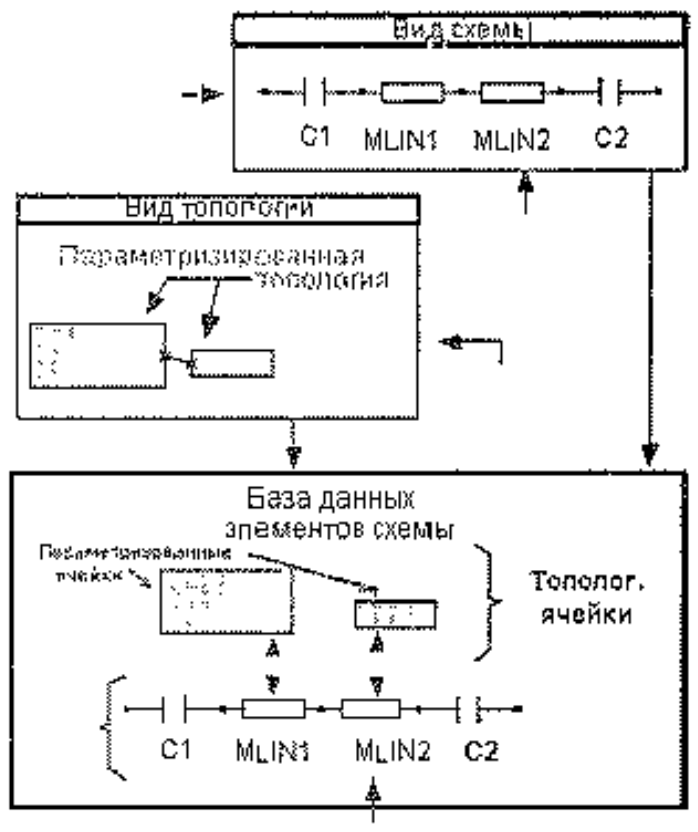


Рис. 9.8. Синхронизация связи схемы и топологии

Для описания ячеек трафарета используются файлы стандартных форматов, чтобы дать большую гибкость при создании и использовании библиотек ячеек. Когда в качестве стандарта используется GDSII, в одной топологической библиотеке могут быть определены топологические ячейки с несколькими иерархиями построения. На рис. 9.9 показана ячейка в GDSII библиотеке, которая содержит две ячейки трафаретов (сохраненные как образцы GDSII). Библиотеки ячеек и трафаретов управляются менеджером топологии в окне Layout. Менеджер топологии показывает все библиотеки ячеек, которые были загружены в проект.

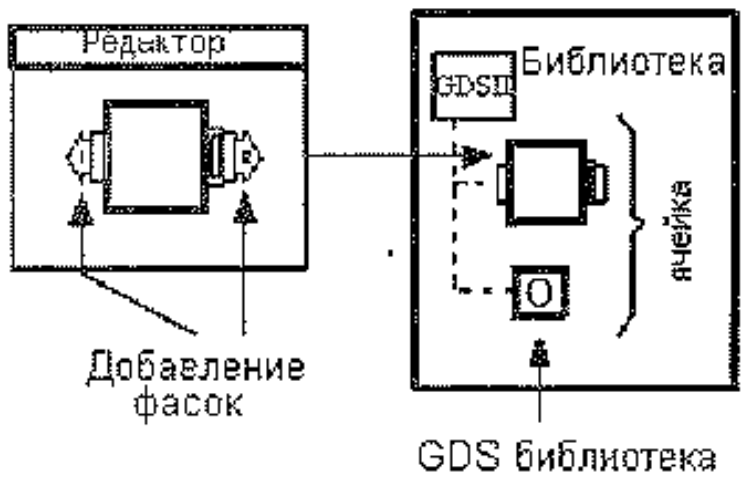


Рис. 9.9. Редактор топологической ячейки трафаретов (Artwork cell) используется для просмотра и редактирования ячейки (слева) в библиотеке ячеек GDSII (справа)

Топологическая ячейка может инсталлироваться двойным нажатием на элемент в менеджере LAYOUT. Ячейки трафарета появляются в окне редактора ячейки, где она может редактироваться и сохранена под

другим именем. У нее могут также изменяться стыковочные грани, которые часто соответствуют портам на электрической схеме.

Стыковочные грани топологического элемента добавляются к ячейке трафарета из окна редактора ячейки трафарета, выбирая **Layout > Cell Port** из меню или панели инструментов. Стыковочные грани (фаски) топологического элемента (порты ячеек) выводятся на ячейку трафарета с помощью инструмента **Cell Port**.

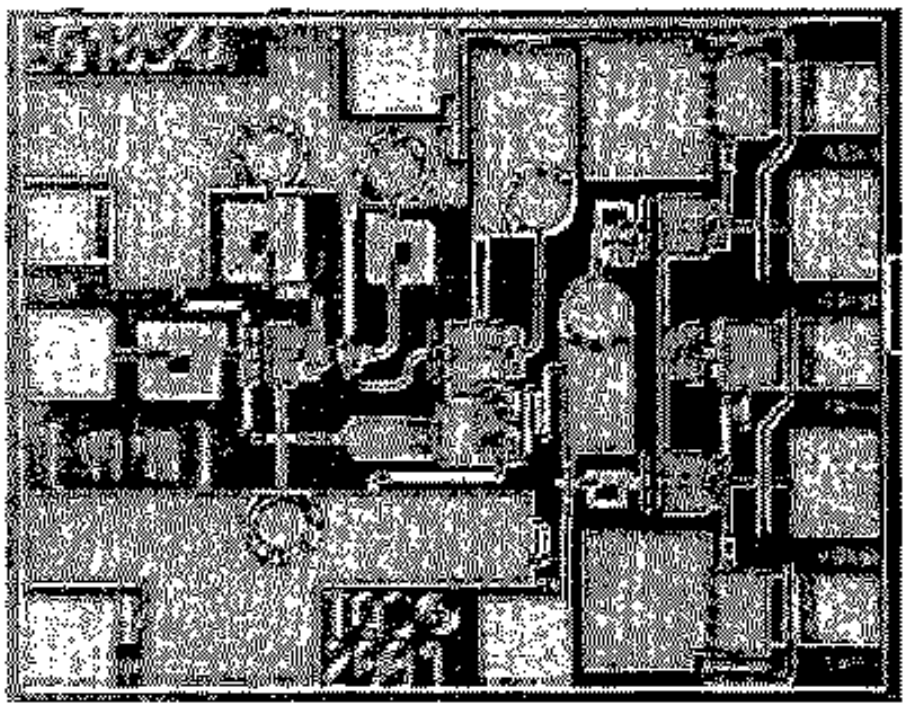


Рис. 9.10. Физический вид топологии конкретной схемы. Для связи элементов на других слоях, а также для бесконтактного наложения, используются воздушные перемычки и межслойные перемычки VIA

После того, как ячейка трафарета или создана или загружена из файла в окно редактора топологии, ее можно связать с элементом схемы. Ячейка трафарета связывается с элементом схемы, выбирая элемент в схеме командой **Change Layout Cell** из выплывающего меню.

После выбора **Change Layout Cell**, диалог покажет список доступных параметризированных ячеек и ячеек трафарета (Artwork cell), которые могут быть связаны с объектами схемы.

В списке будут отображены только те топологические ячейки, которые имеют число граней стыковки, равное числу узлов в схемном компоненте.

Библиотеки топологических компонентов

Для создания и черчения топологии требуется библиотека топологических компонентов, которая соответствует конкретному процессу. Например, базовая библиотека элементов интегральных схем MMIC, в программе MMICAD — хороший пример такой библиотеки. Она использует несколько различных типов ячеек топологии. Ячейки топологии для распространенных в практике проектирования компонентов типа микрополосковых линий, тройников, пересечений, плавных переходов, искривлений и т. д., включены в MWO и могут быть использованы в любой топологии. Дополнительные данные о топологии включены в файл Process Definition File (LPF), который описывает все слои, на которых созданы разнообразные линии и формы и их соединения со слоями отдельных компонентов.

Большинство топологических ячеек из базовой библиотеки имеют свойство перестраиваемой конфигурации, позволяя автоматически редактировать их параметры и использовать это свойство при оптимизации.

Ячейки трафаретов (Artwork cells) — это стандартные ячейки, записанные в формате GDSII, которые имеют точки для соединения, добавленные к ним для использования в качестве топологических ячеек. Ячейка трафаретов используется, например, для не параметризируемой геометрии типа воздушных перемычек (рис. 9.10) и сквозных отверстий между слоями (VIA), топологии полевого транзистора и площадок для пайки. Создать ячейки трафаретов просто: они загружаются в редактор, затем на ячейки наносятся стыковочные грани, и ячейки сохраняются в библиотеке. Масштабируемые трафаретные ячейки допускают параметризацию стандартных ячеек трафаретов.

Если в проекте требуются более сложные параметризированные топологические ячейки, то они могут быть созданы используя язык C++. и эти написанные макросы компилируются в файл DLL. Для чего в MWO есть специальная программа **Cell Wizard**, которая генерирует код C++. Пользователь должен будет только сначала нарисовать рисунок. используя инструменты рисования.

Так как большая часть базовой библиотеки может быть создана используя только построение на ячейках с перестраиваемой конфигурацией и ячейках трафаретов, обычно необходимо будет создать только несколько параметризированных ячеек (примитивов) для базового процесса создания топологии. Процесс создания этих параметризированных ячеек будет описан ниже.

9.2. Редактор топологии

Одно из удобств программы MWO — описание моделируемого устройства в виде проекта, распространено на топологическое представление. Топология управляется редактором топологии (Layout Manager).

В левой нижней части окна MWO находится закладка **Layout** (рис. 9.11) и когда пользователь открывает ее, активизируется редактор топологии.

Редактор топологии **Layout Manager** имеет следующие элементы.

Layer Setup (установки редактора топологии). Дважды щелкните на этом элементе в верхнем левом окне, чтобы открыть диалог, который управляет всеми функциями, связанными с рисованием слоев (рис. 9.12).

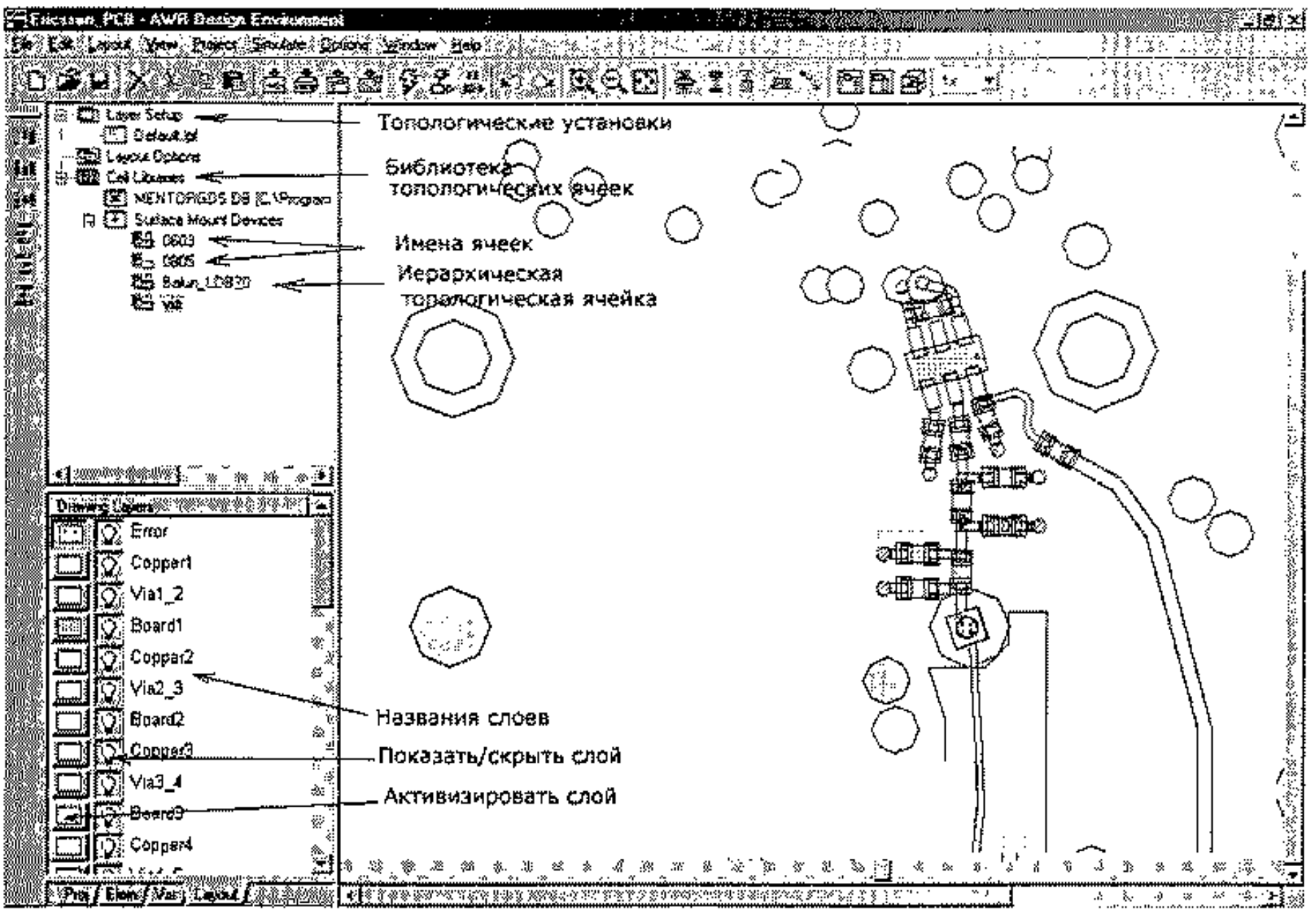


Рис. 9.11. Редактор топологии

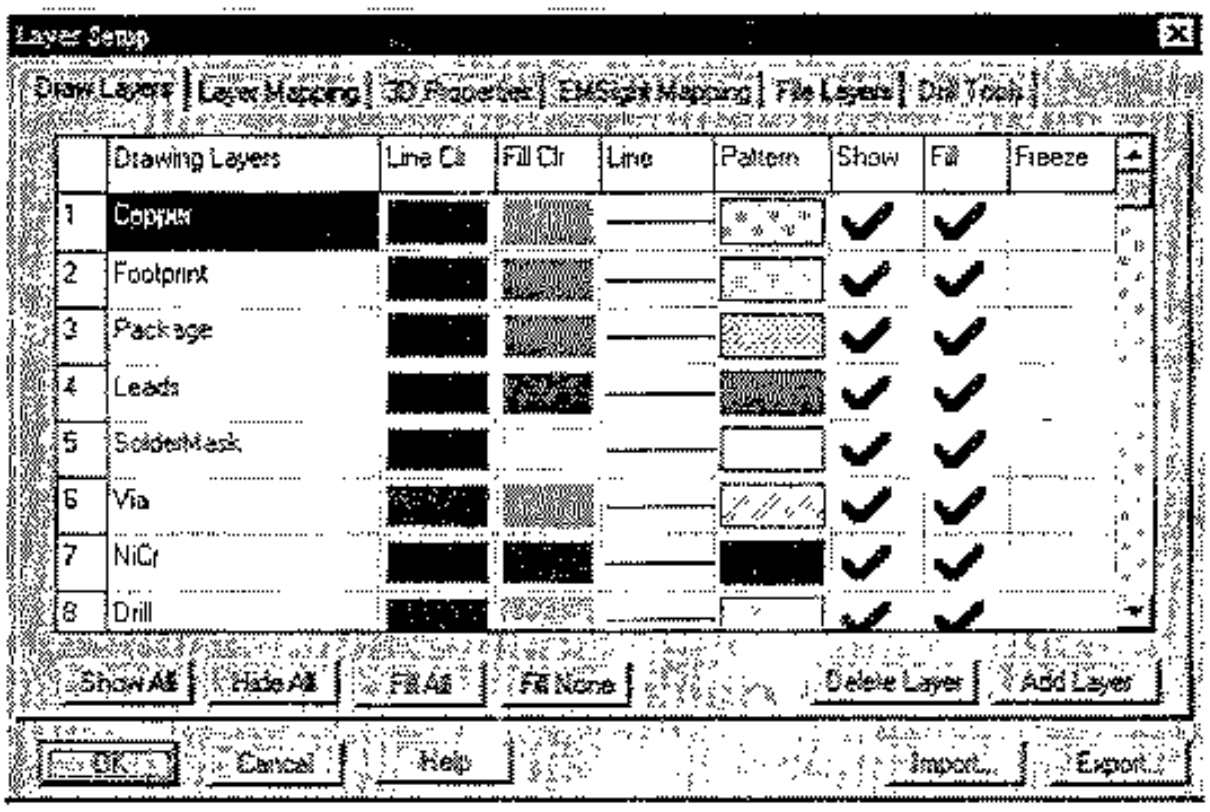


Рис. 9.12. Параметры рисуемых слоев топологии включают цвет, тип линий и заполнений, относящихся к рисункам на слоях

В этом диалоге можно определить такие атрибуты топологии, как цвета линий, заполнений форм, свойства трехмерного (3D) отображения (толщина и пр.) и координатное распределение форм. Для изменения этих атрибутов, выбирается команда **Edit Drawing Layers**. Вы также можете импортировать файл процессирования слоев (*.lpf) для задания этих атрибутов, щелкая правой кнопкой на **Layer Setup** и выбирая **Import Process Definition**.

Cell Libraries (библиотеки топологических ячеек): эта компонента менеджера топологии (рис. 9.11) используется, чтобы создавать или импортировать ячейки топологии для элементов, которые не имеют топологии. Библиотеки ячеек могут быть импортированы в формате GDSII или DXF (по команде **Read GDSII Library...**). Новая библиотека ячеек может быть создана также с помощью собственного редактора черчения. Она создается командой **New Cell Library** (рис. 9.13).

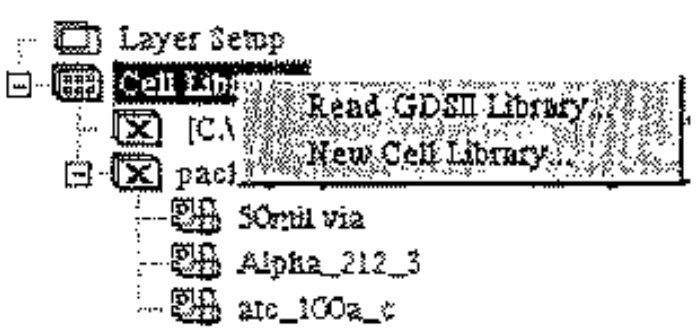


Рис. 9.13. Открытие существующей или создание новой библиотеки ячеек

Редактор топологии (рис. 9.14) используется для следующих целей:

- управления библиотеками ячеек, которые могут использоваться в топологии.
- для перемещения входящих в библиотеку ячеек, в поле редактора (большое окно).
- для отображения и изменения слоев конструкции (или слоев модели, если активизирован редактор Artwork Cell, рис. 9.15).

Layer View (просмотр слоев): используется, чтобы показывать, скрывать нарисованные слои, а также активизировать слои для рисования или связывания их в процессе монтажа.

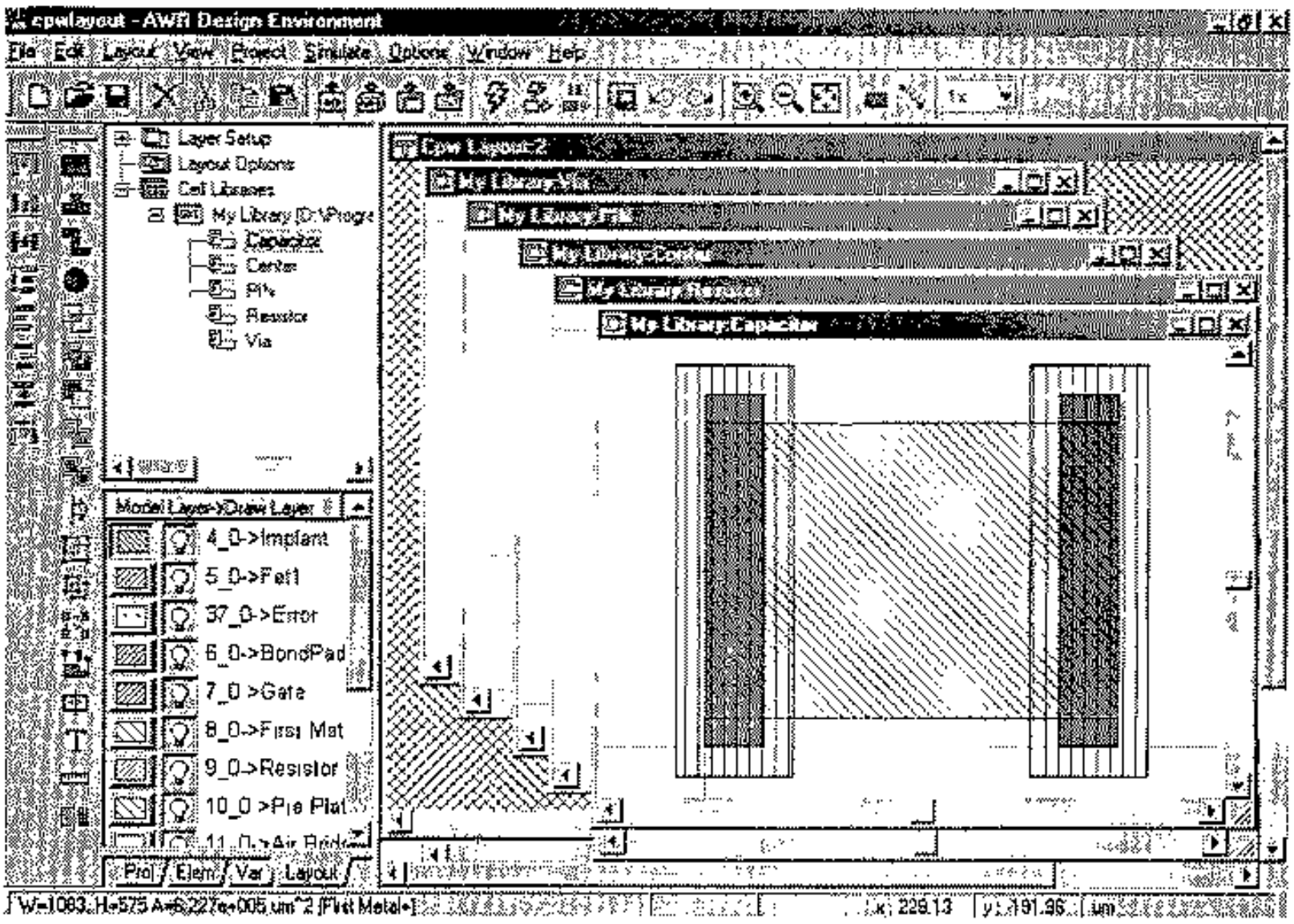


Рис. 9.14. Просмотр содержания библиотеки ячеек с именем My Library

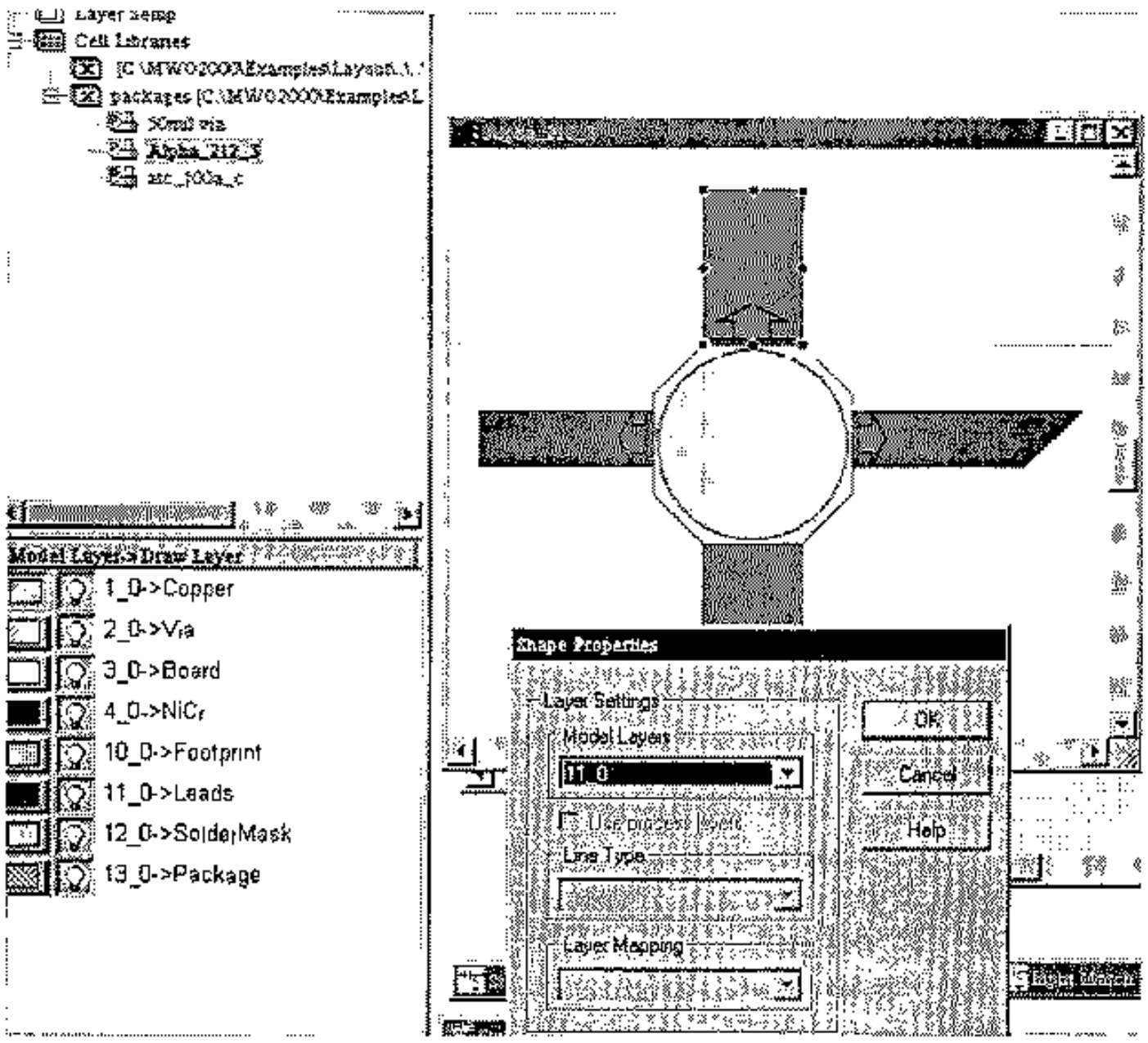


Рис. 9.15. Открытие ячейки Alfa_212 в редакторе

Если знак топологической ячейки дважды нажать в верхнем окне, то она будет показана в редакторе топологических ячеек. Нажимая правой кнопкой на узлы в верхней области окиа, появляется меню, которое можно использовать, чтобы добавить новые библиотекн и ячейки. Из этого меню ячейки и библиотеки могут также быть удалены или переименованы.

Если одна из топологических библиотек (рис. 9.16) активизирована в верхнем окне **Project View**, то в нижнем окне отобразится список ячеек, находящихся в библиотеке топологических ячеек, и их можно перетаскивать в любое открытое окно топологии. Это позволяет использовать ячейку в проекте или для создания более сложных новых ячеек.

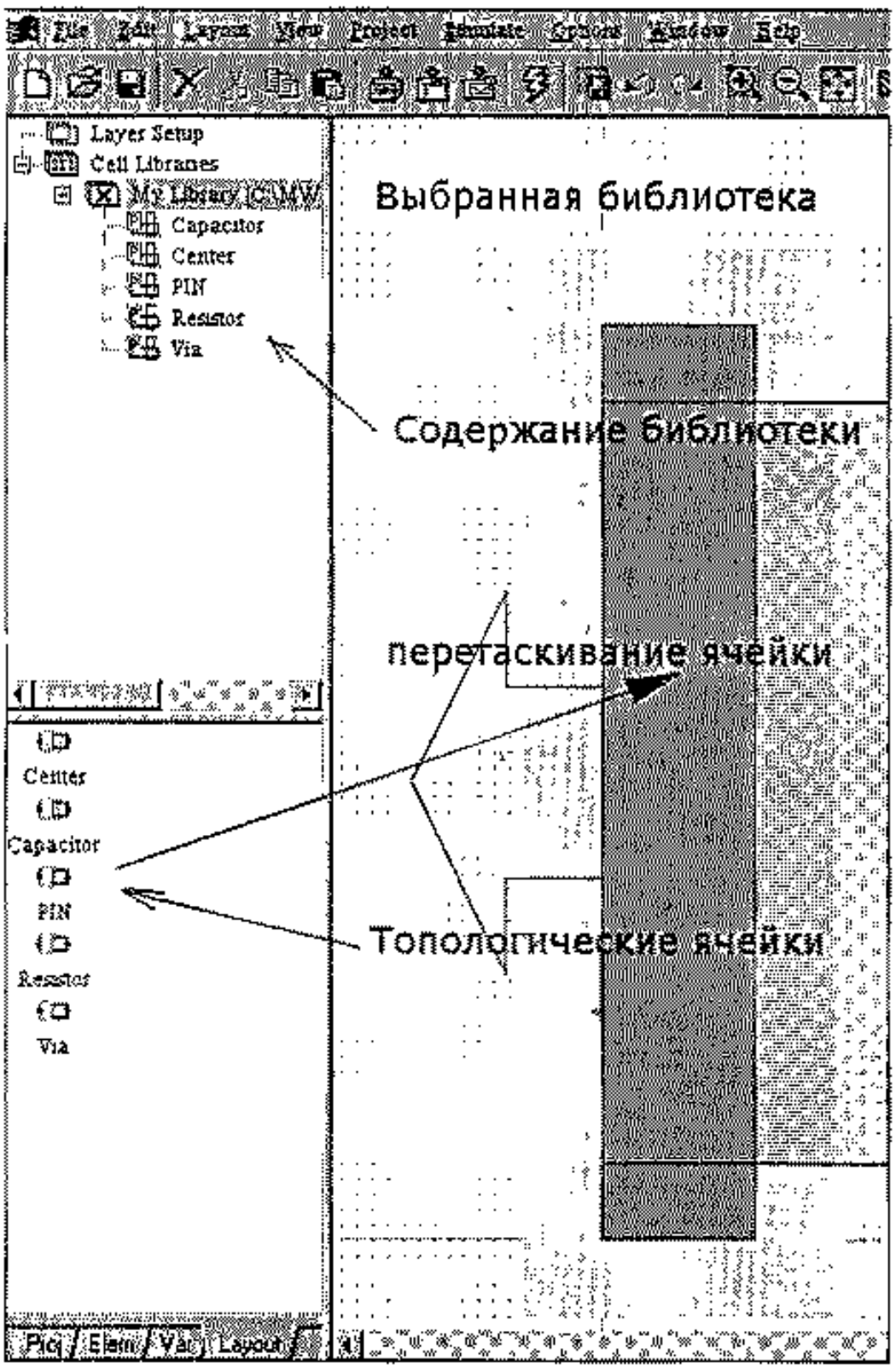


Рис. 9.16. Просмотр содержания библиотеки My Library

Обычно параметризированные топологические ячейки связаны со схемными элементами и содержат параметры, которые соответствуют параметрам топологической ячейки. Это не требуется, когда объект ячейки автоматически создаст параметры топологии и когда не имеется соответствующего параметра в связанной с ним схеме. Например, параметризированная топологическая ячейка для микрополосковой линии (как показано на рис. 9.17) может быть связана с топологией

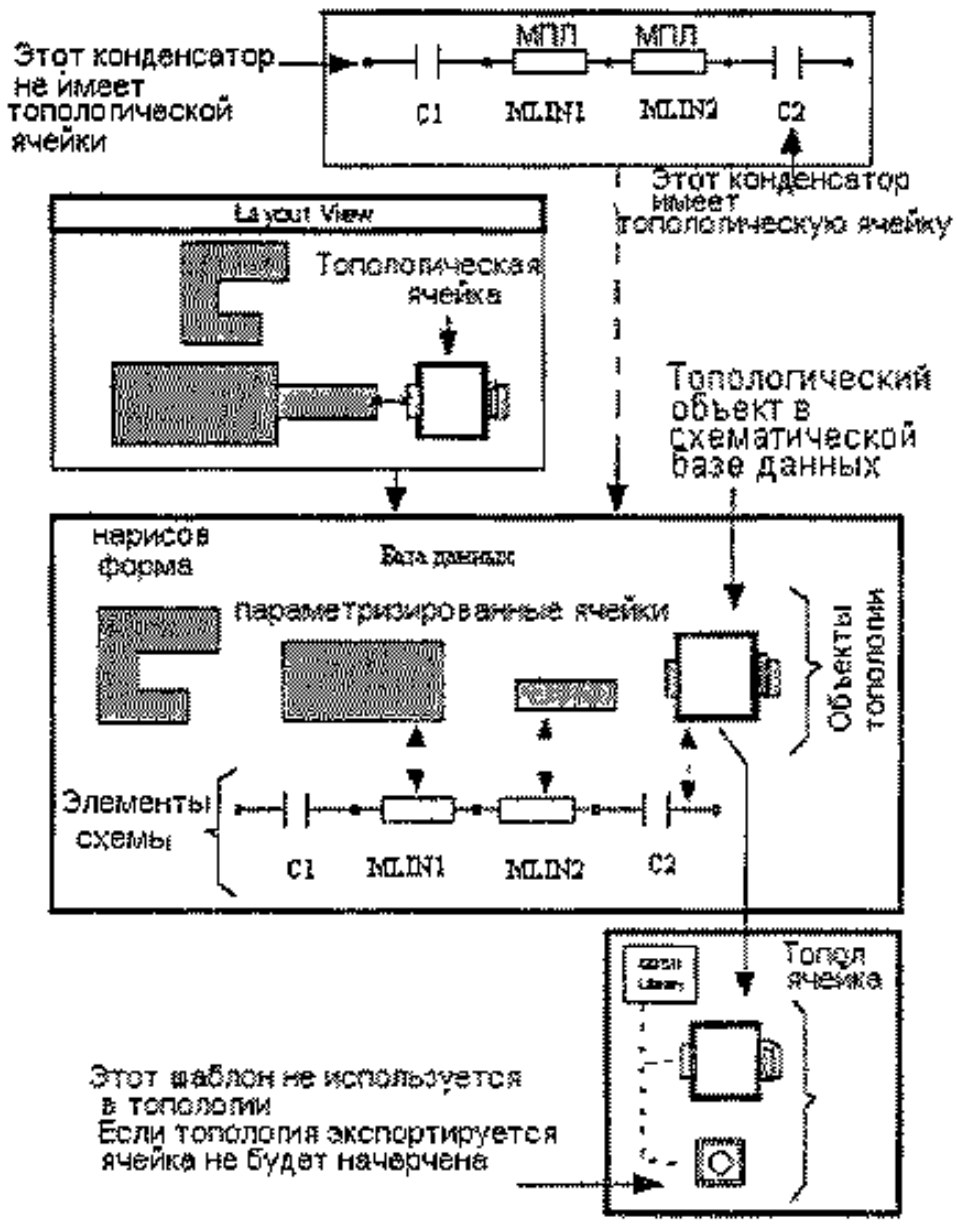


Рис. 9.17. Соединение топологических ячеек

конденсатора, а ширина и длина микрополосковой линии тогда стали бы характеристикой ячейки топологии (потому что конденсатор не имеет параметра W или L) в базе данных. Значения параметров ячейки топологии могут быть просмотрены и установлены, выбирая объект ячейки топологии и затем выбирая **Layout > Shape Properties** из опускающегося меню. Параметры топологической ячейки можно установить в закладке **Parameters** диалога **Parameters Cells**.

Библиотеки топологии

Менеджер топологии **Layout Manager** показывает все топологические библиотеки, которые загружены в проект. Каждая библиотека топологии сохранена или как GDSII, или DXF с форматом GDSII по умолчанию. Когда используется формат GDSII, библиотека может содержать любое число ячеек топологии, которые также могут быть иерархические. Когда используется формат DXF, каждая библиотека будет содержать только одну топологическую ячейку.

Следующие параметры могут быть установлены для каждой библиотеки топологий, нажимая правой кнопкой на папку этой библиотеки в **Layout Manager** и выбирая **Cell Library Properties** (рис. 9.18).

Различные опции (рис. 9.18) работы с библиотеками объясняются ниже.

Library searching priority (приоритет поиска библиотеки): эта опция используется, чтобы изменить порядок поиска для иерархических ячеек. Она применяется чтобы исключить конфликты между именами, когда используются несколько биб-

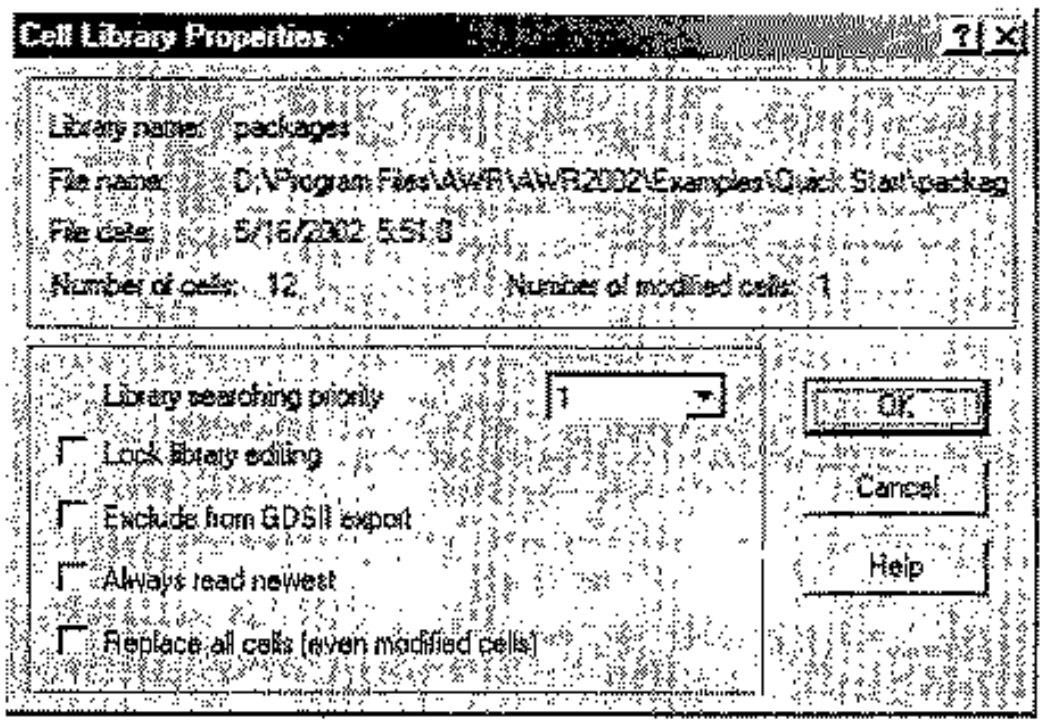


Рис. 9.18. Окно свойств библиотеки топологических элементов

лиотек, которые имеют ячейки с одинаковыми именами. Эта опция только устанавливается для иерархических ячеек.

Lock library editing (блокировка редактирования библиотеки): эта опция используется, чтобы исключить (блокировать) изменения ячеек в библиотеке. Когда библиотека блокирована. любые изменения ячеек не будут сохранены в библиотеке при закрытии редактора ячеек.

Exclude from GDSII export (исключение из экспортируемого файла): если топология экспортируется как иерархический файл GDSII, то ячейки, которые являются частью топологии, будут экспортироваться как образцы GDSII. Если отмечена опция **Exclude from GDSII**, то оригиналы к образцам в библиотеке будут переданы, но фактические данные ячейки не будут переданы. Это может быть полезно, если используется стандартный GDSII, и нужно использовать единственный экземпляр общих ячеек, чтобы уменьшить размер файла.

Always read newest (чтение самых новых): когда эта опция отмечена, редактор топологий автоматически импортирует самые новые ячейки, если дата создания библиотечного файла более новая, чем дата первоначальной библиотеки. Если ячейка используется, то все изменения могут быть потеряны, если становится доступной последняя обновленная библиотека. Чтобы предупредить потери редактирования, работая в этом режиме, необходимо сохранять библиотеку после каждого редактирования (командой **Save Cell Library**). Когда эта опция не отмечена, любое обновление в этой библиотеке не будет отражаться на топологии проекта. Если отмечена опция **Replace all cells**, то опция **Always read newest** не будет влиять на работу, потому что ячейки будут всегда переписываться из библиотеки.

Replace all cells (заменить все ячейки): когда эта опция включена, ячейки будут всегда переписываться из библиотеки, когда проект открыт. Если эта опция не отмечена (значение по умолчанию) тогда любые ячейки (рис. 9.19), используемые в проекте, будут сохранены в проекте и будут использоваться для всех образцов в топологии.

Ячейки из библиотек могут быть не только навесными элементами, но и отдельными нестандартными линиями и перемычками, показываемыми на реальных микросхемах, рис. 9.20.

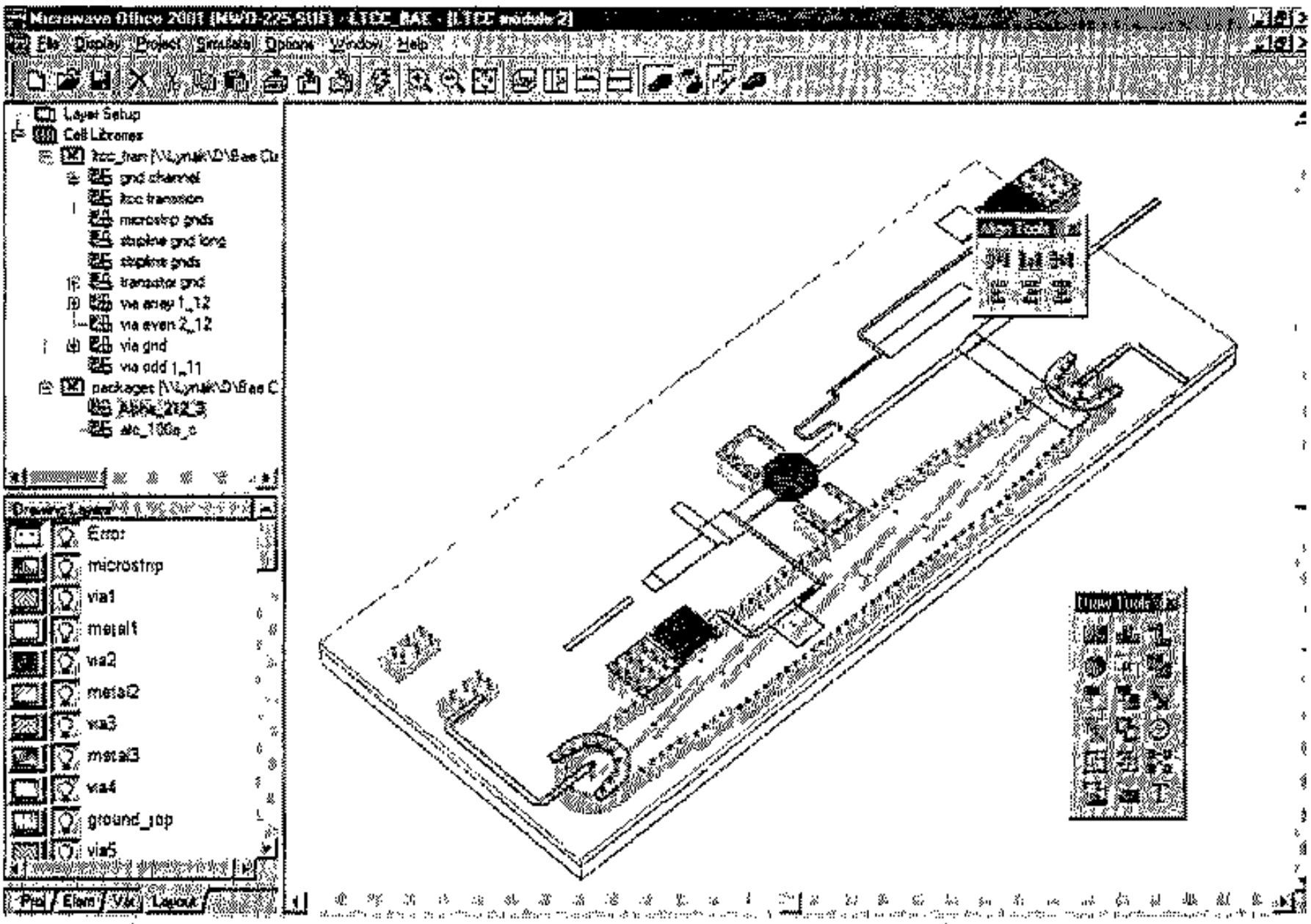
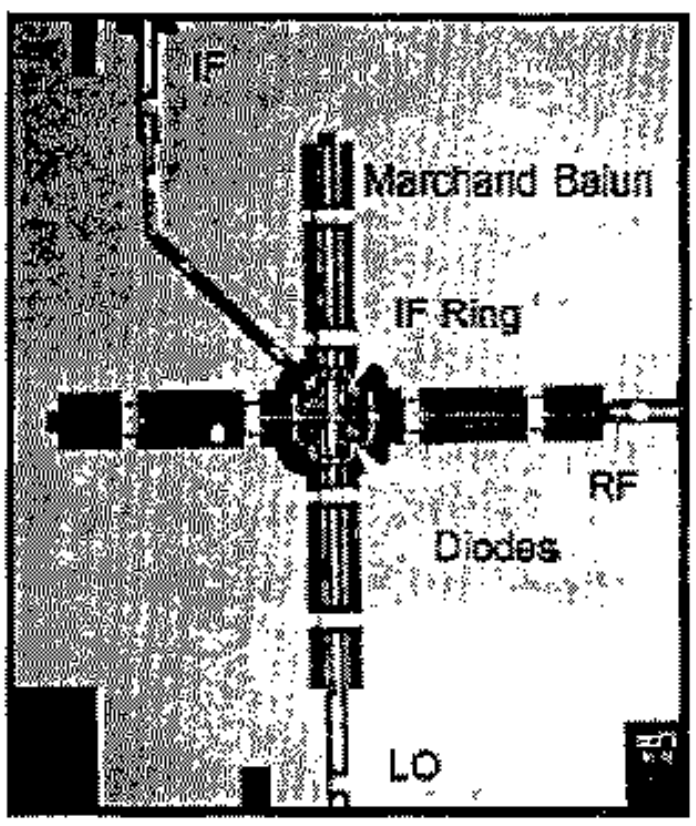
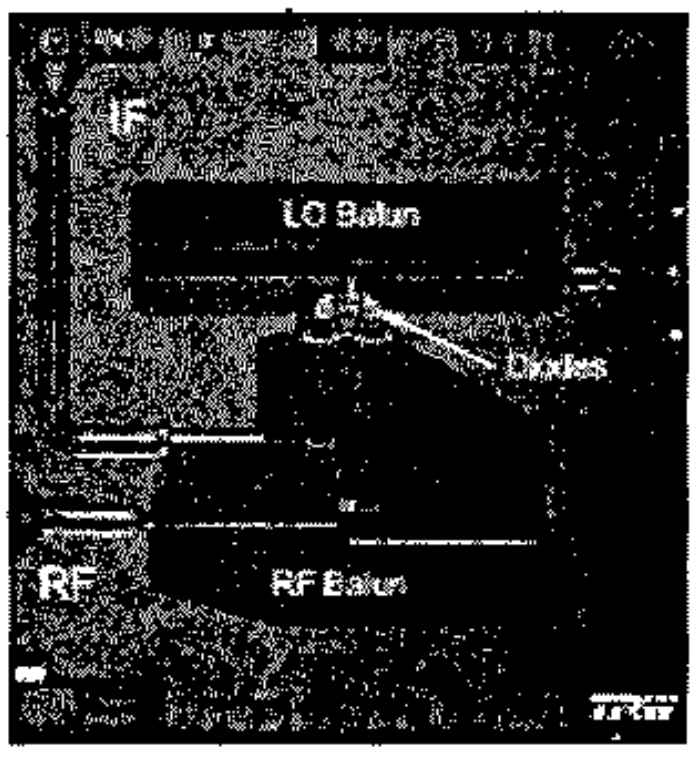


Рис. 9.19. Топология однокаскадного СВЧ усилителя, в которой используются 11 ячеек из двух библиотек ячеек



Смеситель использующий полосковый делитель мощности в конфигурации типа копланарного волновода. Рабочий диапазон 26...40 ГГц. Промежуточная частота 0.. 12 ГГц

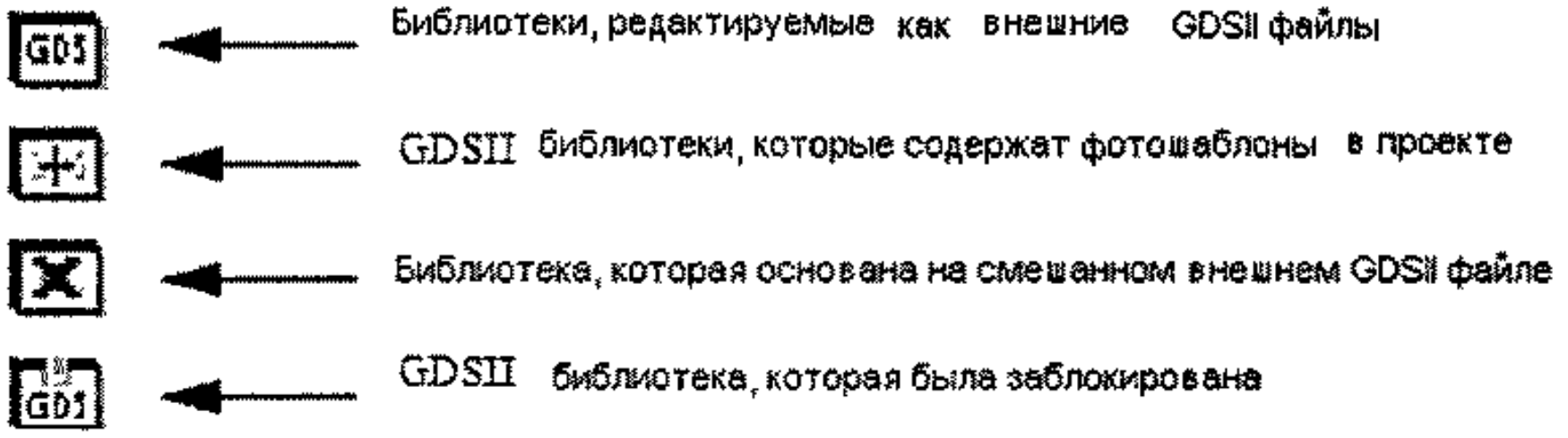


Планарный кольцевой диодный смеситель диапазона 1840 ГГц, промежуточная частота 12 ГГц. Для улучшения характеристик используется фильтр, отражающий четные типы волн

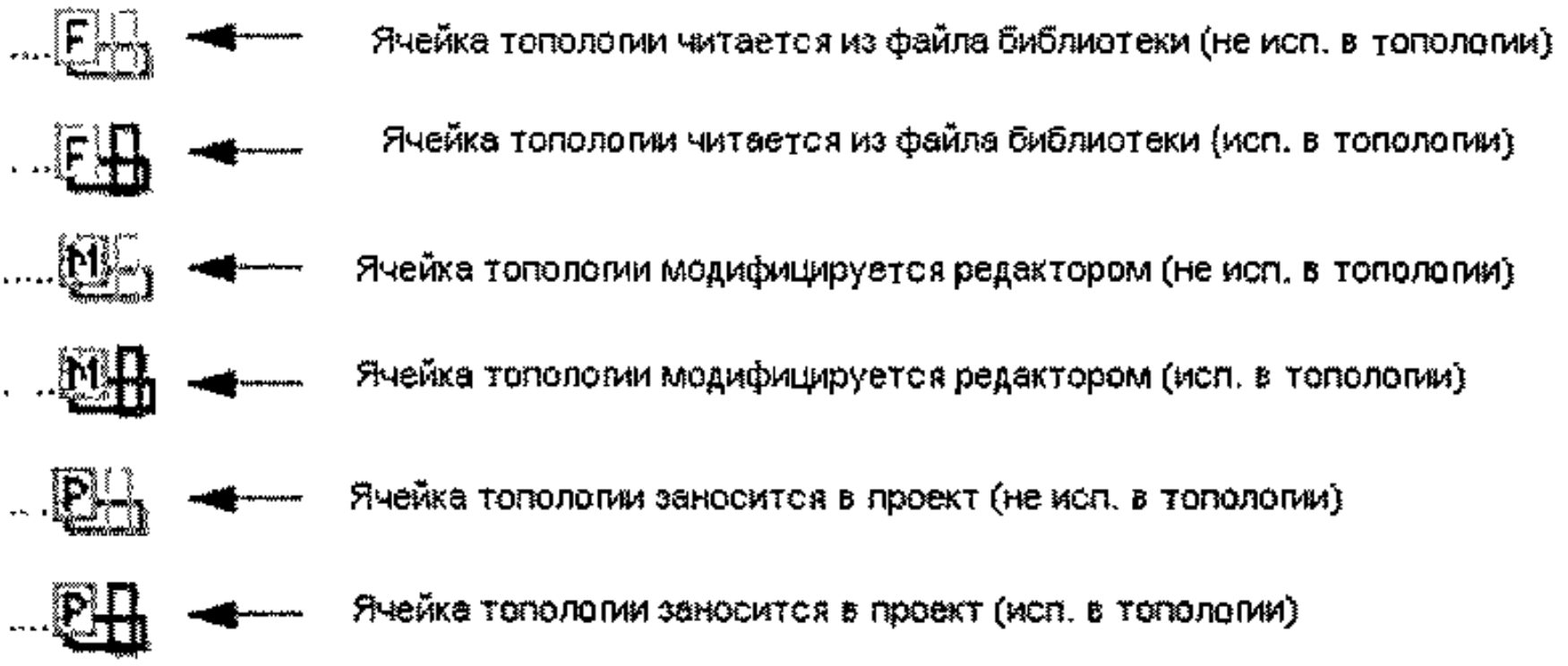
Рис. 9 20. Топологии реальных СВЧ устройств

Сопроводительная информация о библиотеках в менеджере топологии

Менеджер топологии **Layout Manager** отображает список всех библиотек, загруженных в проект. Значки, которые отображены для каждой библиотеки, указывают состояние библиотек. Описание различных значков дается ниже.



Каждая ячейка из библиотеки показывается в окне Layout Manager со значком, который указывает состояние этой ячейки. Различные значки и описание состояния, которое каждый представляет, даются ниже. Ячейкн, которые используются в топологии проекта, будут отображены красным прямоугольником и синим прямоугольником. Если ячейка не используется, то эти прямоугольники будут серые.



F — означает чтение из файла; **M** — означает модификацию; **P** — означает занесение в проект.

9.3. Пример создания топологии

Прежде, чем мы будем далее обсуждать принципы топологического представления в MWO, покажем пример создания топологии из схемы. Этот процесс будет включать следующие шаги.

1. Импорт файла процессирования топологии (LPF).
2. Редактирование единиц базы данных и размера сетки.

3. Импорт библиотекн ячеек.
4. Импорт и размещение файла данных в схеме.
5. Изменение схемного символа.
6. Размещение микрополосковых линий в топологии.
7. Установка соответствия трафарета и схемного элемента.
8. Просмотр топологии.
9. Создание ячейки трафарета.
10. Привязка топологической ячейки к топологии.
11. Манипуляция элементами MTRACE в топологии.
12. Слияние форм в топологии.
13. Экспорт топологии.

Чтобы создать новый проект:

1. Выберите **File > New Project.**
2. Выберите **File > Save Project As** и дайте имя проекту (например, «Layout_example»).

9.3.1. Импорт файла процессирования слоев

Файл **Layer Process File** (LPF) имеет установки топологии, включая нарисованные слои, соединения между слоями, информацию о 3D представлении и топологию для электромагнитного моделирования EMSight.

Чтобы импортировать LPF:

1. Кликните закладку **Layout** внизу, чтобы открыть менеджер топологии;
2. Кликните правой кнопкой мыши **Layer Setup**, и выберите **Import Process Definition.** Появляется окно **Open**;
3. Выберите директорию ...\AWR\AWR2002, дважды нажмите и откройте его (это директория по умолчанию, где инсталлирован MWO);
4. Подсветите файл **MIC_English.lpf** и кликните **Open**. Появится окно менеджера топологии, которое будет выглядеть как на рис. 9.21.

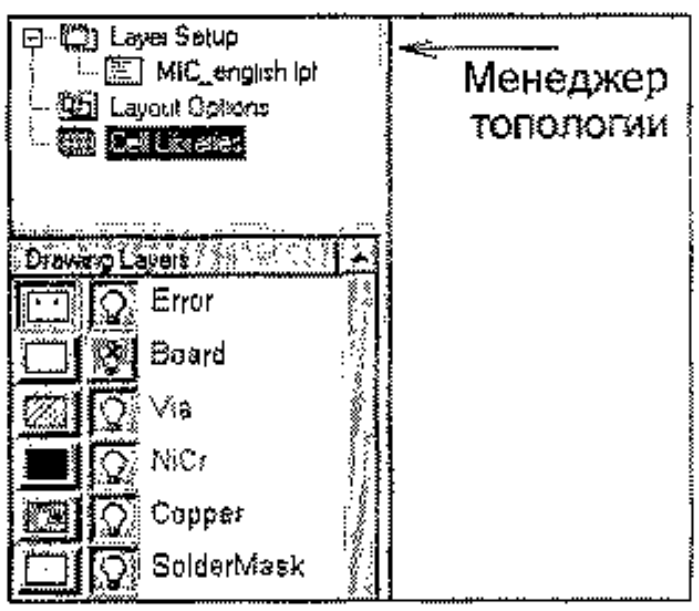


Рис. 9.21. Окна управления топологией

9.3.2. Редактирование единиц базы данных и размера сетки по умолчанию

Единицы базы данных определяют точность топологии. Очень важно, что этот параметр не нужно изменять после того, как он установлен. Изменение единиц может привести к ошибкам округления, что вызывает проблемы в топологическом файле. Размер сетки важен еще и потому, что многие проекты должны перечерчиваться сеткой. Сетка должна быть больше или равна единице базы данных. Из-за того, что размер сетки кратен единице в базе данных, рекомендуется устанавливать размер сетки ровно в 10 раз крупнее, чем единицы в базе данных. Это заранее установленная минимальная сетка.

Чтобы отредактировать единицу базы данных и размер сетки:
1. Выберите **Options > Layout Options** (рис. 9.22).

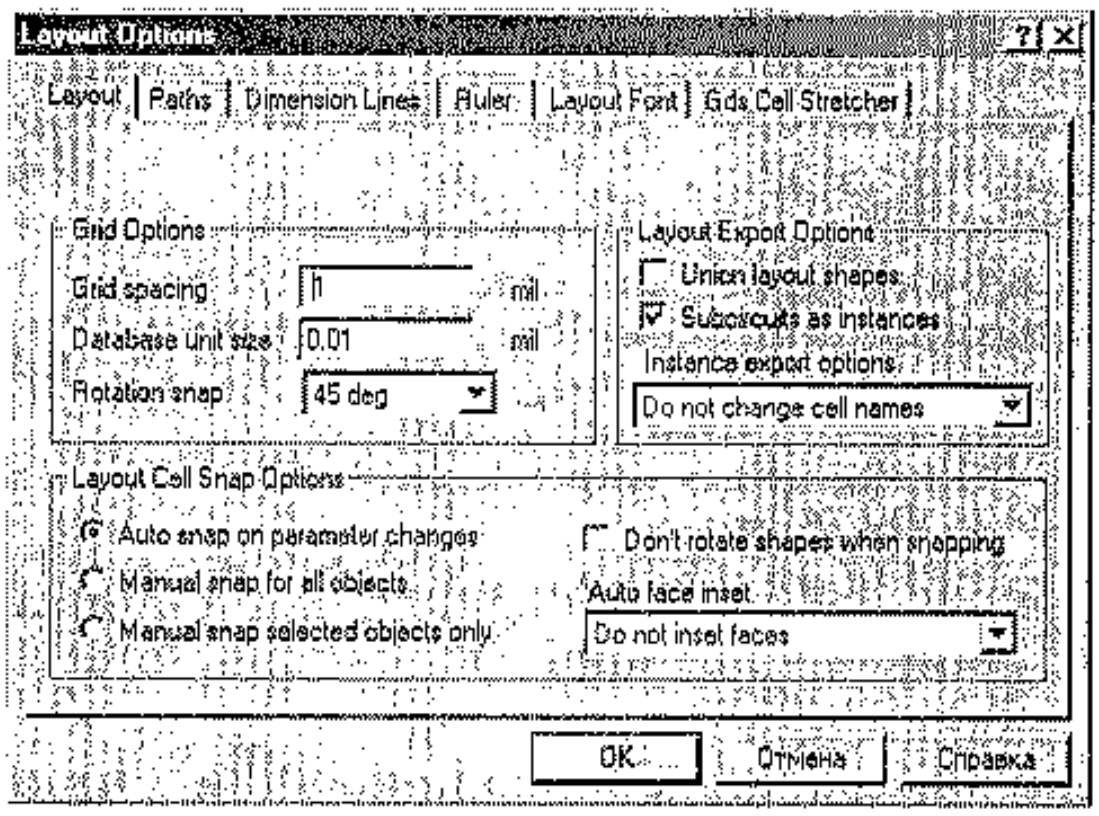


Рис. 9.22. Диалог установки опций топологии

2. Напечатайте **«1»** в **Grid Spacing** и **«0.1»** в **Database size**, затем нажмите **OK.**

9.3.3. Импорт библиотеки ячеек GDSII

Библиотеки ячеек, используемые в MWO, обеспечивают и физическое размещение, и черчение площадок под гибридные микросхемы или навесные элементы, аналогично тому, как используются стандартные ячейки трафаретов в проектах MMIC и RFIC. MWO поддерживает формат файла GDSII как стандарт для инструментов черчения.

Чтобы импортировать библиотеку ячеек GDSII:

1. Кликните правой кнопкой мыши на **Cell Library** в менеджере топологии и выберите Read GDSII Library.
2. Выберите директорию ...\AWR\AWR2002 (или директорию, где инсталлирован MWO).
3. Откройте поддиректорию **Examples** и затем дважды кликните на **Quick Start.**
4. Кликните файл **packages.gds,** а затем на **Open.** Импортированная библиотека ячеек показывается в менеджере топологий (рис. 9.23).

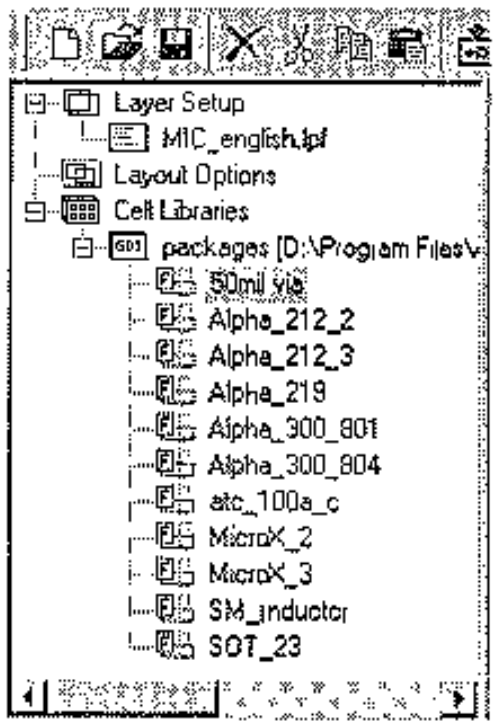


Рис. 9.23. Содержание импортированной библиотеки ячеек

9.3.4. Импорт файла данных

Чтобы импортировать файл данных:

1. Кликните закладку **Proj.**
2. Нажмите правой кнопкой мыши **Data Files** в дереве проекта и выберите **Import Data File**. Появится окно **Open**.

3. Выберите директорию ...\AWR\AWR2002.
4. Дважды кликните на поддиректорию **Examples**, а затем на поддиректорию **Quick Start**.
5. Кликните файл **N76038a.s2p** и затем **Open** (рис. 9.24).

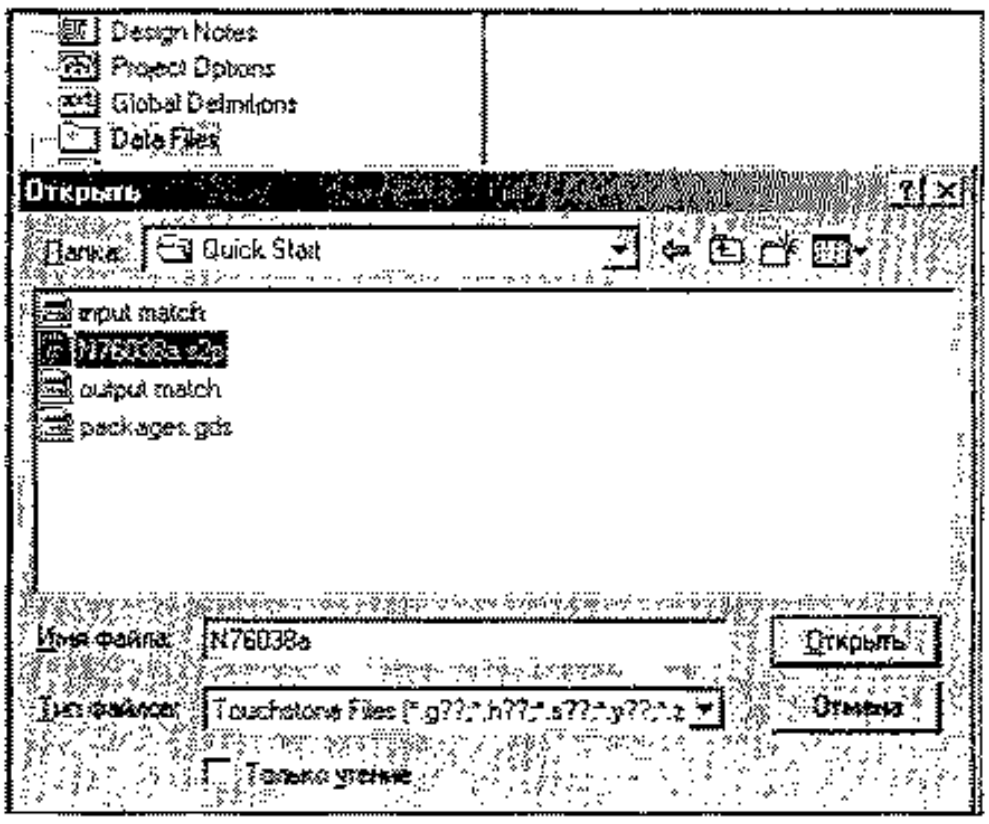


Рис. 9.24. Выбор импортируемого файла данных

Чтобы поместить файл данных на схеме:

1. Нажмите правой кнопкой мыши **Circuit Schematics** в дереве проекта и выберите **New Schematics**. Появится диалог Create New Schematic.
2. Напечатайте «**qs layout**» и затем кликните **OK**.
3. Кликните закладку **Elem** внизу окна, чтобы увидеть браузер элементов.
4. Найдите пункт **Subcircuits** и кликните на него. Внизу появятся модели подсхем.
5. Кликните на модель **N76038a** и, удерживая мышь, перетащите этот элемент на схему (рис. 9.25).

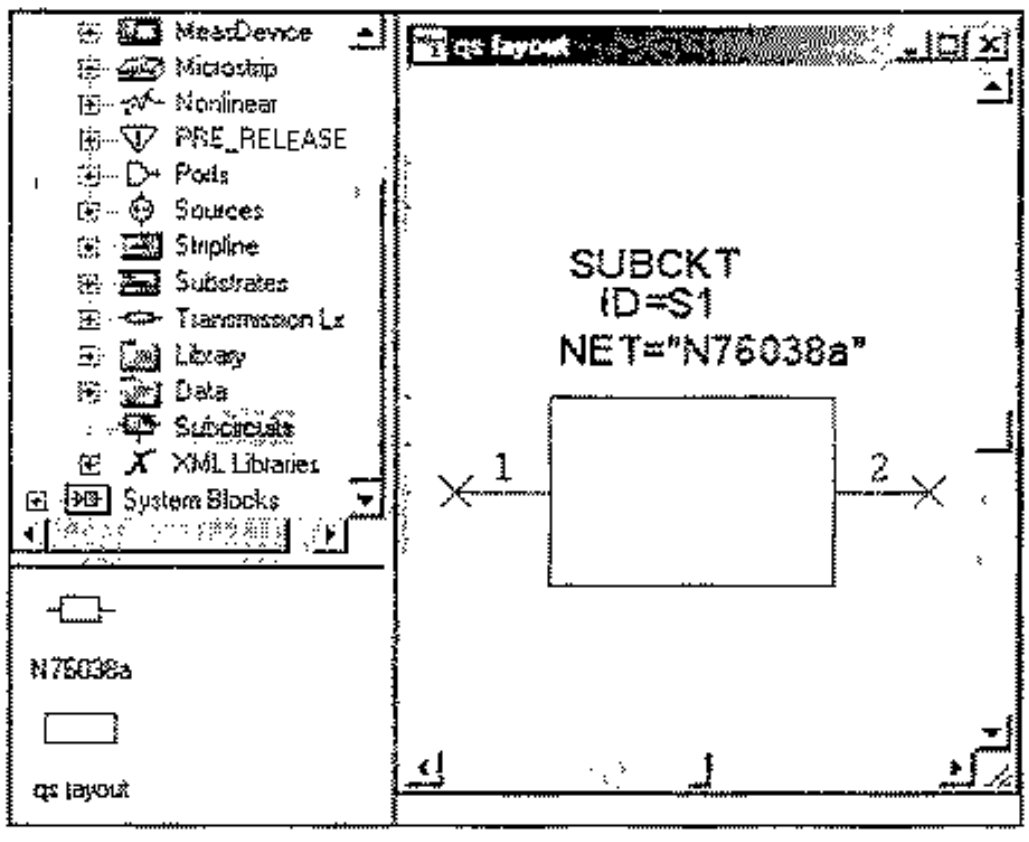


Рис. 9.25. Установка подсхемы в схемное окно

Вы можете изменить количество выводов у этого элемента, поскольку ячейка должна иметь то же самое количество выводов, как и количество узлов у схемного элемента.

Чтобы добавить земляной вывод к файлу транзистора:

1. Дважды кликните на элемент подсхемы в окне схемы. Появится диалог **Element Option**.
2. Выберите закладку **Ground** (рис. 9.26).

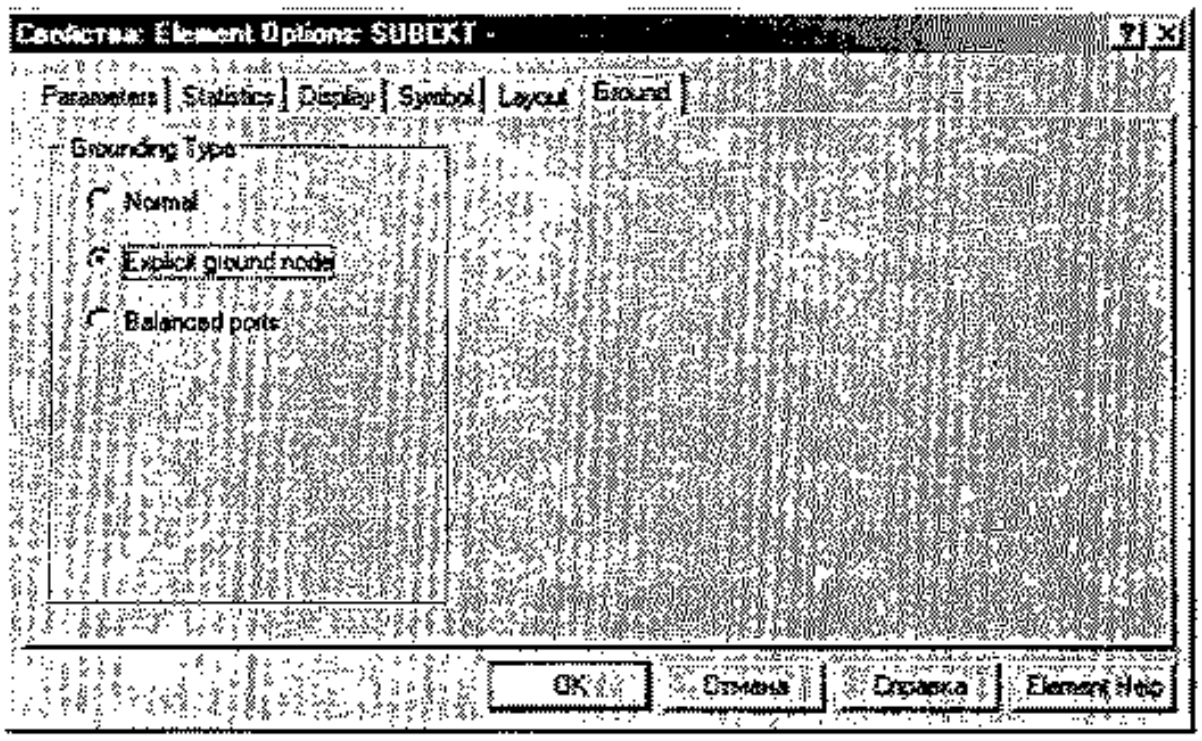


Рис. 9.26 Установка типа вывода заземления

3. Выберите **Explicit ground node** и кликните **OK**. Появляется третий вывод у подсхемы (рис. 9.27).

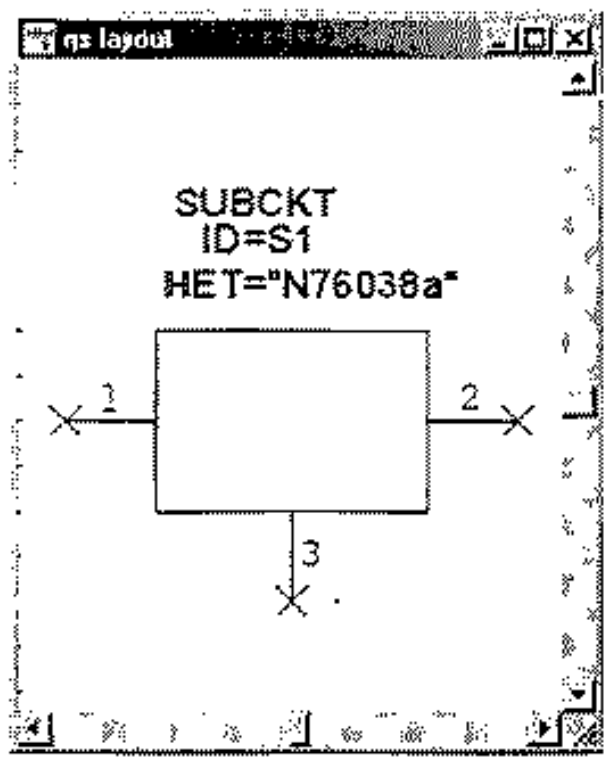


Рис. 9.27. Дополнение модели четырехполюсника третьим выводом заземления

9.3.5. Изменение символа элемента

Символ данной и любой другой подсхемы может быть изменен. Для FET удобно выбрать такой символ, чтобы видеть, какие узлы соответствуют затвору, истоку и стоку.

Для изменения символа:

1. Нажмите дважды на элемент подсхемы в схематическом окне. Появляется диалог **Element Option**.
2. Кликните закладку **Symbol**.
3. Выберите **FET@system.syf** в меню и затем кликните **OK**. Таким образом, символ подсхемы стал соответствовать рис. 9.28, что отражает его функциональное назначение.

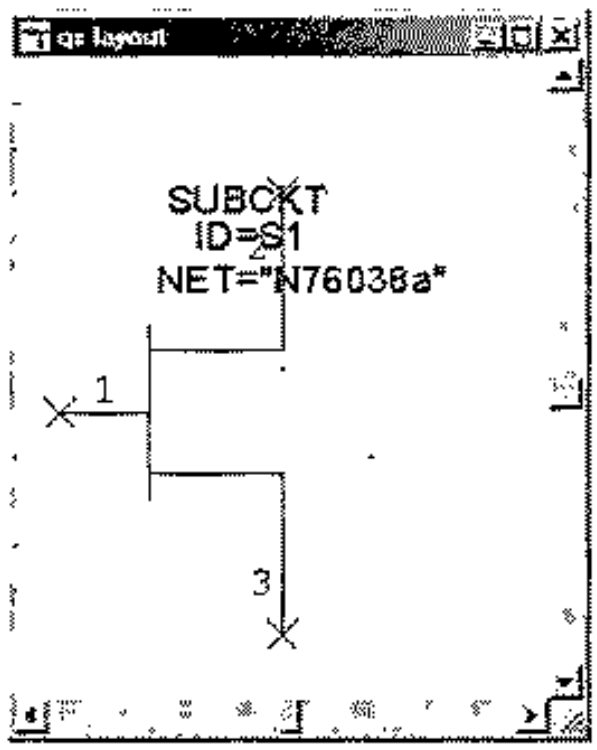


Рис. 9.28. Выбранный новый символ четырехполюсника

9.3.6. Помещение микрополосковых элементов в топологию

Микрополосковые элементы имеют топологические ячейки по умолчанию. Эти топологические ячейки параметризированы и топология их меняется динамически.

Кроме того, MWO имеет специальные элементы, называемые Icels (для адаптированных ячеек), которые не требуют никаких величин параметров от связанного с ним элемента.

Для размещения микрополоскового элемента:

1. Кликните закладку **Elem**, чтобы увидеть браузер.
2. Дважды кликните на **Microstrip** в браузере.
3. Кликните на **Lines** чтобы увидеть модели линии в нижней панели.

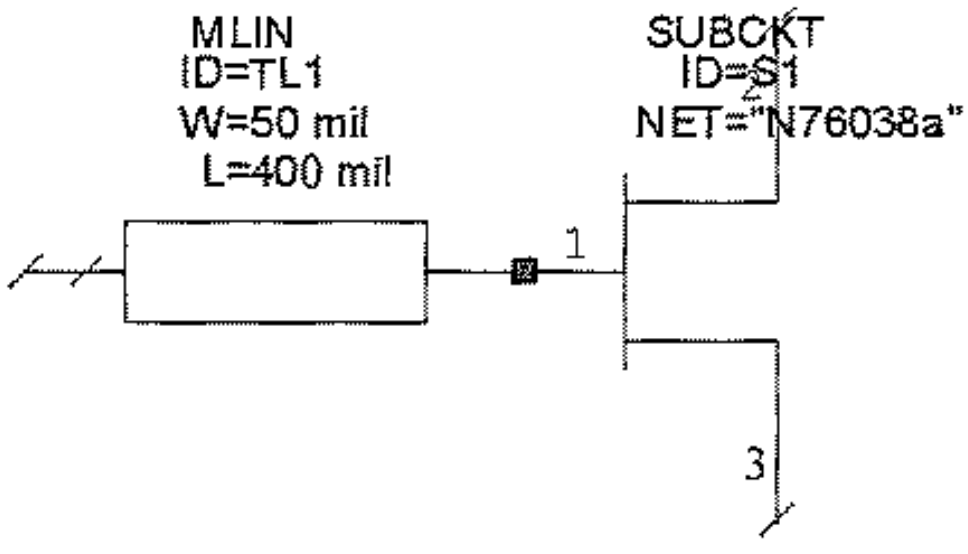


Рис. 9.29. Дополнение схемы микрополосковой линией

1. Кликните модель **MLIN** и перетащите элемент на схему, соединив его с подсхемой **N7068a** (рис. 9.29).
2. Теперь кликните **Junction** в браузере Microstrip. В нижней панели появятся символы выводов (junction). Обратим внимание, что элементы, обозначенные S в конце имени элемента описываются (имеют свои атрибуты) характеристиками порта, к которому они присоединены. Элементы, которые имеют «X» на этом конце создаются из таблицы генерации модели EM. Таким образом, имя «MTEREX&» это микрополосковое разветвление, основанное на таблице, рассчитанной по EM модели, которая получает свою ширину от портов к которому она соединена.
3. Кликните на модель MTEE$, перетащите этот элемент на схему и присоедините его к элементу MLIN (рис. 9.30).

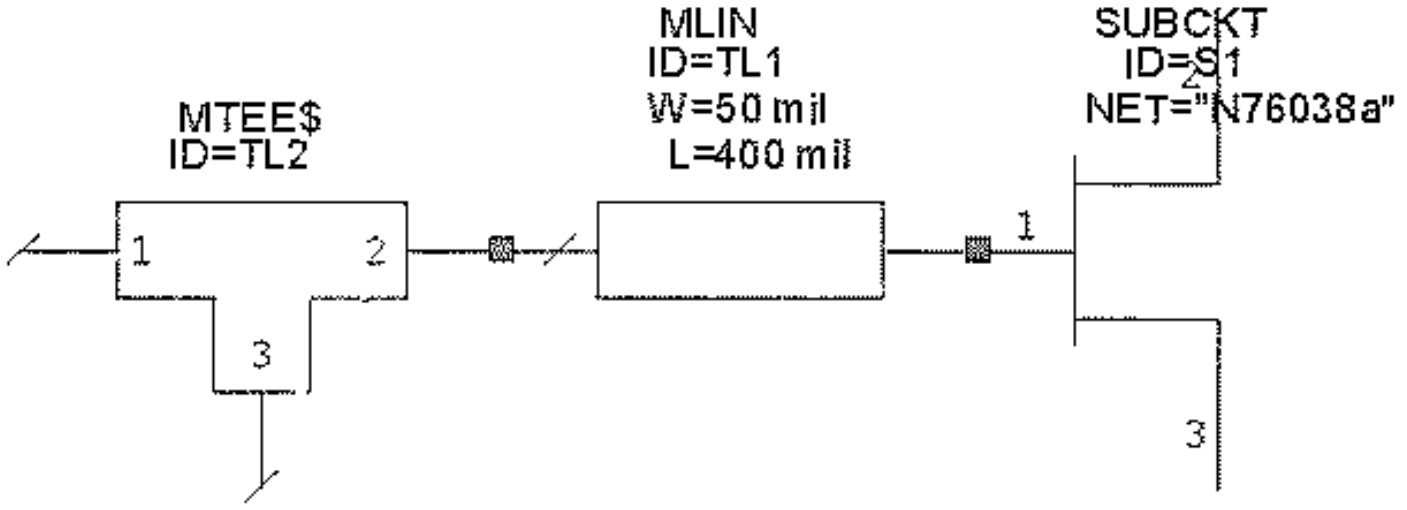


Рис. 9.30. Подключение элемента разветвления микрополосковых линий MTEE

4. Кликните **Lines** в разделе **Microstrip**. Кликните модель **MTRACE** в нижнем окне и перетащите этот элемент в схему, поместив его слева от MTEE$.
5. Кликните модель **MLEF**, перетащите ее в схему, сделав поворот и присоедините к узлу 3 элемента MTEE$.
6. Дважды кликните на элемент **MTRACE** на схеме чтобы открыть окно Element Options.
7. Отредактируйте параметры элемента MTRACE и согласуйте их как на рис. 9.31.

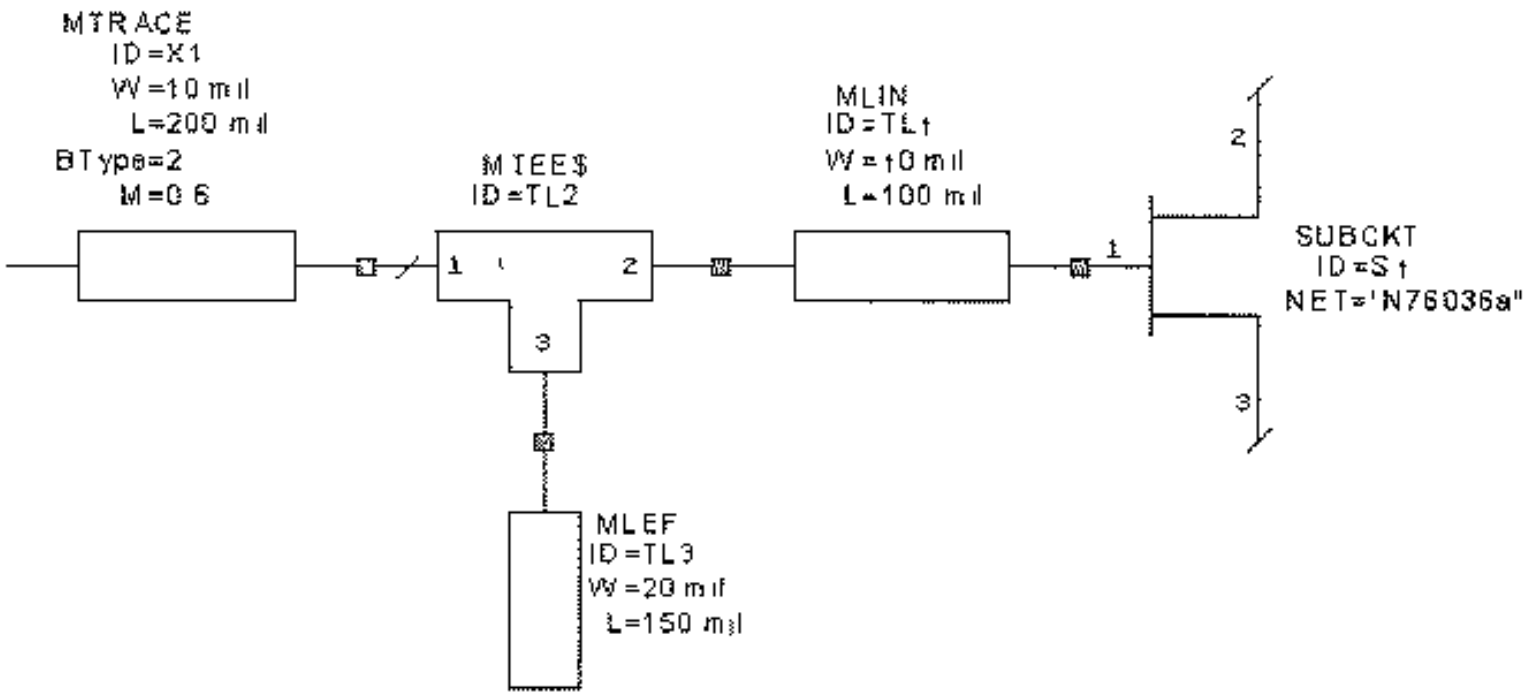


Рис. 9.31. Дополнение схемы усилителя шлейфом и линией

8. Повторите шаг 9 для элементов MLIN и MLEF для редактирования их параметров.
9. Кликните **Substrates** в браузере элементов. Модели подложек появятся в нижней панели.
10. Кликните на модель **MSUB** и перетащите ее на схему.
11. Дважды кликните на элемент **MSUB** и установите параметры подложки, как на рис. 9.32. Нажмите **OK**.

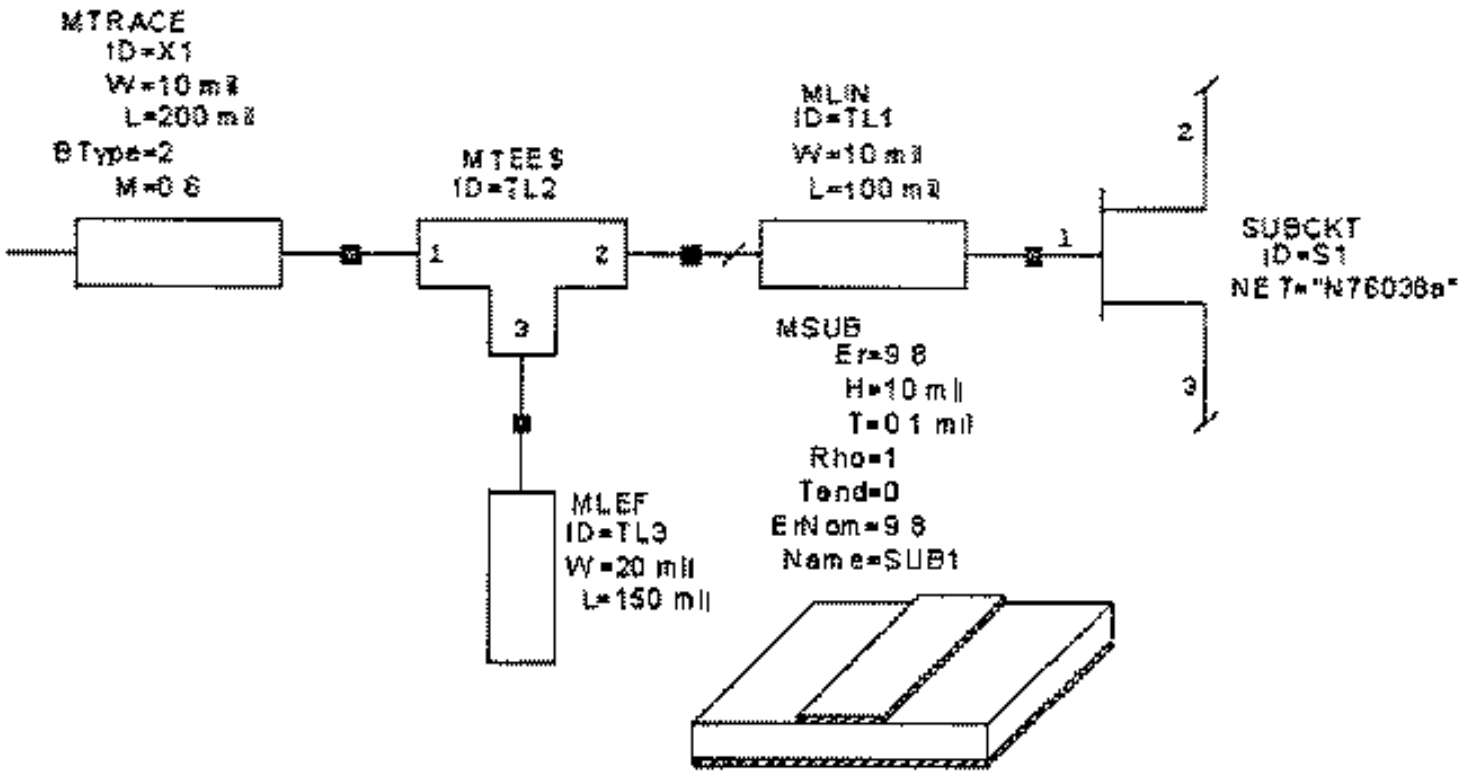


Рис. 9.32. Включение данных о подложке в схему транзисторного СВЧ усилителя

12. Кликните кнопку **Port** и перенесите его на схему, поместив слева элемента MTRACE. Аналогично, установите второй порт к стоку транзистора (рис. 9.33). А к истоку транзистора присоедините землю.

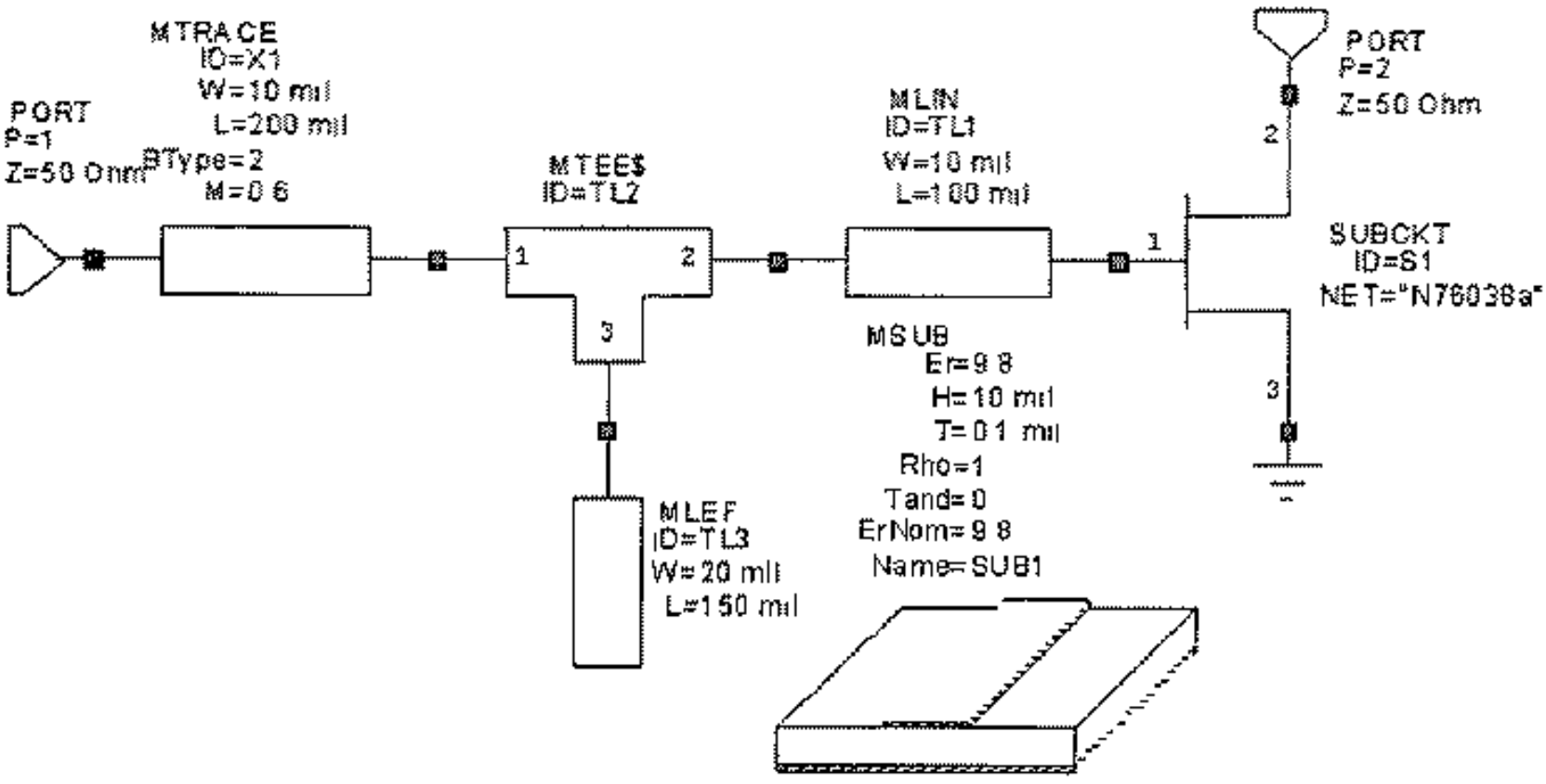


Рис. 9.33. Подключение входного и выходного портов

9.3.7. Установка соответствия топологии ячейки и элемента схемы

Топологическая ячейка, которая представляет топологию, может быть связана со схемным элементом. Для этого:

1. Дважды нажмите элемент подсхемы **N7б038a** в схематическом окне, для вывода диалога Element Option.
2. Откройте закладку **Layout** (рис. 9.34).
3. Выберите **Alpha_212_3** в **Compatible cells** и затем кликните **OK.**

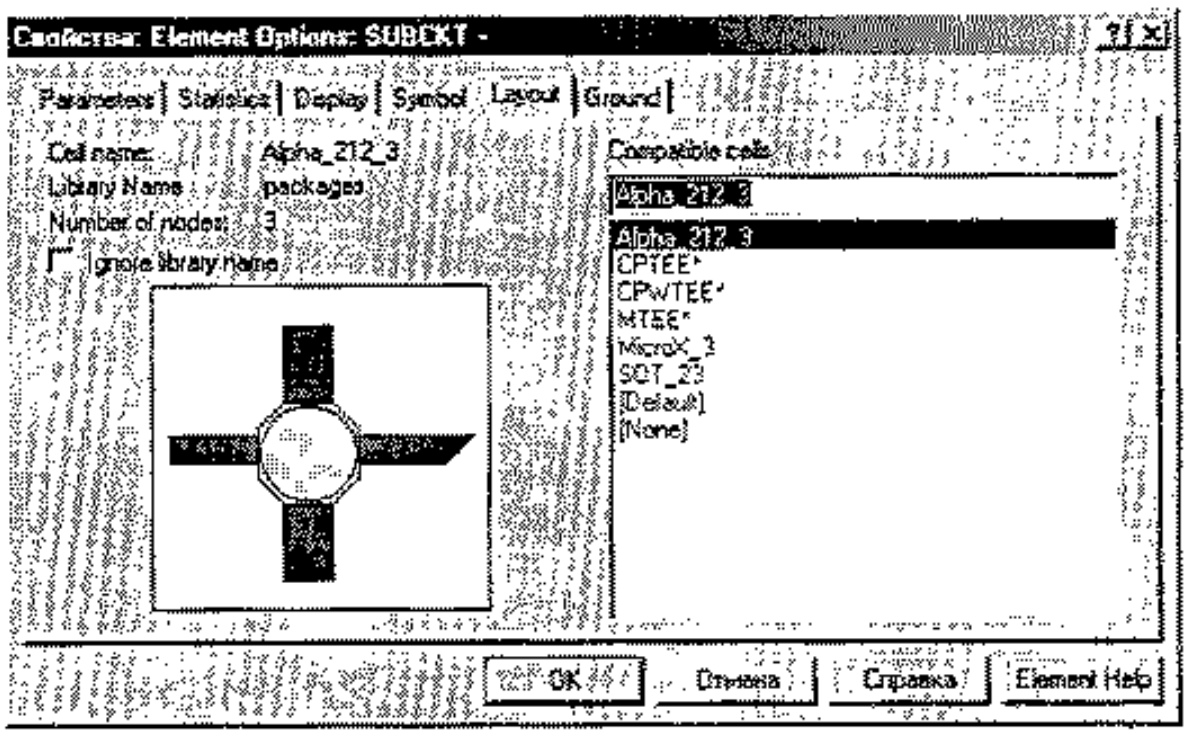


Рис. 9.34. Выбор символа ячейки

9.3.8. Просмотр топологии

Схема и топология — это разное представление одной и той же базы данных. Любые редактирования параметров на схеме немедленно отражаются на топологии и наоборот. Чтобы увидеть топологию:

1. Кликните на схематическое окно и сделайте его активным.
2. Выберите **Schematic > View Layout**. Топология появится в топологическом окне.
3. Выберите **Edit > Snap Together,** чтобы соединить все фаски элементов топологических ячеек вместе (рис. 9.35). Для вывода топологии можно также нажать кнопку **View Layout** на инструментальной панели.

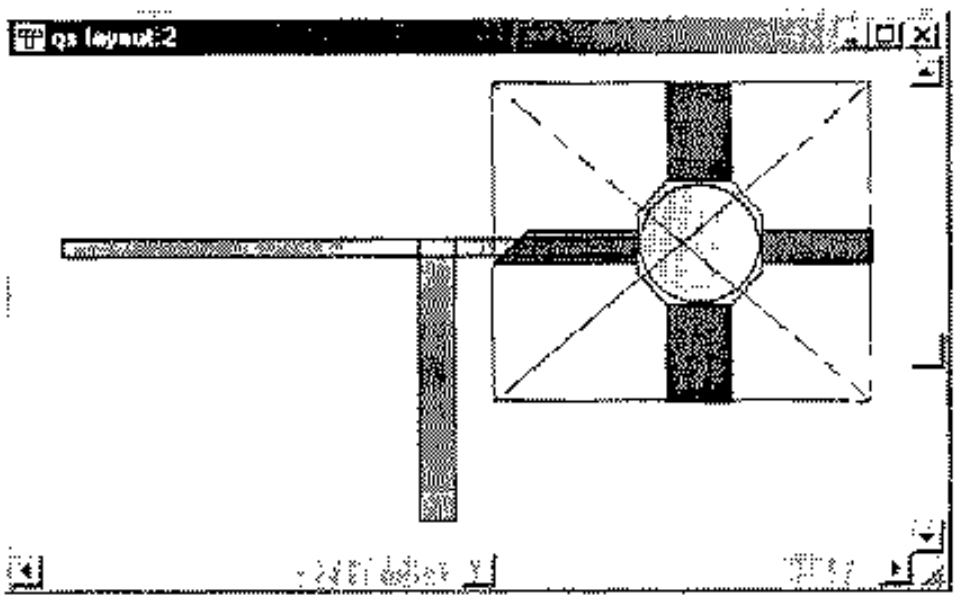


Рис. 9.35 Создание и слияние топологии

9.3.9. Фиксация топологической ячейки

Топологические ячейки имеют различные свойства, которые определяют связи каждой ячейки в общей топологии. Одно из важнейших свойств — это фиксация положения. Оно сохраняет положение ячейки так, что она не будет изменена никакими операциями сдвига. Это свойство обычно используется для задания опорных точек топологии.

Чтобы зафиксировать топологическую ячейку:

1. Выберите ячейку **Alpha_212_3**. Нажмите правой кнопкой мыши и выберите **Shape Properties** для вывода диалога свойств ячейки (рис. 9.36).

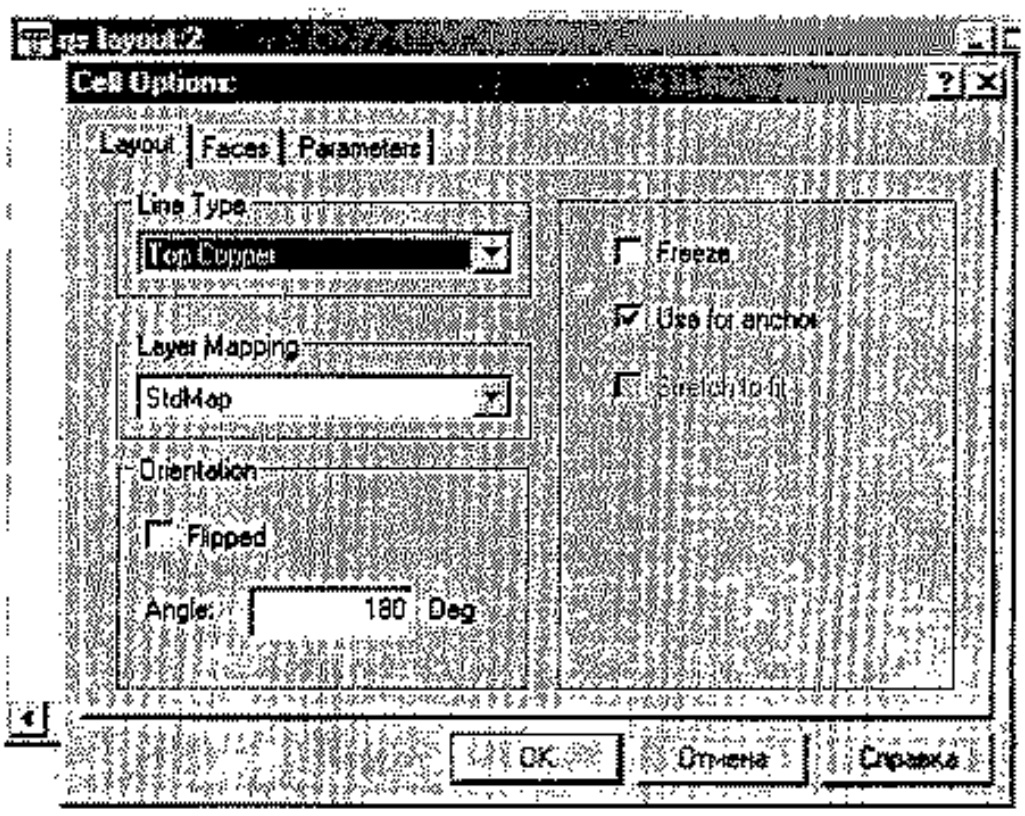


Рис. 9 36. Диалог свойств ячейки

2. Кликните закладку **Layout** выберите **Use for anchor** и затем кликните **OK**. Топологическая ячейка получит теперь следующий символ якоря, как показано на рис. 9.37.

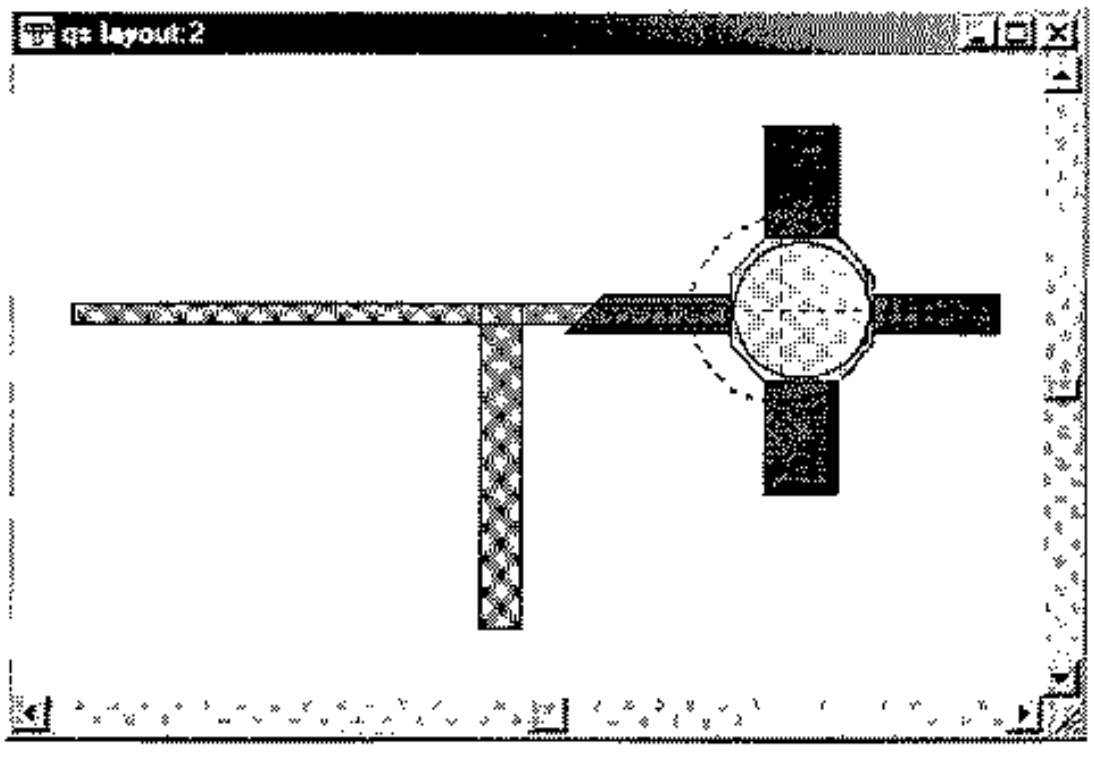


Рис. 9.37. Окончательная фиксация положения транзистора

9.3.10. Создание топологической ячейки

Чтобы создать топологическую ячейку:

1. Кликните кнопку **Set Grid Snap Multiple** на инструментальной панели и установите его на 10x (рис. 9.38).



Рис. 9.38. Команда установки частоты сетки

2. Откройте закладку **Layout** для активизации менеджера топологии.
3. Правой кнопкой нажмите на **Packages** и выберите **New Layout Cell** (рис. 9.39). Появится диалог Create New Layout Cell.

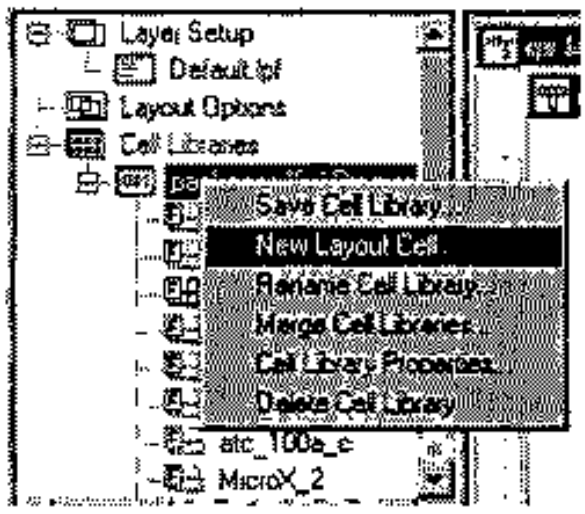


Рис. 9.39. Команда создания новой топологической ячейки

4. Назовите ячейку «**chip cap**» и кликните **OK**.
5. Кликните прямоугольную кнопку «Copper» в левом столбике, чтобы активизировать слой меди, как показано на нижнем рисунке (не нажимайте лампочку (рис. 9.40), так как это задает только высвечивание слоя для показа).

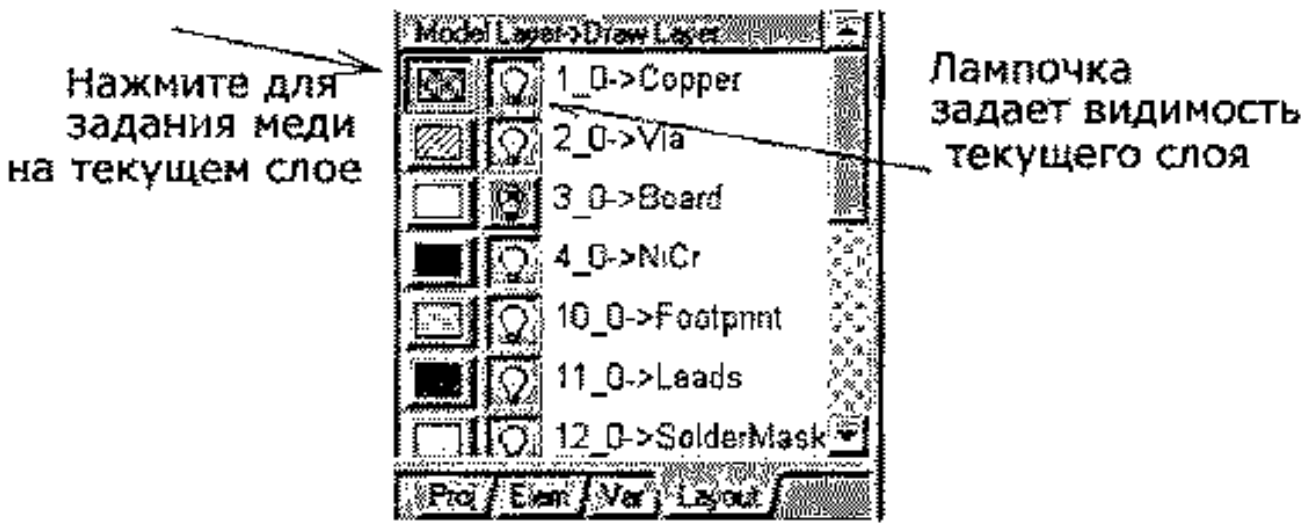


Рис. 9.40. Выбор слоя для создания и редактирования

6. Выберите **Layout > Rectangle**.
7. Сдвиньте курсор в окно рисования и затем нажмите на клавишу **Tab**. Появится диалог ввода координат.
8. Напечатайте «0» и «10» соответственно в поля x и y и кликните **OK**.
9. Нажмите снова клавишу **Tab** для ввода координат и введите «10» и «−10» в поля **dx** и **dy**, соответственно. В результате будет нарисована форма, рис. 9.41.

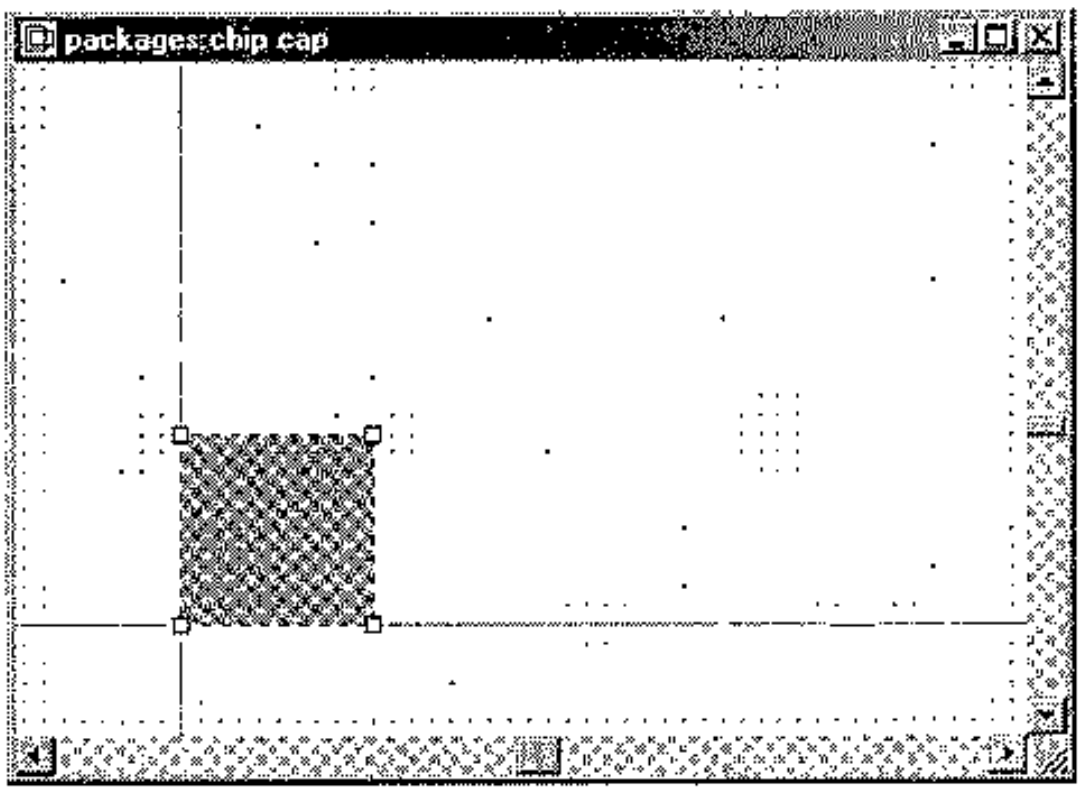


Рис. 9.41. Создание формы на слое

10. Кликните бокс Footprint (площадки) в левой колонке нижней панели менеджера топологии чтобы активизировать слой подложки как активный слой.
11. Кликните окно рисования чтобы сделать его активным.
12. Выберите **Layout > Rectangle**.
13. Сместите курсор с окна рисования, затем нажмите на клавишу **Tab**. Введите координаты «10» и «10» соответственно в поле **x** и **y** и нажмите **OK**.
14. Нажмите **Tab** снова и введите «20» и «−10» в поля **dx** и **dy** соответственно. Топология будет соответствовать рис. 9.42.

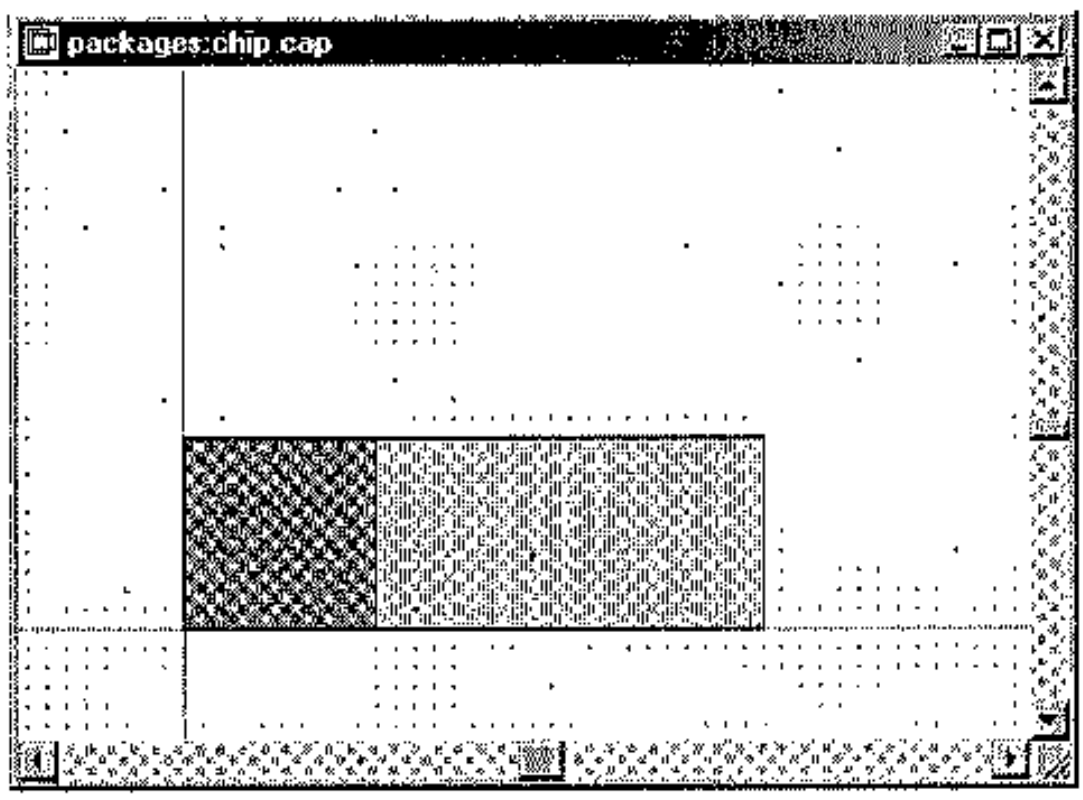


Рис. 9.42. Добавление формы на другом слое

15. Кликните снова на квадратик **copper** в окне рисования и нажмите **Ctrl+C**, а затем **Ctrl+V** чтобы внести его в буфер. Сдвиньте положение курсора и скопируйте квадратик меди справа прямоугольника, а затем кликните на него, чтобы разместить точно в нужное место (рис. 9.43).

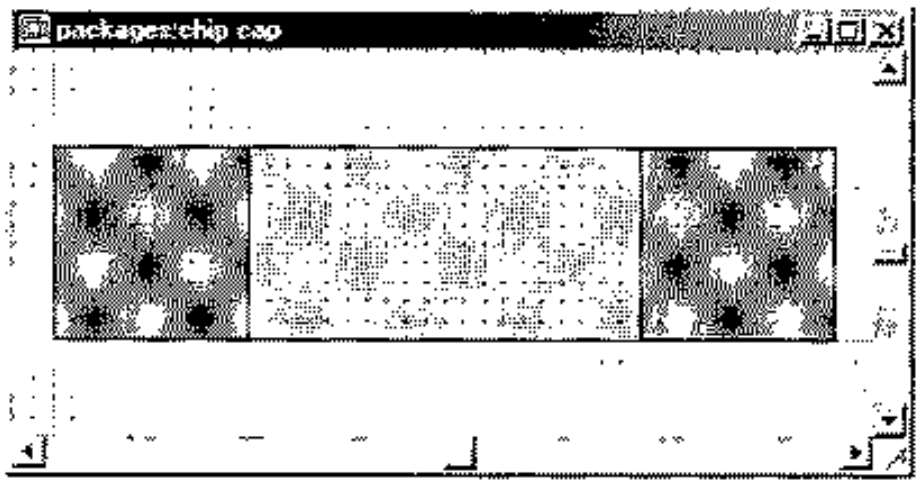


Рис. 9.43. Создание форм ячейки на двух слоях

Добавление портов в топологической ячейке

Порты в топологической ячейке задаются фасками (стыковочными гранями), определяемыми на топологии для соединения с другими ячейками. Стрелки ориентации портов задают направление соединения со смежной ячейкой.

Чтобы добавить порты к тополологической ячейке:

1. Выберите **Layout > Cell Port**.
2. Сдвиньте курсор в окно рисования, нажмите и удерживайте клавишу **Ctrl** пока сдвигаете курсор сверху нижнего левой вершины квадрата символа до появления символа квадратика (рис. 9.44). Не отпускайте клавишу **Ctrl**.
3. Пока клавиша **Ctrl** нажата, кликните и удерживайте кнопку мыши, пока вы сдвигаете курсор к верхней вершине до появления другого квадратика (рис. 9.45). Отпустите клавишу мыши, а затем клавишу **Ctrl**.
4. Повторите шаги с 1 до 3, помещая порт на противоположной стороне (рис. 9.46), но начинайте рисовать на верхней вершине и ведите курсор вниз.
5. Кликните на **X** сверху справа окна **chip cap**.

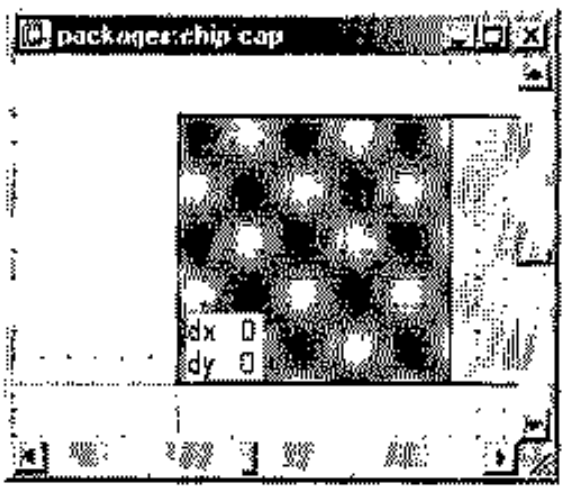


Рис. 9.44. Установление координаты стыковочной грани

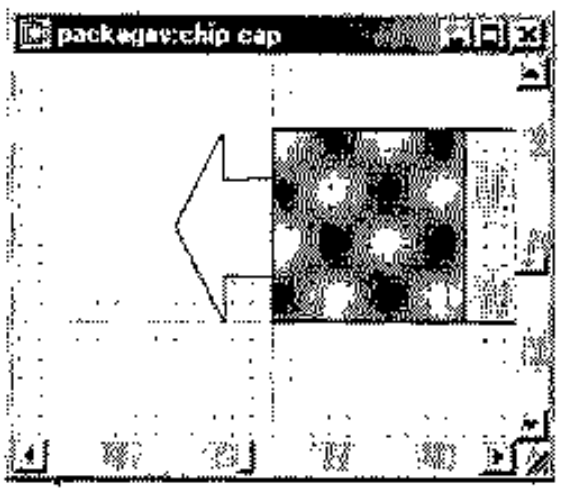


Рис. 9.45. Создание порта на стыковочной грани

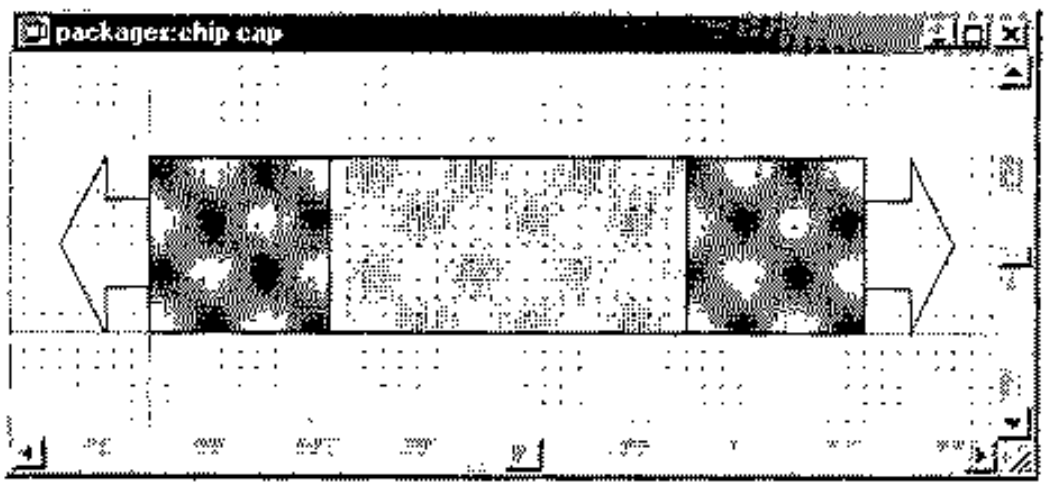


Рис. 9.46. Создание второго порта топологической ячейки

Редактирование схемы и связь топологии и схемы навесного конденсатора

Чтобы отредактировать схему и связанную с ней топологию навесного конденсатора:

1. Кликните на PORT 1 в окне схемы.
2. Нажмите и удерживайте клавишу **Ctrl**, и удерживайте кнопку мыши, пока вы перетаскнваете порт от элемента MTRACE как показано на рис. 9.47.

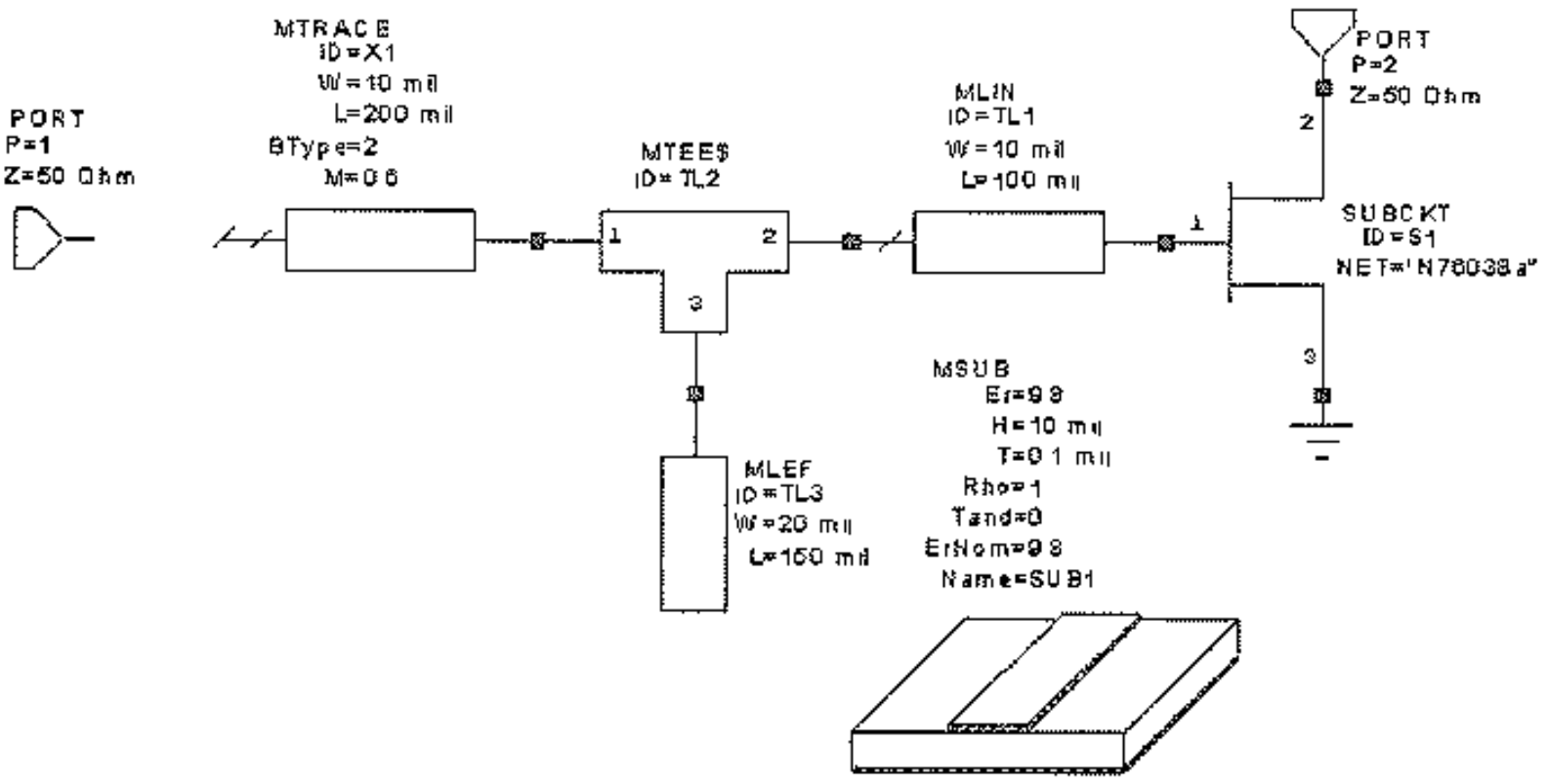


Рис. 9.47. Удаление конденсатора из схемы усилителя

3. Кликните закладку **Elem**, дважды кликните на **Lumped Element**, затем кликните на Capacitor, чтобы увидеть модели емкости в нижней панели.
4. Кликните модель CAP и удерживая кнопку мыши, перетащите элемент на схему, отпустите кнопку мыши, поместив элемент между PORT 1 и элементом MTRACE.
5. Дважды нажмите на элемент CAP C1 в окне схемы. Появляется диалог Element Options (рис. 9.48).

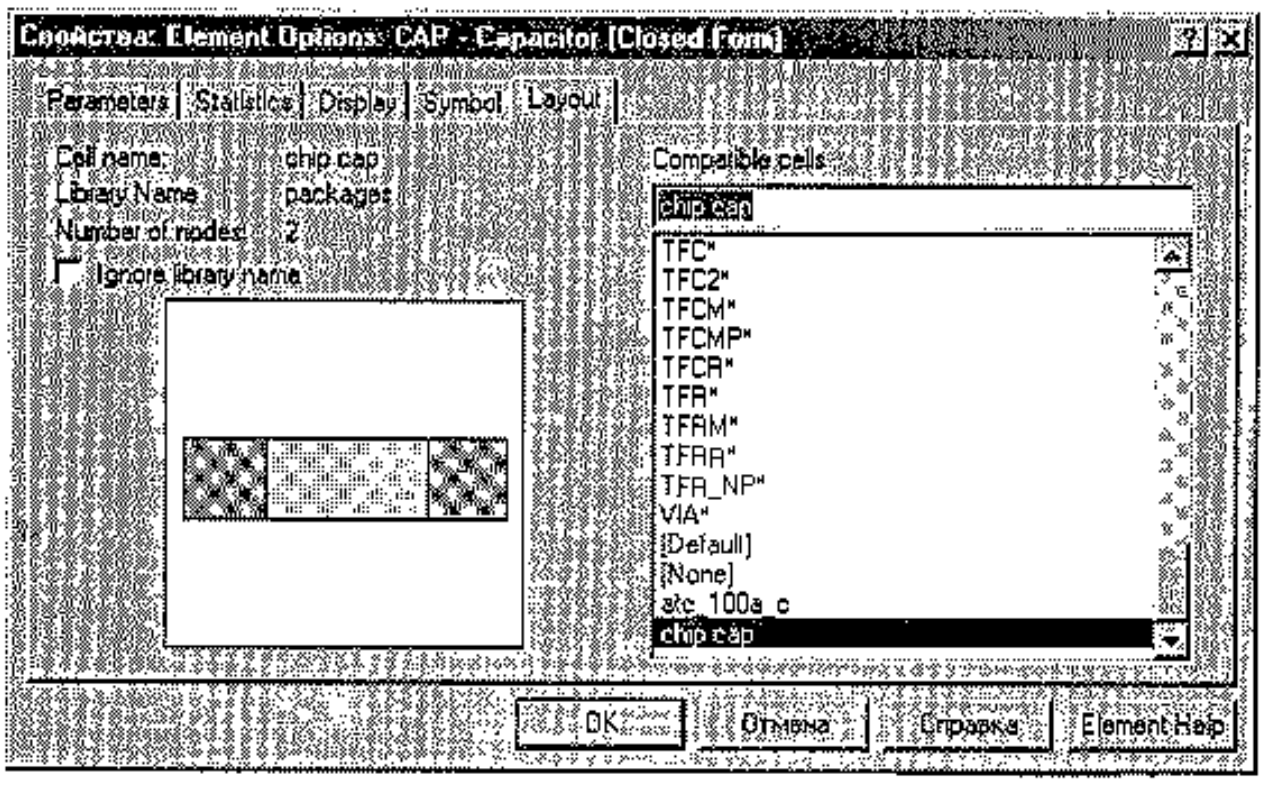


Рис. 9.48. Установка нового символа элементу C1

6. Кликните закладку **Layout**.
7. Выберите **chip cap** в **Compatible cells** и кликните **OK**.
8. Выберите **Schematic > View Layout**. Новая обновленная топология включила ячейку навесного конденсатора (рис. 9.49).

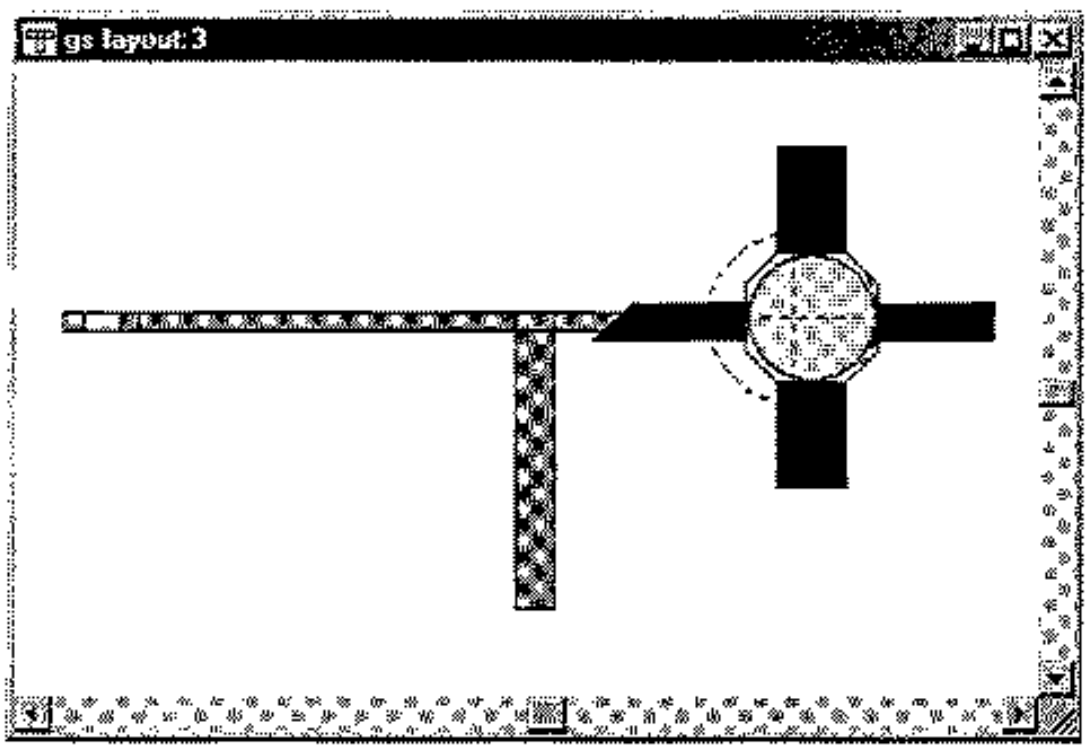


Рис. 9.49. Новая топология усилителя, включающая конденсатор

9.3.11. Использование элемента MTRACE в трассировке топологии

MTRACE — это специальный элемент, который позволяет изменять топологию при прочерчивании пути в виде микрополосковой линии.

Для использования элемента MTRACE:

1. Дважды кликните на элементе MTRACE в Layout View для активизации синих ромбиков, как показано на следующем рисунке.
2. Сдвигайте курсор мыши правого ромбика, пока не появится символ двойной стрелки. Дважды нажмите для активизации инструмента трассировки (рис. 9.50).

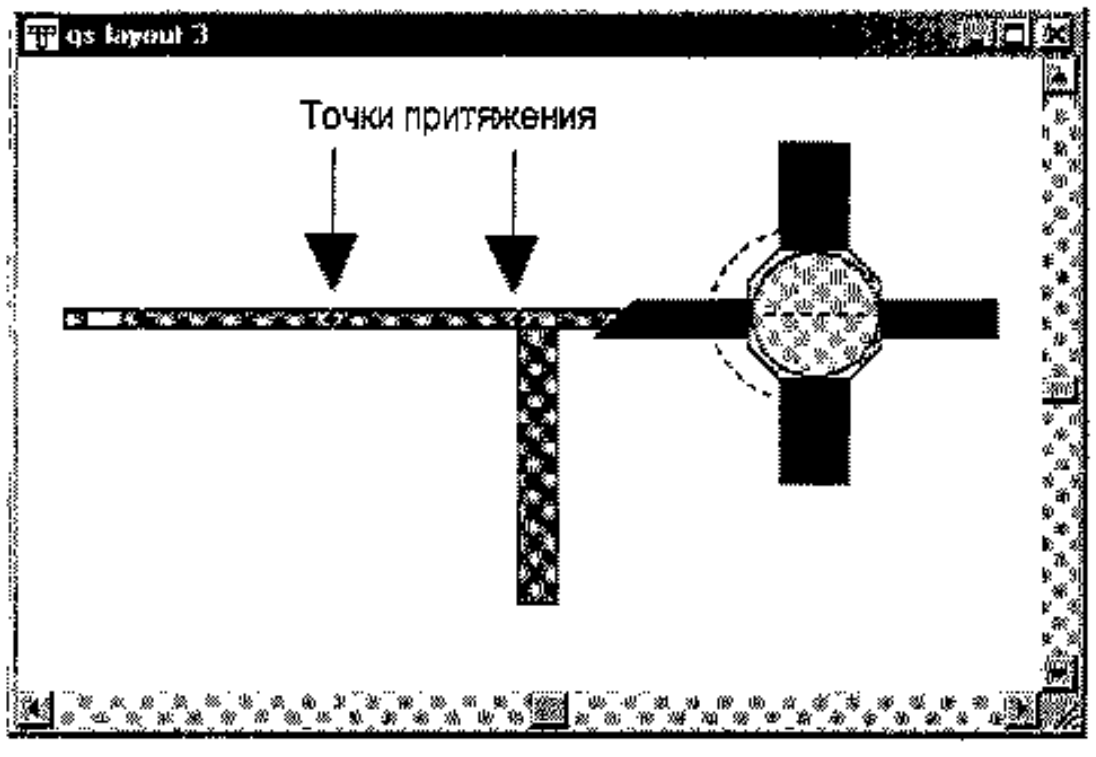


Рис. 9.50. Активизация микрополосковой линии

3. Сдвиньте инструмент трассировки к желаемой точке и кликните в этой точке (нажатие правой кнопки мыши удалит последнюю точку, а нажатие Esc снимет активность команды).
4. Продолжайте устанавливать точки трассы, нажимая каждый раз в новой точке и дважды щелкните при окончании трассировки (рис. 9.51).

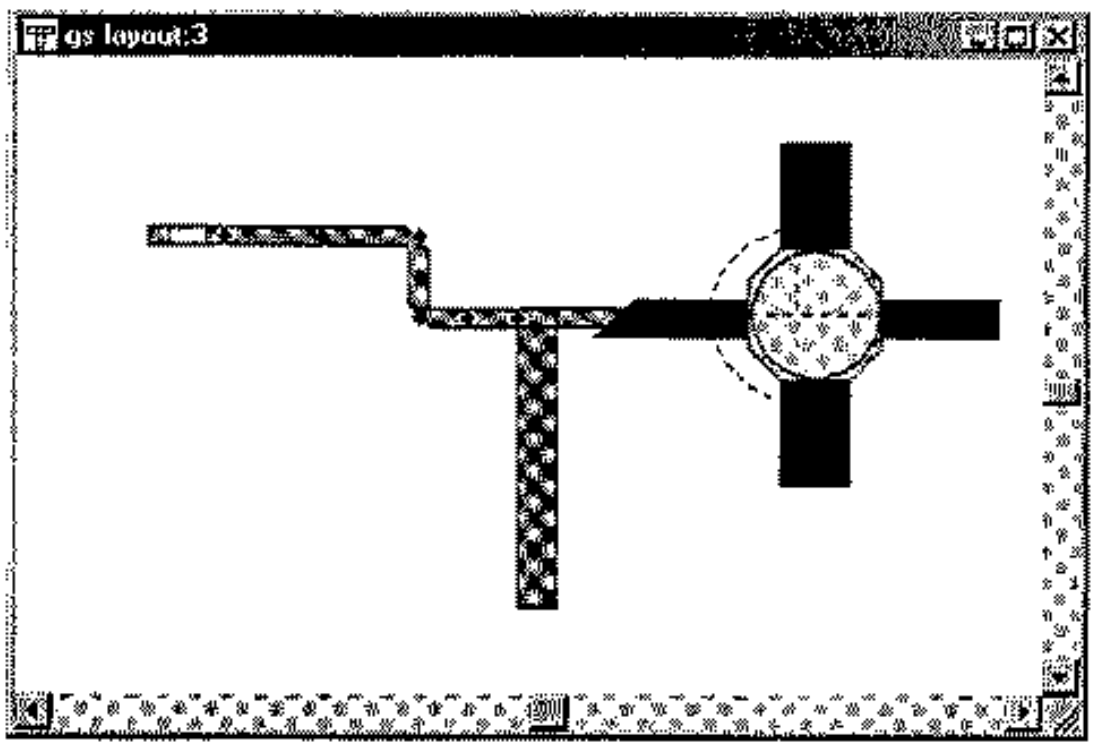


Рис. 9.51. Изменение топологии входной микрополосковой линии

Отметим, что элемент MLIN — это прямой отрезок линии, и вы можете изменять его ширину и длину. Вы можете редактировать элементы MTRACE в топологии для создания скачков ширины, срезанных поворотов и скошенных углов. Вы можете редактировать элемент MCTRACE для создания скачков ширины и срезов с округленными углами.

9.3.12. Функции слияния топологических ячеек

Функции слияния связывают стыковочные грани топологических ячеек в различных конфигурациях. MWO 2002 имеет новые опции слияния, которые можно установить из диалога Layout Option. Для спецификации опций слияния топологий:

1. Выберите **Option > Layout Options**. Появляется окно Layout Options (рис. 9.52).
2. Выберите **Manual snap selected objects only** в разделе **Layout Cell Snap Options**. Кликните **OK**. Это будет режим привязки к сетке только выбранного объекта.

Чтобы отодвинуть топологические ячейки одна от другой так, чтобы были видны изменения:

3. Кликните на топологическую ячейку MLEF и удерживая кнопку мыши, перетащите в новое положение. Кликните при размещении на новом месте.
4. Повторите шаг 3 с элементом MTRACE и ячейкой навесного конденсатора. Положение топологической ячейки как на рис. 9.53.

   Красные нити показывают, что фаски топологических ячеек не сливаются вместе.
5. Удерживая клавишу **Ctrl** выберите топологические ячейки **MLEF, MTRACE** и **MTEE$** в топологическом окне (рис. 9.54).

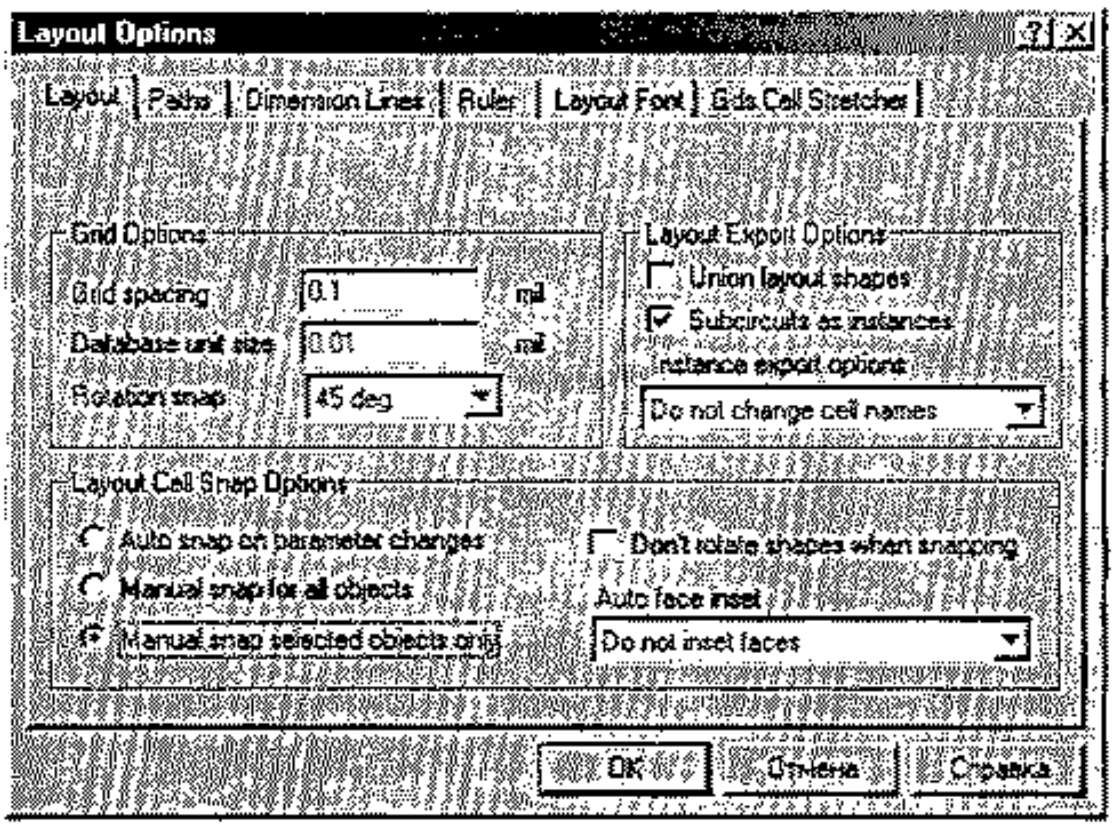


Рис. 9.52. Установка опций топологии для интерактивного объединения форм

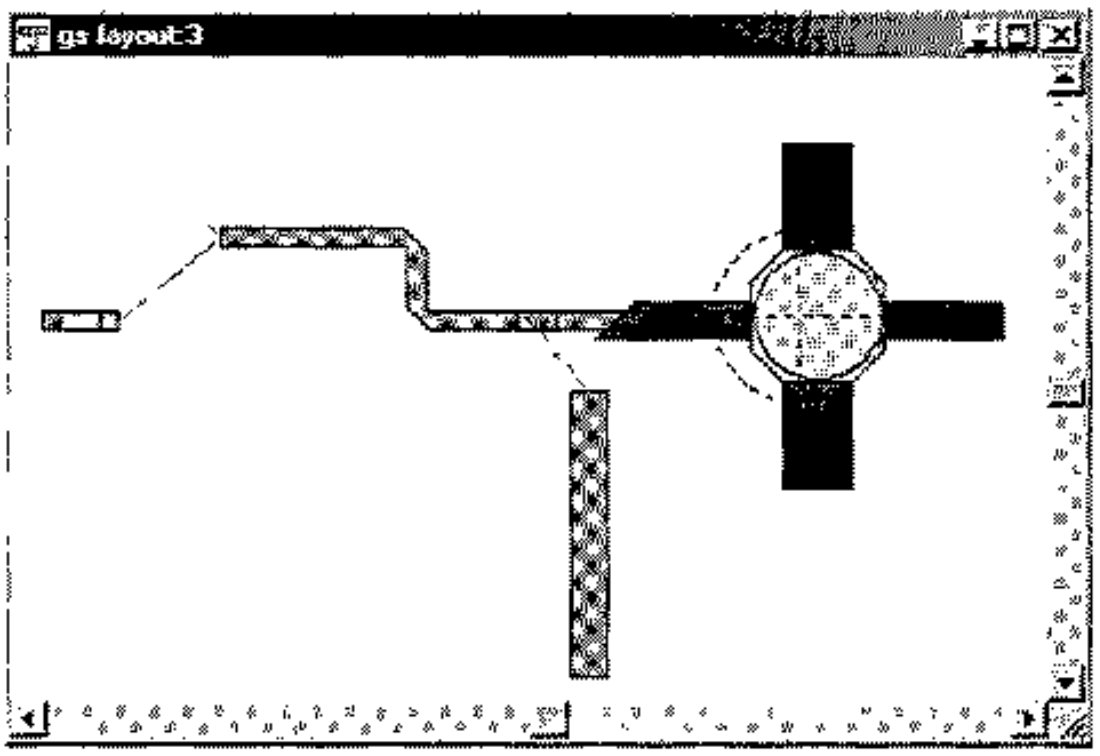


Рис. 9.53. Перенесение элементов C1 и шлейфа в другие положения

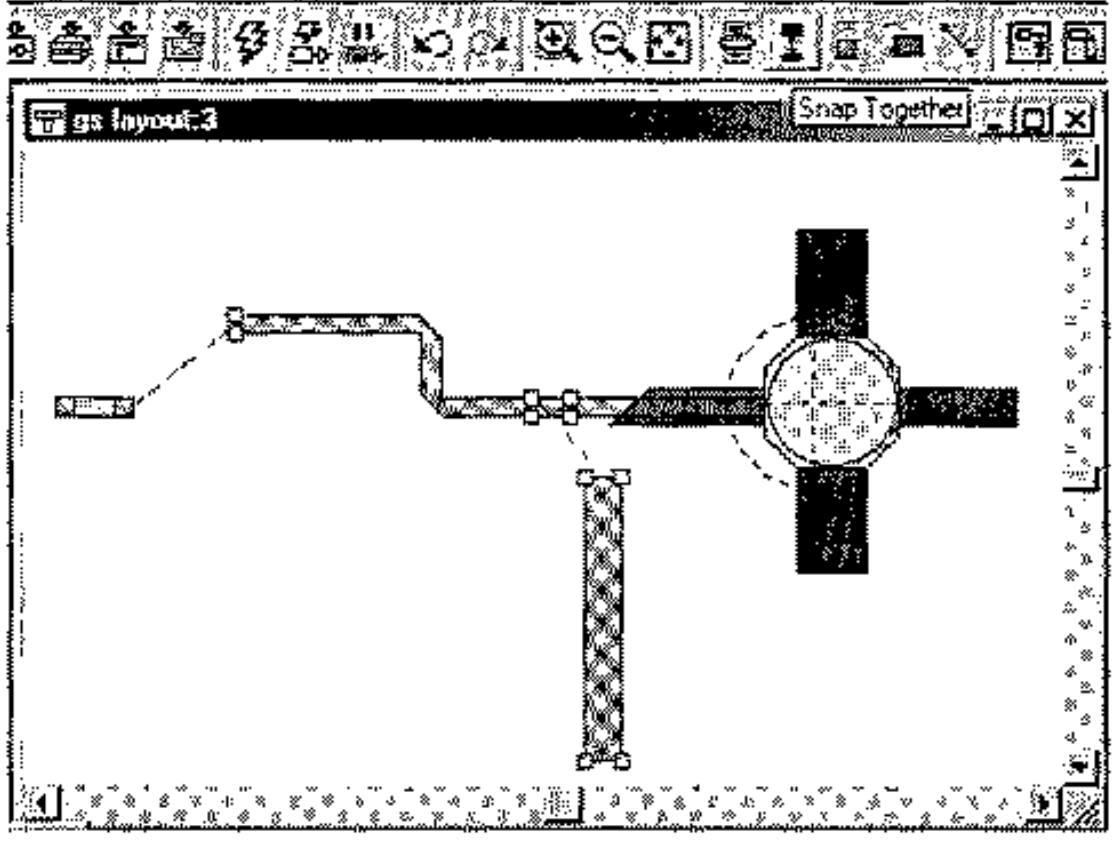


Рис. 9.54. Активизация элементов для слияния

6. Кликните кнопку **Snap Together** на инструментальной линейке. Отметим, что топология навесного конденсатора и топологическая ячейка MLIN не слиты вместе.

Чтобы слить все фаски вместе:

7. Нажмите **Ctrl+A** на клавиатуре и выберите все топологические ячейки. Кликните кнопку **Snap Together** на инструментальной линейке. Топология будет иметь вид как на рис. 9.55.

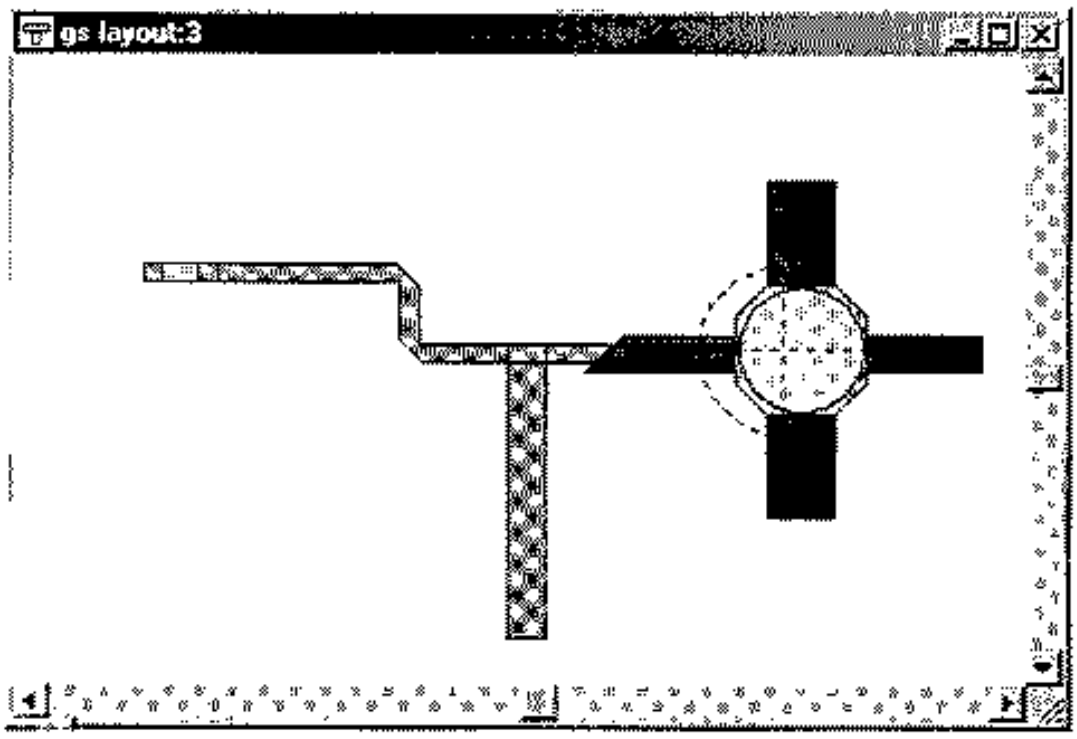


Рис. 9.55. Новая слитая топология усилителя

Функция «snap to fit» оканчивает трассировку топологических ячеек MTRACE для спецификации смежных топологических ячеек.

9.3.13. Экспорт топологии

Чтобы экспортировать топологию:

1. Выберите **Options > Drawing Layers** для задания слоев для экспорта в файл. Появляется диалог Layer Setup.
2. Кликните закладку **Export Mapping**.
3. Кликните закладку **DXF** внизу диалога, снимите выделение всех нарисованных слоев кроме слоя меди в **Write Layers** и кликните **OK**.
4. Выберите **Layer> Export Layout**. Появляется диалог **Save As**.
5. Выберите формат **DXF (*.dxf)** в разделе **Save as type**.
6. Впечатайте «**myfile**» как **File Name** и кликните **Save** для экспорта файла со слоем меди как файл DXF.

На этом завершается рассмотрение примера создания и обработки топологии. Теперь вы можете сохранить работу выбором **File > Save Project**.

9.4. Создание топологических ячеек

Ячейки трафаретов artwork cell (иногда их ассоциируют с фотошаблонами) — это топологические ячейки (Artwork Cells), которые записываются и читаются в соответствии со стандартом AutoCAD.. Анализ существующей топологии,

рис. 9.56, или же его реализации, начерченной в редакторе LAYOUT, имеют своей целью выполнить более точное моделирование, и найти такую топологию, чтобы получить минимальное поле разброса характеристик (рис. 9.58) с учетом технологического разброса производства фотошаблонов и окончательно реализованной топологии устройства.

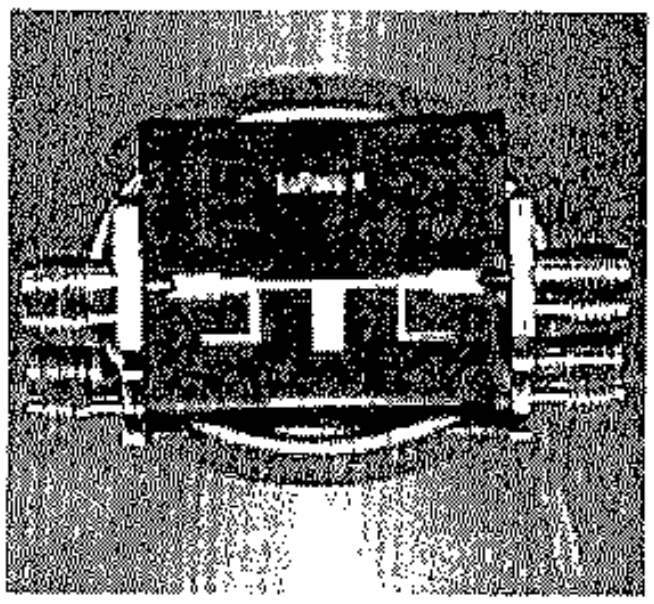


Рис. 9.56. Фотография фильтра

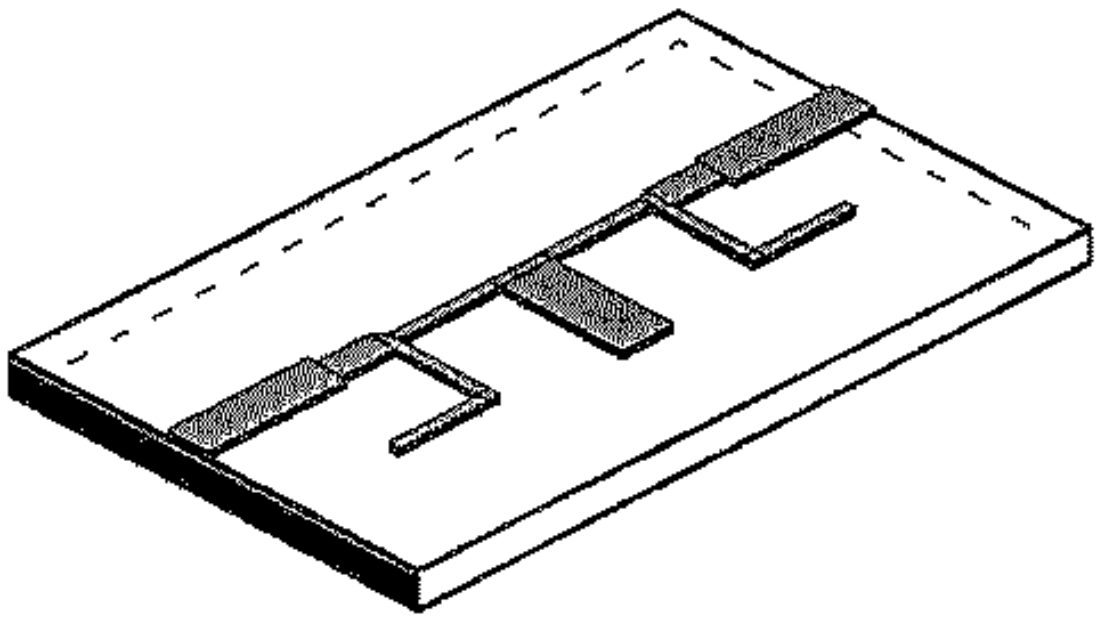


Рис. 9.57. Топология фильтра в редакторе MWO

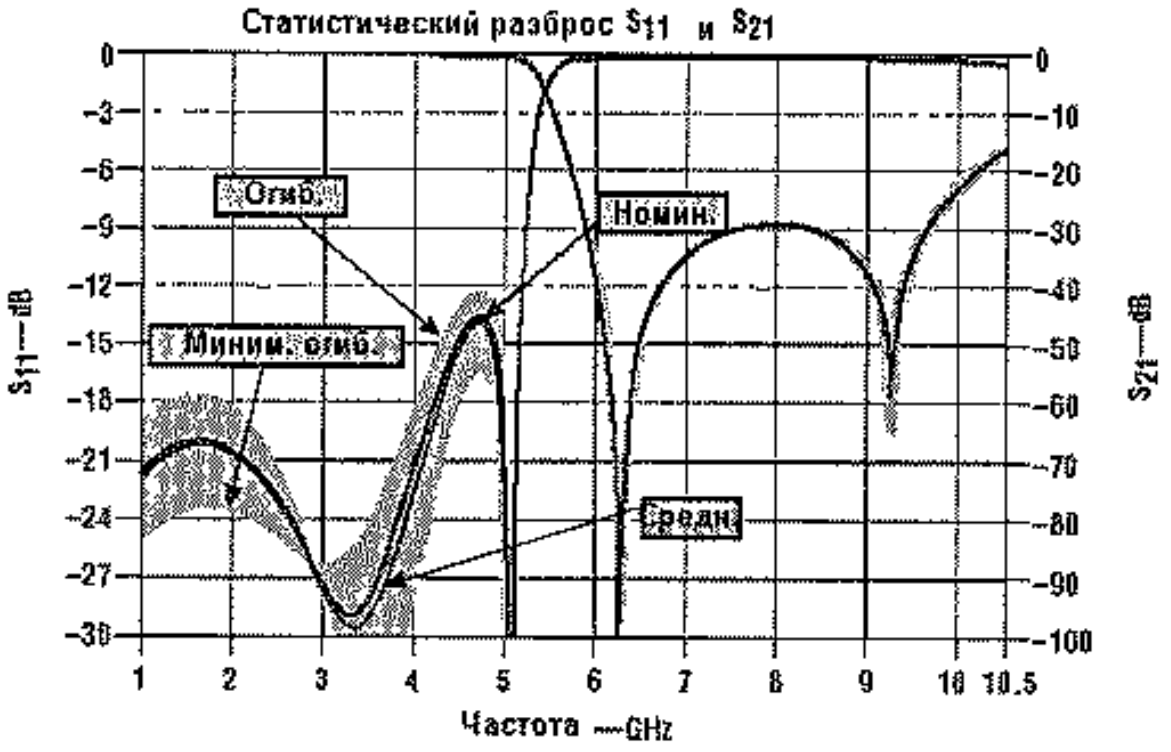


Рис. 9.58. Результаты моделирования и экспериментальных измерений фильтра рис. 9.56

MWO может читать чертежи в форматах GDSII и DXF.

В форматах GDSII и DXF топологические ячейки сохраняются так, что любые топологические ячейки (например используемый в топологии на рис. 9.59 тонкопленочный конденсатор CAP, рис. 9.60), созданные для MWO могут читаться и использоваться в любой программе обработки топологии, которая поддерживает GDSII или DXF.

Ячейка должна иметь точки соединения (топологические связи), соответствующие узлам электрической связи. Эти точки соединения называются «стыковочные грани (фаски)». Направление стыковочной грани используется, чтобы установить, к какой стороне ячеек присоединяется фаска соседнего элемента.

Ячейка может редактироваться и устанавливаться, дважды нажимая на ее символе в дереве проекта в верхней области окна **Layout Manager**. Двойное нажа-

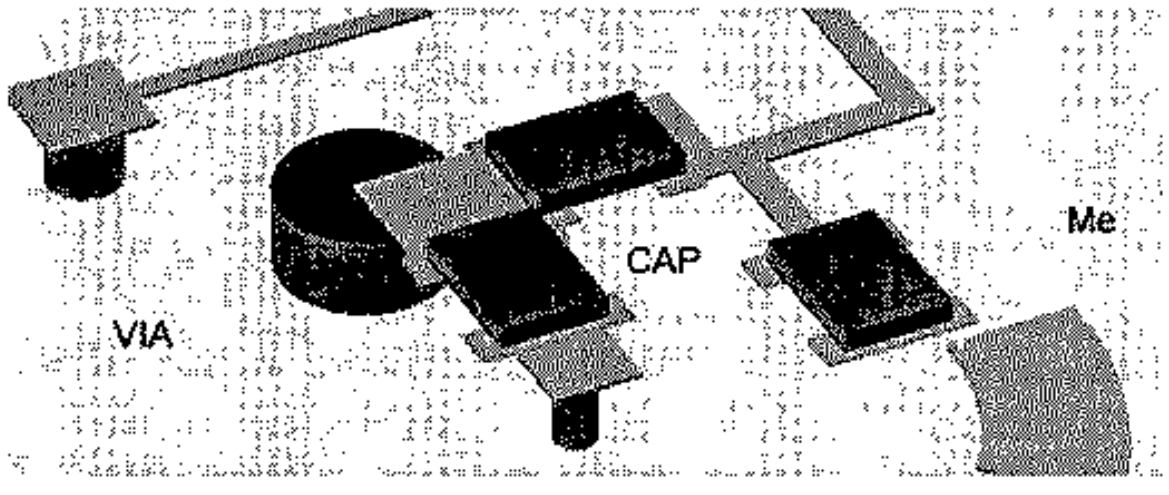


Рис. 9.59. Вид топологии с навесными элементами, экспортированными из библиотеки

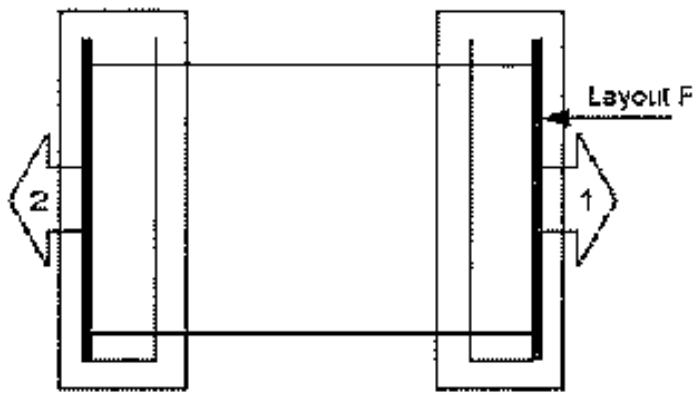


Рис. 9.60. Вид сверху ячейки тонкопленочного конденсатора

тие на значке ячейки открывает ячейку в редакторе **Artwork Cell Editor**. Стыковочные грани (фаски) могут быть добавлены к трафарету (рис. 9.61), используя инструмент **Cell Port** (командой **Layout > Cell Port**). Ячейка **Artwork cell** может быть создана так, что она будет иметь несколько фасок для каждой точки соединения. Это реализуется, давая один номер порта двум или больше граням в редакторе

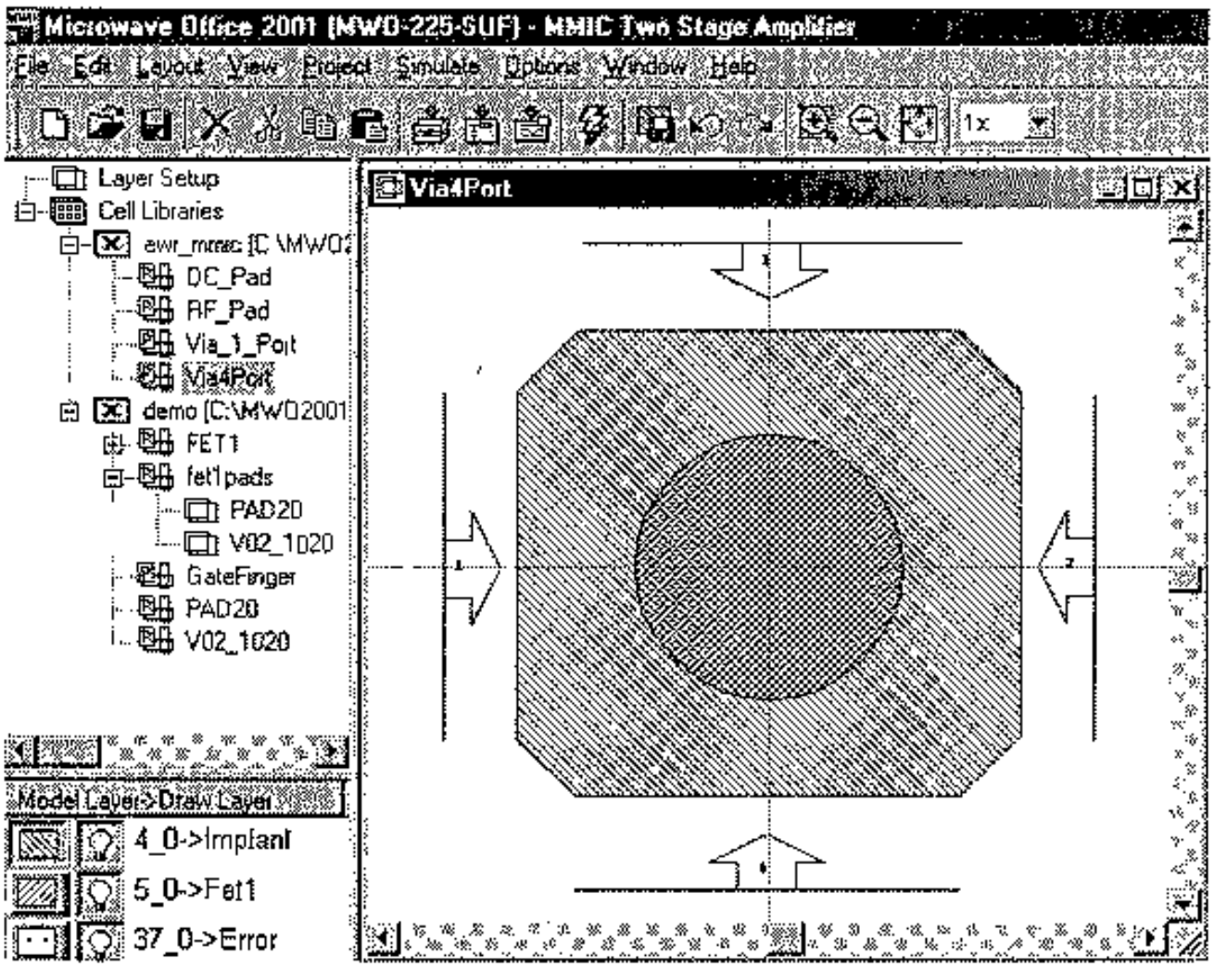


Рис. 9.61. Открытие программы редактирования отдельной ячейки. 1, 2, 3, 4 — лицевые поверхности топологической ячейки

Artwork Cell Editor. Номера портов могут быть изменены, выбирая порт ячейки в редакторе, щелкая правой кнопкой, и выбирая **Shape Properties** из меню.

Диалог показывает номер порта, который должен быть введен. Важно убедиться, что имеется, по крайней мере, один порт для каждого номера, начиная с единицы. Например, нельзя иметь порт с номером 3 и не иметь порт с номером 2.

Если какие либо редактирования сделаны в ячейке, тогда она должна быть сохранена в библиотеке прежде, чем будет вызвана из проекта. Любые редактирования, которые не сохранены в библиотеке, будут утрачены, когда проект закрыт. Изменяемая ячейка трафарета может быть сохранена, выбирая **Edit > Update Cell Edits** из меню или инструментальной панели.

Создание библиотеки ячеек трафаретов

Библиотеки трафаретов могут быть созданы в проекте, выбирая Cell Libraries верхнего уровня в верхней области окна **Layout Manager**, нажимая правую кнопку мыши и выбирая **New Cell Library** из опускающегося меню. Как только библиотека создана, новая ячейка фотошаблона может быть создана, нажимая правой кнопкой и выбирая **New Layout Cell**. Имя, которое выбрано для новой ячейки, должно отличаться от имени ячеек во всех библиотеках, открытых в проекте.

Сохранение библиотеки ячеек и трафаретов

Библиотека трафаретов может быть сохранена как GDSII файл из окна Layout Manager, нажимая правой кнопкой мыши на библиотеку в верхнем окне и выбором **Save Cell Library** из опускающегося меню. Если имеются любые ссылки на ячейку в библиотеке, как базовые элементы из других библиотек, то эти ячейки не будут переписаны в библиотеке.

Загрузка библиотеки ячеек трафаретов

Библиотеки ячеек трафаретов могут быть импортированы из GDSII файла, или DXF файла (DXF библиотеки может содержать только топологические ячейки в библиотеке) выбирая элемент **Library Cell** в верхнем окне Layout Manager, щелкая правой кнопкой и выбирая **Read GDSII Library** или **Read DXF Library** из опускающегося меню. Как только библиотека загружена, новые ячейки могут быть добавлены к библиотеке, нажимая правую кнопку на библиотеке и выбирая **New Layout Cell** из опускающегося меню.

9.5. Соединение элементов топологии

Элементы, соединенные в электрической схеме (рис. 9.62) проводами, в топологии сливаются своими гранями (рис. 9.63). Если элементы схемы не имеют топологических ячеек, то часть топологии будет разъединена, как показано на рис. 9.63. Когда объекты топологии перемешаются, связи к другим объектам топологии показываются как тонкие линии связи между объектами (рис. 9.64). Чтобы «зафиксировать» формы вместе (то есть, устранить тонкие нити связи, появляющиеся при перемещении форм) можно выбрать команду **Snap Together**.

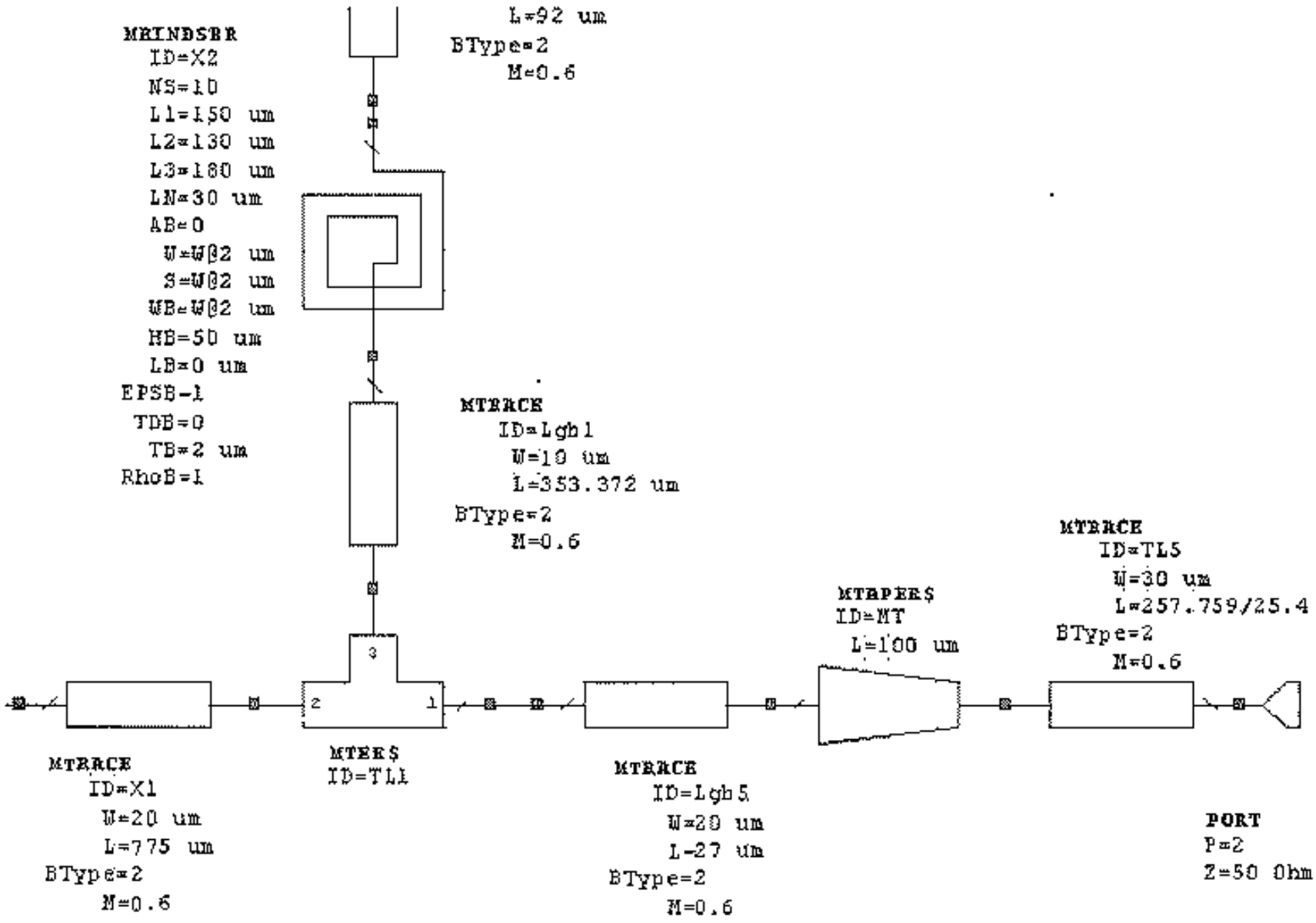


Рис. 9.62. Электрическая схема

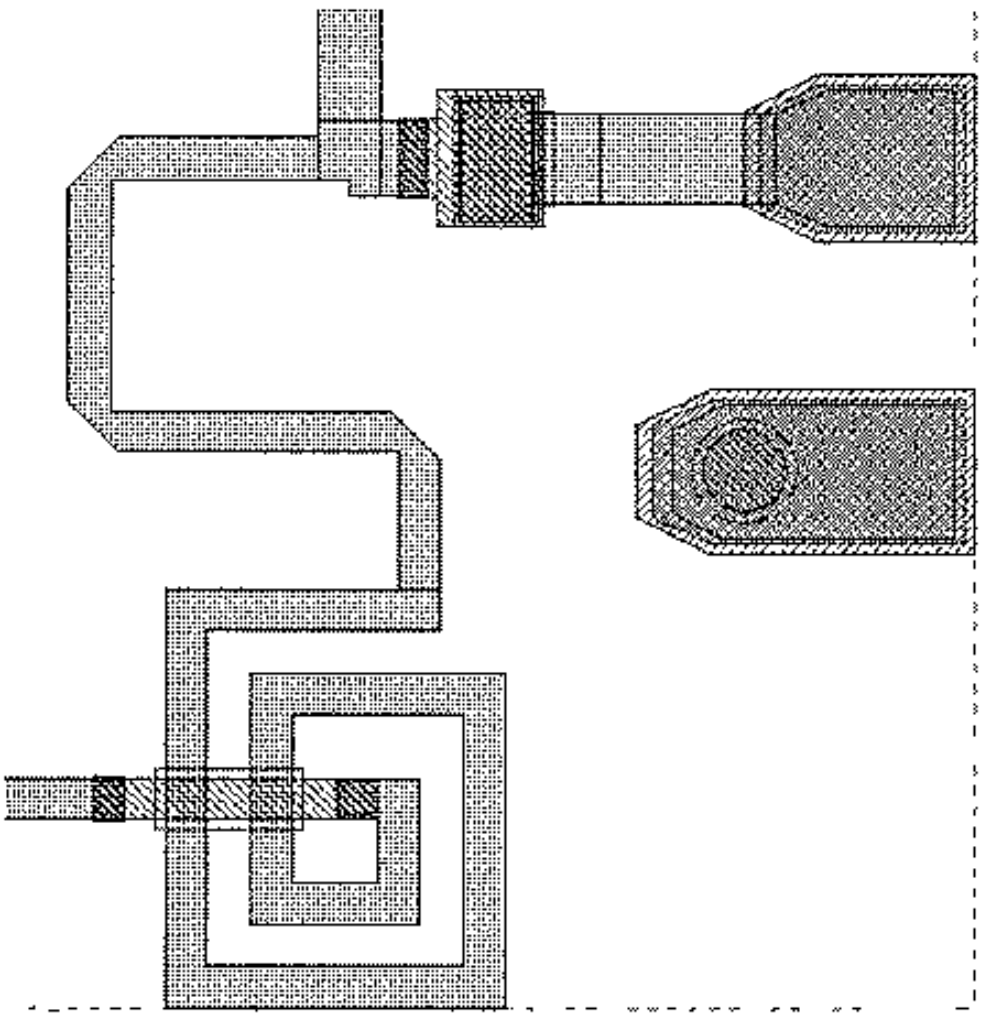


Рис. 9.63. Связанная с ней топология (фрагмент)



Рис. 9.64 Объединение топологических элементов

Стыковочные грани (фаски) топологических ячеек

Связи между топологическими ячейками лежат по стыковочным граням. Стыковочная грань ячейки — это сегмент линии, по которой ячейки должны соединиться командой **Snap Together**. Стыковочные грани для двух простых линий передачи показываются ниже. Когда две формы зафиксированы вместе, эти две стыковочные грани сольются.

Стыковочные грани ячеек имеют параметр, по которому можно установить, как они присоединяются друг к другу. По умолчанию все грани соединяются центрами, как показано на рис. 9.64. В других режимах они выравниваются по верхней или по нижней линии (рис. 9.65). Например, на рис. 9.65, две линии зафиксированы установкой стыковочных граней выравниванием «сверху».

Для удобства управления взаимным положением стыковочных граней, может быть задано смещение в виде величин delta X, delta Y и угла вращения, установленные для каждой стыковочной грани. Переменная смещения сдвигает стыковочную грань к заданной позиции. Когда формы фиксируются вместе, они связываются по смещаемой стыковочной грани (рис. 9.66).

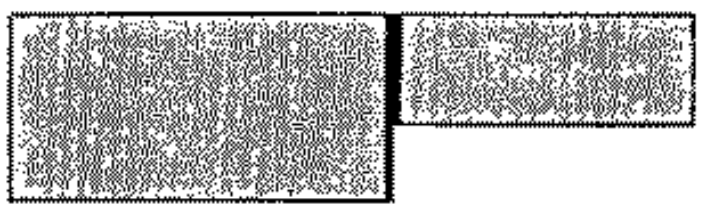


Рис. 9.65 Слияние форм соединением фасок

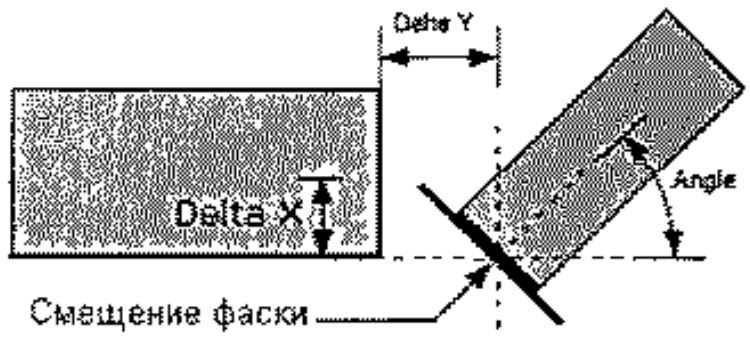


Рис. 9.66. Поворот и смещение одной ячейки относительно другой

Типы топологических ячеек

Имеются несколько типов ячеек, которые отличаются тем, как изменяются их координаты, и как связываются ячейки друг с другом в процессе создания общей топологии.

Parameterized Cells: параметризированные ячейки — это такое представление, которое использует значения параметров электрических компонентов, чтобы выполнить топологическое представление. Например, микрополосковая линия, которая использует параметры ширины (W) и длины (L). рисуется как прямоугольник с шириной W и длиной L. MWO имеет встроенные в программное обеспечение параметризированные ячейки для большинства стандартных компонентов микрополосковой линии. Параметризированные ячейки могут также быть созданы в MWO самим пользователем.

None (ни один): для некоторых электрических компонентов, может быть желательным не иметь топологии, связанной с компонентой (например, паразитная емкость). Когда два электрических элемента с топологическим представлением связаны с элементом, который не имеет топологического представления, тогда эти два объекта в топологическом представлении будут разъединены.

Редактирование топологии

Многие из ячеек, которые используются MWO, могут редактироваться редактором топологии. После двойного нажатия на ячейку, находящуюся в окне топологии, появятся маркеры (закрашенные ромбы) которые можно перемещать, под-

цепляя их с помощью курсора. Редактирование топологии поддерживает как встроенные в MWO ячейки, так и ячейки, созданные пользователем.

Конфигурируемые слои

Большинство ячеек, которые имеются в MWO, могут перестраиваться из файла **LPF**. Ячейки с перестраиваемой конфигурацией могут быть многослойными (например, линия передачи, созданная из двух металлических слоев с промежуточным слоем диэлектрика).

Файл LPF, который описывает весь топологический процесс, позволяет определить разные типы линий. Тип линии описывает слои, используемые для одиночной линии передачи. Например, металлическая линия с нанесенным покрытием, которая состоит из двух металлических слоев и слоя травления, может быть сконфигурирована, как тип линии в файле LPF. Содержание LPF для четырех различных типов линий, показывается ниже.

```
$LINE_TYPE_BEGIN «Plated Line » /Имя идентификации линии
!Layer Layer _offset minWidth flags
«Metal1 » 0 2e-6 0 0
«Via2" -0.5e-6 3e-6 0 0
«Metal2 » 0.5e-6 2e-6 0 0
$LINE_TYPE_END

$LINE_TYPE_BEGIN «Metal0 Line»
«Metal0 » 0 2e-6 0 0
$LINE_TYPE_END

$LINE_TYPE_BEGIN «Metal1 Line»
«Metal1 » 0 2e-6 0 0
$LINE_TYPE_END

$LINE_TYPE_BEGIN «Metal2 Line»
«Metal2 » 0 2e-6 0 0
$LINE_TYPE_END
```

Layer Name — это имя модели слоя. **Offset** — смещение, используемое для рисования слоя, как указано выше. Число **MinWidth** используется для проверки нарушений правила проектирования. Флажки могут использоваться, чтобы передать специальную информацию к топологическим ячейкам.

Часть файла LPF, показанная выше, определяет четыре различных типа линий (Plated, Metal0, Metal1 и Metal2). Ячейка с перестраиваемой конфигурацией (типа ячейки микрополосковой линии) может выбирать, какой тип линии используется при рисовании ячейки в топологии. Если выбран тип «Plated Line», то микрополосковая линия будет создана, используя три слоя (**Metal1, Via2 и Metal2**), где Via2 нарисован с коррекцией внутрь 0.5мкм и Metal2 — нарисован с коррекцией наружу 0.5 мкм. Если выбран тип «Metal0 Line», то линия будет создана на одном слое (Metal0).

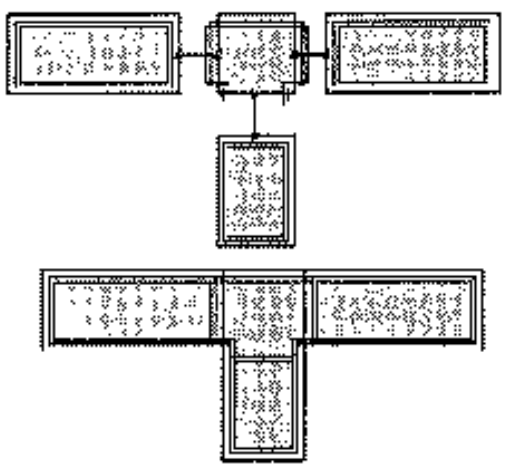


Рис. 9.67. Связь отдельных элементов

Многослойные топологические ячейки проектируются так, чтобы формы на каждом слое присоединились правильно. Ячейка топологии для разветвителя микрополосковой линии (Т-моста) показывается на рис. 9.67.

Сверху она нарисована в разорванном виде, чтобы показать, как выглядят сцепляемые ячейки.

В дополнение к глобальным установкам в файле LPF, имеется много опций, которые могут быть установлены для конкретного топологического объекта, использующего многослойное рисование. Диалоговое окно ниже используется для установки опций для каждой «копии» (instance) топологической ячейки.

Окно свойств ячейки появляется, если нажать правой кнопкой мыши на этой ячейке в топологическом представлении, выбрав **Shape Properties...**

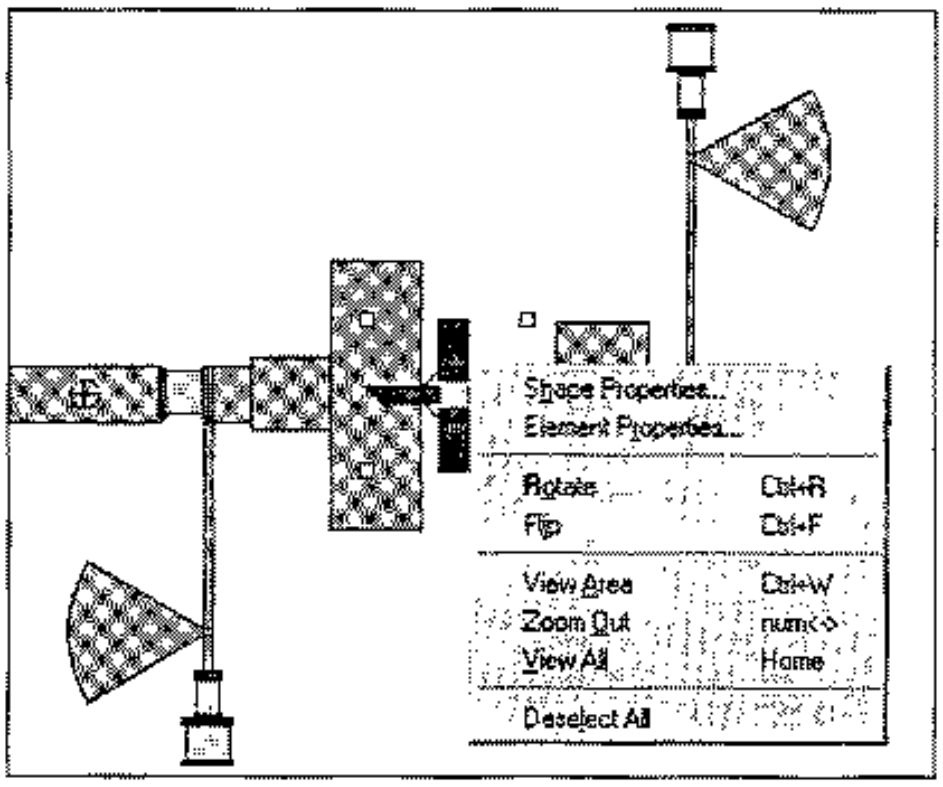


Рис. 9.68. Вызов окна свойств ячейки

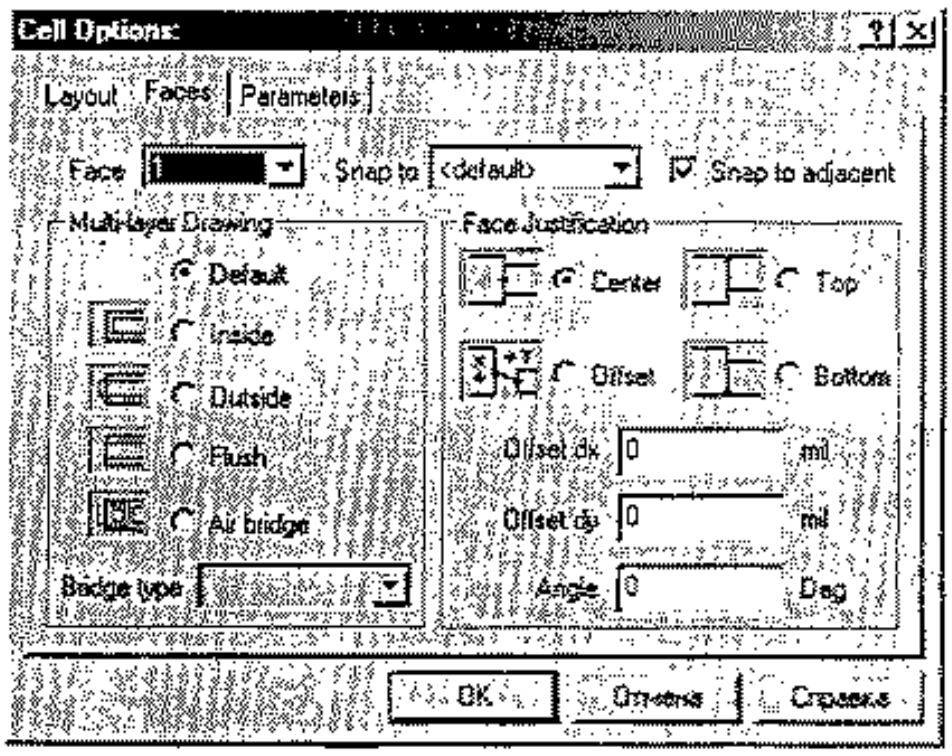


Рис. 9.69. Опции объединения стыковочных граней объектов

В этом диалоге на рис. 9.69 имеются также несколько опций, которые используются для конфигурации способа рисования многослойных ячеек при соединении стыковочных граней. Несколько этих опций иллюстрируются ниже, где левые концы линий нарисованы, используя опции «Inside» (внутри), «Outside» (вне), «Flush» (скаты) и «Air bridge» (воздушная перемычка).

Пример ниже показывает многослойную линию передачи (вид сверху). Размеры W и L представляют ширину и длину этой линии и соответствуют размерам

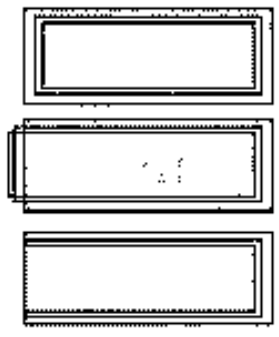


Рис. 9.70. Многослойные ячейки при различных опциях многослойного рисования

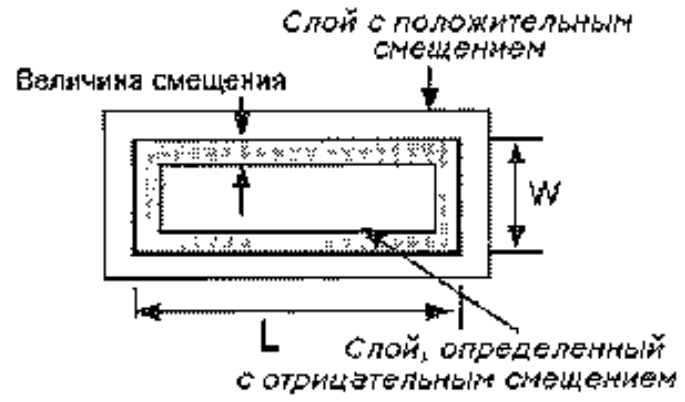


Рис. 9.71. Вид нескольких слоев ячейки микрополосковой линии

электрического компонента в схеме. Любые металлические формы, нарисованные на другом слое, имеющие размеры больше или меньше чем L и W линии передачи, не влияют на моделирование.

В дополнение к установке опций для многослойного рисования, имеется диалог, в котором задаются установки способа соединений в месте двух смежных ячеек. Кроме опции выравнивания, имеется опция для разрешения выбранного пользователем смещения (включая вращение) которое позволяет определить взаимные положения между двумя соединяющимися ячейками (рис. 9.71).

Опции ячейки

Страница **Cell Options** диалога свойств ячеек, вызываемая из меню **Layout>Element Properties,** позволяет установить тип линии для данной «копии» топологической ячейки.

Параметр типа линии **Line Type** нужен только в ячейках, которые используют LPF файл, чтобы конфигурировать их модельные слои. В списке **Line Type** есть данные для каждого типа линии, описанного в LPF файле. Список **Layer Mapping** используется, чтобы выбрать одну из таблиц карты слоев, отображающих соответствие слоя модели и слоя прорисовки, которую нужно применить к выбранной «копии» топологической ячейки. Например, ячейка полевого транзистора, опции которой показаны на рис. 9.72, присоединена в карте StdMap к линии типа верхнего медного слоя. Ориентация ячейки также устанавливается в этом диалоге.

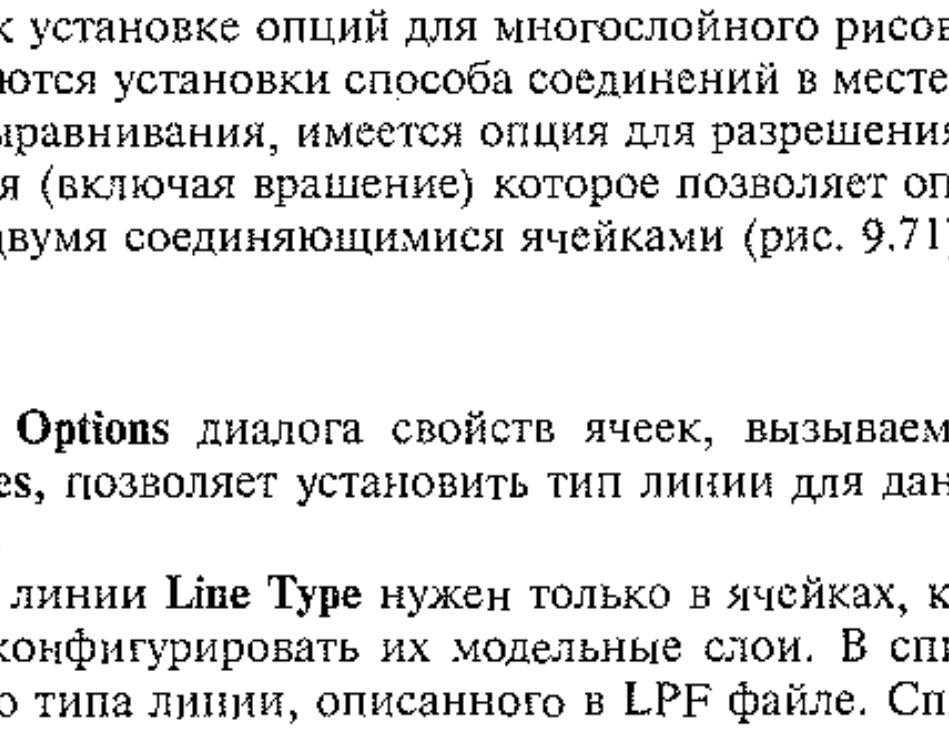


Рис. 9.72. Окно свойств ячейки состоит из трех закладок: опции ячейки и свойства стыковочных граней

Use for anchor (использовать в качестве якоря): опция используется для того, чтобы зафиксировать позицию ячейки в топологии. Зафиксированная ячейка останется в фиксированной позиции, а все другие ячейки корректируются соответственно, когда изменяются параметры схемы. В топологии могут быть несколько зафиксированных объектов, например, навесных элементов, типа транзисторов, емкостей. Каждый такой объект останется в фиксированном положении, когда топология генерируется. В отличие от опции **Freeze position**, зафиксированные ячейки можно перемещать мышью (или введением координат). Выбор режимов **Use for anchor** и **Freeze position** закрепит ячейку без перемещения. Только закрепленные топологические объекты на высшем уровне иерархии используются для закрепления топологических ячеек.

Freeze Position (закрепление позиции): опция используется, чтобы закрепить положение ячейки, сохранить ее от случайного сдвига мышью или введением координат. Такие закрепленные ячейки не сдвигаются, когда топология сливается вместе. Закрепленные ячейки имеют более слабую форму захвата, чем другие ячейки, которые имеют несколько отличные свойства, чем ячейки, которые используются как прикрепленные. С прикрепленными ячейками смежные ячейки размещения будут пытаться соединиться так, чтобы они зафиксировались к прикрепленной ячейке, в то время как с закрепляемыми ячейками смежные ячейки не обязательно фиксируются вместе, когда топология сливается. Если желательно сделать другую привязку топологической ячейки к закрепляемой ячейке, попробуйте выбрать зафиксированную ячейку и затем зафиксировать топологию вместе.

Stretch to Fit (растяжение элемента для слияния): опция служит для использования с элементом TRACE (MTRACE, MCTRACE и т. д.). Если эта опция включена, например для MTRACE, то MTRACE будет автоматически рисоваться согласовано с двумя другими смежными ячейками, когда топология фиксируется вместе.

Flip Cell (отражение ячейки): может использоваться, чтобы зеркально перевернуть ячейку относительно оси.

Orientation Angle (угол ориентации): устанавливает угол ориентации ячейки. Угол ориентации может также быть изменен, используя мышь. При вращении с помощью мыши, можно изменить угол только на величину, фиксированную для вращения.

Параметры Local Cell

Параметры, необходимые для рисования топологической ячейки определяются в схеме. Дополнительные «локальные» параметры могут быть добавлены к описанию топологической ячейки, которое позволит конкретной «привязке» (instance) топологической ячейки хранить информацию, которая может использоваться, чтобы нарисовать эту топологическую ячейку. Это обычно применяется когда размеры необходимые для рисования топологической ячейки не являются частью электрической модели. Значения локальных параметров можно установить из страницы **Parameters** диалога **Cell Options** (рис. 9.73).

Локальные параметры также автоматически создаются, когда топологическая ячейка соответствует схематическому элементу, который не имеет параметров, в которых нуждается топологическая ячейка. Это позволяет использовать любую

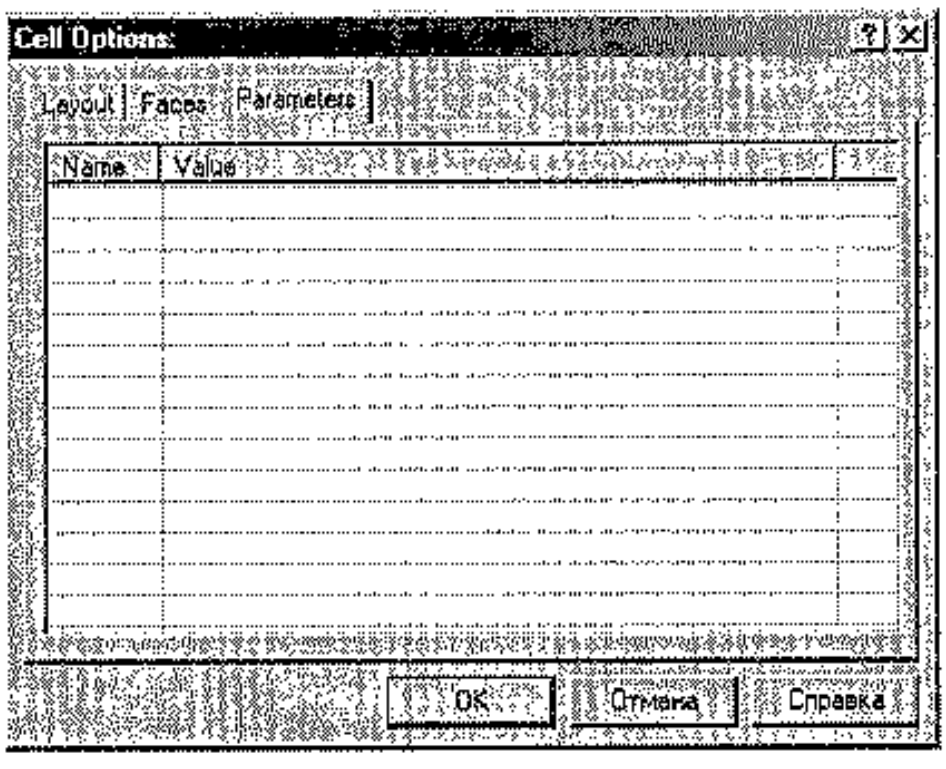


Рис. 9.73. Закладка Parameters диалога опций ячейки

ячейку с любым электрическим элементом (с тем же самым количеством выводов). Например, топологическая ячейка для спиральной катушки индуктивности может быть описана как подсхема с измеренными S-параметрами. Физические размеры спирали тогда вводятся как локальные параметры, чтобы нарисовать спираль правильно.

Узлы и стыковочные грани

У большинства топологических ячеек имеется соединительная стыковочная грань, соответствующая каждому узлу схемы. Топологическая ячейка может также быть создана так, что она имеет несколько точек соединения (стыковочных граней) для одного электрического узла. Топологическая ячейка с несколькими стыковочными гранями для данного узла создается, добавляя дополнительные стыки с одними и теми же номерами узлов для нескольких стыковочных граней. Для нескольких граней с одним номером узла, грань, которая добавлена первой, будет соответствовать точке соединения по умолчанию. Линия передачи TL1 и линия TL2 — обе связаны с третьим узлом полевого транзистора FET.

В этой схеме для топологического представления FET должна использоваться ячейка эталона (Artwork cell). Эта ячейка для FET (рис. 9.74) имеет четыре грани, которые соответствуют трем узлам. Номера стыковочных граней узла могут меняться в редакторе ячейки формата GDSII, выбирая свойства стыковочной грани топологического объекта. Номера узлов показываются на стыковочных гранях объектов.

На рис. 9.75, линии, соединенные с FET, отодвинуты от FET, чтобы сделать связи проще для просмотра. Когда имеются больше чем одна грань для узла, она идентифицируется в диалоге свойств ячейки, используя букву после номера. Для примера, у FET, имеется грань 3a

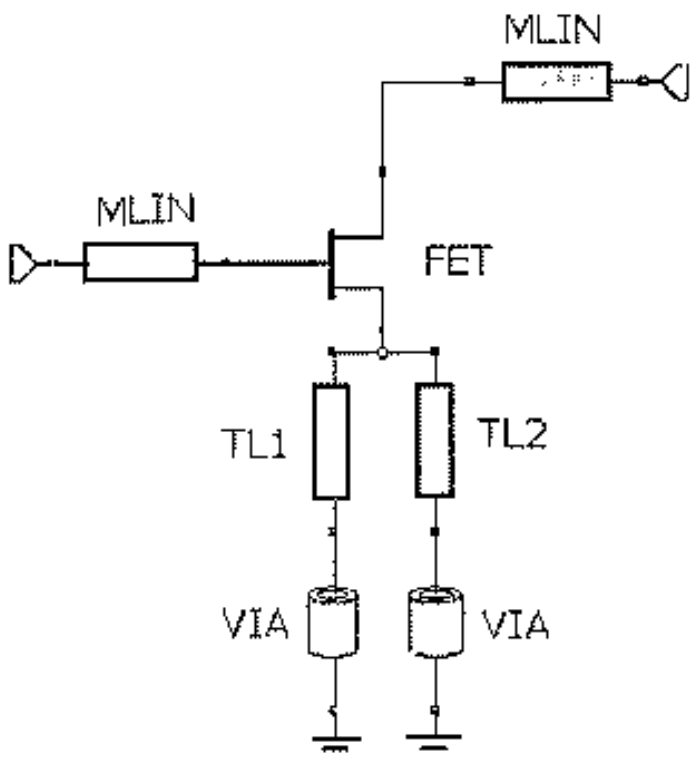


Рис. 9.74. Схема усилительного каскада, в который входят несколько микрополосковых линий и транзистор FET

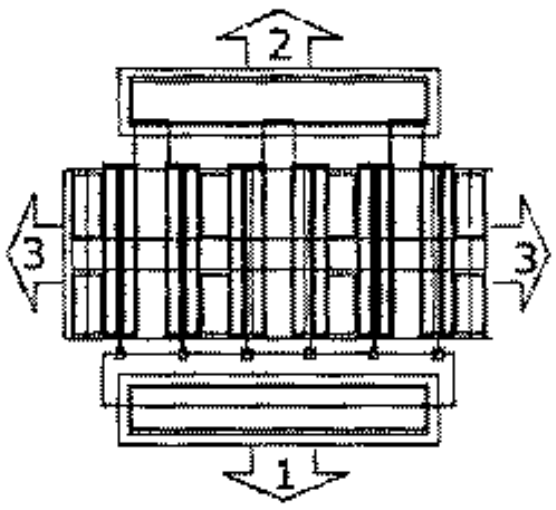


Рис. 9.75. Топология для схемы с полевым транзистором FET показана на следующем рисунке

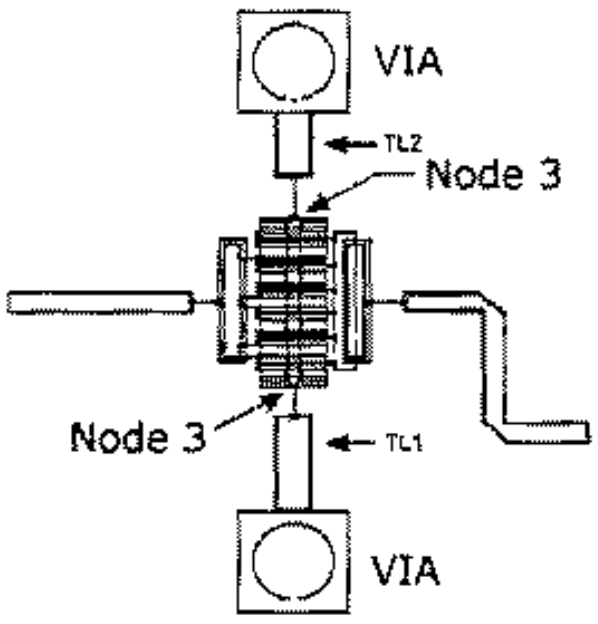


Рис. 9.76. Соединение стыковочных граней ячеек в местах узлов на электрической схеме

и грань 3b. Линия передачи TL1 связана с гранью 3a, а линия передачи TL2 подключена к 3b.

Когда имеются три элемента, подключенные к одному узлу (и имеются две стыковочных грани топологии для одного из узлов), тогда есть несколько различных возможностей подключения между связанными топологическими ячейками (рис. 9.76). В данном примере одна из линий передачи может быть соединена к одной из стыковочных граней или две линии могли быть соединены друг к другу. Чтобы определить правильное подключение, пользователь должен использовать свойство **Snap to** на странице **Faces** диалога свойств ячейки (если значение по умолчанию не дает желаемой связи). Свойство **Snap to** используется, чтобы определить, насколько корректно выполнено соединение граней. Грань, которая должна устанавливать свои свойства, выбирается первой, используя список стыковочных граней в списке **Faces**. Текущая выбранная стыковочная грань будет высвечена синим цветом, если так выбрано в диалоге. Как только требуемая грань выбрана, выберите **Snap to** для грани в другом списке. Стыковочная грань **Snap to** будет высвечена красным цветом, когда выбор изменен. Это должно быть сделано для обеих граней, которые имеют тот же самый номер узла. В показанном примере сначала должна быть выбрана грань TL1, которая связана с 3a, а затем выбирается 3b и выбирается подходящая стыковочная грань TL2 в списке **Snap to**.

Ячейки, которые имеют несколько стыковочных граней с тем же самым номером узла, также используются, чтобы обеспечить альтернативные точки соединения для топологической ячейки.

9.6. Многослойная топология

MWO работает с многослойными СВЧ конструкциями. Формы, лежащие на одной плоскости составляют один слой. Все встроенные ячейки, такие как навесные конденсаторы, транзисторы, перемычки (рис. 9.77), обычно многослойные. В таких топологиях необходимо решить вопрос о совместимости слоев различных топологических ячеек.

Слои модели и нарисованные слои задаются своими названиями (в виде текста). Обычно делается так, чтобы имена слоев модели и слоев прорисовки были общие в *карте соответствия StdMap* (рис. 9.78). Способность ставить в соответствие модельные слои, с произвольным слоям прорисовки, полезна в следующих ситуациях.

1. Если в проекте используются топологические ячейки из нескольких библиотек GDSII и слои, определенные в этих библиотеках не совместимы, то карта

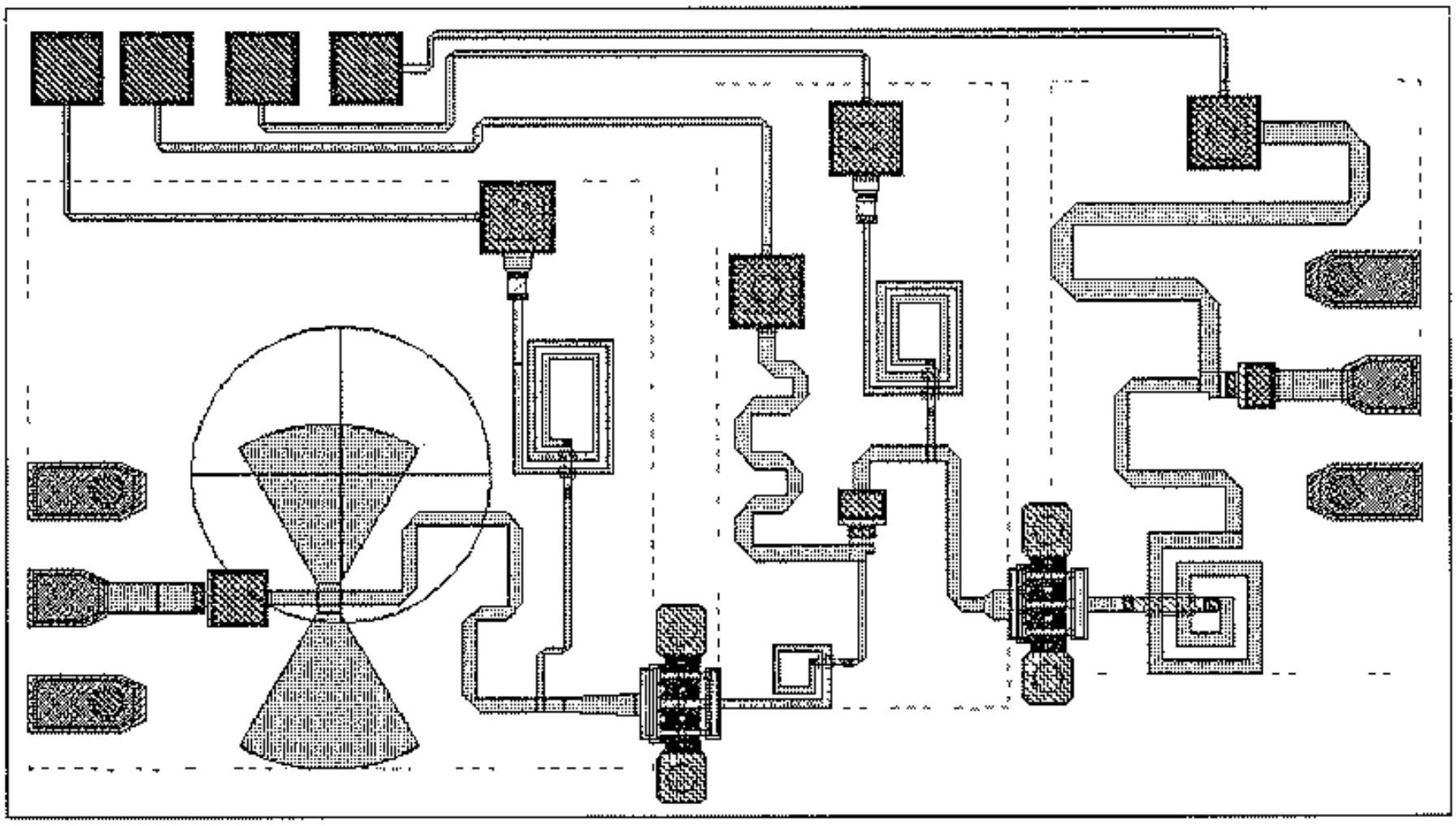


Рис. 9.77. В топологии двухкаскадного усилителя, состоящей из нескольких слоев, каждый слой рисуется другим цветом и заполнением. Имеется возможность вывести отдельные слои или все вместе

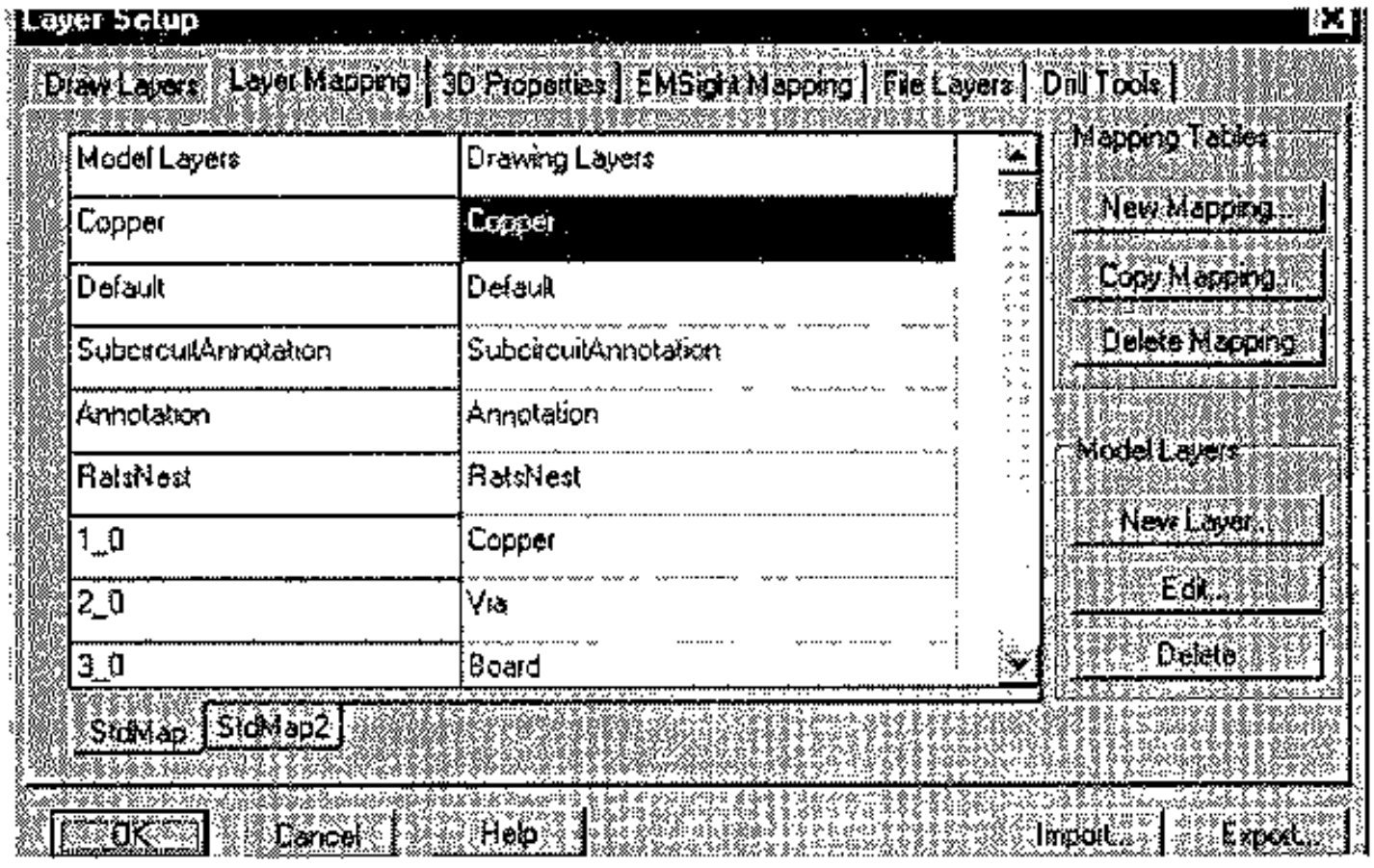


Рис. 9.78. Две карты соответствия: StdMap; StdMap2 в таблице картографирования Layer Mapping. В каждой карте слои имеют два обозначения: как модельные слои (слева) и нарисованные слои (справа)

соответствия обеспечивает четкий механизм для установки соответствия слоев из различных библиотек (слои, описанные в GDSII — файле трактуются эталоном как модельные слои) — путем подходящей установки слоев прорисовки.

Ячейки, описанные в стандарте GDSII, рисуются на модельных слоях, согласно номеру в файле GDSII и типу объекта в файле GDSII. Например, форма, нарисованная на GDSII слое 3 с типом объекта 0 будет нарисована на слое модели

«**3_0**» (тип объекта обычно **0** для большинства GDSII библиотек). Карта соответствия слоев позволяет не использовать менее наглядное имя (например, «**3_0**») при рисовании, а использовать более наглядное имя слоя прорисовки (например, «**Board**»), см. рис. 9.78.

2. В случае созданных параметризированных ячеек. Параметризированная топологическая ячейка, которая соответствует линии передачи, может быть запрограммирована на использование «жестко заданного» имени слоя. Например, параметризированная топологическая ячейка, которая соответствует линии передачи, может быть задана для рисования металлической формы линии передачи на слое с именем «**Metal1**». Параметризируемая топологическая ячейка, ранее заданная иначе для дискретного элемента, могла быть нарисована на слое по имени «**Trace1**». Если обе топологические ячейки используются в одном проекте (и они должны быть нарисованы на одном и том же слое по имени «**Metal1**»), то карта соответствия слоев может быть установлена так, что одна топологическая форма «**Metal1**» будет поставлена, картой соответствия слоев, в соответствие модельному слою «**Metal1**» (единичное картографирование), а для другой топологической формы «**Trace1**», картой слоев будет также поставлено в соответствие «**Metal1**».

3. При применении нестандартных элементов и форм, для сложных многослойных печатных плат часто нужно иметь топологическую ячейку, нарисованную на разных слоях. Например, топологическая ячейка для утопленного резистора может быть той же самой для резисторов, которые расположены между различными слоями физической платы. Создавая дополнительные карты соответствия слоев, утопленный резистор может быть всегда нарисован на тех же самых модельных слоях. В то же время, будучи поставлен картой в соответствие реальному слою прорисовки, эти карты подходили бы для резистора, заданного в размещенных друг под другом физических слоях, как показано на рис. 9.79.

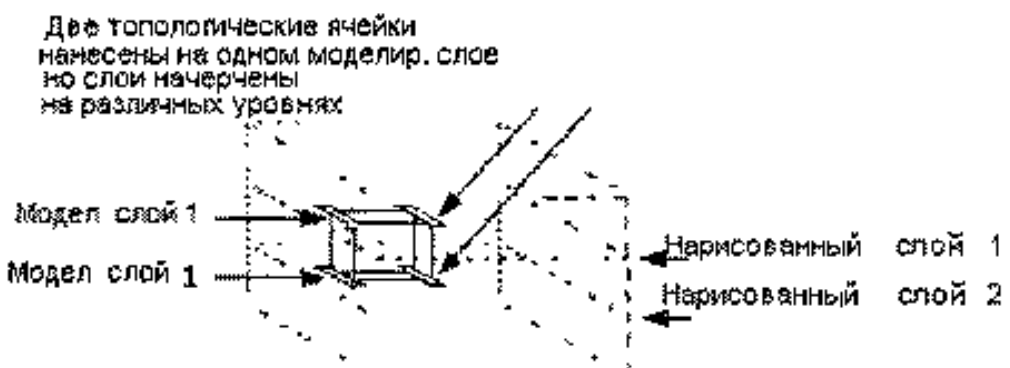


Рис. 9.79. Две «привязки» одной топологической ячейки нарисованы на одном и том же модельном слое, но слои для каждой «привязки» поставлены в соответствие картой соответствия разным слоям прорисовки

Карта соответствия слов топологической ячейки

Последовательность картографирования слоев для рисования топологических ячеек показывается на рис. 9.80.

Соглашение о модельных слоях

Имена моделируемых слоев, используемых топологическими ячейками, зависят от типа топологической ячейки. Существуют три различных типа топологических ячеек, которые имеют различные способы для обозначения слоев модели.

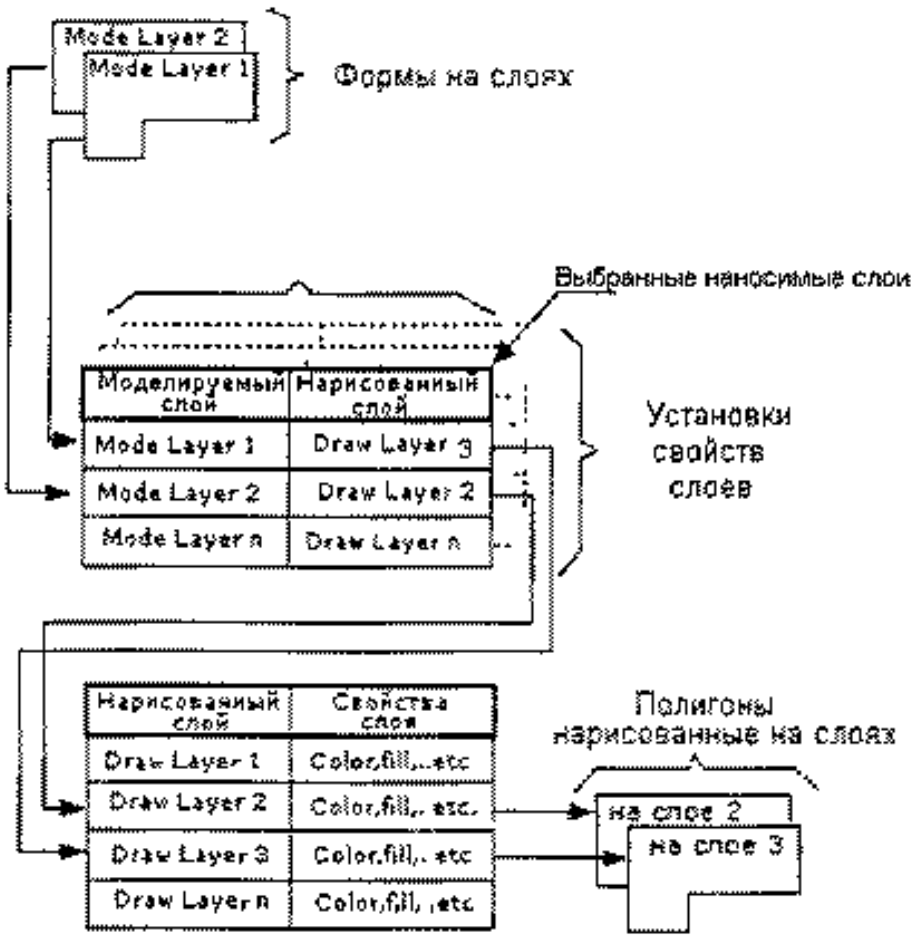


Рис. 9.80. Структура построения сложной иерархической конструкции

Для параметризируемых ячеек, которые реализованы как коды нарисованных параметризируемых топологических ячеек, имеются два метода для обозначения слоев модели. Каждый метод имеет преимущества и недостатки, и логично было бы использовать оба метода при задании топологической ячейки.

Первый метод для обозначения слоев модели в топологической ячейке состоит в жестком задании имени слоя модели в определении ячейки. Например, обращение **SetDrawLayer (L «Metal1»)** заставит все последующие рисуемые формы выводить на слой «Metal1», пока не будет сделан другой вызов **SetDrawLayer**. Этот метод работает лучше всего, когда соглашение об именах принято так, чтобы различные топологические ячейки, которые должны рисоваться на одних и тех же слоях рисунка, используют тот же самый набор слоев модели. Хотя строго выполнять это не требуется, потому что всегда возможно поставить в соответствие несовместимые слои модели любому набору нарисованных слоев. Вообще, не удобно иметь различные наборы карт соответствия для большого количества различных топологических ячеек, поэтому наличие соглашения о названии упрощает использование топологических ячеек.

Второй метод наименования слоев модели в описании параметризуемых ячеек использует имена модельных слоев, которые сконфигурированы в файле LPF (Process Definition File). Этот метод более гибок, и он используется большинством встроенных в MWO ячеек.

Файл LPF задает описание типов линии, включая имена модельных слоев, которые используются для рисования типов линий. Топологические ячейки, которые используют конфигурированные слои, могут легко быть трансформированы от одного процесса к другому, читая различные файлы LPF, сконфигурированные для данного процесса. В дополнение к именам модельных слоев, типов линий, в файле LPF можно определить многослойные линии. Важно помнить, что название слоя, определенное в файле LPF — это название слоя модели, а не название слоя для рисования, хотя обычно используют одни и те же названия для них обоих — с так называемой единичной картой соответствия модельных и рисуемых слоев.

Третий метод для обозначения слоев модели применяется в ячейках эталонов (Artwork cell) GDSII. Эти ячейки используют имена моделей, которые получены из номера слоя GDSII и типа объекта. Например, форма GDSII, которая нарисована на 4 слое с типом объекта 0, будет обозначена и нарисована как слой модели «**4_0**».

Создание таблицы и файла картографирования слоев

В проекте может быть создано одна или больше таблиц картографирования слоев. Таблицы могут быть созданы или отредактированы из диалога **Layer Setup**, или инициализированы из файла ***.LPF**. Закладка **Layer Mapping** диалога **Layer Setup** показывается на рис. 9.81.

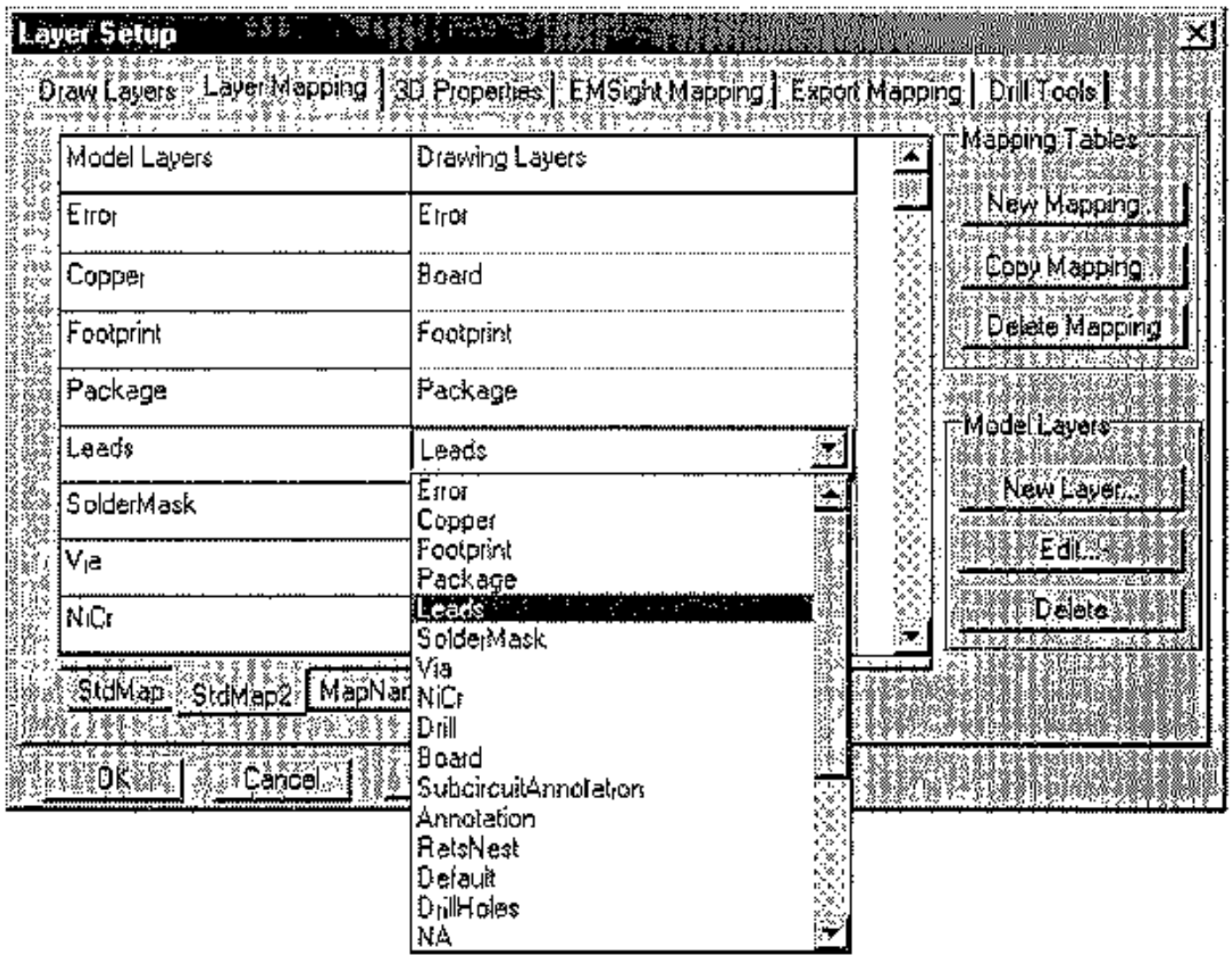


Рис. 9.81. Установки параметров слоев топологии. Используя выплывающий список в колонке Drawing Layers, имеется возможность поставить в соответствие моделируемому слою любой нарисованный слой данного проекта

Новую таблицу картографирования можно создать, нажимая кнопку **New Mapping**.

Когда новое картографирование для проекта создано, и задано его имя, появляется новая закладка **StdMap3**. Таблица картографирования (и соответственно, закладка) может быть скопирована или удалена из диалога **Layer Setup**. Кнопка **New Layer** используется, чтобы добавить новый слой в таблицу картографирования. Слой добавляется внизу всех таблиц картографирования. Кнопка **Edit** позволяет изменить имя слоя для существующего элемента в таблице картографирования. Слои могут также быть удалены из таблицы, нажимая кнопку **Delete**.

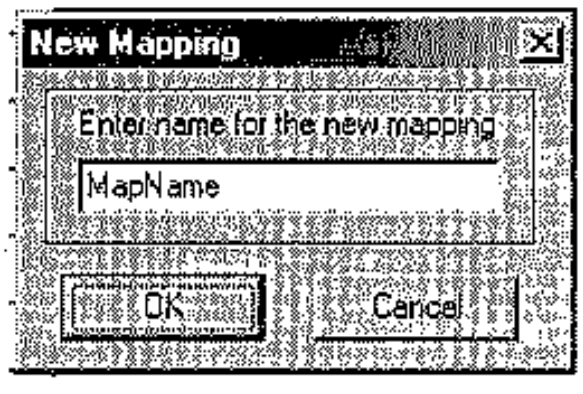
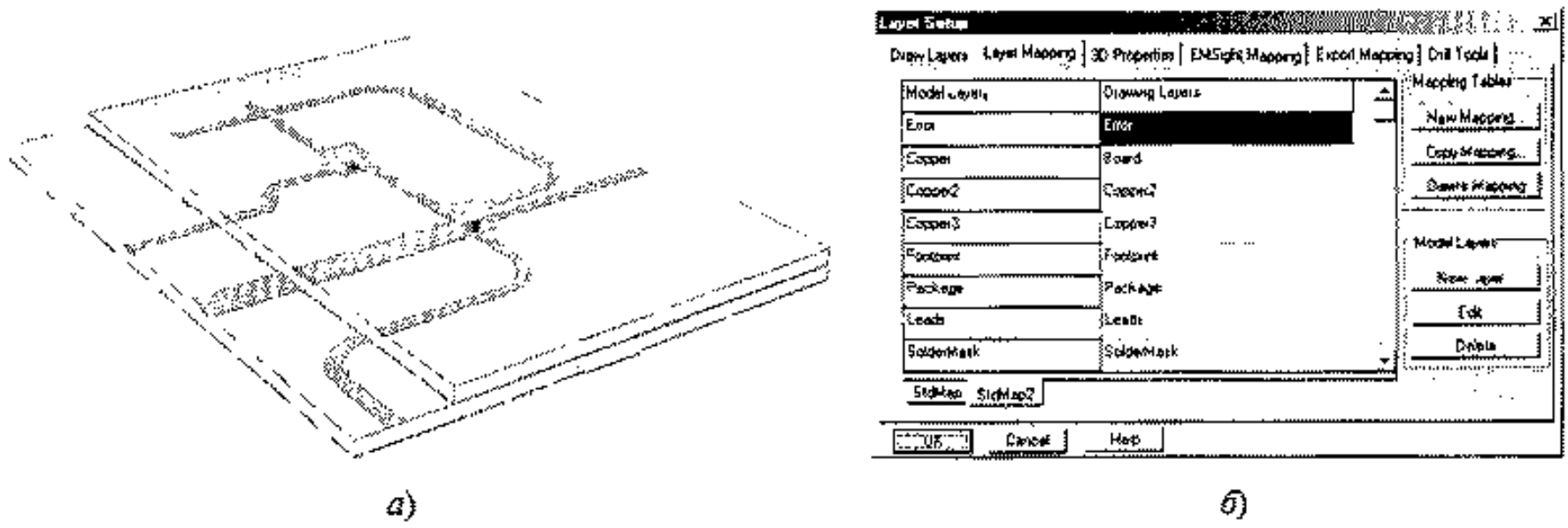


Рис. 9.82. Окно задания имени новой таблицы картографирования

Многослойная топология разветвителя и ее картографирование слоев

Слой для рисования, который назначается для соответствия данному модельному слою, выбирается из списка, который появляется после нажатия на имя рисуемого слоя (рис. 9.81) на странице **Layer Mapping.**



а) *б)*

Рис. 9.83. Разветвитель имеет три медных слоя, нижний слой Footprint, слой корпуса, проводников, пайки и др.

Картографирование слоев в системе GDSII

Ячейки GDSII могут использоваться для определения топологических ячеек, или они могут быть добавлены к топологии как нарисованные формы, которые не связаны с какими либо схемными элементами. Копии («привязки» — instances) GDSII- эталонов, которые используются как топологические ячейки (или используются как несвязанные формы), могут содержать неограниченное количество уровней иерархии в этих ячейках. Например, GDSII ячейка полевого транзистора FET может содержать, в свою очередь, подячейки полоски затвора. Когда используется иерархическое построение, все ячейки в пределах иерархии должны быть загружены в проект.

Соглашения о GDSII слоях

Сложные формы в файле GDSII находятся на слоях, заданных номером рисуемого слоя и типом объекта. Номер слоя и тип объекта комбинируются, чтобы определить свой, отличный номер слоя. Фактический номер слоя формируется, используя номер слоя GDSII для байта низшего разряда и типа объекта для байта старшего разряда. Первоначально в спецификации GDSII разрешались только 64 слоя. Размер данных позволял хранить номер слоя в файле GDSII до 256 слоев. Поэтому большинство современных программ, которые поддерживают GDSII, позволяют использовать до 256 слоев. При комбинировании с 256 возможными типами объекта, общее количество возможных уникальных слоев равно 65536. Однако, поскольку инсталлированный тип объекта обычно равен «нулю» для большинства GDSII библиотек, типичные файлы GDSII часто имеют меньше чем 256 уникальных слоев.

Программа MWO работает с поименованными слоями (в отличие от пронумерованных слоев, используемых GDSII). Когда файл GDSII читается в MWO, пронумерованные слои автоматически связываются с именами слоев модели. Имена

этих модельных слоев имеют форму **LayerNumber_ObjectType**. Например, форма на слое **8** с типом объекта **0** будет связана со слоем, названным **8_0**. Сгенерированные слои модели GDSII обычно ставятся в соответствие именам слоев, что более наглядно для рисования.

Топологические ячейки GDSII

К ячейкам GDSII, которые используются как части топологии, должны быть добавлены стыковочные грани (faces), чтобы определить, как они должны соединиться с другими топологическими ячейками. Стыковочная грань может быть добавлена к любой ячейке GDSII, добавляя фаску на ячейку в редакторе ячеек. Ячейки GDSII, к которым добавлены грани, могут быть сохранены как обычные файлы GDSII. Стыковочные грани рисуются как протяженные объекты GDSII с номером слоя до 99 и с номером узла, который соответствует стыковочной грани. Так как вся информация относительно стыковочных граней хранится как стандартная конструкция GDSII, топологические ячейки GDSII могут читаться и изменяться любым инструментом, который обрабатывает стандарт GDSII. Использование стандарта GDSII делает возможным создать GDSII ячейки (со стыковочными гранями) с использованием других инструментов, которые позволяют задавать номер слоя и тип объекта.

Импортирование библиотеки GDSII

При импортировании библиотеки GDSII из менеджера **Layout Manager**, очень важно, что имеется правило картографирования и перевода от слоя GDSII к рисуемому слою. Это требует, чтобы имелась модель для каждого слоя GDSII. Например, если имеются только два слоя в файле GDSII (слой **2** и слой **8**), то должны иметься два модельных слоя в таблице картографирования для слоев **2_0** и **8_0**. Модельные слои **2_0** и **8_0** должны тогда быть отображены к желательным рисуемым слоям.

9.7. Экспорт топологии в MWO

После создания топологии, она может экспортироваться как файл GDSII (иерархический или одномерный), файл **DXF**, файл **Gerber** или геометрический файл **PAD** (контактных площадок). Прежде, чем топология может быть экспортирована, нужно иметь таблицу или *картографирование файла* (т. е. карту соответствия слоев прорисовки слоям экспортируемого файла) и выбрать формат экспортируемого файла (то есть GDSII или DXF). Различные картографирования файла должны быть созданы для каждого типа файла, который нужно вывести. В MWO могут быть созданы несколько картографирований файла, так чтобы была возможность записать некоторые из слоев в один файл, а другие слои в другой файл (например, если вы делали рисунки в формате AutoCAD для отдельных слоев маски). Картографирование файла для GDSII ячейкн схемы показывается ниже.

Картографирование файла используется, чтобы отобразить связь рисуемых и модельных слоев в файле (рис. 9.84). Оно может также использоваться, для замораживания некоторых слоев, т. е. запрета их изменения в файле.

Важно заметить, что таблица картографирования (рис. 9.84) отображает соответствие модельных слоев слоям для рисования реальных слоев конкретных объектов топологической ячейки, в то время как картографирование файла отобража-

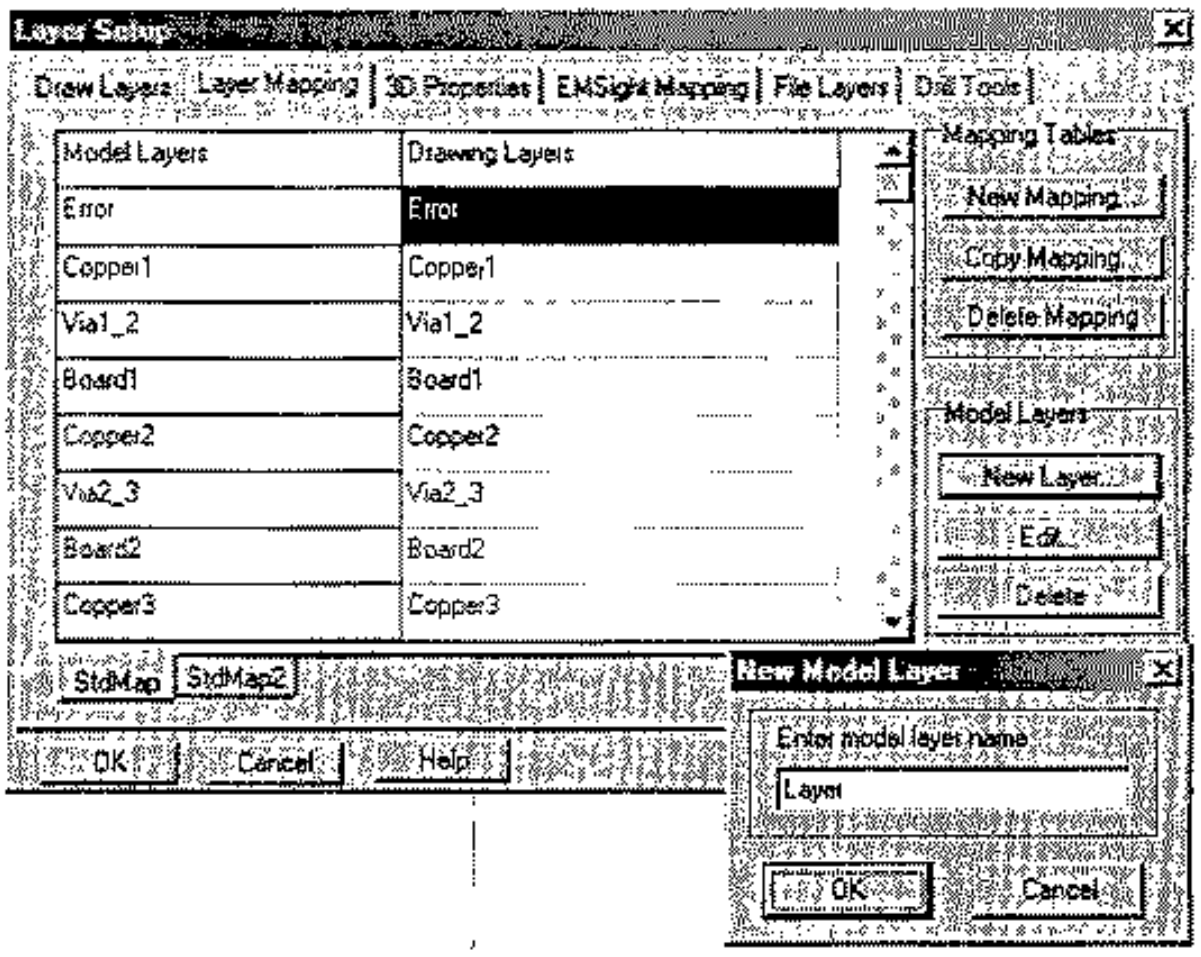


Рис. 9.84. Таблица картографирования слоев. В данном случае модельные слои соответствуют по названию рисуемым слоям

ет слои рисунка, на которых объекты схемы окончательно нарисованы послойно. Если используется библиотека ячеек GDSII и экспортируемая топология должна реализоваться с тем же самым набором слоев GDSII, то картографирование файла должно быть установлено так, чтобы слои рисунка, которые отображают ячейки GDSII в закладке **Layer Mapping**, были нанесены на те же самые слои GDSII (рис. 9.85) в картографировании файла. Когда топология экспортируется, имеется опция для каждой таблицы файла картографирования в списке **Save As Type** в диалоге **Save As**, который открывается, когда вы выбираете директиву **Export Layout**. Топология, которая экспортируется, будет соответствовать топологии, которая находится в настоящее время в активном окне редактирования. Топология, предназначенная для экспорта, может начинаться на любом уровне иерархии при открытии окна редактора топологии и выбирая **Layout > Export Layout** из меню.

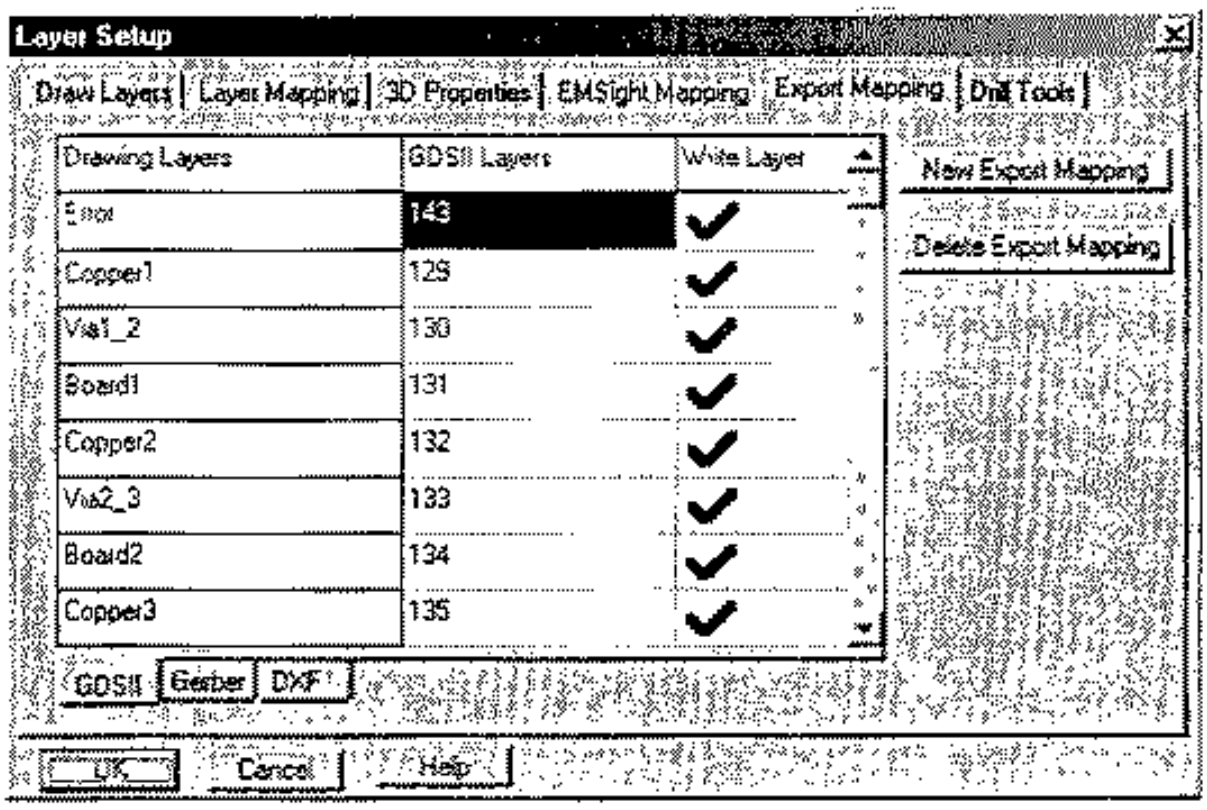


Рис. 9.85. Закладка, из которой выполняется экспорт слоев

Установки картографирования файла

Установки картографирования файла могут быть сделаны в файле LPF, или в закладке **File Layers** диалога **Layer Setup**. Диалог **Create New File Mapping**, который задает имя нового файла картографирования, показывается на рис. 9.85. Имя файла картографирования используется, чтобы идентифицировать картографирование, при выборе команды **Export Layout**. Флажок для каждого слоя используется, чтобы определить, должен ли слой быть записан или нет в этом файле картографирования.

Экспорт сложных объединенных форм

MWO может автоматически объединять соприкасающиеся полигоны на одном слое, когда топология экспортируется. Эта особенность может быть очень полезна при создании масок фотошаблонов, потому что многие плоттеры требуют наличия замкнутых полигонов, чтобы делать маски фотошаблонов. Экспорт объединенных полигонов экономит время, необходимое для удаления всех линий пересечения на конкретном слое. Рис. 9.86 показывает разницу между обычно экспортированной схемой и той, которая экспортируется в режиме **Union layout shapes**. К топологии, которая создана объединением всех топологических ячеек, присоединяются все отдельные формы.

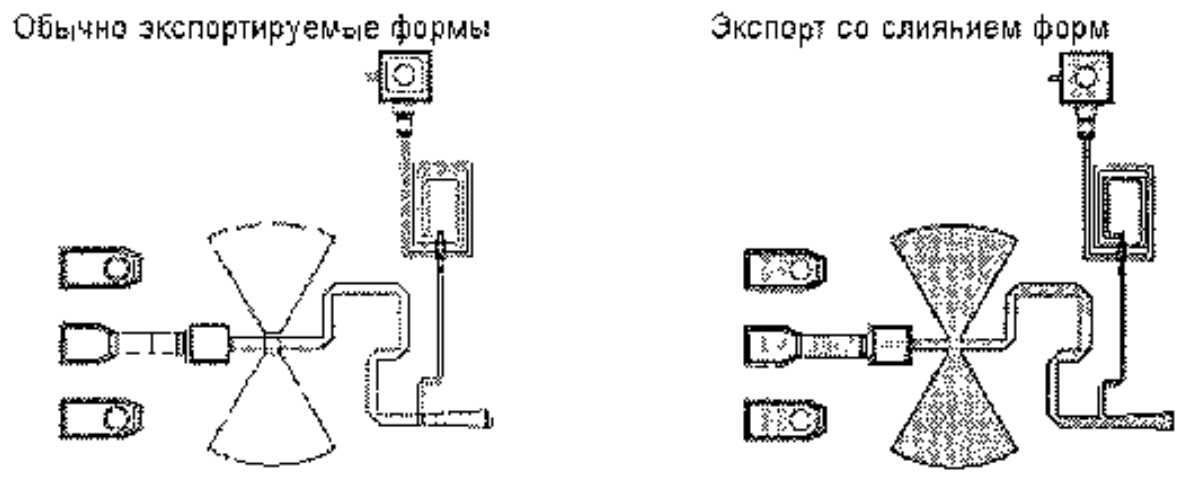


Рис. 9 86. Слияние топологии согласующей структуры перед экспортом

Режим слияния форм при экспорте схемы устанавливается, выбирая **Options > Default Layout Options** и отмечая **Union layout shapes** в разделе **Layout Export Options**, чтобы экспортировать объединенный полигон для каждого слоя.

Экспорт подсхем как неизменяемых эталонов

По умолчанию, топология подсхемы экспортируется как неизменяемый эталон (ячейка-оригинал) при экспорте в иерархический файл GDSII. Этот режим может быть изменен, выбирая **Options > Default Layout Options** из меню и затем снятием режима **Subcircuits as instances** в разделе **Layout Export Options**. Если этот режим не выбран, то только топологические ячейки, которые внедрены, используя ячейки трафарета, будет описаны как неизменные образцы. Снятие этого режима, и когда включен режим **Union layout shapes**, приводит к тому, что формы на различных уровнях иерархии схем объединяются вместе (сливаются все, кроме неизменных образцов). Это полезно для производства, чтобы например ячейки для

полевых транзисторов могли быть заменены ячейками базовой модели FET, оставляя неизменной другую часть топологии.

Режимы экспорта зафиксированной топологии эталонов

Имеются несколько опций, которые применяются, когда GDSII образцы эталонных ячеек экспортируются в файл. Параметры используются только для экспорта иерархического GDSII. Эти опции выбираются из списка **Instance export options** в закладке **Layout** (рис. 9.87) диалога **Default Ckt Option** (выбирая **Options > Default Layout Options** из опускающегося меню или двойным щелчком на **Default Ckt Options** в дереве проекта и выбирая закладку **Layout**).

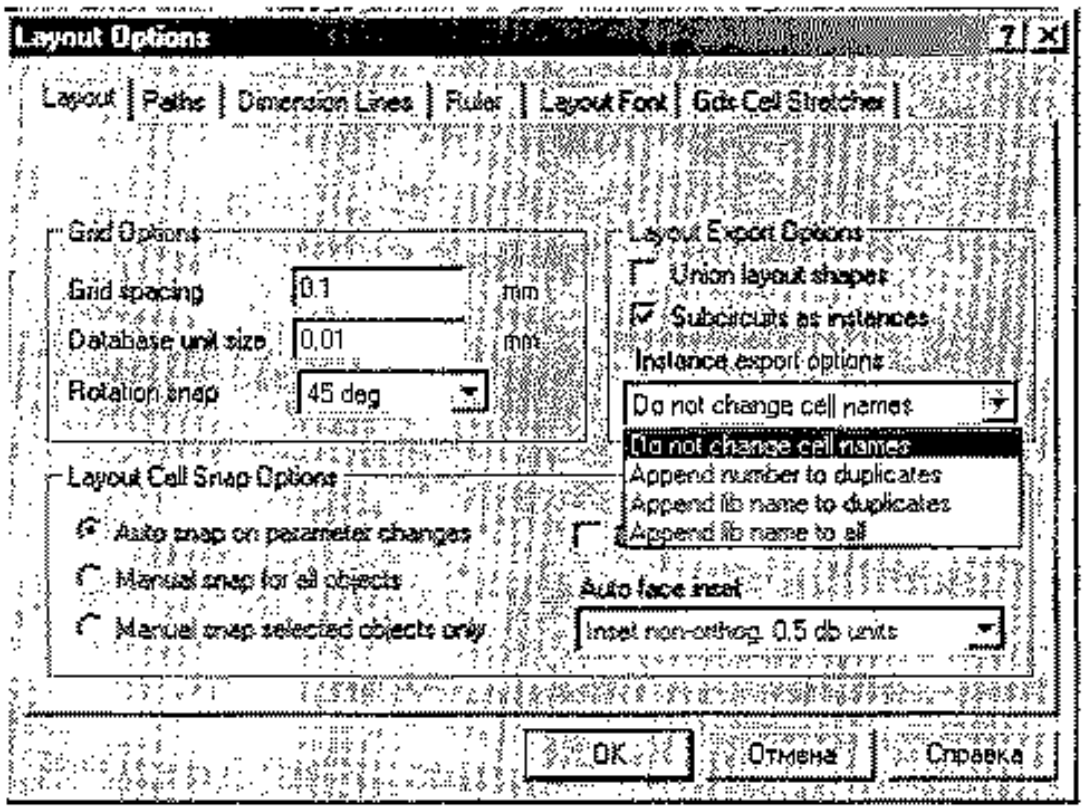


Рис. 9.87. Установки топологии, применяемые при экспорте

Эти параметры следующие.

Do not change cell names (имена ячеек не меняются): если в топологии имеется много ячеек (из различных библиотек) с одинаковым именем ячеек, то только одна из нескольких копий ячеек будет записана в файле GDSII, если этот режим выбран. Это — результат ограничения того, что имена ячеек должны быть уникальны в пределах одного GDSII файла, поэтому, если мы не позволяем изменять название копии ячейки, тогда возможно записать только одну из ячеек.

Append number to duplicates (добавление числа при дублировании): этот режим позволяет нескольким образцам ячеек иметь одно имя, написанное в один файл GDSII. В этом режиме автоматически изменяется имя ячейки, которое было предварительно записано, добавляя в конец число, с символом подчеркивания. Например, если имеется записанный **CellA**, то другой **CellA** будет конфликтовать, при попытке записать его в тот же самый файл, и будет автоматически переименован к **CellA_1** (т. е. добавлено число).

Append lib name to duplicates (добавление имени при дублировании): этот режим позволяет нескольким ячейкам иметь одно имя и быть записанной в один GDSII файл. Этот режим автоматически изменит название модели ячеек, который был предварительно записан, добавляя в конец название библиотеки, из которой об-

разец ячейки был получен. Например, если имеется **CellA** из записанного **LibA**, то другой **CellA** из **LibB** — будет конфликтовать, и должен быть записан в тот же самый файл, тогда первый образец ячейки будет переименован в **CellA_LibA**, а второй образец переименован в **CellA_LibB**.

Append lib name to all: этот режим добавит в конец имени всех ячеек название библиотеки. Например, **CellA** из **LibA** будет переименован в **CellA_LibA**, даже если не имеется никаких образцов других ячеек по имени **CellA**.

Сохранение библиотек ячеек

Когда дается команда на сохранение библиотеки ячеек в менеджере LAYOUT (при нажимании правой кнопки мыши на библиотеку и выбором **Save Cell Library**), будут сохранены только копии ячеек, которые имеются фактически (имеются в библиотеке). Любые упомянутые модели, которые находятся в других библиотеках, не будут сохранены в этой библиотеке.

Отрицательные слои

Программа LAYOUT поддерживает концепцию отрицательных слоев. При использовании отрицательных слоев, используются обращения к трем различным слоям. Эти три слоя описаны ниже.

Positive Layer (положительные слой) используются согласованно с отрицательными слоями. Идея состоит в том, что отрицательные слои вычитаются из положительных слоев. Положительные слои создаются, добавляя знак «+» в конце имени слоя. Например **LayerA+** является положительным слоем **LayerA**.

Negative Layers (отрицательные слои): которые вычитаются из положительных слоев. Отрицательные слои создаются, добавляя знак «-» в конец названия слоя. Например, **LayerA-** отрицательная версия слоя **LayerA**.

Normal Layers (нормальные слои): слои, которые не вычитаются из отрицательных.

Если включен режим **Union layout shapes**, то вычитание и объединение положительных и отрицательных слоев будут автоматически выполняться при экспорте топологии. Вычитание и объединение выполняется только при экспорте, так что формы на отрицательных слоях рисуют подобно любой другой форме в редакторе топологии.

Чтобы сделать формы видимыми, когда они вычитаются друг из друга, порядок слоев и заполнение цветом рисунков могут быть заданы так, чтобы отрицательные слои вычитались из положительных слоев.

Например, отрицательный слой должен использовать тот же самый тип заполнения, как положительный слой, а цвет заполнения должен быть выбран как фон.

Если слои упорядочивают так, чтобы положительный слой рисовался первым, то, когда рисуется отрицательный слой, создается видимость, что он стирает положительный слой. Если включен режим быстрой штриховки **Fast batch draw** (значение по умолчанию), то слои, которые также имеют положительные и отрицательные номера должны использовать штриховку основных форм для заполнения полигонов.

Пример ниже показывает, как отрицательные слои могут использоваться, чтобы реализовать ячейку для копланарного волновода. Формы этих слоев, испо-

льзуемых для рисования плоскости заземления, нарисованы на положительном слое, в то время как формы, которые применяют для рисования промежутков, используют отрицательные слои (рис. 9.88). Чтобы упростить реализацию ячейки, центральные проводникн рисуются на нормальных слоях сверху прямоугольников, нарисованных на отрицательных слоях. Нормальные слои выводят без другого преобразования.

Рис. 9.89 показывает, как конфигурация выглядит после экспорта при включении режима **Union layout shapes**.

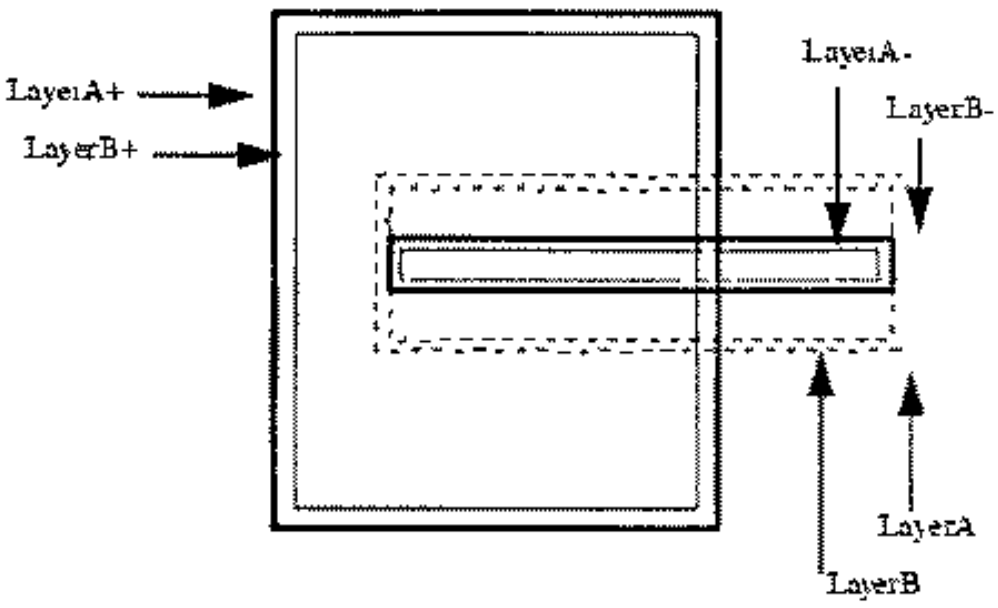


Рис. 9.88. Распределение слоев для отдельных форм по версиям

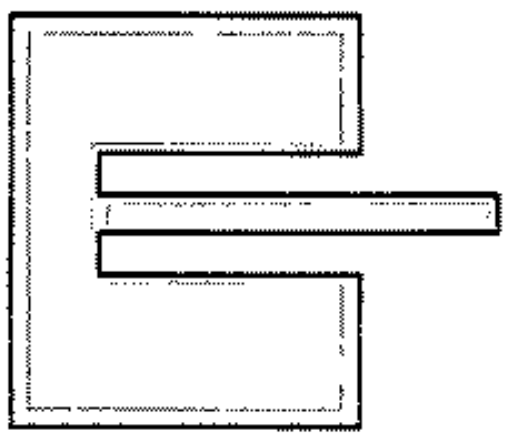


Рис. 9.89 Объединение форм при экспорте образцов копланарного волновода

Экспорт топологий копланарных волноводов

При экспорте топологии копланарного волновода, который использует отрицательные слои, должен быть включен режим **Union layout shapes**, а режим **Subcircuits as instances** отключен.

Режим **Union layout shapes** дает возможность объединения формы и вычитания отрицательного слоя, что необходимо для экспорта корректной топологии элементов компланарного волновода.

Режим **Subcircuits as instances** должен быть отключен так, чтобы объединенные и вычитаемые слои охватили все уровни иерархии. Например, должна быть возможность вычесть отрицательные слои в подсхемах низшего уровня из форм на высших слоях более верхнего уровня.

Создание ПФО (промежуточный фотооригинал)

ПФО это комплект масок, которые используются в производстве рабочих шаблонов. С помощью рабочих шаблонов обрабатывают пластины — это при контактной фотолитографии. Если применяется более современная проекционная фотолитография — то обходятся без рабочих шаблонов, а используют сразу ПФО.

Имеются несколько различных методов, которые могут использоваться для создания топологической маски, которая содержит ряд других топологических рисунков (ретиклов).

Рекомендуется, чтобы ПФО было «собран» в редакторе **Layout View Editor**, а не в редакторе **Artwork Cell Editor**. Это объясняется тем, что там имеется большее количество опций для экспортирования топологии. Когда используется **Layout**

View Editor, библиотеки сохраняются из окна Layout Manager. Библиотеки, собранные с помощью редактора эталонов Artwork Cell Editor не включают ячейки топологии из других библиотек. Чтобы объединять ячейки топологии из нескольких библиотек, топология должна экспортироваться из **Layout View Editor**. Другой метод монтажа ПФО состоит в том, чтобы сформировать ее в редакторе **Artwork Cell Editor** как одну большую исходную эталонную ячейку (artwork cell), и затем перевести эту исходную ячейку в редактор **Layout View Editor** и экспортировать ПФО из топологического редактора **Layout View Editor**.

Первый шаг в создании ПФО состоит в создании пустой схемы, и открытии топологии для этой пустой схемы (топология открывается в редакторе **Layout Editor**).

Если схема, которая будет добавлена к ПФО, находится в том же самом проекте, добавляется подсхема в пустой схеме так, чтобы полная топология схемы появилась в окне топологии. Это может быть повторено для любых других цепей, которые должны быть добавлены из проекта.

Если топология схемы, которая должна быть добавлена к ПФО, зафиксирована во внешнем файле GDSII, то импортируйте файл GDSII как библиотеку в **Layout Manager**. При импортировании внешних файлов, важно, что слой картографирования виден устройством правильно так, что импортированные GDSII слои заканчиваются на правильных слоях при импорте. После того, как GDSII библиотека правильно импортирована в Layout Manager, любой образец в импортированной библиотеке может быть добавлен к ПФО из окна **Layout Manager**. Чтобы делать это, выберите импортированную GDSII библиотеку в Layout Manager, и затем перетащите и опустите желательную ячейку в окно **Layout Editor** из нижней панели окна **Layout Manger**.

Как только все элементы топологии и ячейки эталонов (artwork cell) помещены в окно **Layout Editor**, они устанавливаются для формирования ПФО. Использование точек притяжения и/или ввода координат значительно упрощает процесс сдвига отдельных объектов в пределах фотооригинала.

Как только ПФО собран в схемном редакторе, он может экспортироваться согласно правилам экспорта топологии.

9.8. Редакторы топологии в MWO

В MWO имеются три редактора топологии:

- **Layout View Editor** —редактор общей топологии;
- **Artwork Cell Editor** — редактор топологических ячеек;
- **EM Layout Editor** — редактор топологии EM моделятора.

Большинство функциональных возможностей и инструментов рисования — одинаковое для всех трех редакторов, хотя имеются некоторые различия. Рассмотрим свойства этих редакторов по отдельности, а потом сравним их назначения и возможности.

9.8.1. Редактор топологии (Layout View Editor)

Редактор топологического представления используется, чтобы видеть топологию схемы. Редактор топологии (рис. 9.90), открывается, активизируя схематическое окно **Schematic** и выбирая команду **View Layout** из инструментальной панели, или **Schematic > View Layout** из меню. Это — основной топологический редактор в

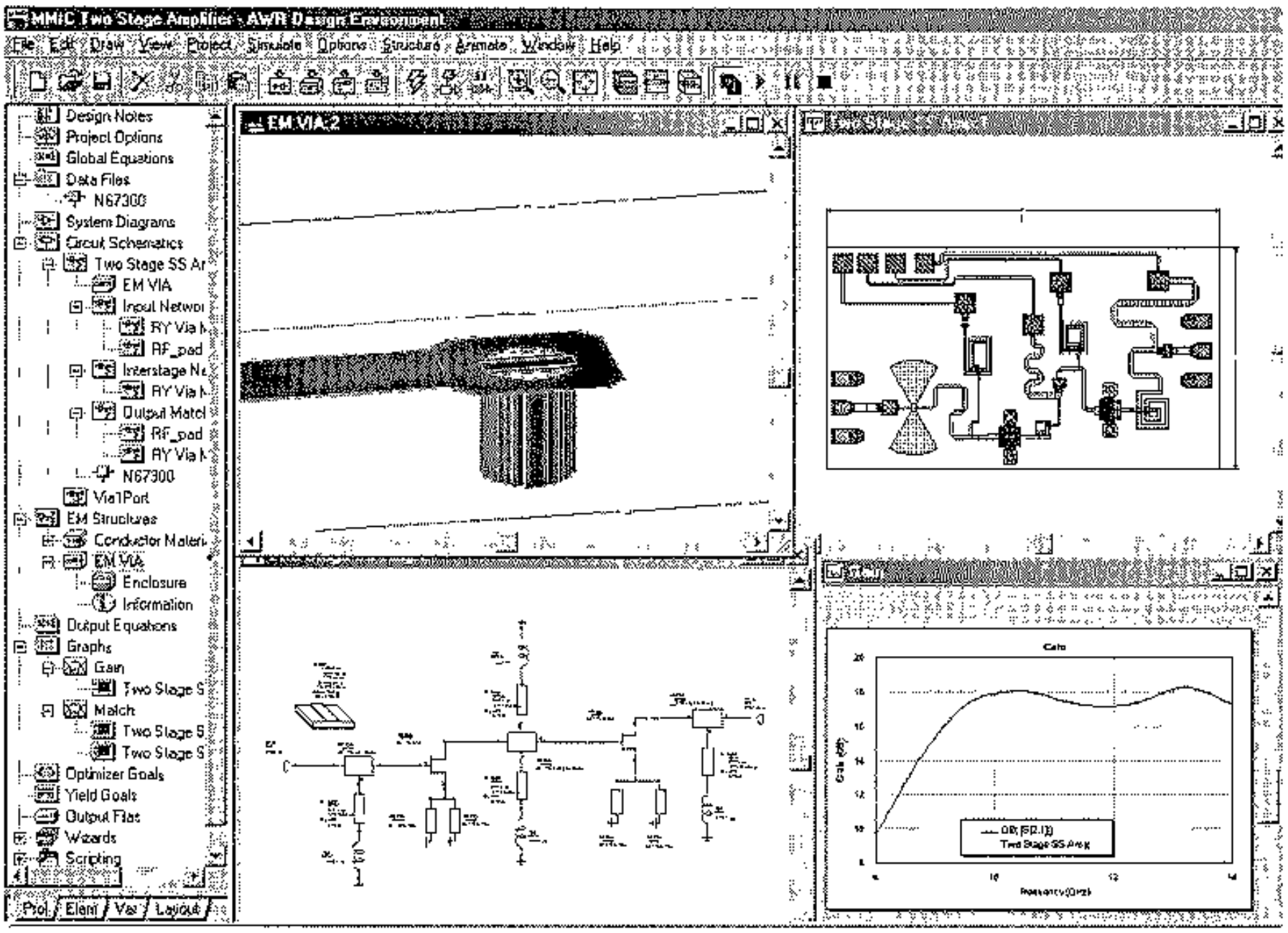


Рис. 9.90. Схема усилителя, часть которой (элемент VIA) показан в редакторе **EM Layout Editor**, а вся топология создается в **Layoul View Editor**

MWO. Изменения в параметризированных топологических объектах в этом редакторе будет обновлять значения параметров схемы в окне **Schematic.**

9.8.2. Редактор топологических ячеек (Artwork Cell Editor)

Редактор топологических ячеек служит для создания библиотеки собственных топологических ячеек и выполняет операции импортирования ячеек из библиотек других форматов. Файлы в формате GDSII (с расширением.gds) и DXF (с расширением.dxf) можно импортировать в MWO через редактор топологических ячеек.

Имеются три способа перевести объект ячейки эталона (другого формата) в окно **Layout View Editor:**

1) **Drag and Drop**: объекты в библиотеке ячеек эталонов можно перетаскивать в **Layout View Editor** или окно **Artwork Cell Editor**, выбирая название библиотеки в окне **Layout Manager** и перемещая объект из нижней панели Layout Manager. Если ячейка помещена в редактор Artwork Cell Editor, получающаяся в результате ячейка эталона (artwork cell) будет иерархическая, когда создана таким образом. Каждая ячейка эталона, которую перемещают в отредактируемую ячейку эталона, помещена как ссылка на перемещаемую копию эталона. Если перемещаемый образец — не является частью той же самой библиотеки, то окончательная библиотека будет иметь зависимость от другой библиотеки. Также, когда библиотека сохранена через **Layout Manager**, любые ячейки из других библиотек не будут записаны как часть библиотеки.

2) **Copy and Paste**: объекты в библиотеке ячеек эталонов могут быть скопированы и вставлены в окно **Layout View Editor**. используя команды обычного копирования, из меню **Edit**.

3) **Associate Artwork Cell with Schematic Element (связывание ячейки эталона с элементом схемы)**: из окна Schematic выберите элемент или подсхему, сделайте правый щелчок мыши, и выберите **Change Layout Cell** из опускающегося меню. Названия всех объектов ячеек с тем же самым номерами числов портов появятся в диалоговом окне. Выберите название и нажмите кнопку **OK**.

Имеются два типа ячеек, которые могут быть созданы в редакторе ячеек.

1) **Artwork Cell Object**: объект ячейки эталона состоит из одного или большего количества многоугольников. Объекты ячейки эталона могут быть созданы в редакторе ячейки эталона, или они могут быть импортированы из файла DXF или GDSII. Меню **Layout** или инструменты рисования можно использовать, чтобы вызвать функции рисования в редакторе.

2) **Artwork Cell Object with Ports**: ячейка эталона с портами может быть создана из любой оригинальной ячейки, прибавляя порты к полигонам, чтобы определить фаски и точки соединения. Эти точки соединения соответствуют выводам схематического элемента или узлам подсхемы.

9.8.3. Редактор топологии при решении электромагнитных задач

Редактор **EM Layout Editor** используется для рисования, послойно, форм анализируемого устройства и выполнения EM анализа. Имеются три способа получить топологию в EM Layout Editor:

1) **Import a File**: топология может быть непосредственно импортирована как EM структура. Выберите объект **EM Structures** из дерева проекта, сделайте щелчок правой кнопки мыши, и выберите **Import EM Structure** из меню. Типы файлов, которые могут быть импортированы, будут в списке: .em, .geo, .dxf и .gds.

2) **Draw the Layout**: рисование топологии, используя команды рисунка из меню;

3) **Copy and Paste**: копирование и вставка из редакторов Artwork Cell Editor или Layout Editor. Чтобы скопировать и вставить из Artwork Cell Editor или Layout Editor в EM Layout Editor, должна быть сконфигурирована таблица картографирования слоя EMSight из окна Layer Setup.

Имеются три способа экспортировать схему из EM Layout Editor:

- выбором названия нового объекта структуры EM из дерева проекта. Сделайте щелчок правой кнопкой мыши и выберите **Export EM Structure**. Имеются четыре доступных типа файла (.em,.geo,.dxf,.gds);
- копированием и вставкой из EM Layout Editor в топологический редактор Cell Editor или Layout Editor (рис. 9.90). Команды копирования и вставки используют первую описанную карту соответствия EM-слоев (EM layer mapping) для колирования форм в Layout View Editor или Artwork Cell Editor;
- вставкой новой EM структуры как подсхемы в окне Schematic, для чего откройте окно Layout Editor для топологического представления и EM структура станет дополнением к другим топологическим ячейкам, связанной в проекте, объединяющем подсхемы.

Редакторы **Layout View Editor** и **Artwork Cell Editor** почти идентичны. Рассмотрим основные особенности этих редакторов.

Artwork Cell Editor рисует формы компонентов на своих, относящихся к модели, слоях, в то время как **Layout View Editor** рисует и редактирует формы на рисуемых слоях, относящихся к общей конструкции. Если выбрана закладка **Layout**, активизируется **Layout Manager** и слои, которые используются в Layout View Editor или Artwork Cell Editor, будут видимы в нижнем окне Layout Manager (рис. 9.91). Если активен **Layout View Editor**, то на слоях будут выводиться рисунки форм. Если активен **Artwork Cell Editor**, то показанные слои будут моделируемые.

Artwork Cell Editor имеет дополнительный инструмент рисования стыковочных граней.

Artwork Cell Editor может использоваться только для создания и редактирования статических форм (полигоны, эллипсы, тексты, стыковочные грани и т. д.). Layout View Editor может включать статические формы, а также топологические ячейки, которые связаны с элементами схемы (такие как параметризованные топологические ячейки типа микрополосковых линий).

Геометрия, созданная в **Artwork Cell Editor,** сохраняется в стандартных геометрических форматах (или GDSII или DXF). Это показывает различия между этими двумя редакторами. Например, в GDSII не имеется эллиптических объектов и поэтому, если эллипс создан в Artwork Cell Editor и сохраняется, он будет преобразован в многополюсник.

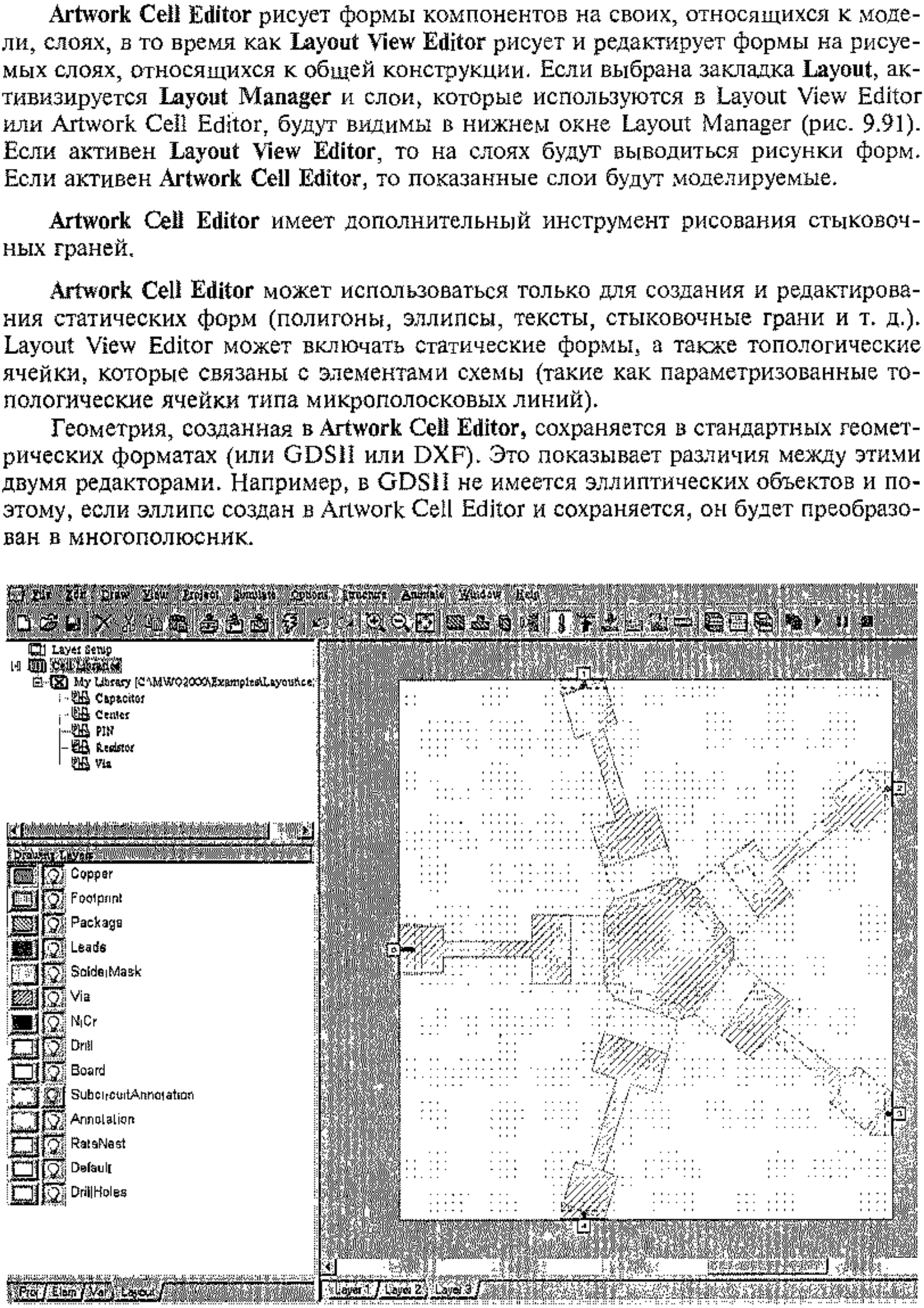


Рис. 9.91. Двумерное представление топологии сумматора мощности в редакторе **EM Layout Editor**

При создании топологии можно использовать группировку объектов, чтобы создать геометрию в Artwork Cell Editor, но группировка будет потеряна при операции сохранения ячейки (хотя вся достоверная геометрия будет сохранена). Группы не сохраняются в ячейке оригинала, когда не имеется никаких групповых объектов в GDSII.

EM Layout Editor существенно отличается от **Layout View Editor** и **Artwork Cell Editor**, хотя многие из функциональных возможностей редактирования — те же самые. Основные различия между **EM Layout Editor** и другими двумя редакторами — следующие:

- в редакторе **EM Layout Editor** слои соответствуют рисункам на диэлектрических слоях с различными Z-координатами. Эти слои изменяются, когда открывается закладка Layout внизу окна **EM Layout Editor**;
- физически существующий корпус показывается в редакторе **EM Layout Editor** (рисуется как прямоугольник);
- многие из инструментов рисования, которые имеются в других редакторах, пока не доступны в **EM Layout Editor** (рис. 9.92). Доступные инструменты рисования подобны соответствующим инструментальным средствам в других топологических редакторах. Если более расширенные функциональные возможности рисования необходимы при создании EM схемы, то геометрия может быть создана в другом топологическом редакторе и затем скопирована и вставлена в **EM Layout Editor**.

В этом редакторе имеется возможность для перемещения форм вверх и вниз (операция stackup) и имеется возможность зафиксировать (freeze) все формы, кроме форм на активном слое.

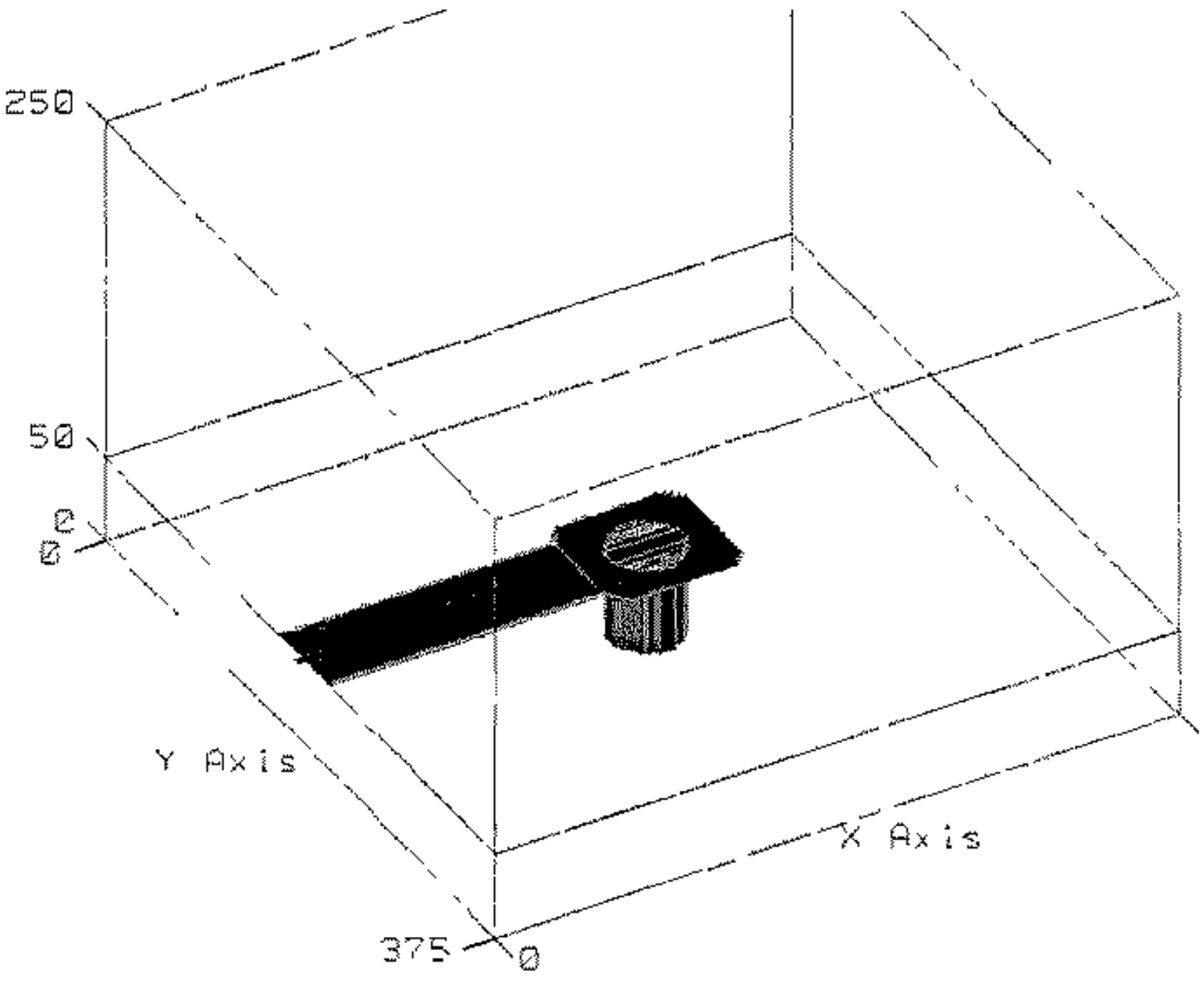


Рис. 9.92. Пример VIA в корпусе (редакторе EM Layout Editor)

9.9. Инструменты черчения топологии

В редакторе **Layout Editor** имеется много инструментов черчения. Меню Layout (рис. 9.93) появляется только тогда, когда активизируются редакторы Layout Editor или Artwork Cell Editor.

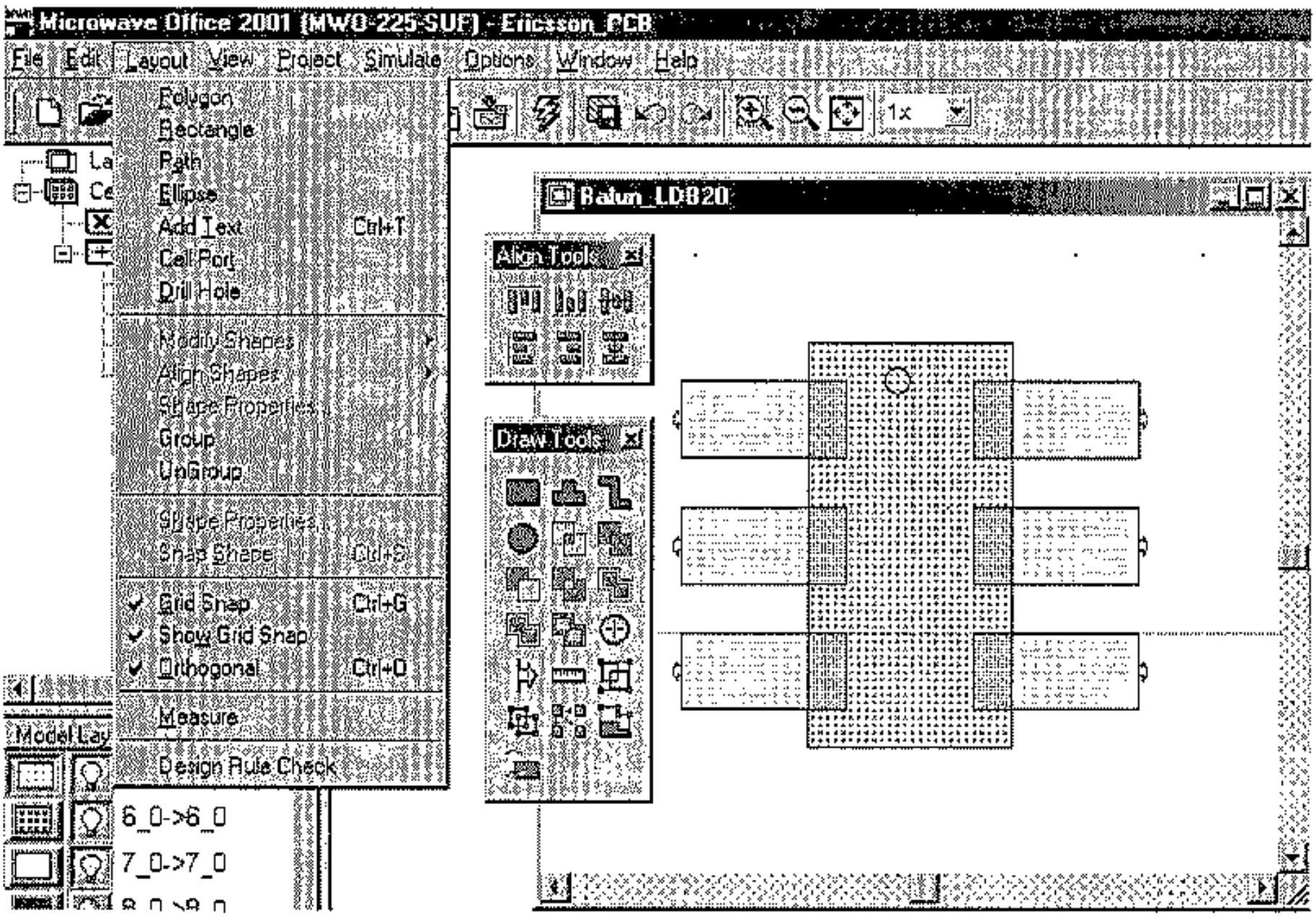


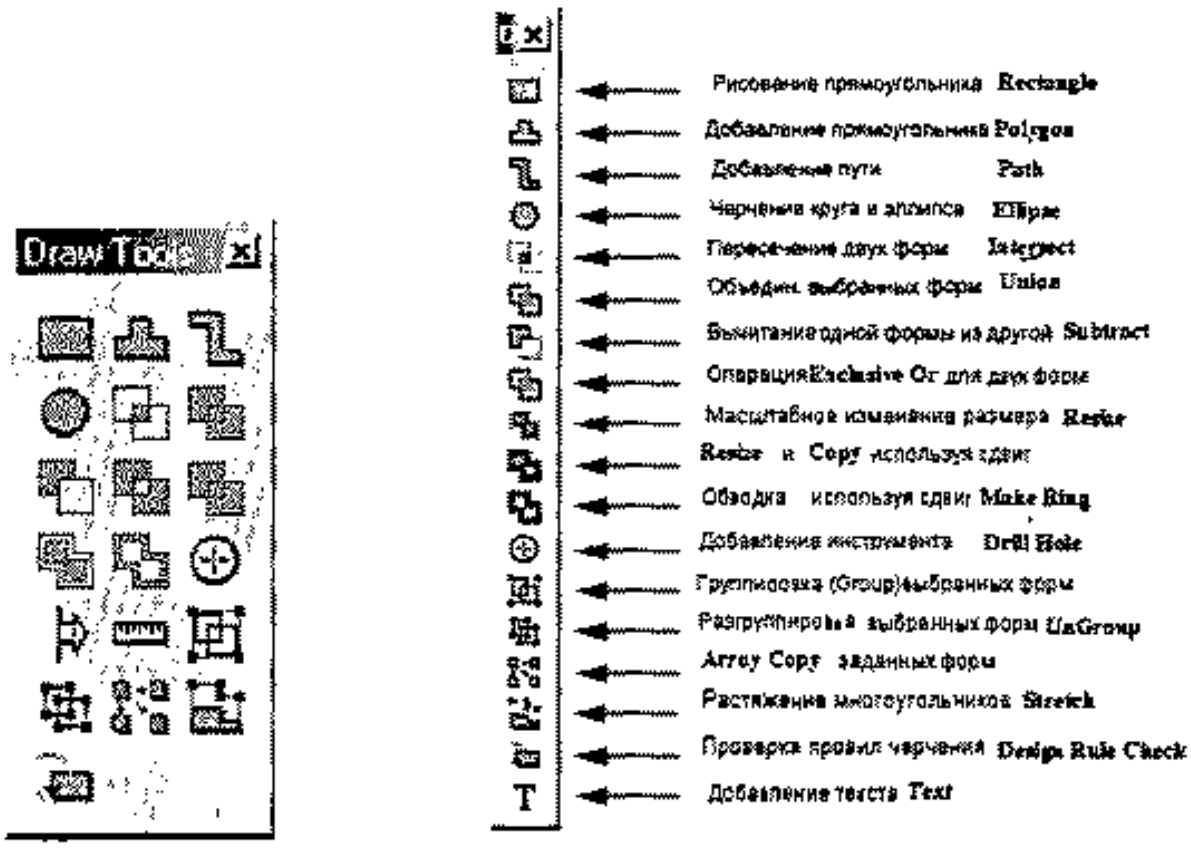
Рис. 9.93. Инструменты черчения многослойной ячейки Polygon — многоугольник; Path — шина, путь; Offset — смещение; Array Copy — копирование для получения массива, задавая dx, dy, число строк и столбцов; Stretch on Area — растягивание; Design Rule Check — проверка КТО (конструктивно-технологические ограничения)

9.9.1. Состав инструментов

Инструменты черчения топологии могут также использоваться, выбирая их на панели **Draw Tools**. Если инструментальная панель Draw Tools не видима, она может быть сделана видимой, выбирая **View > Show Tools > Shape Tools** из меню. Различные инструменты **Draw Tools** показываются на рис. 9.93, 9.94 вместе с коротким описанием.

Полигон (многоугольник) (Ctrl+p)

Чтобы нарисовать полигон, выберите **Layout > Polygon**. Щелкните левой кнопкой мыши, чтобы поместить первую точку в область рисования топологии. Не отпуская кнопку, передвиньте ее в месторасположение следующей вершины (чтобы отменить последнюю точку, можно нажать правую кнопку мыши). Сделайте двойной щелчок левой кнопки мыши, чтобы замкнуть полигон.



а) *б)*

Рис. 9.94. Инструменты рисования

Прямоугольник (Ctrl+b)

Чтобы нарисовать прямоугольник, выберите **Layout > Rectangle**. Сделайте щелчок левой кнопки мыши, чтобы отметить вершину, передвиньте курсор в диаметральную точку, а затем отпустите мышь.

Путь (шина) (Ctrl+L)

Чтобы наметить шину или направление будущей широкой линии, выберите **Layout > Path**. Сделайте щелчок левой кнопкой мыши, чтобы поместить очередные точки шины, и завершите шину двойным щелчком. Чтобы изменять ширину шины, задайте ее в **Options > Default Layout Options**. Ширина шины, тип окончания шины и тип скоса под углом 45° задаются в окне рис. 9.95.

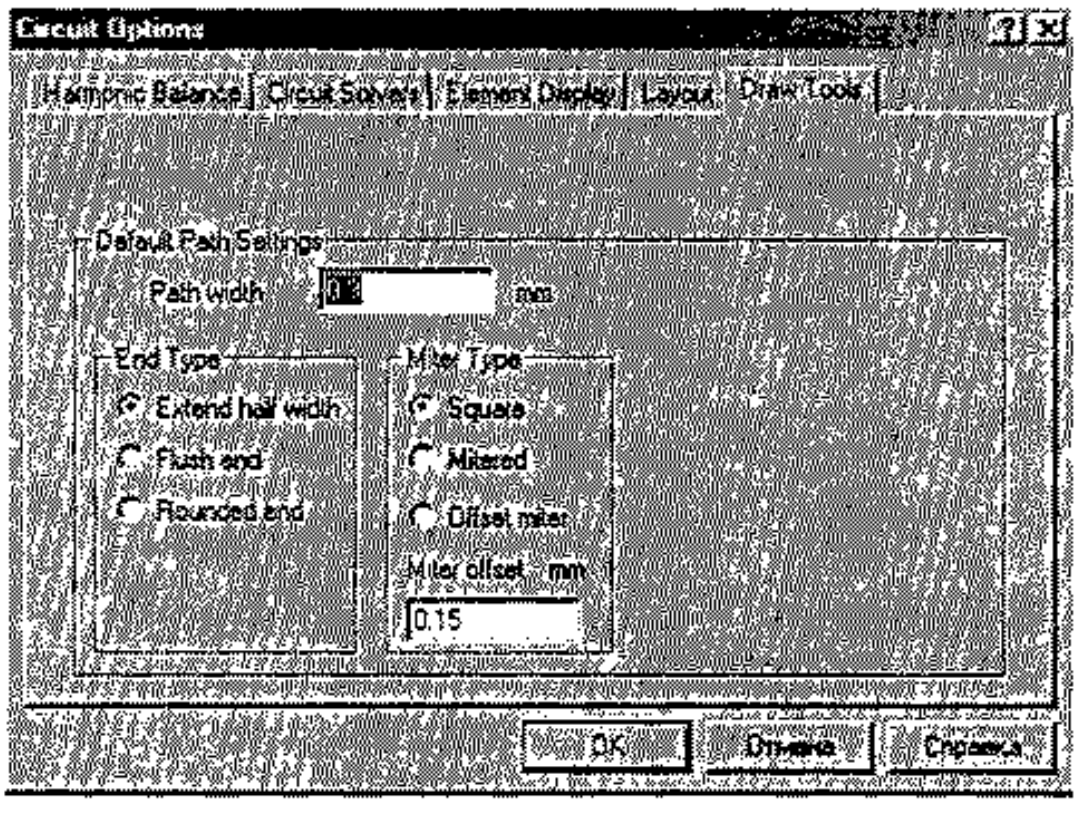


Рис. 9.95. Выбор параметров шины (ширина, скос и окончание)

Ширина шины, тип окончания и тип скоса поворота под углом 45° могут также быть изменены после того, как путь был намечен. Выберите объект Path, нажмите правую кнопку мыши и выберите **Shape Properties**, чтобы вызвать окно **Path Properties** (рис. 9.96).

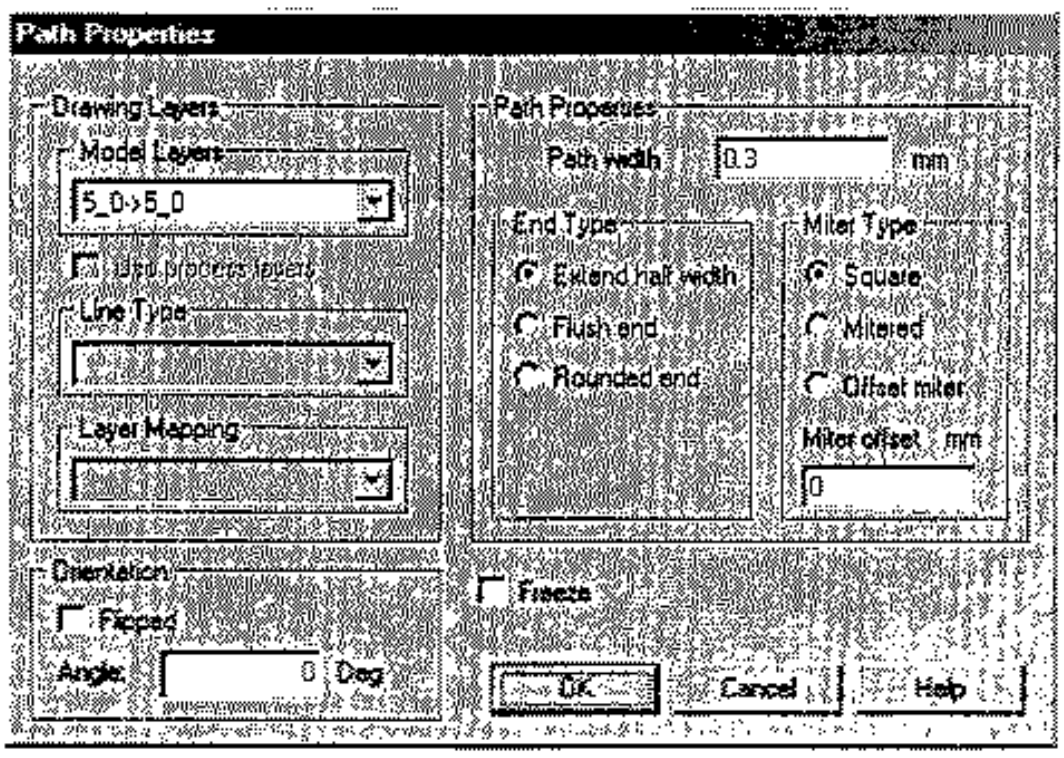


Рис. 9.96. Установка свойств трассирования пути

Эллипс (Ctrl+E)

Чтобы нарисовать эллипс, выберите **Layout > Ellipse** из меню или инструментальной панели. Свойства его можно изменить в окне рис. 9.97.

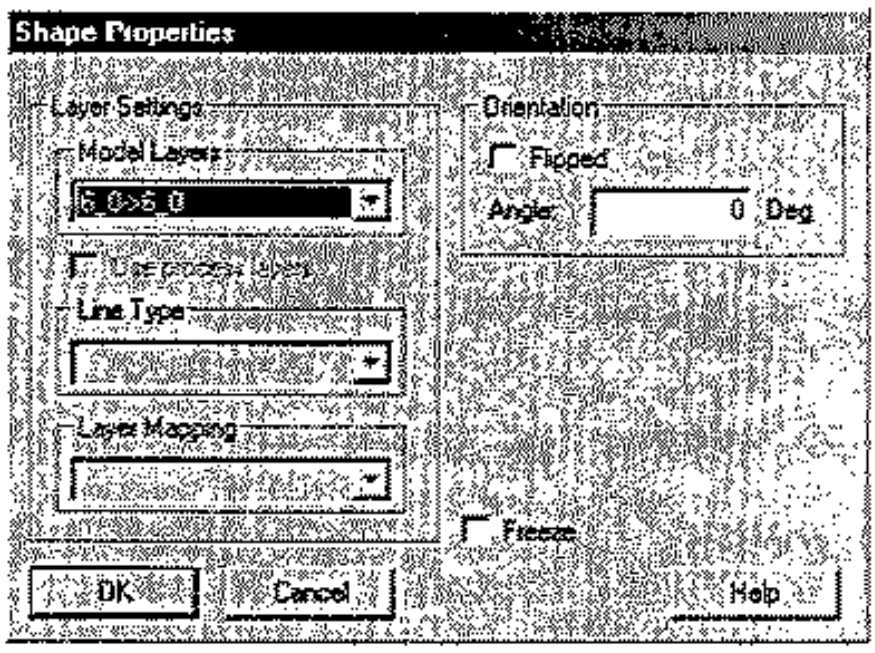


Рис. 9.97. Установка свойств черчения эллипса

Высверленное отверстие

Чтобы изобразить высверленное отверстие, выберите **Layout > Drill Hole**. Поместите перекрестие в нужную точку на рисунке и нажмите левую кнопку мыши. «Высверленное» отверстие будет иметь заданный по умолчанию размер, указанный в файле *.lpf. Чтобы изменить размер отверстия, выберите его и нажмите

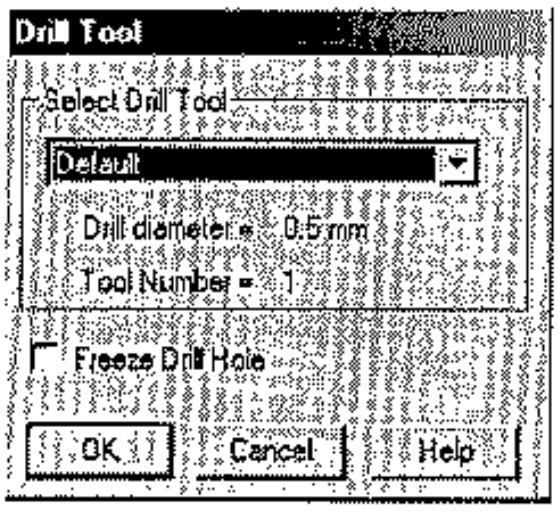


Рис. 9.98. Установки инструмента сверления отверстий

правую кнопку мыши. Выберите **Shape Properties** (свойство формы), а в окне **Select Drill Tool** параметры для различных сверл, установленных в закладке Drill Tools окна Layer Setup (рис. 9.98, 9.99). Выберите сверло и измените диаметр отверстия согласно выбранному сверлу.

Для того чтобы добавить новое сверло, выберите **Options > Drawing Layers** из меню или двойным нажатием на **Layer Setup**. Выберите закладку **Drill** в окне. Выберите **New Drill Type** и напечатайте имя, номер и диаметр нового сверла.

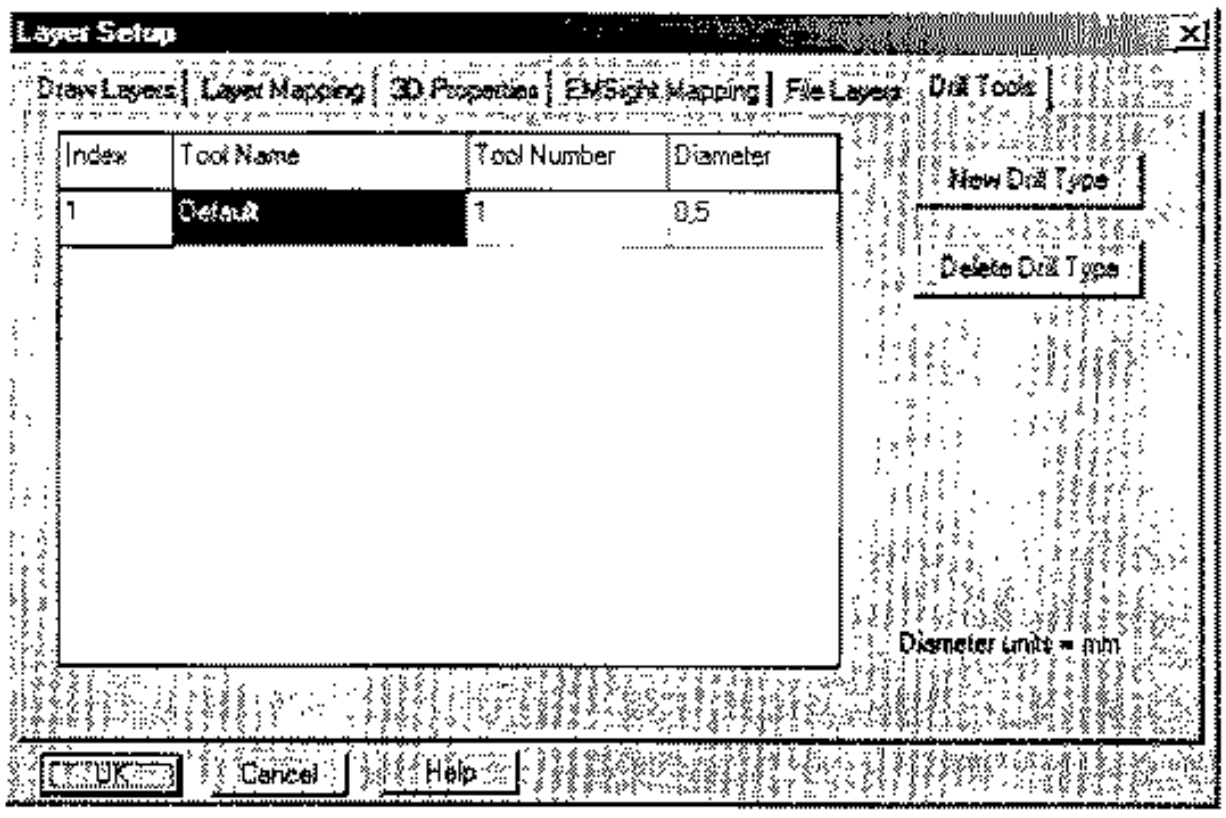


Рис. 9.99. Установка инструмента сверления (имя, номер и диаметр)

Область 3D-захвата (3-D Clip Area)

Эта область 3D-захвата используется, чтобы создать прямоугольную область в топологии и отсечь трехмерный рисунок схемы. Это может быть полезно для просмотра сечений конструкции в трехмерном виде.

Добавление текста на чертеж (Ctrl+T)

Текст может быть добавлен к схеме командой **Layout > Add Text** из опускающегося меню или инструментальной панели, и затем поместив курсор в топологии, где должен быть введен текст. Как только мышь нажата, появляется окно редактирования и текст может быть напечатан в этом окне. Закончив ввод текста, нажмите **Enter**. Свойства текста будут соответствовать параметрам, заданным по умолчанию. Чтобы изменять заданные по умолчанию параметры текста, выберите **Layout > Default Font** из меню. Заданный по умолчанию шрифт установлен из диалога.

Для шрифта можно установить следующие параметры.

- **Font Type**: тип шрифта должен быть Windows True Type Font. Только Шрифты True Type, которые в настоящее время установлены в системе, находятся в списке шрифтов;

- **Font Style**: шрифт может иметь выделение полужирным или курсивом;
- **Font Height**: высота шрифта.

Как только текст размещен, он может быть отредактирован в окне **Shape Properties** (рис. 9.100).

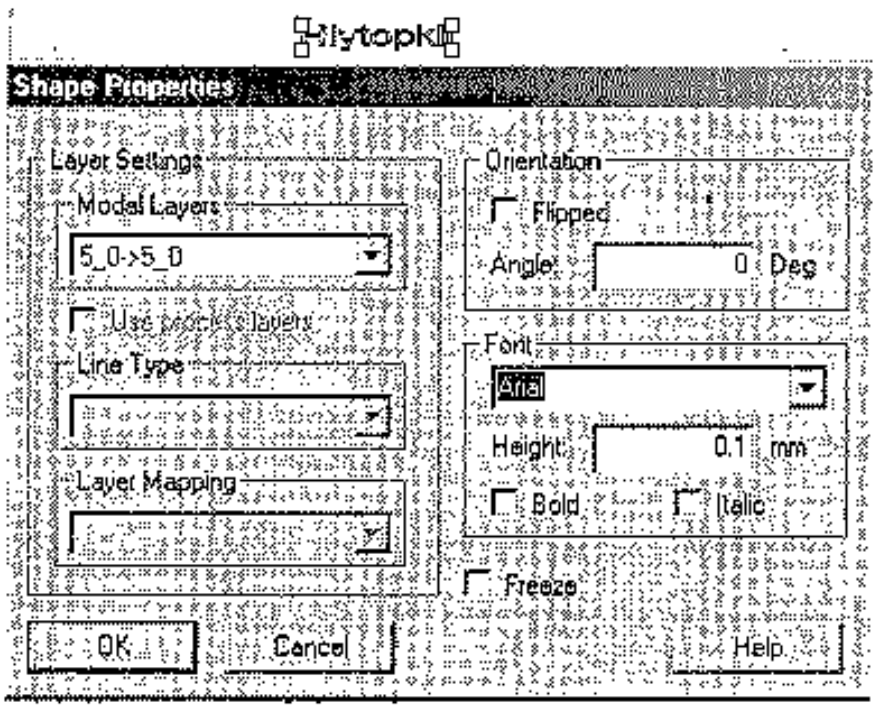


Рис. 9 100. Установки параметров форм шрифтов

Имеются дополнительные свойства, которые могут изменить заданный по умолчанию диалог шрифтов:

- **Drawing Layer**: выбор и спецификация слоя, на котором должен быть нанесен текст. Если текст добавляется в режиме работы Artwork Cell Editor, тогда должен быть определен слой моделирования;
- **Orientation**: угол, на который текст наносится относительно вертикальной линии, может быть определен, наряду со свойством текста;
- **Freeze**: текст может быть зафиксирован от случайного изменения и перемещения.

Текст схемы рисуется в прямоугольнике на указанном слое рисунка (или моделируемом слое в **Artwork Cell Editor**). Полигоны автоматически генерируются согласно шрифту True Type Font. Если не имеется подходящего шрифта, может использоваться другое программное обеспечение для создания шрифта. Если текст находится в **Artwork Cell Editor**, то он будет преобразован в полигоны, когда исходная ячейка сохранена в библиотеке ячеек оригиналов.

9.9.2. Режимы редактирования

Следующие два параметра используются многими инструментальными средствами рисования и команд.

Grid Snap (привязка к сетке)

Привязка к сетке может быть включена или выключена, выбирая режим **Layout > Grid Snap** из меню. Когда привязка к сетке включена, рисуемые формы привязываются к узлам сетки. Операции редактирования (типа перемещения формы) будут также выполняться дискретно. Например, если размер привязки к сетке равен 5 микрон, то при перемещении объекта может быть только на расстояния, кратные 5 микрон (um). Сетка может быть изменена фиксированными кратными

числами, выбирая кратное число **Grid Snap** из **Set Grid Snap Multiple**. Например, если Grid Snap = 5 мкм и выбран умножитель **2x**, то привязка будет выполняться через расстояние 10 мкм.

Ortogonal

Режим **Ortogonal** может быть включен или выключен, выбирая **Layout > Orthonal** в меню. Этот режим, прежде всего, используется с редактированием полигона. Когда режим **Ortogonal** включен, это ограничит растяжение сторон только в ортогональных направлениях.

Выбор формы

Объекты в топологии выбираются, нажимая на них мышью. Выбранные объекты рисуются в выбранном прямоугольнике с маркерами на углах объекта. При выполнении селекции полигона при перекрытии слоев, по умолчанию выбирается самый маленький полигон. Это полезно для редактирования сложных рисунков типа ячеек FET. Щелчок на объекты с одновременным нажатием **Ctrl**, заставит выбранные объекты циклически повторяться по всем объектам по щелчку. Клавиша **Ctrl** также используется, чтобы включить точки привязки (в центре), так что использование этого метода выбора может также заставлять курсор мыши сдвигаться к точкам привязки формы.

Множественная селекция

Несколько объектов одновременно могут быть выбраны в любом из редакторов схемы, используя один из следующих четырех методов:

- щелканье последовательно на каждый объект, удерживая клавишу **Shift** выберет все нажатые объекты;
- щелканье в область экрана без объектов, а затем перемещение выбранной прямоугольной области по объектам, выбирая и активизируя все объекты, которые попадают в область селекции. Любые объекты, которые полностью не попадают в область селекции, не будут выбраны;
- если удерживается клавиша **Shift** при перемещении области селекции, тогда будут выбраны все объекты, которые касаются области селекции (обычная селекция выбирает только объекты, которые полностью включены в область селекции);
- если удерживаются клавиши **Ctrl** и **Shift**, то выбранная область очень похожа на нормальную область селекции, кроме первого положения при выборе области на вершине существующего объекта. Это может быть полезно для выполнения выбора области в плотных схемах.

Выбор и редактирование нескольких объектов

Свойства нескольких топологических объектов могут быть изменены сразу. Чтобы изменять свойства для нескольких объектов топологии, выберите группу объектов, используя один из методов, поясненных выше. Сделайте щелчок правой кнопки мыши, чтобы вызвать опускающееся меню, и выберите **Shape Properties**. Все соответствующие изменения будут сделаны одновременно ко всем выбранным объектам.

9.9.3. Точки притяжения

Точки притяжения дают быстрый и простой способ создания, изменения положения и выравнивания форм в топологии. Точки притяжения появляются при удерживании клавиши **Ctrl** и перемещении указателя по объектам в схеме. Если операция рисования не выполняется, то нажатие клавиши **Ctrl** заставит курсор притягиваться к вершине, граням, пересечениям, средним точкам или контрольным точкам выбранных объектов. Различные типы точек притяжения имеют различные силы. Более сильные точки притяжения предпочтительнее более слабых. Например, удерживая клавишу **Ctrl**, курсор зафиксируется к граням выбранного полигона, но если курсор смещен в угол, то курсор зафиксируется в углу даже при том, что он уже зафиксирован к краю. Рис. 9.101 показывает типичные контрольные точки для выбранной формы многоугольника. Заметим, что пересечения граней формы — также контрольные точки притяжения.

Точки притяжения могут использоваться в различных случаях (рис. 9.102). Первый пример, описанный ранее (удерживание клавиши **Ctrl**, когда никакая операция рисования не происходит), полезный для установки базовой точки. При перемещении формы, если вы сначала зафиксируете курсор в углу формы, очень просто переместить форму так, что угол точно выровняется с углом, средней точкой, краем, или пересечением другой формы.

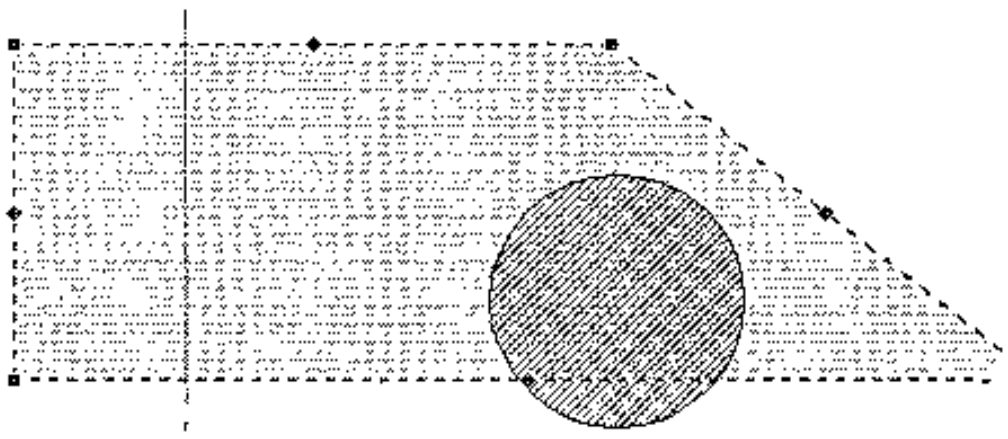


Рис. 9.101. Подготовка создания сложных форм

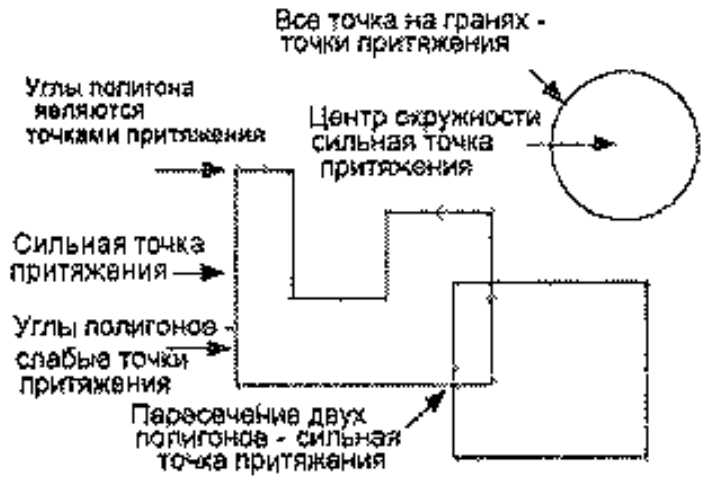


Рис. 9.102. Точки притяжения и сильные точки притяжения

Установка начальной базовой позиции, используя клавишу Ctrl работает только с выбранными формами, в то время как все другие применения точек притяжения работают на любой форме (выбранной или невыбранной).

Некоторые из более полезных использований точек притяжения описаны ниже.

Moving Objects: при перемещении формы в схеме, удерживайте клавищу **Ctrl**, и двигайте курсор до появления точки притяжения на выбранной форме. Тогда нажмите и тяните эту форму. Указатель будет теперь захвачен к точке притяжения выбранной формы. Если клавиша **Ctrl** удерживается во время операции протяжения, курсор зафиксируется к любой точке притяжения на любом другом объекте (выбранном или невыбранном). Если курсор перемещен в точку притяжения на другом объекте, и мышь отпущена (окончание операции протяжения) тогда точка притяжения на перемещенном объекте и другом объекте будут точно теми же самыми. Например, если точка притяжения на перемешенном объекте — в углу прямоугольника, и точка притяжения на другом объекте — также в углу (и это — прямоугольник) тогда два угла из этих двух прямоугольников будут точно выровнены.

Aligning Edges: грани форм могут быть сделаны совпадающими, перемещая формы и используя грани для точек притяжения.

Centering Ellipses: круг или эллипс могут быть точно центрированы на другой точке притяжения.

Drawing Polygons: точки притяжения могут применяется при рисовании полигона. Чтобы использовать точки притяжения, нажимая клавишу **Ctrl** на точке притяжения, чтобы прибавить новые точки к полигону. Это позволяет полигонам быстро быть нарисованными, точно совпадая с углами, гранями, средними точками или пересечениями любой из существуюших форм.

Drawing Rectangles: точки притяжения могут использоваться, чтобы определить два противоположных угла прямоугольника во время рисования.

Drawing Path: когда используются точки притяжения с инструментом рисования пути, точки оси пути могут быть зафиксированы к любым точкам притяжения, если клавиша **Ctrl** удерживается при рисовании пути.

Rotating Objects: чтобы вращать форму относительно точки (например, вращать ее относительно одного из ее углов), нужно выбирать форму, затем сделать щелчок правой кнопкой мыши на выбранном объекте и выбрать команду **Rotate**. Если клавиша удерживается **Ctrl**, в то время как курсор перемещается, то курсор притянет любую точку притяжения к себе или любой другой форме. Как только курсор зафиксируется на точке притяжения, нажмите клавишу мыши и тяните линию вращения, чтобы вращать объект относительно точки притяжения.

Flipping Objects: чтобы зеркально отразить объект, щелкните форму относительно указанной точки или ребра (например, щелкните одну из ее граией в той же самой позиции), выберите форму, сделайте правый щелчок на выбранной форме и выберите **Flip** из быстрого меню. Если клавиша **Ctrl** удерживается, в то время как указатель перемещен, то курсор зафиксируется к любой точке притяжения. Как только курсор зафиксирован на точке притяжения, нажмите мышь и прорисуйте линию зеркального отражения.

Measuring: линейка для измерения расстояния на чертеже всегда использует точку притяжения (клавишу **Ctrl** не нужно удерживать). Это делает измерение намного проще.

Adding Cell Ports: при добавлении лицевых поверхностей Cell Port к ячейкам оригинала (фотошаблона) в редакторе ячейки оригинала, очень важно убедиться, что Cell Port точно совпадает с гранями соединяющихся форм в ячейке оригинала. Если лицевая поверхность Cell Port не точно совпадает, то могут иметься малые промежутки в окончательной топологии. Точки притяжения могут использоваться, чтобы определить две конечных точки лицевой поверхности схемы во время операции рисования лицевой поверхности.

Вращение и зеркальное отражение

Чтобы произвольно вращать объекты в схеме, выберите их и сделайте правый щелчок мышью, выберите **Rotate** из опускающегося меню и перемещая мышь в желательное направление. Вращение использует угол установки вращения в заданном по умолчанию опускающемся меню. Альтернативный метод вращения со-

стоит в том, чтобы выбрать объект, сделать правый шелчок мыши, выбрать **Shape Properties** и затем вводить угол вращения в поле. Система позволяет выполнить произвольное угловое вращение с шагом 0,1°.

Чтобы перевернуть объекты в топологии, выберите объекты, сделайте правый щелчок мыши, выберите Flip из меню, а затем нажмите левую кнопку и двигайте мышью. Линия, отмеченная нажатием курсора и операция протяжения определит линию, относительно которой объект схемы зеркально отражается.

Точки притяжения или координатный ввод могут также использоваться во время вращения и зеркального отражения для более точного управления положением объектов.

Редактирование полигонов

Полигоны могут быть нарисованы в поле топологии, используя мышь, или покоординатный ввод. Чтобы нарисовать полигон выберите **Layout > Polygon** из меню или инструментальной панели. Первая точка может быть введена или шелканием вниз в нужном положении и отпусканием мыши или, если клавиша **Tab** нажата, координаты первой точки вводятся непосредственно. Для следующей точки в полигоне, новая точка может быть добавлена графически с помощи мыши (точки притяжения могут использоваться, чтобы графически ввести точные координаты), или нажимая клавишу **Tab**, чтобы открыть диалог **Enter Coordinates**. Если удерживается клавиша **Shift** при добавлении новых точек, то добавленный сегмент будет расположен вертикально, горизонталью или под углом 45°. Этот метод можно использовать для всех точек в полигоне. Неверно внесенные точки можно удалять, щелкая правой кнопкой мыши во время операции рисования. Последняя точка может быть введена, используя любой из следующих методов. Если мышь дважды нажимается, будет добавлена точка к полигону, и он будет замкнут. Если мышь нажата точно на первой точке, то полигон замыкается. Если используется покоординатный ввод, введение значения (0,0) замкнет полигон.

Перемещение точек или граней

Чтобы сдвинуть точку или грани полигона, сделайте двойной щелчок на полигоне, — это переведет полигон в режим редактирования (когда полигон находится в режиме редактирования, он имеет ромбики притяжения на каждой вершине и в каждой средней точке). Сделайте щелчок на границе и протяните один из ромбиков притяжения. Прямоугольники, пути и эллипсы могут быть изменены подобным способом.

Растяжение области

Команда растяжения области может использоваться, чтобы растянуть части выбранных форм. Чтобы запустить эту команду выберите **Layout > Modify Shapes > Stretch Area** из меню или из инструментальной панели. Когда команда активна, щелкните и переместите мышь по области, выбирая точки на выбранных формах, которые находятся внутри области. Выбранные точки будут обозначены цветом селекции (обычно темный цвет). Щелкание и перемещение по области могут быть повторены, чтобы прибавить больше выбранных точек, если это нужно. Точки могут также быть выбраны, щелкая (вниз а затем отпуская) непосредственно на вершине формы. Когда точки выбраны, ранее выбранные точки также останутся выбранными. Если клавиша **Shift** удерживается при перемещении по области, то точки в пределах области исчезают. Точно так же, если клавиша **Shift**

удерживается и выбрана вершина формы, эта точка исчезает. Как только все нужные точки были выбраны, нажимают вниз (и удерживают) мышь на одной из выбранных точек, перемещая курсор на верхний левый угол. Когда курсор превращается в перекрестие, нажмите и протяните вершину, чтобы переместить все выбранные точки. Когда мышь отпускается, то все выбранные точки будут сдвинуты на то расстояние, на которое мышь была перемещена. Если используется координатный ввод, то нажмите **Tab**, в то время как кнопка мыши удерживается на одной из выбранных точек, и диалог Enter Coordinates откроется, чтобы задать сдвиг в относительных или абсолютных координатах.

9.9.4. Черчение с помощью ввода координат

Большинство форм можно также нарисовать, используя ввод координат. При этом рисуется форма на одном слое с помощью последовательного ввода координат. Чтобы выполнить координатный ввод, нажмите клавишу **Tab** во время любой операции, которая требует движения мыши, и появится диалоговое окно (рис. 9.103) чтобы вы могли вводить координаты (x, y) как абсолютные или относительные координаты. Вы можете также вводить величины (модуль, угол) в полярной системе координат.

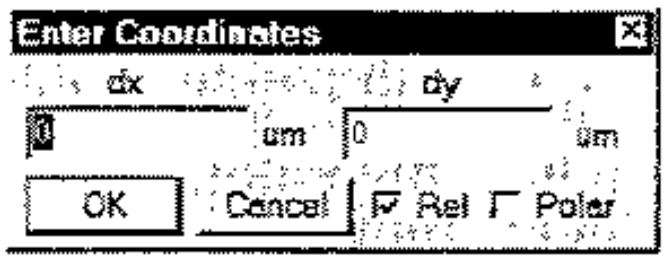


Рис. 9.103. Введение координат точек формы

Координатный ввод работает так, что его можно дополнять обычным редактированием с помощью мыши. Например, при рисовании полигона, некоторые из точек могут быть добавлены мышью, в то время как другие добавлены используя координатный ввод.

Drawing Polygons: ввод координат можно использовать, вводя точные координаты многоугольника, когда он рисуется. Чтобы использовать координатный ввод выберите **Layout > Polygon**. Первая точка может быть введена или щелканьем и отпусканием кнопки мыши в нужной точке, или, если клавиша **Tab** нажата, вводом координаты первой точки непосредственно. Переключатель **Rel** (относительный) в диалоге Enter Coordinates не нужно отмечать для первой точки. После ввода координат в диалоге выберите **OK** (или нажмите клавишу **ENTER**). Для следующей точки в полигоне, снова введите точку графически, нажимая мышью (точки притяжения могут использоваться, чтобы ввести точные координаты) или нажимая клавишу **Tab**, чтобы вызвать диалог Enter Coordinates. Теперь можно вводить относительные координаты (относительно предыдущей точки), отмечая опцию **Rel**. Этот подход может быть продолжен для всех точек в полигоне. Последняя точка может быть введена, используя любой из следующих методов:

- если мышь дважды нажать, то точка в положении щелчка будет добавлена к полигону и полигон будет замкнут.
- если мышь нажата точно на первой точке, то полигон также будет замкнут;
- если используется координатный ввод, относительное значение (0,0) закроет полигон;
- заданное по умолчанию относительное значение в диалоге Enter Coordinates равно (0,0), так что полигон может быть закрыт, нажимая клавишу **Tab**, чтобы вызвать диалог, с последующим нажатием ENTER;
- если координаты введены так, что введенная точка совпадает с первой точкой, то полигон также будет замкнут.

Режим ввода координат предназначен, чтобы сделать возможным ввести весь полигон без мыши. Чтобы ввести полигон без помощи мыши нажмите **Ctrl+P**, чтобы запустить инструмент черчения полигона нажмите **Tab**, затем впечатайте абсолютную координату *X*, нажмите **Tab**, затем впечатайте абсолютную координату *Y*, нажмите **Enter**, чтобы принять точку, нажмите **Tab**, чтобы запустить следующую точку,..., затем нажмите **Tab** и **Enter**, чтобы закрыть полигон.

Drawing Rectangles: координатный ввод может использоваться, чтобы определить одну и/или обе противоположных вершин прямоугольника. Первая точка вводится в абсолютных координатах (или мышью), и далее вторая точка вводится или в относительных или абсолютных координатах (или мышью). Как и в случае рисования полигона, точки притяжения могут использоваться, чтобы точно задать любую точку. Черчение запускается командой **Layout > Rectangle**.

Drawing Ellipse: эллипсы рисуются, задавая прямоугольник, ограничивающий эллипс, так что координатный ввод — аналогичен вводу прямоугольника. Запустите рисование, выбирая **Layout > Ellipse** из меню или инструментальной панели.

Drawing Patb: добавление пути, используя координатный ввод — аналогичен рисованию полигона. Запустите директиву, выбирая **Layout > Patb** из опускающегося меню или инструментальной панели. Геометрическая ось пути выводится подобно полигону. Основная разница в том, что полигон, определяющий геометрическую ось не замыкается, когда директива закончена. Рисование пути может быть закончено, вводя относительное число (0,0) для последней точки при использовании координатного ввода.

Placing Drill Hole: координатный ввод может использоваться, чтобы разместить отверстие. Для этого выберите **Layout > Drill Hole** из меню или инструментальной панели, затем нажмите клавишу Tab, чтобы вызвать диалог Enter Coordinates. Абсолютные координаты, которые вводятся в нем, это положение центра отверстия.

Moving Objects: координатный ввод предоставляет два режима для сдвига объектов в топологии. Чтобы сдвинуть объект, нажмите вниз (и удерживайте) объект с помощью мыши. Вместо перемещения объекта мышью, можно нажать клавишу **Tab**. Тогда откроется диалог ввода координат, в который можно ввести относительные или абсолютные координаты. Если используются относительные координаты, объект будет сдвинут на указанное расстояние. Если используются абсолютные координаты, объект будет помещен в указанную точку. Точка в координатах появляется, если сделать щелчок вниз при использовании абсолютных координат. Если вводятся абсолютные координаты, обычно желательно фиксировать базовое положение к одной из точек притяжения на объекте. Например, чтобы сдвинуть прямоугольник так, чтобы он сместился на угол в (100,100), выберите прямоугольник, удерживайте клавишу **Ctrl** и зафиксируйте курсор на точке заданного угла, затем нажмите вниз левой кнопкой мыши. При удержании кнопки мыши внизу, отпустите клавишу **Ctrl**, затем нажмите клавишу **Tab**, чтобы вызвать диалог Enter Coordinates. Снимите отметку с переключателя **Rel** и введите (100,100) как координаты, затем нажмите **Enter**. Заданный угол прямоугольника будет теперь смещен на угол (100,100).

Stretching Shape Edges: край (или точка) полигона или другой формы может легко быть перемещен на указанное расстояние, используя координатный ввод. Чтобы сдвинуть край полигона, сделайте двойной щелчок на полигоне, чтобы пе-

ревести полигон в режим редактирования (когда полигон находится в режиме редактирования. он имеет квадраты селекции на каждой вершине и ромбы селекции в каждой средней точке), затем нажмите один из ромбиков селекции в одной из средних точек и нажмите кнопку мыши. Затем, нажмите клавишу **Tab**, чтобы вызвать диалог Enter Coordinates. Если координаты введены как относительные, то край будет перемещен на указанное расстояние. Если используются абсолютные координаты, то край будет перемещен до указанной точки. Углы полигонов могут быть растянуты таким же образом. Прямоугольники, пути и эллипсы могут быть изменены подобным способом.

Stretching Areas: команда растяжения области может использоваться, чтобы растянуть части одних или более выбранных форм. Чтобы задать расстояние, на которую область растягивается, можно использовать ввод координат. Чтобы использовать координатный ввод, нажмите клавишу Tab, удерживая кнопку мыши на одной из выбранных точек во время растяжения области. Тогда появится диалог **Enter Coordinates**, чтобы определить сдвиг в относительных или абсолютных координатах.

Copied Object Placement: координатный ввод можно использовать, чтобы скопированные в буфер объекты вставить в топологию. Например, чтобы сделать копию прямоугольника на расстоянии 100 единиц справа от теперешнего его положения, выберите прямоугольник, а затем выполните команду **Copy**, а затем **Paste**. Когда директива **Paste** выполнена, скопированный прямоугольник будет двигаться с указателем мыши. Чтобы поместить его в нужное место, нажмите клавишу **Tab**, затем, введите относительную координату (100,0) и нажмите **Enter**. Скопированный прямоугольник будет теперь смешен от оригинала точно на 100 единиц в направлении X. Если поле **Rel** не отмечено в диалоге Enter Coordinates, то копия будет помещена в абсолютную координату. Опорная точка для абсолютного размещения всегда центр формы.

TRACE Element Routing: топологические объекты TRACE (MTRACE, MCTRACE, и т. д.) могут быть перерисованы по другому пути, рисуя геометрическую ось линии так же, как и она вводилась. Чтобы указывать конец MTRACE или MCTRACE команой выбора маршрута, введите относительную координату (0,0), чтобы завершить команду. Нажатие клавиши **Tab** и клавиши ENTER завершит команду при вводе относительных координат, потому что заданные по умолчанию относительные координаты всегда (0,0).

Rotating about Points: координатный ввод может использоваться, чтобы определить точку, относительно которого объект должен вращаться. Чтобы вращать форму относительно этой точки, выберите форму, щелкните правой кнопкой на выбранном объекте и выберите Rotate из меню. Если клавиша **Tab** нажата, откроется диалог Enter Coordinates, затем может быть введена точка, относительно которой будет выполняться вращение (в абсолютных координатах).

Flipping about Points: координатный ввод может использоваться, чтобы определить линию, относительно которой объект должен зеркально отразиться. Чтобы отразить форму относительно точной линии, выберите форму, сделайте правый щелчок на выбранном объекте и выберите **Flip** из меню. Если клавиша Tab нажата, откроется диалог Enter Coordinates и затем первая точка линии отражения может быть введена в абсолютных координатах.

9.9.5. Измерение размеров

Измерительная линейка появляется нажимая **Ctrl-D** или выбирая инструмент **Layout > Measure**. Линейка автоматически привязывается к точкам притяжения в топологии по мере перемещения мыши. Захват и удержание к точкам притяжения делает измерение проще. Чтобы измерить расстояние между двумя точками, инициируйте линейку и двигайте мышь по направлению измерения. Если имеется вершина формы, средняя точка, край, пересечение или другая точка притяжения около указателя, то указатель автоматически притянется к точке. Затем нажмите левую кнопку мыши на одном конце и двигайтесь ко второй точке, чтобы определить расстояние. По мере продвижения мыщи, она будет притягиваться к точкам притяжения в топологии. Если и первая, и вторая точка зафиксированы к точкам притяжения, то измерен будет точный интервал между двумя точками. Указатель линейки показывает dx, dy и полный интервал. Чтобы выполнить измерение точно по вертикальной линии, горизонтальной или под углом 45°, удерживайте клавишу **Shift** при измерении (рис. 9.104).

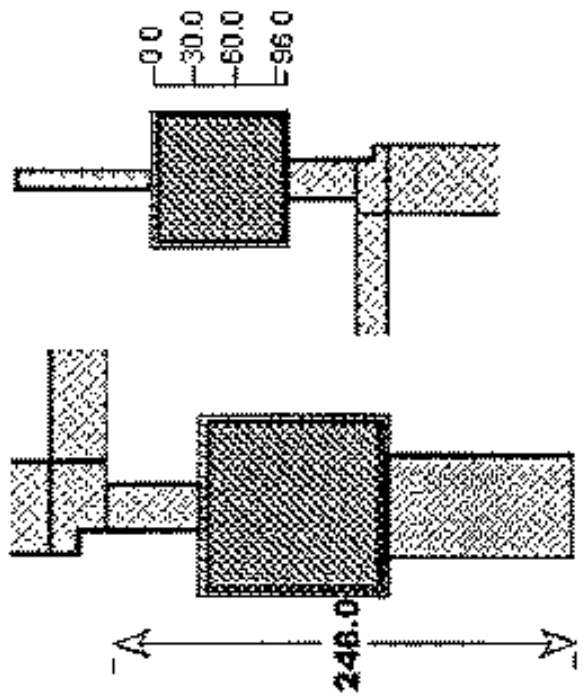


Рис. 9.104. Пример выполнения измерения

Изменение масштаба изображения

Имеются несколько методов для изменения масштаба топологического представления. Различные операции изменения масштаба изображения объясняются ниже.

View All (просмотр всего вида)

Нажимая клавишу **Home** или выбором **View > View All** из меню, представление изменит масштаб изображения так, что вся топология будет видна в окне.

View Area (просмотр области)

Выбирая **View > View All** из опускающегося меню, запустите команду выбора области. Когда указатель принимает форму увеличительного стекла, нажмите ее и выделите желательную область.

Zoom Previous (изменить масштаб изображения на предыдущий)

При нажиме клавиши **End** или при выборе **View > Zoom Previous** из опускающегося меню область просмотра возвращаться к предыдущему состоянию перед последним представлением, когда были даны команды **View All, View Area, Zoom In** (увеличение области), **Zoom Out** (уменьшение области) или **Zoom Previous.**

9.9.6. Операции над формами

Команды модификации формы используются, чтобы изменить полигон или несколько полигонов. Команды зависят от порядка, в котором полигоны выбраны. Можно выделить одновременно несколько форм полигонов, используя команды **Ctrl + щелчок, Shift + щелчок**, и выделяя формы с помощью курсора.

Модификация формы может быть выполнена, выбирая соответствующую директиву из **Modify Shapes** в меню **Layout** или выбирая желательную операцию из инструментальной панели. Возможные операции объясняются ниже. Для команд, которые требуют, чтобы две или больше формы были выбраны, принимается, что форма **A** выбрана перед формой **B**.

Intersection (пересечение): выберите два различных перекрывающихся полигона и эта команда уберет все области, которые не пересекаются. В результате получится один многоугольник, соответствующий области перекрытия (рис. 9.105).

Union (объединение): выберите два различных перекрытых или соприкасаемых полигона, и эта команда объединит области в единый полигон (рис. 9.106).

Subtraction: выберите два различных перекрывающихся полигона и эта команда вычтет зону перекрытия из первого выбранного полигона. Второй выбранный полигон исчезает полностью (рис. 9.107).

Exclusive Or (Xor): выберите два различных перекрывающихся полигона и эта команда удалит общую область (рис. 9.108).

Re-size: выберите полигон и эта команда позволит вам изменять его размеры, прибавляя смещение к координатам (x, y), рис. 9.109.

Copy: выберите полигон и эта директива позволит вам создавать измененную копию полигона, прибавляя смещение к размерам (x, y). Копия будет появляться непосредственно сверху исходного полигона.

Make Ring: эта директива сворачивает заполненный полигон в кольцо с шириной, которую определяет пользователь (рис. 9.110).

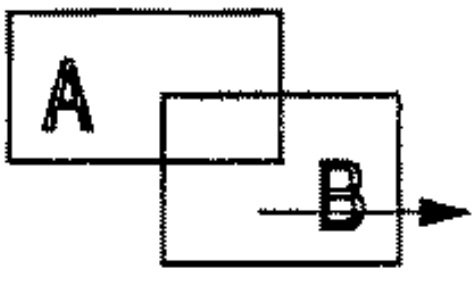


Рис. 9.105. Общая область пересекающихся прямоугольников

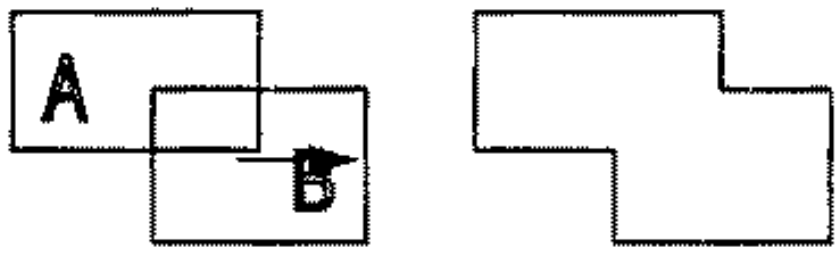


Рис 9.106. Объединение пересекающихся прямоугольников

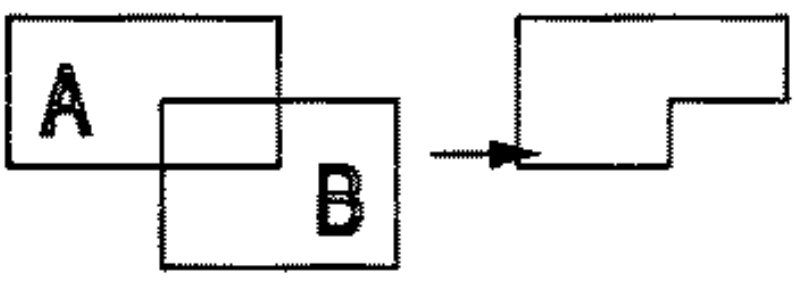


Рис. 9.107. Вычитание пересекающихся прямоугольников

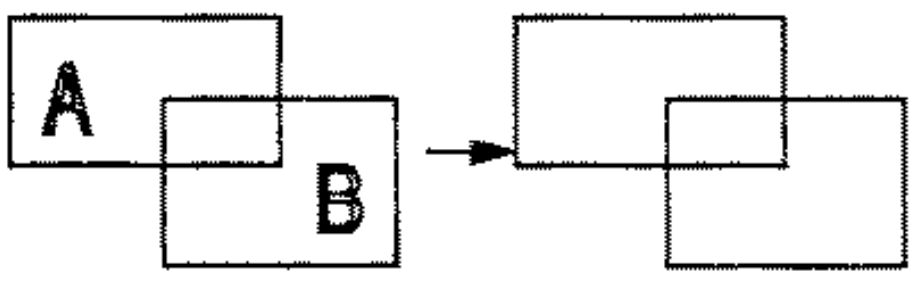


Рис. 9.108. Разделение пересекающихся прямоугольников

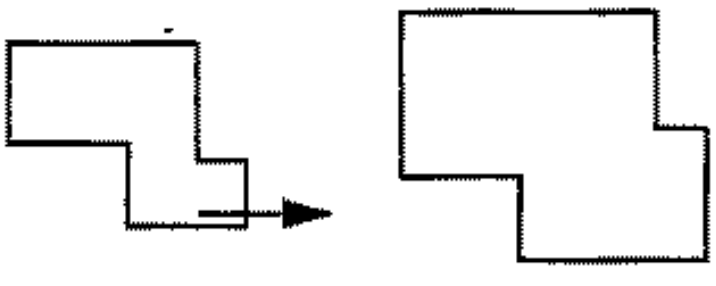


Рис. 9.109. Изменение масштаба полигона

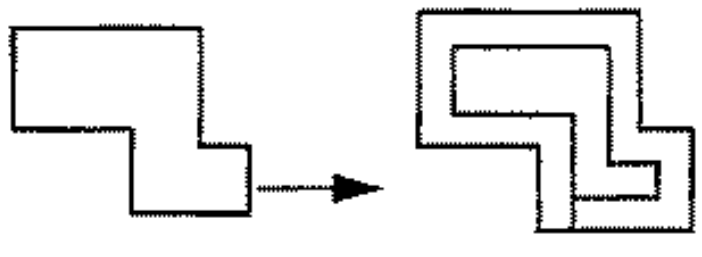


Рис. 9.110 Трансформирование заполненного полигона

...Group — команда группировки используется, чтобы блокировать вместе взаимные положения нескольких топологических объектов. Директива разгруппировки **Ungroup** используется, чтобы разделить сгруппированные объекты. Группы могут использоваться, чтобы помогать создать геометрию в редакторе **Artwork Cell Editor**, но группировка будет потеряна, когда сохраняется исходная ячейка (однако вся правильная геометрия будет сохранена). Группы не сохранены в ячейке оригинала, потому что в GDSII не имеется никаких групповых объектов.

...Array Copy — директива многократного копирования используется, чтобы создать многократные копии формы рисунка, задавая число строк, столбцов и разделения для каждого измерения.

9.9.7. Инструменты выравнивания

Выравнивание или юстировка форм могут быть выполнены, выбирая **Layout > Align Shapes** из опускающегося меню или инструментальной панели. Инструментальная панель юстировки может быть сделана видимой, выбирая **View > Show Tools > Alignment Tools** из меню. Инструментальная панель **Alignment Tools** показывается но рис. 9.111.

Чтобы использовать инструментальные средства юстировки, выберите два или больше полигона, чтобы выровнять их. Для этого выбирается полигон, самый близкий к данному направлению (вершина, нижняя часть, левая, правая) чтобы выровнять все формы к краю.

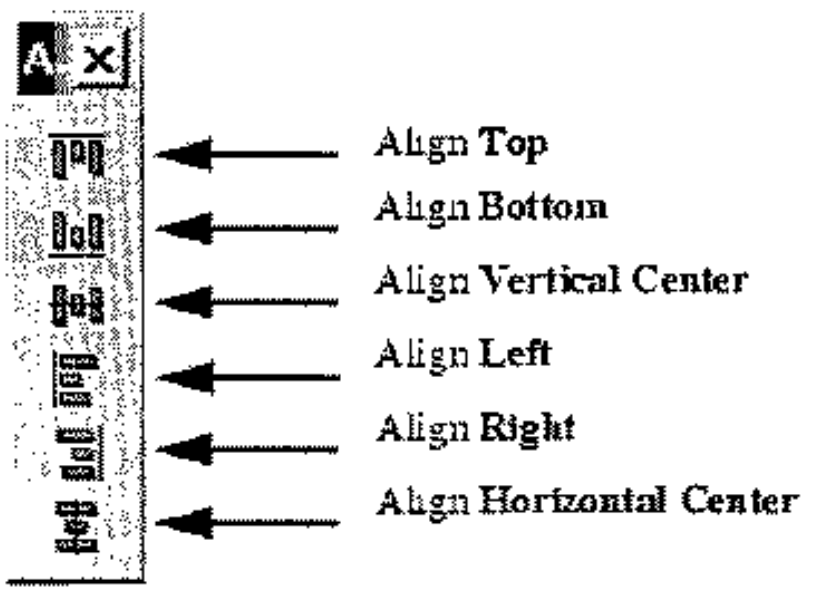


Рис. 9.111 Команды выравнивания положения полигонов

Top: выравнивает все формы по верхнему краю формы, которая имеет самую высокую точку.

Bottom: выравнивает все формы по краю нижней части формы, которая имеет самую нижнюю точку.

Left: выравнивает все формы к левому краю формы, которая имеет самое далекое направление слева.

Righ: выравнивает все формы к правому краю формы, которая имеет самую далекую правую точку.

Horizontal Center: середина между минимальным и максимальным значение X всех выбранных полигонов будет использоваться как линия юстировки.

Vertical Center: середина между минимальным и максимальным значением Y выбранных полигонов будет использоваться как линия юстировки.

Зафиксированный полигон не будет двигаться, если его ребро не самое близкое к данному направлению. Например, чтобы выровнять формы к вершине закрепляемого полигона, который не выше чем другие выбранные полигоны, делают выравнивание сверху, затем выравнивают снизу, и снова выравнивают верх. Эта операция выровняет все полигоны по верхнему краю зафиксированного полигона, даже если его верхнее ребро было не выше, чем у других полигонов. Для

выравнивания, середина минимума и максимального значения всех выбранных полигонов будет использоваться как линия юстировки.

9.10. Трассирование пути

Имеются несколько различных элементов TRACE, которые заменяют линию трассирования конкретными физическими линиями. Это, например, MTRACE — микрополосковая линия, которая может иметь, а может не иметь несколько поворотов в стороны. MCTRACE — это модификация MTRACE, когда в месте резкого поворота используется скругление.

Трассировка с помощью линии

В общем случае редактирование топологических ячеек TRACE выполняется, используя мышь. Двойное нажатие левой кнопкой мыши на элементе топологии активизирует черные ромбики (рис. 9.112), которые используются, чтобы управлять формой и срезами линий.

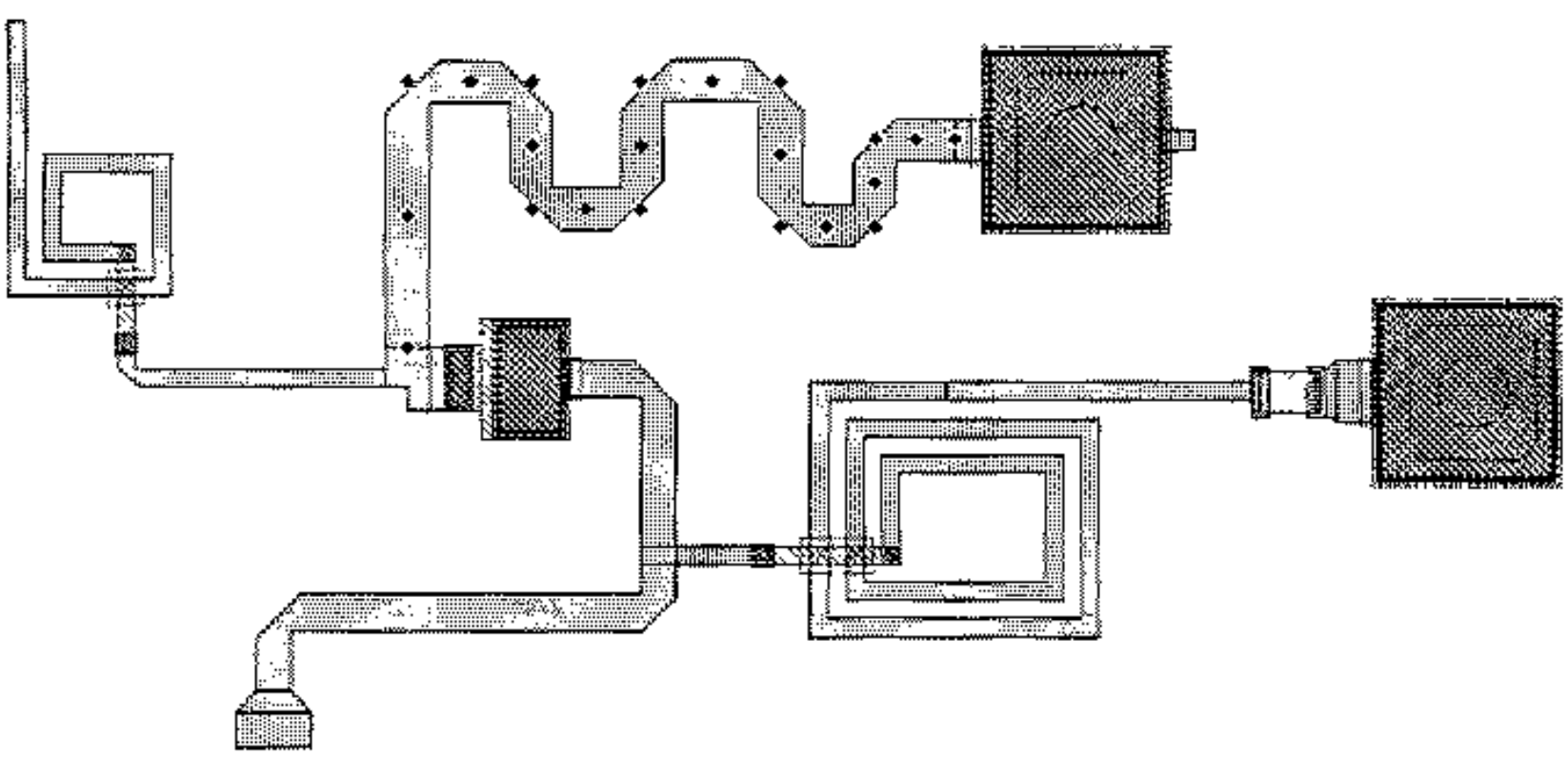


Рис 9 112. Активизация пути, по которой прочерчена меандровая индуктивность

Внешние ромбики управляют длиной сегмента, в то время как ромбик в середине линии управляет изгибом. Ромбики захвата управляются, помещая мышь по срезу, так, чтобы появились стрелки .

Чтобы двигать форму, сделайте шелчок левой кнопкой мыши, и, удерживая кнопку, тяните указатель стрелки в другое положение и затем отпустите кнопку мыши. Эта операция будет упрощена, если выбрать команду **Drag&Drop** из меню.

Добавление изгиба

Чтобы сделать изгиб, выберите элемент MTRACE в топологическом представлении. Выберите команду **Drag&Drop** и захватите среднюю точку. Прежде, чем кнопка мыши отпущена, появляется топология нового MTRACE (рис. 9.113).

Окончательно изгиб показывается на рис. 9.114.

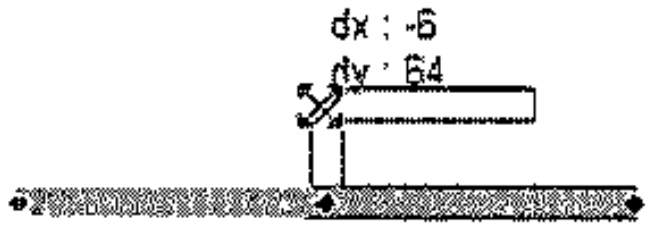


Рис. 9.113. Добавление сдвига трассируемой линии

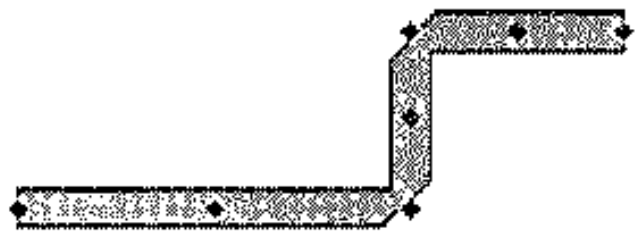


Рис. 9.114. Окончательный изгиб трассы

Сдвиг положения поворота с сохранением общей длины

Имеются три режима при перемещении изгиба в новое положение. Первые два режима относятся к перемещению изгиба на одном из концов сегментов. Третий режим относится к перемещению среднего сегмента между двумя поворотами.

Режим 1 (Option 1): когда сдвигается конечный сегмент, два сегмента, смежные к перемещаемому изгибу, сохраняют центральную точку по линии, в то время как часть сегмента сохраняется постоянным. Выбирая команду **Drag&Drop**, захватите средний ромбик в последнем сегменте (рис. 9.115) и топология изменяется с новым положением изгиба.

Новая топология изгиба с сохранением общей длины, показана на рис. 9.116.

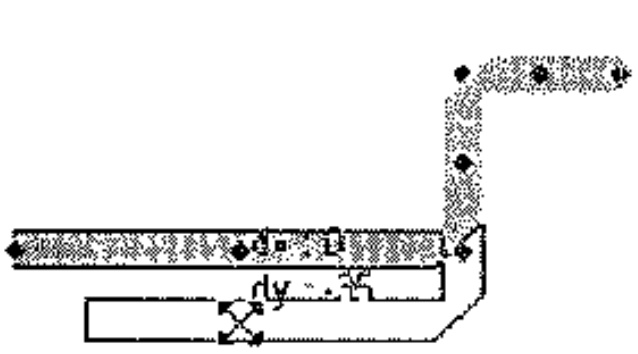


Рис. 9.115. Смещенная трасса

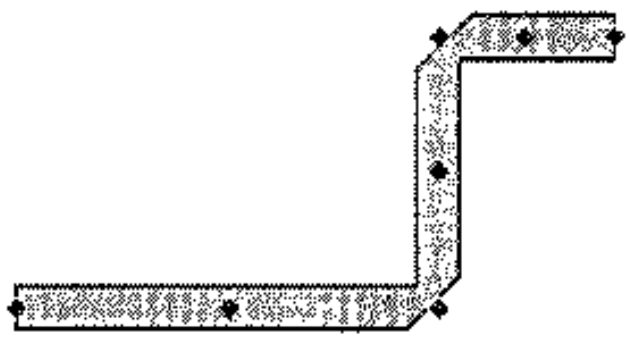


Рис. 9.116. Сдвиг с сохранением общей длины

Режим 2 (Option 2): удерживая **Ctrl + Shift**, захватите и передвигайте средний ромбик последнего сегмента. Этот режим — противоположность режиму 1. Часть линии, занятая другими сегментами, не передвигается мышью. Конечный сегмент не изменяется по длине, в то время как составляющие два сегмента изменились (рис. 9.117).

Новое положение изгиба для режима 2 показывается на рис. 9.118.

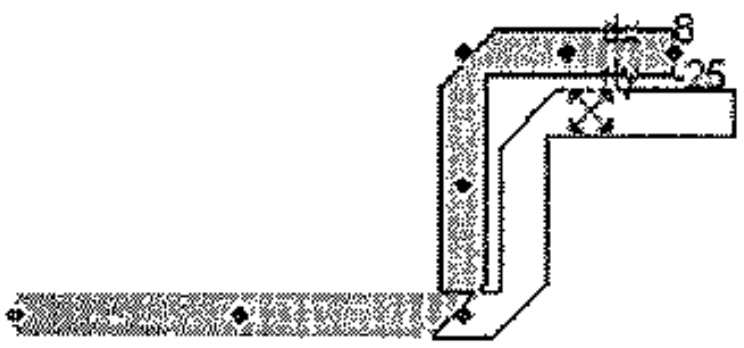


Рис. 9.117. Сдвиг части трассы

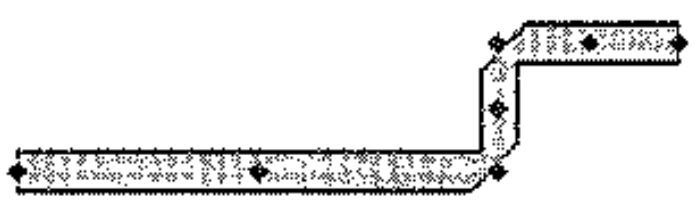


Рис. 9.118. Выделение центрального сегмента трассы

Режим 3 (Optoin 3): При перемещении среднего сегмента между двумя поворотами, средний сегмент всегда остается постоянным, в то время как крайние сегменты изменяются в длине. Используйте те же самые команды, как в режиме 1, чтобы переместить средний сегмент (рис. 9.119).

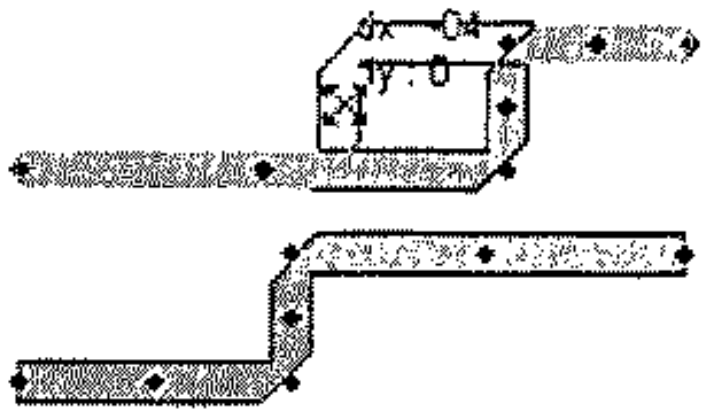


Рис. 9.119. Смещение части трассы

Перемещение позиции изгиба с изменением общей длины

Сдвиг позиции изгиба при изменении общей длины может быть сделан, перемещая конечные сегменты TRACE, когда имеется два или меньше поворотов в топологии. При изменении длины TRACE и перемещения положения изгиба, перемещаемый сегмент остается постоянным по длине, в то время как сегмент, приложенный к изгибу, изменяется по длине. Перемещать изгиб и изменять длину можно, удерживая клавишу **Shift**, захватывая средний ромбик последнего сегмента. Длина среднего сегмента тогда изменится, в то время как последний сегмент сохраняет свою длину (рис. 9.120).

Новое изменение в длине и положении изгиба показывается на рис. 9.121.

Когда имеются больше чем два поворота в TRACE, можно изменить позицию изгиба и длину «тромбона». Используйте нажатие на Shift, выбирая команду Drag&Drop на внутреннем сегменте TRACE (рис. 9.122). Убедитесь, что средняя длина сечений остается постоянной, в то время как другие два сегмента изменяются по длине.

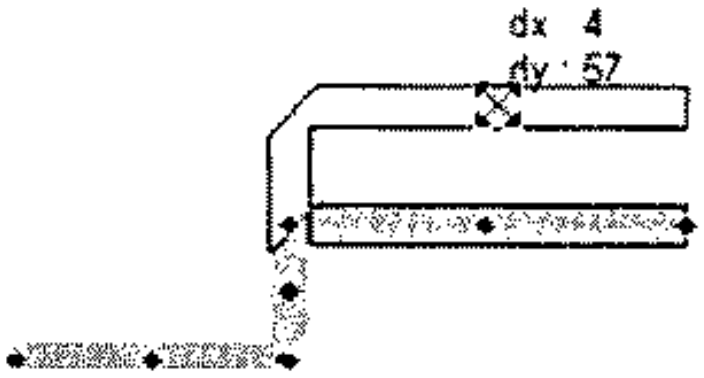


Рис. 9.120. Смещение части трассы

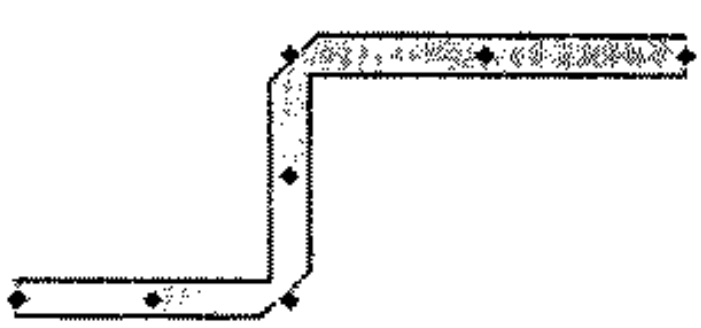


Рис. 9.121. Новое положение трассы

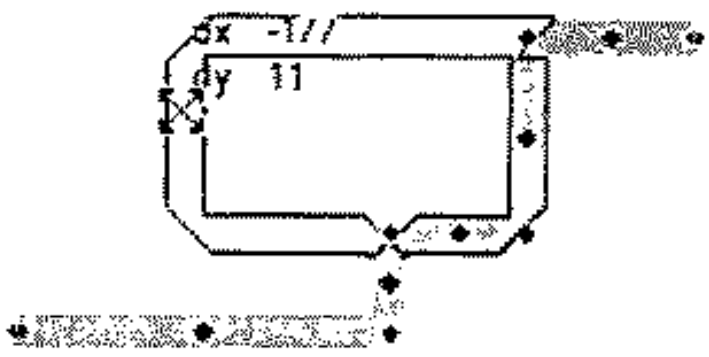


Рис. 9.122. Сложное редактирование пути

Прибавление изгиба после начального изгиба

Чтобы прибавить дополнительный изгиб после начального изгиба, удержнвая Ctrl, захватите и потяните за ромбик между двумя поворотами. Схема нового изгиба показывается на рис. 9.123.

Окончательное положение TRACE с новым изгибом показывается на рис. 9.124.

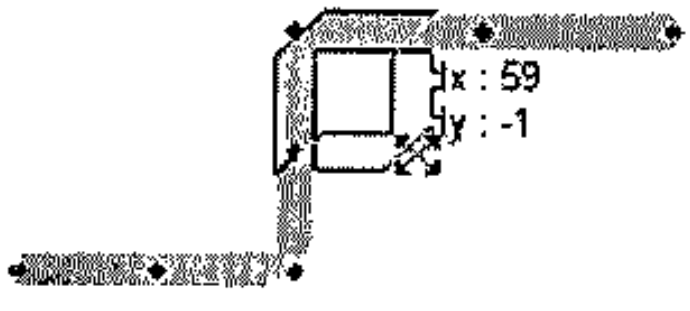


Рис. 9.123. Создание ступенчатого изгиба

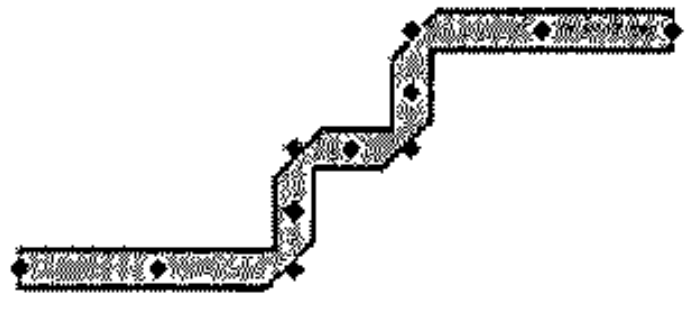


Рис. 9.124. Окончательная трасса с новым изгибом

Вращение сегмента

Чтобы вращать конечный сегмент TRACE (рис. 9.125), выберите команду Drag&Drop, удерживая Ctrl, по отношению к последнему отрезку MTRACE, который имеет, по крайней мере, один изгиб.

Заметим, что когда включена привязка к сетке, угол поворота будет изменяться только на величину дискретного угла, указанного в меню **Options > Default Layout Options**.

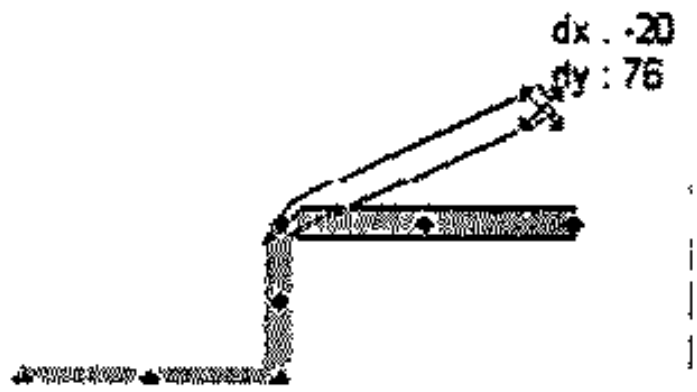


Рис. 9.125. Вращение части пути

Изменение маршрута движения линии

Ячейке **TRACE** можно придать новое направление, используя команду вращения линии. Команда вращения направляет линию пути от средней линии, которая выведена мышью (или использование координатного ввода). Выбор маршрута линии начинается с двойного нажатия TRACE, чтобы перевести линию в режим редактирования. Когда TRACE находится в режиме редактирования, ромбики захвата станут видимые (рис. 9.126). Выбор маршрута линии тогда начинается двойным нажатием на одном из ромбиков и захватом его на любом конце TRACE.

Как только команда вращения маршрута линии выполнена, путь средней линии может быть прорисован, как показано ниже. Если нажать клавишу **Tab** во время рисования средней линии, то откроется диалог ввода координат, чтобы вве-

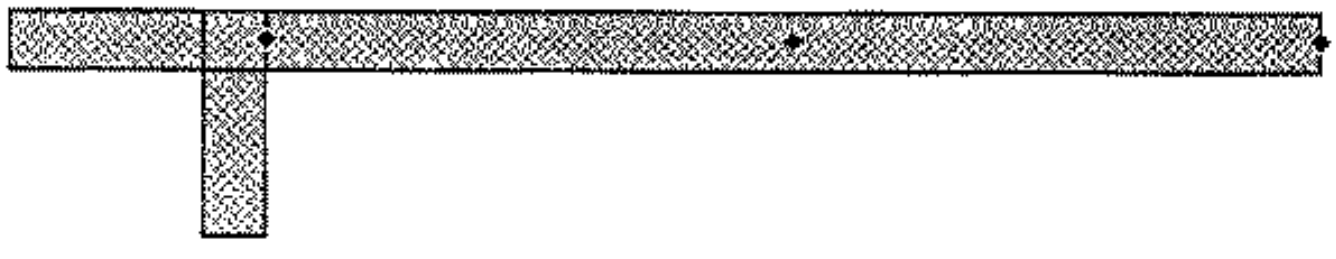


Рис. 9.126. Ромбики захвата и часть линии, направление которой можно изменить

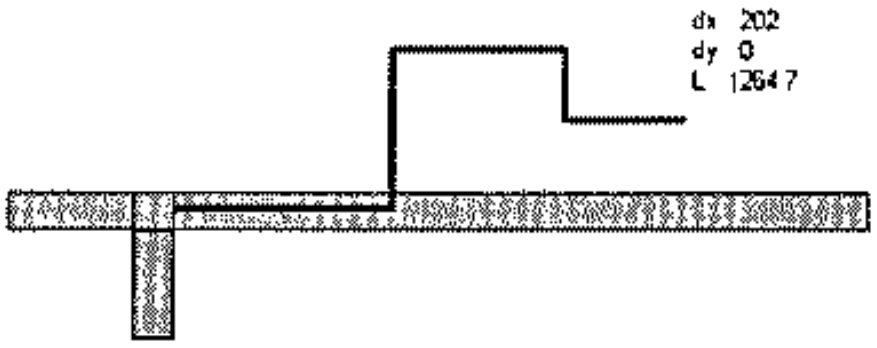


Рис. 9.127. Операция деформирования пути

сти координаты точек средней линии. Точки привязки могут также использоваться при рисовании средней линии. Средняя линия рисуется при нажатии левой кнопки мыши в каждой из желательных точек вершины (рис. 9.127). Рисунок средней линии заканчивается двойным нажатием на последней точке или нажимая ту же точку дважды.

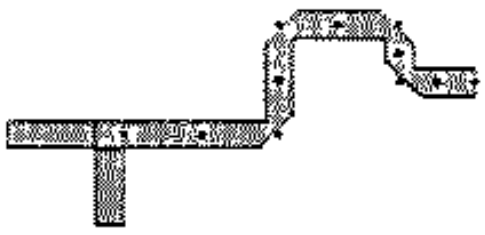


Рис. 9.128. Увеличение количества ромбиков приаязки при усложнении пути

Как только рисунок пути средней линии закончен, элемент MTRACE прорисуется в соответствии с путем средней линии. Выбор маршрута выполияется не всегда точно на средней линии, потому что имеются другие связи, которые могут появиться в структуре. Например, когда прорисовывается элемент MTRACE, должна быть обеспечена минимальная допустимая длина для каждого сегмента (рис. 9.128).

Сохранение общей длины линии

Во время трассировки длина трассы считается по длине начерченной средней линии. Если нужно, чтобы линия MTRACE сохранила эту длину, то клавиша **Shift** должна быть нажата, когда рисуется средняя линия. Нажатие и удержнвание **Shift** заставит MTRACE масштабироваться так, что общая форма MTRACE остается равной длине средней линии.

Соединение форм скачком

Имеются несколько элементов, у которых топологические ячейки могут автоматически изменять размеры и соединяться командой **Snap to Fit**. Все элементы TRACE поддержнвают эту особенность, а также многие из элементов линий (например, MLIN). Покажем использование команды **Snap to Fit** (рис. 9.129).

Результат применения привязки, на центральной ячейке MTRACE показан на рисунке 9.130.

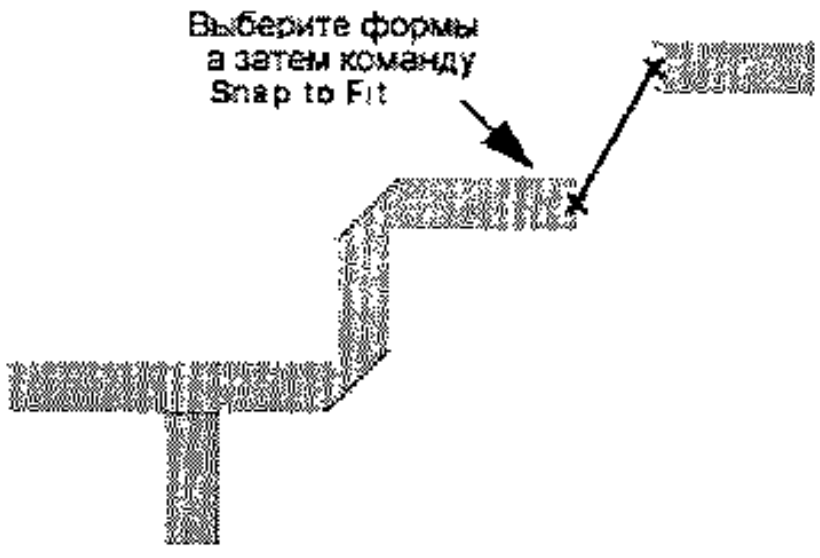


Рис. 9.129. Связь форм

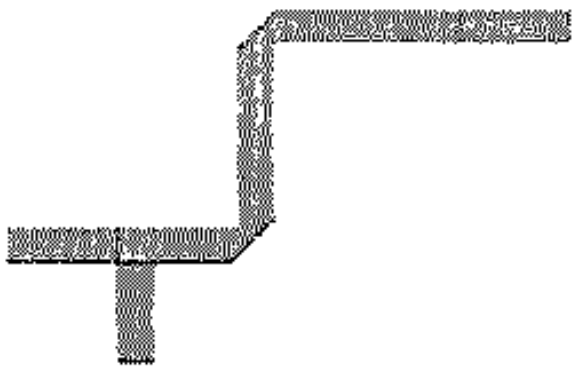


Рис. 9.130. Результат привязки формы шлейфа к линии

В случаях, где это невозможно, для топологической ячейки изменить свои размеры, чтобы точно подстроиться, размеры изменяются как только можно близко. Например, если ячейка MLIN согласована только по одной координате, применяется команда **Snap to Fit to MLIN**, чтобы подстроить MLIN в перпендикулярном направлении.

Симметричные структуры

Команда **Generalized Intelligent Cells** (iCells) используется, чтобы упростить создание топологии, которая имеет симметричные компоненты. Обобщенный синтаксис iCell позволяет параметру заданного элемента иметь то же самое значение, как параметр любого другого элемента топологии. Например, параметр W (ширина) элемента MLIN (образец TL1) может иметь то же обозначение, как и параметр W другого MLIN (образец TL2), используя синтаксис W=W@MLIN.TL1 для параметра W элемента TL1. Имя образца TL1 входит в идентификацию для элемента схемы.

Для схемы, показанной на рис. 9.131, элемент MTRACE с ID=X2, использует обобщенный синтаксис iCell, чтобы описать большинство его параметров такими же, как соответствующие параметры в образце MTRACE с ID=X1. Обычно, параметры DB и RB для элемента MTRACE скрыты (они могут быть сделаны видимыми или отредактированы в диалоге редактирования параметра). Параметр DB определяет вектор длин сегментов, а параметр RB определяет угол каждого изгиба. Если параметры RB и DB будут равными параметрам RB и DB другого MTRACE, то окончательная трасса будет иметь те же самые повороты. Важно также сохранить длину MTRACE равной длине другой MTRACE так, чтобы линия расположилась симметрично. Другие параметры MTRACE, например ширина, могут также стать равными другим параметрам MTRACE, но это не обязательно. Окончательная топология для схемы показана ниже. Если верхняя трасса направлена не в то направление или изменена, то нижняя трасса автоматически направится по неправильному направлению. На рис. 9.131 элемент MTRACE, который использует обобщенный синтаксис iCell, зеркально отражается так, что схема становится полностью симметричной.

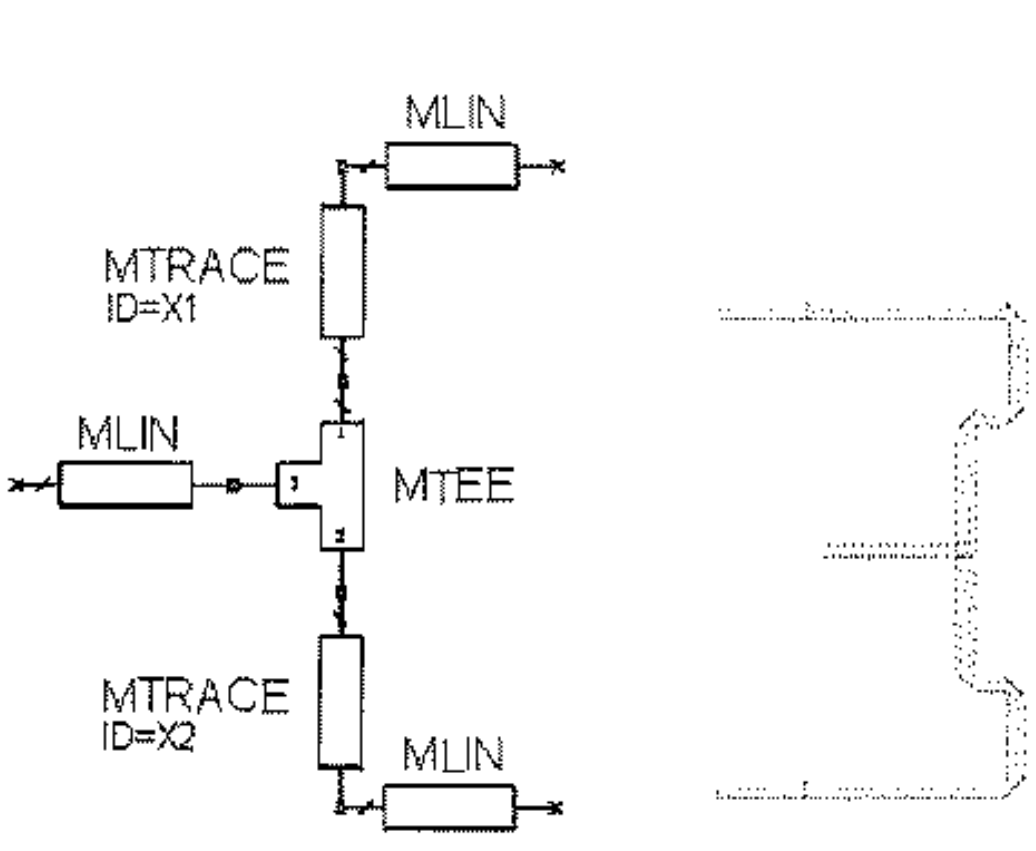


Рис 9.131. Симметричная схема и топология

9.11. Файл процессирования топологии (LPF)

Файл процессирования топологии (Layout Process File — **LPF** файл) позволяет сконфигурировать проект для конкретного производственного процесса. Файл LPF может быть импортирован в проект, что выполняется выбором команды **Options > Process Definition Import.** Файл LPF может также экспортироваться из существующего проекта, выбирая команду **Options > Process Definition Export.** Файл LPF с именем Default.lpf, который находится в коренном каталоге MWO, часто используется как заданная по умолчанию конфигурация для новых проектов. Если другой файл LPF должен использоваться по умолчанию, то его нужно переименовать на Default.lpf и поместить в каталог MWO.

Файл LPF по умолчанию не используется для конфигурации сохраненных проектов, которые считываются обратно в MWO. Сохраненные проекты сохраняют свои установки главным образом, когда они созданы. Они также сохраняют любые изменения, которые, возможно, были сделаны, когда проект был создан. Если самый последний файл LPF должен использоваться, чтобы «модифицировать» установки в проекте, то файл LPF может быть импортирован обратно в проект. Когда файл LPF импортирован в проект, он возвратит все параметры настройки и любые предыдущие изменения установок (такие, как изменения в таблице картографирования слоев) будут переписаны.

Строки в файле LPF записываются, используя следующую систему обозначений:

```
$XXX_BEGIN
! Конкретная информация
$XXX_END
```

Часть слова **XXX** может быть заменена более описательной информацией. Комментарии могут также быть включены в файл LPF. Комментарий начинается со знака «!». Имеются много различных компонентов в файле LPF, которые обсуждены ниже.

```
$PROCESS_SETUP_BEGIN
:
$PROCESS_SETUP_END
```

Обозначения **PROCESS_SETUP_BEGIN/END** используются, чтобы записать информацию в файле LPF, относительно многослойных ячеек, единиц по умолчанию, и т. д. Этот раздел — один из двух основных разделов в файле LPF. Другой раздел имеет следующий вид:

```
$LAYER_SETUP_BEGIN
:
$LAYER_SETUP_END
```

Обозначения **LAYER_SETUP_BEGIN/END** используются, чтобы заключить информацию в файле LPF для установок, отображенных в диалоге Layer Setup. Информация о слое включает всю информацию о рисунке, свойствах слоя и всех таблицах картографирования.

Раздел $PROCESS_SETUP_BEGIN/END

Имеются несколько подразделов в этом разделе файла LPF. Каждый из них описан ниже.

Default Units (единицы по умолчанию)

Этот подраздел для установкн заданных по умолчанию единиц показывается ниже со всеми возможными внесенными в список типами единиц (длина, частота, емкость, индуктивность, сопротивление, проводимость, температура, угол, время, напряжение, ток и мощность).

```
$DEFAULT_UNITS_BEGIN
LEN mil
FREQ G
CAP p
IND n
RES k
COND m
TEMP DegC
ANG Deg
TIME n
VOLT m
CUR m
PWR m
$DEFAULT_UNITS_END
```

Возможные единицы внесены в список ниже:

```
f femto
p pico
n nano
u micro
m milli
c centi
k kilo
M mega
G giga
T tera
mil mil (for length only)
inch inch (for length only)
feet feet (for length only)
```

Draw_Resolution (установки разрешения рисунков)

Следующий раздел специфицирует разрешения базы данных и видимой сетки. Формы наносимых топологий измеряются в нанометрах, причем наименьшее возможное разрешение при рисовании равно 1 нанометр. Если рисунок должен создаваться в английских метрических единицах (милсах), то разрешение рисунка должно быть представимым четным числом нанометров. Если топологии специфицируются в милсах, то это подразумевает, что минимально возможное разрешение рисунка будет равно 0,005 милс (127 нанометров). Параметры разрешения и сетки вводятся следующим образом:

```
$DBASE_UNIT_BEGIN
   DRAW_RESOLUTION .01 u
   GRID_SPACING 1 u
$DBASE_UNIT_END
```

Определения типов линии

Тип линии описывает слои, используемые для одиночной линии передачи. Например, металлизированная линия требует задания двух металлических слоев и слоя подложки, и может быть сконфигурирована как тип линии в файле LPF. Элементы, вводимые в файл LPF для простой линии показывается ниже. В каждой линии вводятся параметры слоя.

```
    $LINE_TYPE_BEGIN "Plated Line " !имя слоя
!Layer        Layer       _offset     minWidth     flags
"Metal1 "     0           2e-6        0            0
"Via2"        -0.5e-6     3e-6        0            0
"Metal2 "     0.5e-6      2e-6        0            0
$LINE_TYPE_END
```

Параметр _offset — это смещение, используемое для рисования слоя. Минимальная ширина minWidth используется для проверки нарушений правила проектирования. Параметры flags используются, чтобы передать специальную информацию к топологическим ячейкам.

Struct_Type (определение типа структуры)

Параметр типа структуры описывает слои, используемые в структуре, которая может быть определена в параметризируемой топологической ячейке. Это позволяет ввести так же информацию о типе структуры, типе линии, типе металла, которые нужно определить пользователем для описания топологических ячейках с перестраиваемой конфигурацией. Имя, данное структуре, может использоваться, чтобы обратиться к информации о коде черчения топологической ячейки.

```
$STRUCT_TYPE_BEGIN "Resistor"
!layer              offset          min width      flags
"Res "              -2e-6           4e-6           1
"Thick Metal"       0               5e-6           0
$STRUCT_TYPE_END
```

Определения конденсатора

При описании объемного навесного тонкопленочного конденсатора необходимо описать слои, используемые тонкопленочным конденсатором. Первый слой в таком описании должен быть нижней платой основания конденсатора.

```
$CAP_DEFINE_BEGIN
!layer              offset          min width      flags
"Metal2 "           2e-6            3e-6           0
"Metal Top"         0               4e-6           0
"Thick Metal"       -2e-6           4e-6           0
$CAP_DEFINE_END
```

Описание перемычки VIA

При задании перемычки необходимо описать слои, используемые для топологии встроенной ячейки VIA. Пример топологической ячейки VIA показывается на рис. 9.132. Эта ячейка установлена по размеру параметра элемента «D» (диаметр).

Файл LPF используется, чтобы генерировать эту топологию. В данном элементе имеются 3 слоя. Каждый из этих слоев VIA имеет начерченные металличе-

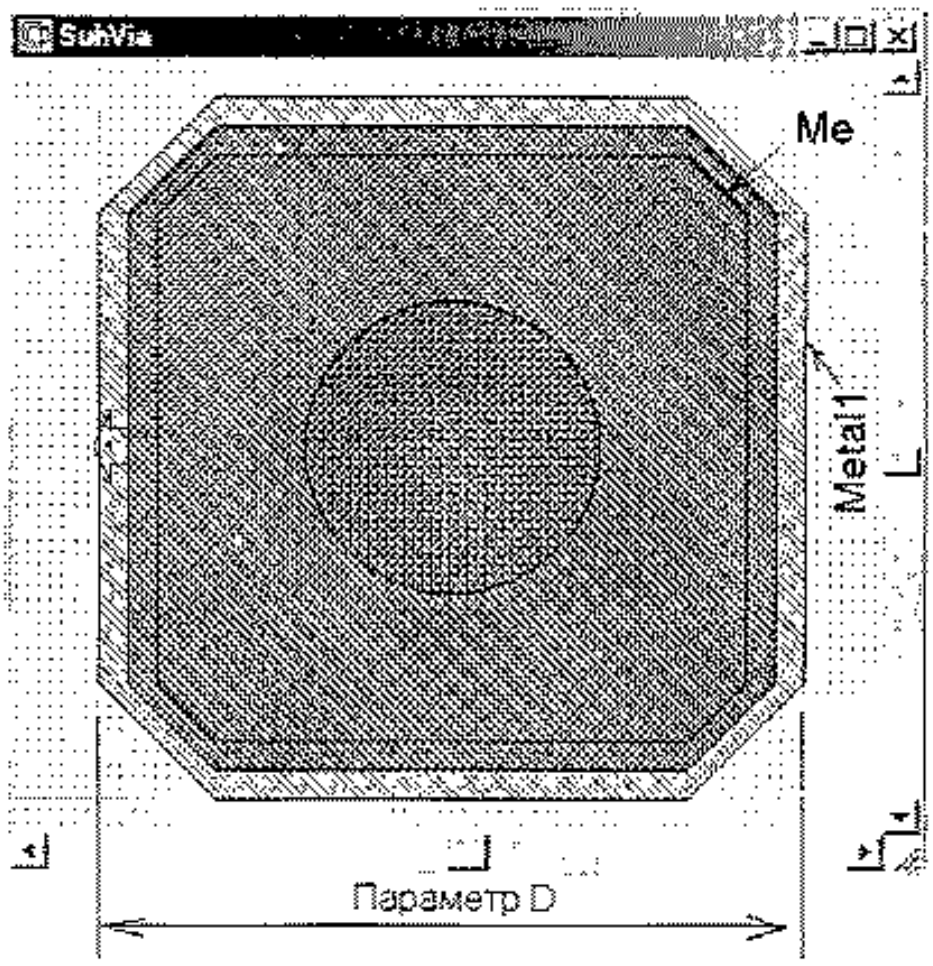


Рис. 9.132. Пример топологической ячейки

ские формы. Величина смещения для каждого слоя определяет размер формы. Например, если нарисован круг, радиус круга равен **D/2+offset**. Отрицательное смещение **offset** создает меньший круг. Значение flags используется, чтобы определить тип формы, которая должна быть выведена. Выведенная форма может быть квадрат или круг. Flags также используются, чтобы определить, где на VIA находятся лицевые поверхности, к которым фиксируются подключения. По умолчанию, лицевые поверхности будут в центре VIA (имеются также другие лицевые поверхности, которые позволяют подключение с VIA от любого из четырех ортогональных направлений). Имеются четыре возможных значения flags. Если значение 1 или 3, то выведенная форма будет круг; если — 0 или 2, это будет квадрат. Значение 2 или 3 заставит внешний периметр выведенной формы использоваться как опорная плоскость для рисунка лицевой поверхности. Только один (самое большее) из заданных слоев должен иметь значение flags, равное 2 или 3. Если ни один из определенных слоев не имеет значение 2 или 3, то лицевые поверхности будут выведены в центре VIA. Параметр скоса под углом 45° используется, только когда выводится квадрат. Ненулевое значение для скоса под углом 45° сделает углы квадрата соединенными под углом 45°.

```
$VIA_DEFINE_BEGIN
! -> Layer            offset mitre    flags
"First Metal "        0               0          0
"Source Metal "       -2e-06 5e-06    0
"Via Etch "           -7e-06          0          1
$VIA_DEFINE_END
```

Выбор нарисованного объекта воздушной перемычки

Для выбора нарисованного объекта воздушной перемычки используется следующая запись, для спецификации топологических ячеек. Это имя должно быть

согласовано с именем объекта рисунка воздушной перемычки в его физическом воплощении.

```
$BRIDGE_DRAW_BEGIN
     MyLayoutType
$BRIDGE_DRAW_END
```

Файл правил топологии DRC

Файл правил топологии с именем drc_rules.txt может быть сконфигурирован в файле LPF, как показано ниже. Путь нахождения файла может использоваться, чтобы определить файл проверки правил топологии. Идентификатор $MWO заменяется путем, где установлен MWO.

```
$DRC_RULES_FILE_BEGIN
"$MWO\drc_rules.txt"
$DRC_RULES_FILE_END
```

Заданный по умолчанию шрифт топологии

Заданный по умолчанию шрифт, используемый для нанесения на чертежи топологии текста, может быть также задан в файле LPF. Первый элемент в технических требованиях — имя шрифта. Это может быть любой установленный шрифт Windows True Type. Второй элемент — высота шрифта в нанометрах. Третье число 1, если шрифт полужирный и 0, если это не так. Четвертое число 1, если шрифт курсив, и 0, если нет.

```
$DEFAULT_FONT_BEGIN
"Arial"    100000    0    0
$DEFAULT_FONT_END
```

Величины по умолчанию

Дискретный интервал для установки величин по умолчанию для новых элементов схемы, которые добавляются к проекту, показывается ниже со всеми возможными внесенными в список единицами. Модифицируемые единицы, которые могут применяться в описании файла LPF как показано ниже — те же самые единицы, используемые для заданных по умолчанию единиц, описанных ранее.

```
$DEFAULT_VALUES_BEGIN
W      40 u
L      100 u
H      50 u
T      2 u
Er     12.9
Rho    1
C      1 p
L1     1 n
Rad    50 u
M      0.6
$DEFAULT_VALUES_END
```

Раздел $LAYER_SETUP_BEGIN/END

Имеются несколько подразделов, которые могут быть включены в этот раздел. Свойства в этой части LPF наиболее легко конфигурируются, устанавливая желательные параметры в диалоге **Layer Setup** и затем экспортируя файл LPF проекта.

Свойства рисования слоев

Пример описания свойств слоя рисунка показывается ниже.

```
$DRAW_LAYERS_BEGIN
"Error" 255 255 0 16 1 1 0 35000 0 "" 0 0 1 "Obsolete " 0
"Air Bridge" 32896 65535 0 16 1 1 0 35000 0 "" 0 0 1 "Obsolete " 0
"Thick Metal" 8388 608 84 0 16 1 1 0 35000 0 "" 0 0 1 "Obsolete " 0
"Via" 128 330 23 0 16 1 1 0 35000 0 "" 0 0 1 "Obsolete " 0
"SubcircuitAnnotation" 4 48 0 16 1 1 0 350 0 "" 0 0 1 "Obsolete " 0
"Annotation" 128 33023 0 16 1 1 0 35000 0 "" 0 0 1 "Obsolete " 0
"RatsNest" 128 33023 0 16 1 1 0 35000 0 "" 0 0 1 "Obsolete " 0
$DRAW_LAYERS_END
```

Свойства Layer Mapping

Пример картографирования слоев показывается ниже, а топология на рис. 9.133.

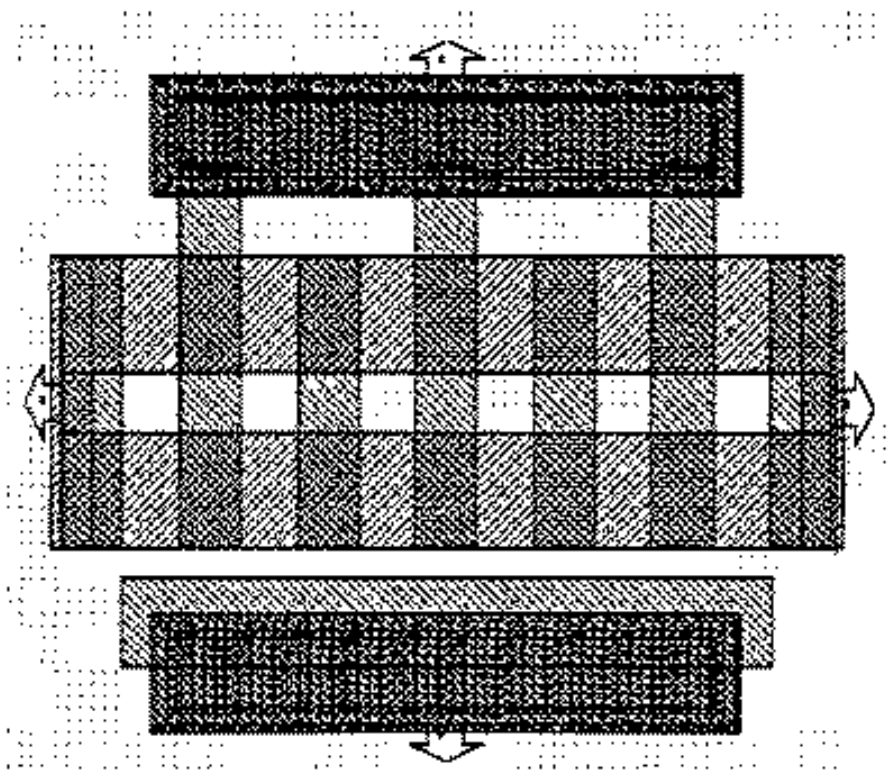


Рис. 9.133. Чертеж многослойной топологии описан файлом LTP

Для каждой из пар картографирования, моделируемый слой является первый, а рисуемый слой — второй. Ввод в форме «**11_0**» используются, чтобы отобразить моделируемые слои GDSII к начерченным слоям (рис. 9.78). В последующем примере имеются две таблицы картографирования (Mapping 1 и Mapping 2). Ключевое слово $MAP_NAME указывает имя чертежа, которое также указывает на начало новой таблицы. Две таблицы картографирования ниже — те же самые, как и для картографирования воздушной перемычки **Air Bridge** и **Thick Metal**, возвращенные во вторую таблицу.

```
$MODEL_LAYER_BEGIN
$MAP_NAME "Mapping 1" (таблица картографирования 1)
"Error " "Error"
"Air Bridge " "Air Bridge"
"Thick Metal " "Thick Metal"
"Via " "Via"
"SubcircuitAnnotation " "SubcircuitAnnotation"
"Annotation " "Annotation"
"RatsNest " "RatsNest"
"11_0 " "Air Bridge"
"12_0 " "Error"
"13_0 " "Via"
$MAP_NAME "Mapping 2" (таблица картографирования 2)
"Error " "Error"
"Air Bridge " "Thick Metal"
"Thick Metal " "Air Bridge"
"Via " "Via"
"SubcircuitAnnotation ""SubcircuitAnnotation"
"Annotation " "Annotation"
"RatsNest " "RatsNest"
"11_0 " "Air Bridge"
"12_0 " "Error"
"13_0 " "Via"
$MODEL_LAYER_END
```

9.12. Программное описание топологических ячеек

Пользователи могут создавать параметризированные топологические ячейки, используя язык C++ и последующую компиляцию. У этих ячеек можно будет менять, регулировать, подстраивать и оптимизировать геометрические размеры. Такие топологические ячейки реализуются в виде динамических библиотек (DLL). Чтобы построить ячейку, файл компилируется (или в Visual C++ или Borland C++) и связывается с библиотекой AWR. Как только файл DLL создан, его нужно поместить в каталог «cells». Когда MWO будет запущен в следующий раз, топологическая ячейка будет доступна для использования, точно так же, как любая другая ячейка.

Если вы хотите, чтобы ячейка автоматически была связана с конкретной электрической компонентой, то вы можете также добавить эту информацию в файл картографирования CellMap.txt, который находится в каталоге MWO. Типичная таблица картографирования будет рассмотрена ниже, где параметризированная MCROSS ячейка является элементом пересечения микрополосковых линий. Все параметризированные ячейки должны сопровождаться знаком «*» в файле картографирования, например MCROSS MCROSS*.

Некоторые из рисуемых примитивов доступны для внедрения в программу создания рисунка ячейки топологии и показываются с помощью интерфейса API.

Интерфейс для получения значений параметра

Первый параметр — это имя электрической компоненты. Второй параметр — текст, который обычно задает его значение по умолчанию, если топологическая ячейка не может получить значение параметра от электрической компоненты.

Текст используется для того, чтобы значения по умолчанию, указанные в файле LPF, могли использоваться вместо кода по умолчанию:

```
double GetParameterValue(const wchar_t* name, const wchar_t* def_id)const;
```

Эта функция — такая же, как и первая, кроме программного кода по умолчанию, может быть записана как:

```
double GetParameterValue(const wchar_t* name, double def_val)const;
```

Ячейки топологии могут иметь собственные параметры (не связанные с параметрами электрической компоненты) для задания опций, которые связаны только с данной ячейкой топологии (локальные параметры). Функция, приведенная ниже, восстанавливает значение локального параметра, который сохранен в топологическом объекте.

```
double GetLocParamValue(const wchar_t* name)const;
```

В компиляторе C++ переменная wchar_t* требует чтобы перед строковой константой был поставлен «L». Например, вторая функция должна быть в следующем виде:

```
double w = GetParameterValue(L"W", 10e-6);
```

Функции трансформации изображения

Эти функции могут использоваться, чтобы сдвинуть систему координат при рисовании.

```
void TransformPushScaling(double scaleFactor, double originX, double
originY,int flipX, double rotateCCW, double deltaX, double deltaY);
void TransformPop();
```

Функции рисования сеток

Следующий код позволяет рисовать ячейки с определенным углом и угловым разрешением.

```
void RoundToGridLDB(double* inOutValue);
void GetRoundedAngle(double* inOutAngle);
void GetAngleDivisionsPerQuadrant(int* numDivisions);
```

Функции, используемые с топологическими ячейками для поддержки редактирования.

```
int GetAngleDivPer90()const;
int GetGridSpacing()const;
int GetDataBaseUnit()const;
```

Основные команды рисования

Следующая функция устанавливает активный слой рисунка. Как только вызвана команда **SetDrawLayer**, все примитивы будут рисоваться на указанном слое, пока **SetDrawLayer** не установит другой активный слой.

```
void SetDrawLayer(const wchar_t* layName);
```

Функция рисования прямоугольника:

```
void DrawRect(double x_ul, double y_ul, double x_lr, double y_lr);
void DrawEllipse(double x_ul, double y_ul, double x_lr, double y_lr);
```

Функция рисования полигона:

```
void PolygonBegin ();
void AddPolyPoint (double x, double y);
void AddPolyArc (double x, double y, double radius, int is_ccw);
void PolygonEnd ()
```

Функция для рисования пути:

```
void PathBegin (double width, int miterType=2, double miterOffset=0,
int endType=2,double bOffset=0,double eOffset=0);
void AddPathPoint (double x, double y);
void PathEnd ();
```

Функция рисуемой аннотации в одну линию:

```
void DrawAnnotationLine(double x_start, double y_start, double x_end,
double y_end);
```

Точки соединения

Точки соединения для топологической ячейки определены как линии (фаски), которые могут совмещаться с фасками другой ячейки. Порядок этих двух точек в фаске определяет направление фаски (то есть выбора, с какой стороной другая лицевая поверхность соединяется).

```
void AddFace (double lx, double ly, double rx, double ry,
int portNumber=0);
```

Поддержка конфигурируемой ячейки

Следующая функция используется для создания ячейки с перестраиваемой конфигурацией. Эта функция возвращает число слоев, которые нужно использовать при выводе этой ячейки.

```
int GetNumbLayersForLine()const;
```

Для каждого слоя, на который будет выведена ячейка, получается информация, необходимая чтобы нарисовать ячейку. Возвращаемая информация — информация из файла LPF.

```
void GetLayInfoForLine (int iLayer, const wchar_t** name,
double* offset, double* minWidth, unsigned* flags)const;
```

Следующая запись используется, чтобы нарисовать слои, когда имеется воздушный мост, присоединенный к фаске.

```
bool RemoveBridgeLayer (int iLayer, double W, int bridgeLoc,
int bridgeType, int connectToType, double connectToWidth,
double* offset)const
```

Следующие две функции используются, чтобы нарисовать фаски многослойных ячеек.

```
int GetFaceDrawProp (int iFace);
int GetEndOffsetMult (int iFace, int defFaceDraw);
```

Функции ниже используются, чтобы нарисовать воздушные перемычки.

```
void DrawBridge(double X0,
double Y0,
double W,
double angle,
int nDims,
double* dims,
int bridgeLoc,
int bridgeType,
int connectToType=0,
double connectToWidth=0);
int GetNumbBridgeTypes()const;
```

Поддержка операции перетаскивания

Следующая функция используется, чтобы установить значения параметра электрической компоненты во время операции редактирования перетаскиванием.

```
void SetParameterValue (const wchar_t* name, double value);
```

Эта функция используется, чтобы установить значение локальных параметров (локальные параметры — только те параметры, которые не получают свои значения от электрической компоненты, которая связана с топологической ячейкой).

```
void SetLocParamValue (const wchar_t* name, double value);
```

Следующие функции предназначены для использования с вектором параметров (например, массив смещений, сохраняющий информацию о позиции поворотов в элементе MTRACE).

```
int GetParVectSize (const wchar_t* name)const;
double GetParVectValue(const wchar_t* name, int index)const;
void SetParVectSize (const wchar_t* name, int size);
void SetParVectValue(const wchar_t* name, int index, double val);
```

Простой пример ячейки топологии

Этот пример — для ячейки тонкопленочного конденсатора. Код ниже — полное определение этой ячейки. Никакой другой код для ячейки не требуется.

```
//=================================
// Определение ячейки топологии
//=================================
AWR_CELL_RECORD_BEGIN (KLayoutCell_TFC, 2, 0, "TFC","Thin Film
Capacitor","AWR",0,0)
AWR_CELL_RECORD_END
void KLayoutCell_TFC::DoDrawCell()
{
double W=GetParameterValue(L"W",L"%W");
double L=GetParameterValue(L"L",L"%W");
double L1_L2 = 2e-6;
double L1_VIA = 2e-6;
double x0 = 0;
```

```
double x1 = L;
double y0 = -W/2;
double y1 = W/2;

     SetDrawLayer(L"Layer1");
DrawRect(x0, y0, x1, y1);
SetDrawLayer(L"Layer2");
DrawRect(x0+L1_L2,y0+L1_L2,x1-L1_L2,y1-L1_L2);

     SetDrawLayer(L"Via1");
DrawRect(x0+L1_VIA,y0+L1_VIA,x1-L1_VIA,y1-L1_VIA);

     AddFace(x0, y0, x0, y1);
AddFace(x1-L1_L2, y1, x1-L1_L2, y0);
```

В коде выше, имя макроса AWR_CELL_RECORD_BEGIN используется, чтобы зарегистрировать топологическую ячейку системой. Только одна функция должна быть определена, чтобы вывести ячейку (функция **DoDrawCell**).

Пример редактирования топологической ячейки

Может быть создана и более сложная версия тонкопленочного конденсатора, позволяющая редактировать значения параметра, используя маркеры на топологических ячейках. Но тогда нужно определить несколько дополнительных функций, чтобы реализовать топологическую ячейку, которая может быть размещена при помощи мыши.

Функция **DoDrawCell** выполняется одинаково, вне зависимости от того, допускается ли редактирование топологии или нет.

```
void KLayoutCell_TFC::DoDrawCell()
```

Функция **DoGetNumbHandles** возвращает количество маркеров, которые будут нарисованы на топологической ячейке, когда объект топологии будет выделен двойным нажатием.

```
int KLayoutCell_TFC::DoGetNumbHandles()
```

Функция **DoGetDragHandle** используется, чтобы возвратить информацию относительно маркера, его положении и направлении. Информация возвращается через параметр KdragHandleInfo. Параметр iHandle указывает номер маркера, для которого требуется информация.

```
void KLayoutCell_TFC::DoGetDragHandle(int iHandle,
KDragHandleInfo& handle)
```

DoDrawDragOutline используется, чтобы вывести внешнюю линию формы, во время ее редактирования. Часто внешняя линии рисуется в более простом виде (когда в многослойной ячейке рисуется только один слой). Параметр **IHandle** указывает, какой маркер передвигается, а параметры dx и dy — на какое расстояние. Параметр **ModKeys** может использоваться, чтобы определить, удерживается ли во время операции перетаскивания клавиша **Ctrl** или **Shift**.

```
void KLayoutCell_TFC::DoDrawDragOutline(int iHandle, double dx,
double dy, int modKeys)
```

DoCommitDrag принимает те же самые параметры, что и функция **DoDrawDragOutline**. Назначение функции DoCommitDrag состоит в вычислении и задании

значения параметра, которые заставили бы ячейку нарисовать в положении, обозначенной функцией DoDrawDragOutline. Например, ячейка схемы конденсатора тонкой пленки использует параметры ширины (W) и длины (L) электрического элемента.

```
int KLayoutCell_TFC::DoCommitDrag(int iHandle, double dx, double dy,
int /*modKeys*/)
```

Реализация примера показана ниже. Вспомогательная функция, называемая awr_GetTFC_Points использовалась, чтобы упростить реализацию.

Воздушные перемычки

Воздушные перемычки используются для соединения топологических форм и навесных объектов линиями передачи, лежащими, обычно на других слоях, они также используются, когда одна линия передачи должна пересечь другую без замыкания. Воздушные перемычки, которые соединяются с компонентами (типа выводов конденсатора) и рисуются как линии передачи. Один из параметров, определяющий фаску для концов линии передачи — «**Airbridge**». Когда выбран **Airbridge**, то пользователь может задать также тип воздушной перемычки.

Реализация вывода воздушной перемычки

Рисование воздушных перемычек выполняется с помощью определяемых выводов воздушной перемычки. Каждой воздушной перемычке дается имя, которое затем используется в диалоге свойств фасок. Объектам воздушных перемычек также даются имена, которые могут быть использованы для идентификации процесса. Может иметься любое число выводов перемычек, но только один можно использовать для данного проекта. Один вывод воздушной перемычки должен содержать полный набор типов выводов воздушной перемычки, которые могут потребоваться в данном проекте. Конкретный объект рисуемой воздушной перемычки, используемый для проекта, задан своим именем в файле LPF. Ниже приведена запись в файле LPF для объекта рисунка воздушного моста по имени **Process1**.

```
$BRIDGE_DRAW_BEGIN Process1 $BRIDGE_DRAW_END
```

Вывод воздушной перемычки обычно требует, чтобы некоторые из форм «отступили» от конца линии, в соответствии с нормами производства (чтобы не привести к короткому замыканию). Рис. 9.134 показывает смещение окончания линии передачи, на нескольких нарисованных слоях. Интервал, на который смещается каждый слой, регулируется выводом перемычки.

Воздушная перемычка и смещенные слои, необходимые для создания воздушной перемычки, считаются отдельными объектами перемычки. Окончательно этот объект компилируется в тот же самый файл Dll, который определяет параметризированные ячейки, используемые в процессе технологии производства. Пример ниже показывает шаблон, необходимый для создания вывода воздушной перемычки (он может быть

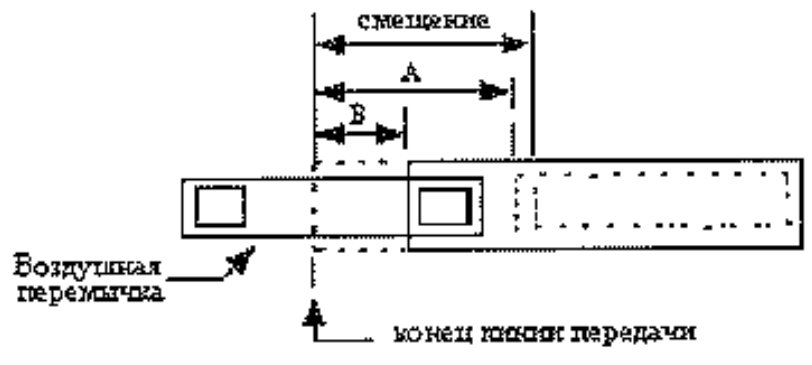


Рис. 9.134. Структура воздушной перемычки

определен и откомпилирован в тех же самых файлах, которые реализуют параметризированные ячейки).

```
AWR_CELL_UTIL_RECORD(KAirbridgeDrwUtil,"MyProccess",
"Airbridge for MyProcess","AWR",1)
```

Функции, которые должны быть определены, приводятся ниже. Первая функция используется для рисования перемычки (рис. 9.135), вторая функция, чтобы задать смещения слоя, которое необходимо для перемычки данного типа.

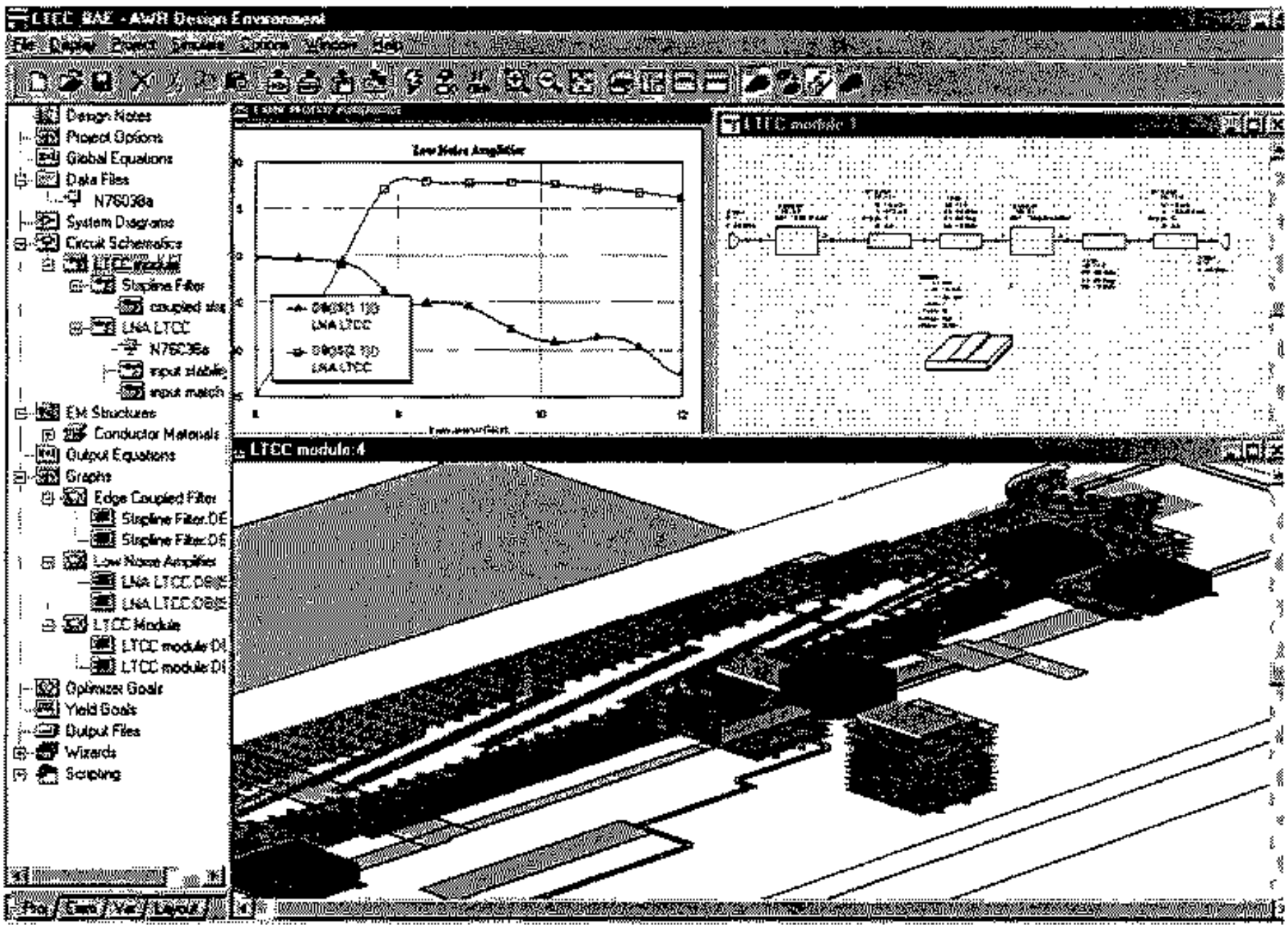


Рис. 9.135. Топология малошумящего усилителя с перемычками различных типов

Более полное описание этих функций находится в документации, предоставляемой средством разработки ячеек.

```
void KAirbridgeDrwUtil::DoDrawBridge(IKDrawSurface* ds,double W,
int nDims,
double* dims,
int bridgeLoc,
int lineType,
int bridgeType,
int connectToType,
double connectToWidth)
{
                    //Add airbridge drawing functions here
                     }
          bool KAirbridgeDrwUtil::DoRemoveBridgeLayer(int iLayer,
```

```
double W,
int bridgeLoc,
int lineType,
int bridgeType,

int connectToType,
double connectToWidth,
double* offset)const
{
     //Return the offset for iLayer in variable offset.
     //Return false if no offset.
}
```

9.13. Проверка правильности топологии

Операция проверки правильности топологии (**Design Rule Checking DRC**) предназначена для нахождения различных ошибок проектирования в активной топологии. Активная топология — эта та, которая в настоящее время отображена в активном окне. Операцией проверки будет проверены все уровни иерархии в иерархическом проекте, начиная с верхнего уровня. DRC может также охватить только один низший уровень иерархии, если это задать.

Имеются два типа проверок, которые выполняются, когда запускается DRC. Первый режим — проверка ячеек. Эта проверка может относиться и к неизменяемым, и к параметризированным топологическим ячейкам. Другая проверка — проверка полигонов. Эта проверка правильности создания конкретных полигонов, которые сгенерированы как плоские формы («плоские» означает, что все полигоны от всех уровней иерархии приводятся к одному уровню иерархии).

Диалог **DRC Rules** позволяет выбрать правила, которые будут проверяться, отмечая их в диалоге.

Чтобы обратиться к диалогу **DRC Rules** в режиме просмотра топологии нажмите на **Run DRC** на главной панели инструментов или выберите **Layout > Run DRC**.

Например, для определенной топологии возможно проверить правила создания, показанные на рис. 9.136.

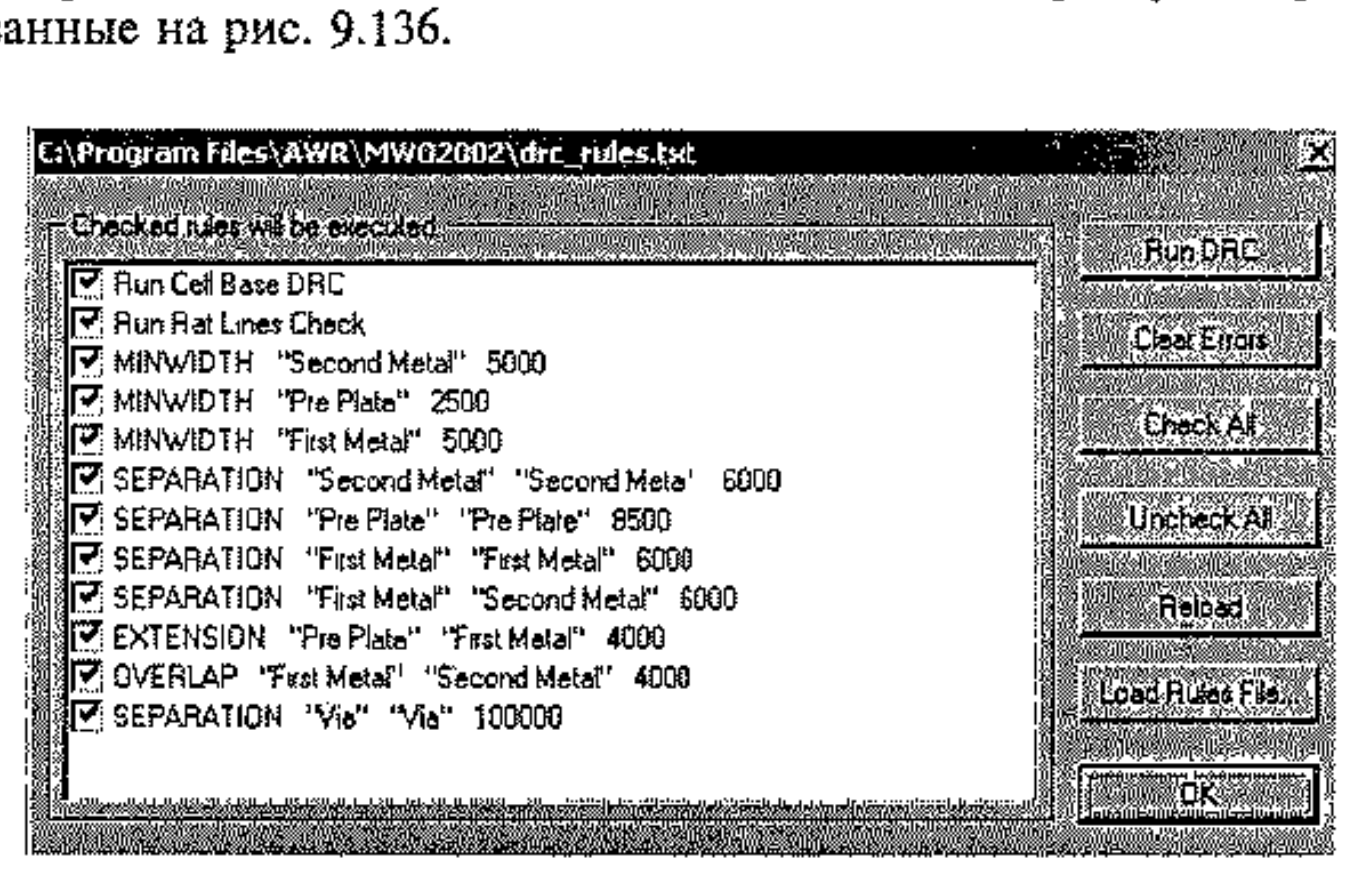


Рис. 9.136. Выбор режима проверки правильности топологии

Следующие правила DRC применяются к ячейкам и полигонам:

Правила объединения в группы:

```
DRC_GROUP_BEGIN <group_name>
<DRC rule>
<DRC rule>
...
DRC_GROUP_END
```

Выполнение булевых операций по отношению к двум слоям, при создании нового слоя: BOOLEAN_OPS <new layer name> <layer_1>

<operation: AND, OR, XOR, and SUBTRACT> <layer_2>

Пример:

BOOLEAN_OPS «Resulting Layer» «Second Metal» SUBTRACT «First Metal»

Запуск **Rat Lines Check** активизирует встроенные правила, которые предупреждают вас, если топология ячейки имеет ошибки в начертании линий.

Проверка, выполняемая по отношении к ячейке

Проверка по отношении к ячейке, используется к параметризированным топологическим ячейкам. Ячейка, нарисованная с помощью программируемого интерфейса API (*Application Programming Interface*), реализованного в MWO, позволяет осуществить проверку правил черчения в параметризированной топологической ячейке. Эти правила могут использовать величины и координаты ячеек, которые явно записаны или читаются из файла *.lpf (Layout Process File).

Проверка, основанная на ячейке осуществляется, применяя функцию проверки в реализации параметризированной топологической ячейки. Эти правила (рис. 9.137) могут использоваться, чтобы проверить правильность этого параметры и соответствие с данными, полученными при генерации из схемы конкретной топологической ячейки.

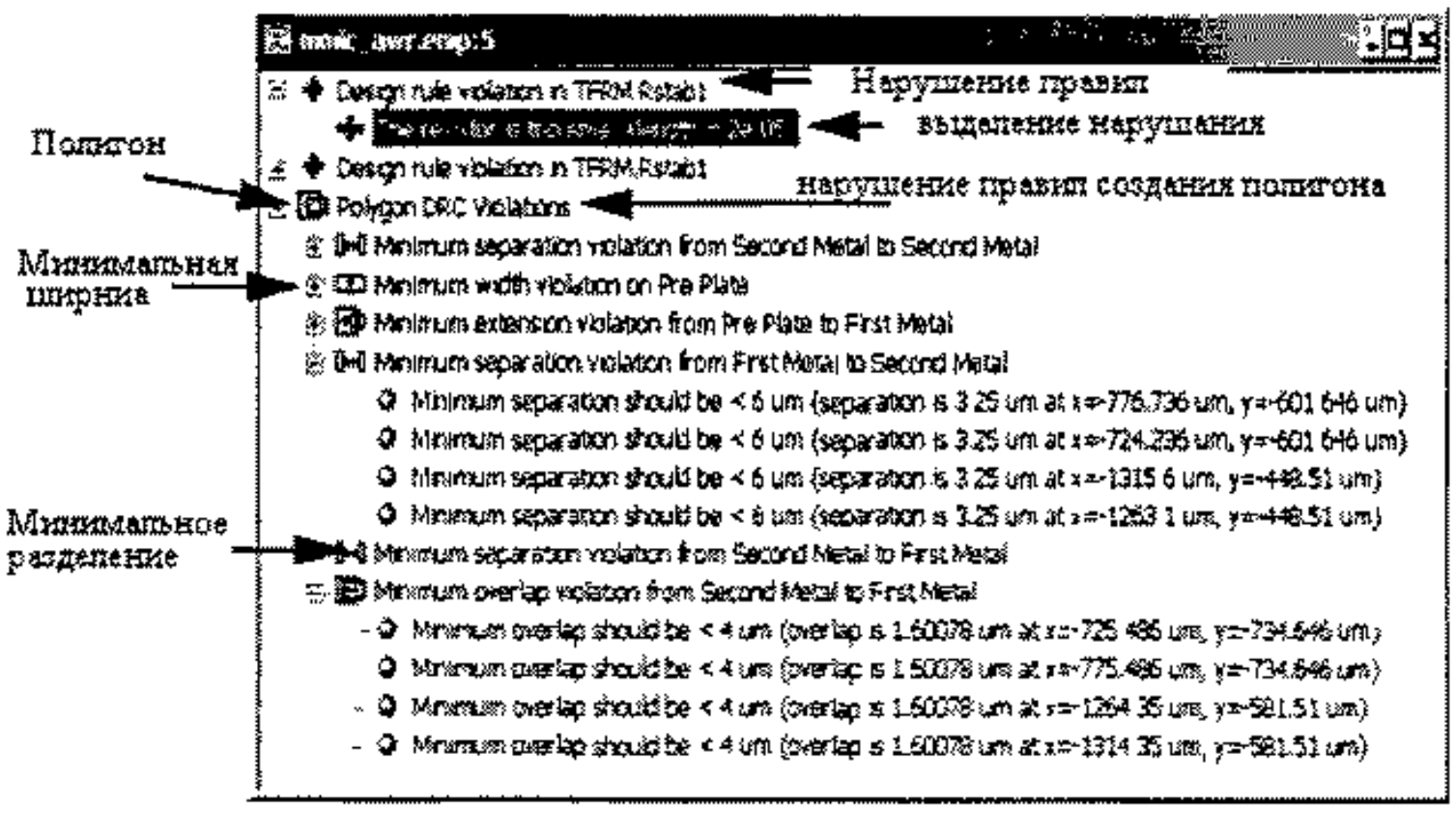


Рис. 9.137. Окно проверки правил создания топологии

При выполнении DRC для схемы, основанной на любой ячейке, нарушения будут внесены в список в окне нарушения. Двойное нажатие на нарушении заставит форму нарушения высветиться и раскрыть сообщение.

Проверка созданных полигонов

При анализе правильности создания полигонов набор правил применяется ко всем полигонам, сгенерированным схемой. Правила определены в файле правил, который может быть создан пользователем или изалечен из библиотеки. DRC автоматически сглаживает иерархию и объединяет все формы вместе на каждом отмеченном слое прежде, чем выполняется проверка. Проверка правил создания полигонов было так специализировано, чтобы работать с произвольной геометрией, которая часто применяется в СВЧ и ВЧ схемах. Например, включена специальная обработка изогнутых форм, чтобы предотвратить ложные ошибки на изогнутых линиях.

Имеются пять различных типов правил, которые в настоящее время поддержаны в проверке полигонов. Рассмотрим эти правила.

Минимальная ширина

Проверка правила минимальной ширины (**Minimum Width**) обнаруживает минимальную ширину линий и других форм (рис. 9.138). Любой полигон с расстоянием между противоположными гранями меньшим, чем минимальная ширина, вызовет нарушение. Для этого правила, определен только один слой.

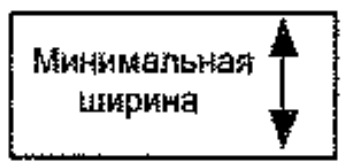


Рис. 9.138. Проверка минимальной ширины

Разделение

Правило разделения (**Separation**) проверяет минимальное разделение между двумя формами или на том же самом слое или различных слоях (рис. 9.139). Это правило может также использоваться при поисках малых промежутков в металлических слоях, которые слишком тонки, чтобы быть замеченными визуально. Это правило требует спецификацию этих двух слоев (эти два слоя могут лежать на одном слое).

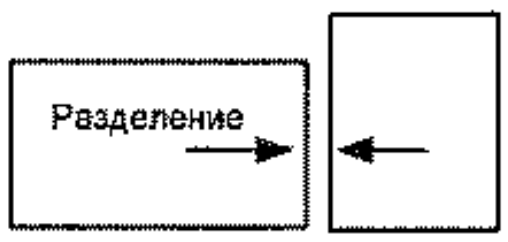


Рис. 9.139. Проверка разделения форм

Перекрытие форм на слоях

Это правило (**Overlap**)проверяет минимальное перекрытие одного слоя над другим слоем (рис. 9.140). Это правило часто используется, чтобы убедиться, что различные слои достаточно перекрываются, чтобы сделать технологичное подключение (например, перемычки). Правило требует, чтобы эти два слоя были

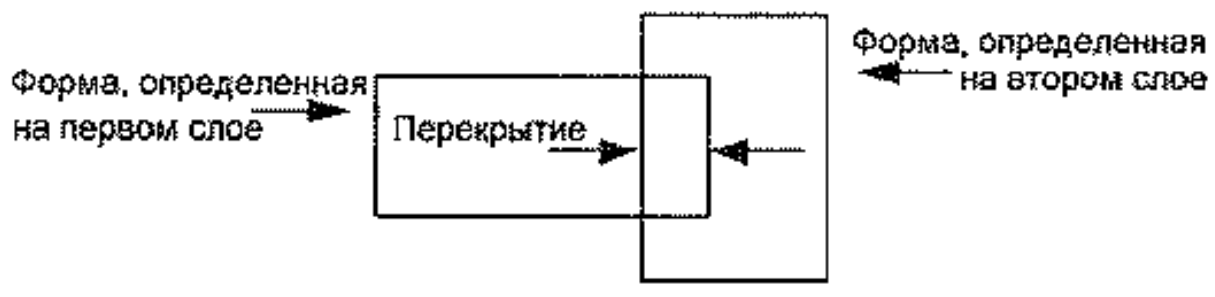


Рис. 9.140. Проверка перекрытия форм

определены, и они должны лежать на разных слоях. Правило не зависит от порядка слоев в технических требованиях. Например, правило: OVERLAP «A» «B» 1000 не должно быть одновременно с правилом OVERLAP «B» «A» 1000.

Общий синтаксис:

OVERLAP <layer_name1> <layer_name2> <distance [nm]>

Растяжение

Правило растяжения (**Extension**) проверяет минимальное вытягивание форм на одном слое относительно форм на другом слое. Рис. 9.141 показывает расстояние, которое проверяется. Это правило часто используется, чтобы убедиться, что линия и шлейфы достаточные по величине (например, при металлизации линии). Это правило требует, чтобы в конструкции были два слоя, и они должны быть различны. Для того, чтобы не дублировать, принято, что правило EXTENSION «A» «B» 1000 не должно дублировать случай EXTENSION «B» «A» 1000.

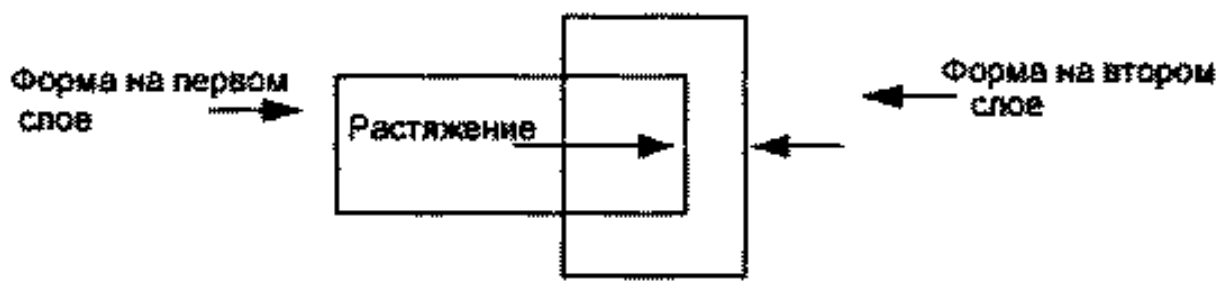


Рис. 9.141. Проверка смещения форм

Паз

Правило паза **Notch** проверяет минимальную ширину паза в форме, как показано на рис. 9.142. Это правило требует, чтобы только один слой был определен.

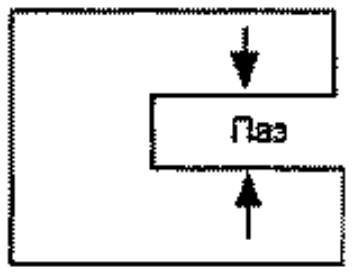


Рис. 9.142. Проверка ширины паза

Показ нарушений правил создания топологии

Нарушения правила проектирования показаны в окне **Design Rule Violation** (рис. 9.137). Нажмите дважды левой кнопкой мыши на нарушение правил и программа выведет информацию о данном нарушении.

Пример нарушения правила проектирования показываются на топологии рис. 9.143. Круг представляет минимальное расстояние, необходимое, чтобы выполнить правило, и концы стрелок фактически неверные. В примере на рис. 9.143, нижияя линия, которой касается круг, вызывает нарушение разнесения на минимальную ширину, которое равно 50 um. Если курсор мыши поместить поверх нарушения в окне схемы, то на экране высветится окно, в котором будет показано описание нарушения (минимальное разделение по умолчанию). Когда конкретный тип правила выбран в окне **Design Rule Violation**, высветятся нарушения для того правила, изменяя зеленый цвет на красный.

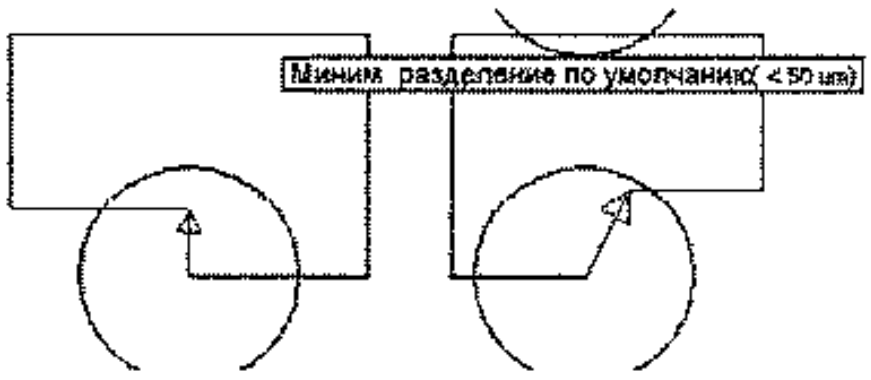


Рис. 9.143. Пример ошибки черчения топологии. Правый чертеж имеет паз больше, чем разрешено в правилах

Файл правил, основанный на полигоне

Правила DRC просты и осуществляются с использованием простого текстового редактора. Все размеры в файле правил должны быть кратны целому числу нанометров. Например, расстояние 2 um должно быть введено как 2000.

Расположение файла drc_rules.txt может быть определено в файле.lpf. Синтаксис строки следующий:

```
! -- Файл, используемый для проверки DRC полигона ----
$DRC_RULES_FILE_BEGIN
"$MWO\drc_rules.txt"
$DRC_RULES_FILE_END
```

Чтобы использовать другой файл правил, замените $MWO\drc_rules.txt другим именем файла, содержащим правила DRC, которые вы желаете использовать в проекте. $MWO — корневой каталог Microwave Office.

Синтаксис файла правил очень прост. Каждое правило имеет ключевое слово, которое сопровождается одним или двумя названиями слоя (в зависимости от правила) в кавычках и минимальном интервале. Интервал всегда определяется в целом числе нанометров. Имеется пять ключевых слов правила:

MINWIDTH
NOTCH
SEPARATION
EXTENSION
OVERLAP

Ключевые слова MINWIDTH и NOTCH — это названия проверяемых правил, которые требуют также дополнения в виде одного названия слоя, или двух названий слоев.

Пример файла правил показывается ниже:

```
MINWIDTH "Second Metal" 5000
MINWIDTH "Pre Plate" 2500
MINWIDTH "First Metal" 5000
NOTCH "First Metal" 3000
SEPARATION "Second Metal" "Second Metal" 6000
SEPARATION "Pre Plate" "Pre Plate" 8500
SEPARATION "First Metal" "First Metal" 6000
SEPARATION "First Metal" "Second Metal" 6000
EXTENSION "Pre Plate" "First Metal" 4000
OVERLAP "First Metal" "Second Metal" 4000
SEPARATION "Via" "Via" 100000
```

Вывод и анализ нарушений правил

Нарушения правил проектирования сообщаются в окне **Design Rule Violation**. вы можете дважды щелкнуть на строку, указывающую нарушение, чтобы получить более подробную информацию.

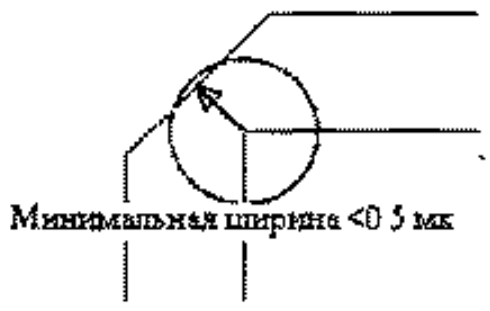


Рис. 9.144. Если срез выполнен так, что минимальное расстояние < 0.5 мк, то дается предупреждение

Например, нарушения правила черчения полигона показываются в схеме следующим образом (рис. 9.144). Круг представляет минимальный интервал, необходимый, чтобы удовлетворить правилу и конец стрелки показывает конкретное нарушение.

В этом примере, наклонная линия, которая касается круга, проведена с нарушением минимальной ширины в углу. Если вы перемещаете мышь поверх нарушения в окне **Layout**, появляется окно, которое сигнализирует нарушение и дается его описание. Когда вы выбираете конкретное правило в окне **Design Rule Violation**, в случае нарушения этого правила, сообщения будут поочередно вспыхивать красным и зеленым цветами.

Глава 10
Анализ систем связи

Программа **VSS** (Visual System Simulator) — инструмент анализа систем связи на системно-функциональном уровне. Она полностью интегрирована с **MWO** и позволяет выполнить проектирование систем и разработку схем, входящих в эту систему одновременно.

10.1. Введение в VSS

Программа **VSS** позволяет проектировать системы, используя различные методы моделирования и кодирования сигналов в различных блоках [17, 18]. Так, вы можете выполнить моделирование структурной схемы передатчика и приемника, составленных из компонентов на системном уровне, таких как усилители, смесители, фильтры, а также учесть условия распространения радиоволн (блочное построение части приемника показано на рис. 10.1). Проектирование радиосистемы, каждый из функциональных блоков которой описан небольшим количеством параметров и часто независимых от частоты, традиционно называется эскизным проектированием. Такое проектирование предназначено для отработки требований к отдельным блоками и функциональным узлам на основании заданных характеристик на все устройство. Однако, важнейшие характеристики на все устройство (например, вероятность поражения цели, точность наведения координат) часто имеют статистические свойства и не выражаются непосредственно через характеристики, присущие радиоблокам (такие как коэффициент усиления, коэффициент шума и др.). Поэтому эскизное проектирование всегда носило приближенный характер. С появлением программ анализа систем, таких как VSS, проектирование переходит на новый качественный уровень. VSS, как программа, имеющая уклон на проектирование систем радиосвязи, позволяет рассчитать характеристики BER (коэффициент битовых ошибок), ACPR (мощность в соседнем канале), спектры в различных каналах системы. Немаловажным является то, что описание в виде блоков не исключает учета взаимовлияния между блоками. **VSS** позволяет выполнить подстройку в режиме реального времени, аналогично подстройке в программе MWO, сразу наблюдая за изменением характеристик.

Рассмотрим сначала пример, в котором используются аналоговые системные блоки. Это приемник с двойным преобразованием частоты, реализованный в виде каскадного соединения блоков (рис. 10.1). Расчет, выполненный на системном уровне, называется бюджет анализ (или экономичный анализ), заменив рекомендованное ранее эскизное проектирование. Такой анализ выполняется быстро, и позволяет оценить влияние характеристик любого блока на характеристики всей системы.

Он был реализован в версии MWO 2002.

Метод анализа системы в MWO может быть как линеаризированный, так и полноценный нелинейный гармонический анализ. В результате моделирования мы получаем гармонический состав выходного сигнала и все линейные и нелинейные характеристики системы.

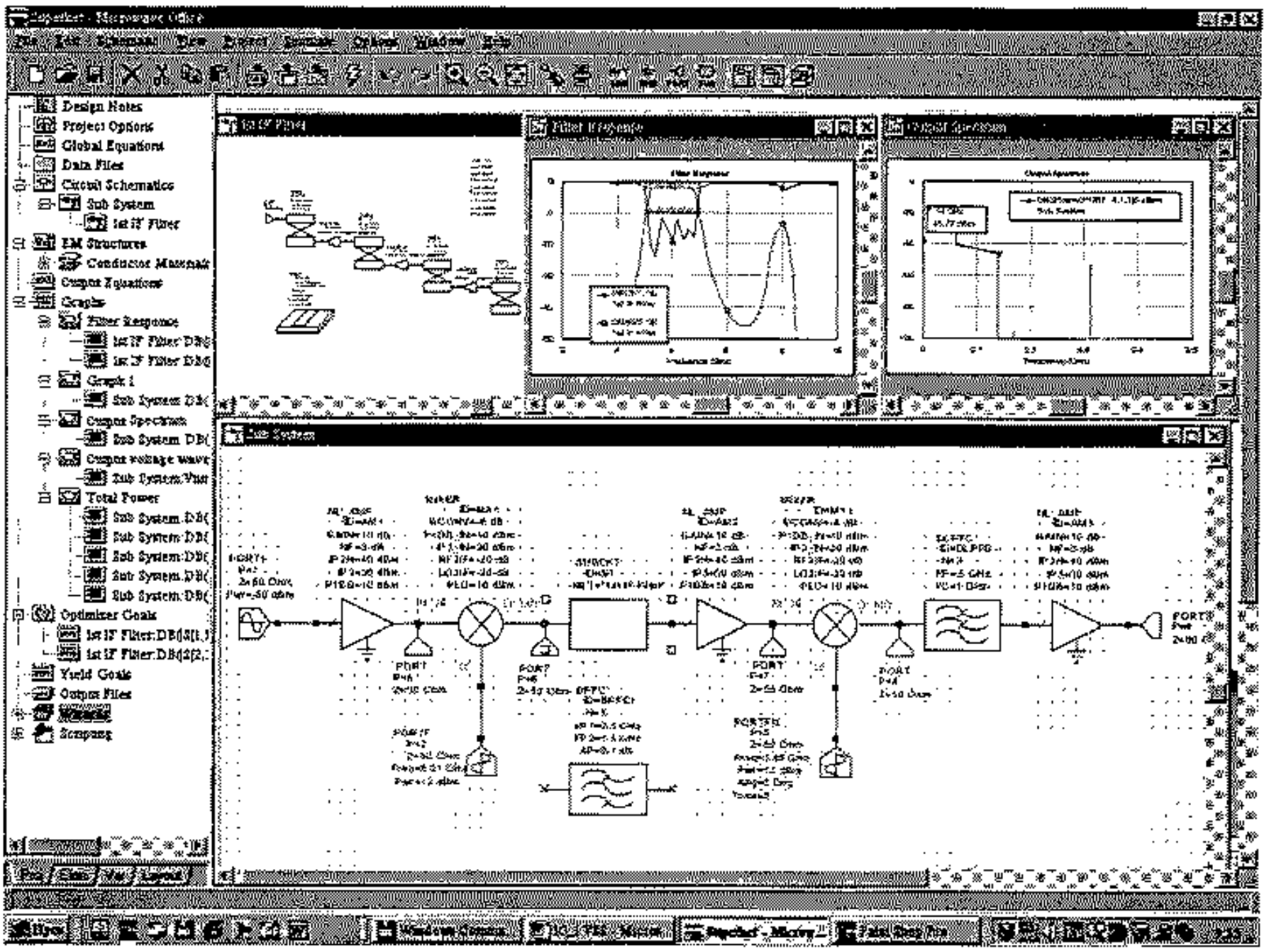


Рис. 10.1. Расчет приемника с двойным преобразованием частоты, один из фильтров которого анализируется отдельно и представлен в виде подсхемы

Следующий пример — анализ линии связи абонентского телевидения — это пример анализа на системном уровне, выполненный, используя библиотеки и компоненты VSS (CATV RF link).

На входе этой системы (рис. 10.2) стоит многогармонический источник NTONES, имеющийся в библиотеке VSS, для генерирования трех гармоник с частотами 441 МГц, 447 МГц и 453 МГц равной мощности. Первый пробник TP1 выводит график «Input Tones» показывает спектр трех гармоник.

Сигнал с выхода источника NTONES поступает на идеальный усилитель и идеальный смеситель с частотой гетеродина LO, равной 773 МГц.

С выхода смесителя сигнал проходит через полосовой фильтр BPF **up_filter** (нижняя частота полосы пропускания 1210 MHz, верхняя частота 1230 MHz).

С фильтра **up_filter** сигнал поступает на следующий смеситель (преобразователь вниз) с частотой LO, равной 1176,25 МГц. Обработанный сигнал проходит другой полосовой фильтр BPF (down_filter: нижняя частота 36 MHz верхняя 52 MHz).

Блок VSS решает задачу анализа системных характеристик принципивльно на другом уровне. Он использует в качестве критерия не сигналы в виде напряжения, тока или мощности, и не такие их производные, как спектр или спектральные характеристики, а *потоки данных*.

VSS использует блочный метод для обработки потоков данных между узлами системы. Коммутаторы блоков не просто осуществляют связь, но являются «элас-

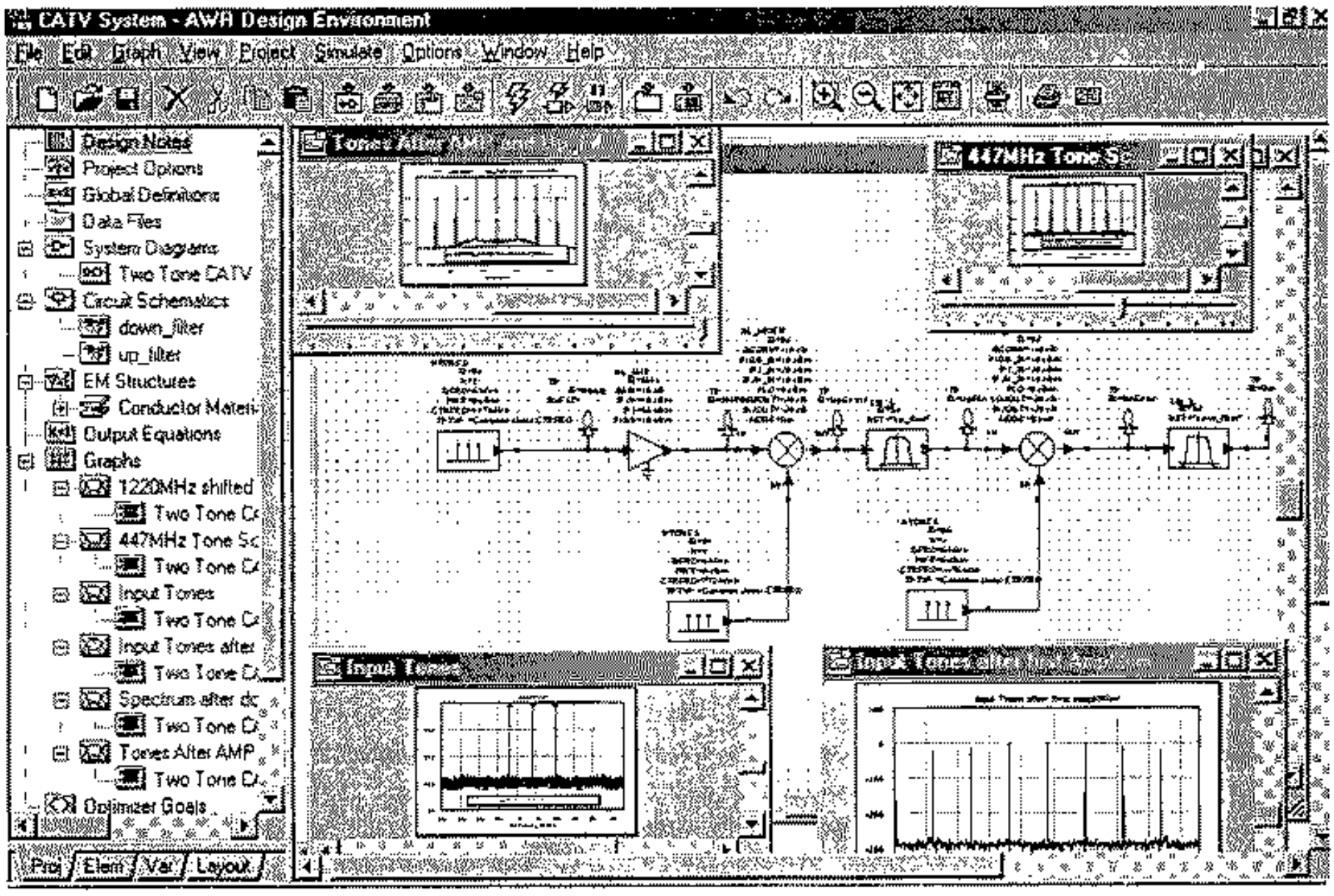


Рис 10.2. Схема VSS анализа линии связи абонентского телевидения

тичными буферами», преобразователями типов данных, например, из численного потока во временной поток данных. Линии между блоками автоматически устанавливают правильное преобразование данных при расчете частоты ошибочных битов (BER), используя асинхронную передачу данных. В этом расчете без вмешательства пользователя используется несколько типов обрабатываемых данных. Чтобы избежать проблем, связанных с контурами обратной связи, блоки VSS запрограммированы так, чтобы выполнять расчеты численных значений потока данных в дискретные моменты времени.

VSS позволяет анализировать сложные системы, включая тракты приемника и передатчика, связанные через дуплексный фильтр с антенной. Набор программ подходит для моделирования и улучшения эффективности систем радиосвязи, быстродействующих систем цифровой проводной связи и оптических систем связи.

VSS дает возможность пользователям быстро создать блок-схему сложной радиосистемы, затем проанализировать эффективность выбранных блоков или всей системы, используя встроенные функции характеристик (т. н. постобработка результатов расчета) и сложные сигнал-генераторы. Инструментальные средства могут моделировать практически любую схему модуляции, включая амплитудную (AM) и частотную (ФМ) модуляцию с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), квадратурной амплитудной манипуляцией (QAM), модуляцией методом минимального фазового сдвига (MSK) и фазовой манипуляцией (PSK).

VSS унаследовала лучшие свойства программы *Advanced Communication Links Analysis и Design Environment* (ACOLADE). Она включает большую библиотеку системных элементов с более чем 230 компонентами и математическими функциями, а также элементами, используемые для моделирования широкополосных систем связи (табл. 10.1). Модели включают кодеры/декодеры (включая кодеры Viterbi,

Reed-Solomon и сверточного типа), модуляторы/демодуляторы и цифровые фильтры.

В VSS имеются нужные на практике компоненты для многих стандартов связи, включая IS-95, IEEE 802.11, беспроволочных локальных сетей (WLAN), системы с увеличенной скоростью передачи данных EDGE, системы связи GSM и систем третьего поколения (3G) радиосвязи цифровых стандартов.

Принимая во внимание, что сигналы, используемые в современной радиосвязи, стали существенно более сложными, обычные способы оценки эффективности системы становятся неадекватными. Существующие программы анализа на системном уровне, типа AppCAD, SysCAD, основанные на аппроксимации аналитических функций и таблиц, весьма приблизительно оценивают качество современных систем. Проектирование систем нуждается в таком инструменте, когда учитывается влияние соседних блоков, допускается построение разветвленной структуры, а также выполняется коэмуляция, т. е. анализ аналоговых и цифровых узлов в одном процессе проектирования.

В программе VSS, как и в других программах анализа систем, проект создается из библиотечных моделей, которые соединяются между собой непосредственно.

Пакет VSS рассчитывает формы и спектры сигналов, выполняет статистический анализ методом Монте-Карло, сквозное моделирование канала с учетом кодирования данных в источнике модуляции, демодуляции, цифровой обработки сигналов, а также учитывает специфические характеристики канала: замирание, многолучевость распространения сигналов и наличие помех различных типов. Кроме того, программа VSS имеет несколько библиотек для анализа систем связи с обширными возможностями обработки и кодирования цифровых данных. Программа работает с потоками данных и позволяет моделировать устройства с большими скоростями передачи данных, а также с асинхронными потоками.

Базовая часть пакета VSS содержит около 100 моделей основных функциональных блоков систем связи. Подключение библиотеки *Advanced Transmission Library* позволяет применять более сложные виды модуляции и методы кодирования. Библиотека *Coding Library* состоит из цифровых моделей кодирования, декодирования и преобразования данных, например для кодирования с использованием алгоритма Рида-Соломона и стандарта 3GPP.

В библиотеку *RF/Analog Library* входят различные АЦП, ЦАП, смесители, усилители, модуляторы, источники шума и фильтры, описанные на системном уровне и позволяющие оценивать уровни паразитных комбинационных составляющих, интермодуляционных искажений и перекрестной модуляции в частотной области, а также анализировать линейные и нелинейные зависимости, импульсные характеристики и эффекты модуляции во временной области. Для анализа систем с кодовым разделением каналов имеется библиотека *CDMA Library*, содержащая корреляторы данных, кодеры Витерби и Уолша, модуляторы и демодуляторы широкополосных сигналов.

10.2. Структура VSS 2002

VSS 2002 имеет обширную библиотеку блоков, которые могут моделировать каналы, передатчики, приемники, кодеры и декодеры. В свою очередь, эти блоки могут использоваться, например, чтобы создавать сигнал произвольной формы. Эти блоки могут быть написаны на языке C++ и вычисляться с двойной точностью.

Дополнительная гибкость дает возможность чтения извне данных в различных форматах. Таким образом, могут вводятся AM/PM зависимости усилителей мощности и других нелинейных блоков, интермодуляционные таблицы смесителей, компоненты, задаваемые уровни фазовых шумов, и файлы данных S и шумовых параметров. Иерархические проекты реализуются с помощью подсхем «Sub-System».

Таблица 10.1. Компоненты программы VSS

	Группа блоков VSS	**Имена компонент**
1	Каналы связи	AWGN, DPLRSHFT, RAYLEIGH, MULTPATH, RUMMLER
2	Кодеры/ декодеры	CNV_ENC. DIFF_DEC, DIFF_ENC. VIT_DEC, RS_DEC, RS_ENC, CNV_DLVR, CNV_ILVR, DSSC. LFSR_SRC
3	Конверторы	ADC, DAC, B2SYM, SYM2B, C2RI, R2D, R2C, D2R, RI2C, C2MP. CPHASE, CMAG. MP2C
4	Цифровые фильтры	FIR_FRQ. FIR_IMP, IIRFLT_AB, IIRFLT_PZ, BPFIR_ER, BPIIR_BN, BPIIR_CN_, BSFIR_ER, BSIIR_BN, BSIIR_CN, HPIIR_BN, HPIIR_CN, HPFIR_ER, LPIIR_BN, LPFIR_ER, LPIIR_CN
5	Математические функции	AND16, AND2, AND4, AND8, OR16, OR2, OR4, OR8, XOR16, XOR2, XOR4, XOR8, ABS, ACOS, ASIN, ATAN. COS, DIFF, DIV, EXP, LOG, LN, MOD, NEG, TAN, SQRT, SQR, SIN, SCALE, RECIP, POW, NORM, ADD16, ADD8, ADD4, ADD2, MULT2, MULT8, MULT4, MULT16, DEMUX2, DEMUX4, DEMUX8, DEMUX16, MUX2 MUX4, MUX8, MUX16
6	Цифровые измерители	CP_METER, PS_METER, TP, BER, BER_EXT, SER, SER_EXT, VNA_LS, VSA, VNA_SS
7	Модуляторы	BPSK_DET, BPSK_MAP, BPSK_SRC, BPSK_RX, BPSK_TX, RCVR, MPSK_SRC, MPSK_RX. MPSK_MAP, MPSK_DET, MPSK_TX, MSK_SRC, MSK_RX, MSK_TX, OFDM_DET. OFDM_MAP, OQPSK_TX. OQPSK_SRC, OQPSK_RX
8	Порты	PORTDIN, PORTDOUT
9	Радиоблоки	COMB_N, LOGAMP, NL_AMP, NL_MIXER, QHYB_12
10	Блоки цифровой обработки	ATTEN, INTG_DMP, PHASE, PK2AVG, FRQSHFT, RUN_AVG
11	Источники цифровых сигналов	SRC_FRQ, SRC_C, SRC_D, SRC_R,WGNS, COLORNS
12	Блоки тестирования	TST11N, TST2IN

Программа VSS 2002 объединяет многоуровневую программу моделирования во временной области с методом управления потока данных. Системные блоки связываются в VSS 2002 через адаптивные буферные преобразователи, преобразующие потоки данных в численные значения и в времязависимую огибающую радиосигнала. Эти преобразователи обеспечивают точную настройку данных без необходимости введения звеньев задержки для каждого блока, упрощая, например, расчет характеристики BER. Эти преобразователи позволяют моделировать син-

хронные и асинхронные передачи данных и учитывать на системном уровне эффекты ухудшения сигнала за счет наличия шумов и искажений.

Системы могут моделироваться в частотной или временной области.

Программное обеспечение расчета на системном уровне может моделировать широкий диапазон рабочих показателей качества, включая спектральную плотность сигнала, модуль вектора ошибки (EVM), и относительную мощность в соседнем канале (ACPR). Настройка в режиме реального времени позволяет подстраивать любые характеристики блоков, например коэффициента усиления и коэффициента шума малошумящего усилителя (LNA), и сразу наблюдать влияние их параметров на эффективность системы.

Кроме того, можно использовать системные функции для последующей обработки сигнала, и использовать эти данные для дальнейшей обработки.

Системные инженеры, используя VSS 2002, могут разрабатывать технические требования, которые после этого можно использовать в MWO 2002 для проектирования ВЧ и СВЧ компонентов, причем можно выполнять расчет компонентов и моделирование на системном уровне одновременно (эта процедура называется косимуляция). Например, можно использоваться два принципиально разные метода, чтобы корректировать смещение на усилителе или транзисторе при анализе BER. Кроме того, **VSS 2002** обеспечивает связь с другими программами моделирования, включая Matlab.

Рассмотрим несколько примеров использования VSS для обработки потока данных в системе. В проекте 16QAMSER (рис. 10.3) рассчитывается характеристика Symbol Error Rate (SER) сигнала с амплитудной и фазовой модуляцией типа 16QAM.

Блок **QAM_SRC** (из категории Modulated Signals) используется для генерирования сигнала модуляции (в базовой полосе) со спектром в виде приподнятого косинуса, (Root Raised Cosine, RRC) 16QAM сигнала.

Если дважды нажать на блок **QAM_SRC,** появится диалог Element Options, затем кликните на **Show Secondary** чтобы увидеть все параметры блока. В модели **QAM_SRC**, задается модуляция QAM и импульсная характеристика фильтра.

Показываются сигнальные созвездия передатчика (TX) и приемника (RX).

Вид сигнального созвездия TX зависит от фильтра с импульсной характеристикой, сформированной RRC.

Дополнительный белый Гауссов шум добавляется в блоке AWGN, следующим за моделью QAM_SRC.

Приемник RCVR используется, чтобы демодулировать сигнал. Он автоматически устанавливает свои параметры в соответствии с параметрами передатчика TX.

Блок расчета ошибок символа (SER) используется, чтобы сравнить принятые символы с переданными символами. В этом примере переменная Es_N0 последовательно меняется в блоке SER. Блок SER сам генерирует первоначальную последовательность данных, используемую в блоке TX, и затем этот блок ожидает появление 50 ошибок в максимальном количестве 1e6 переданных символов. После того, как модель рассчитает 50 ошибок, переменная Es_N0 увеличивается до следующего значения.

Эта переменная управляется уравнением Es_N0 = sweep(stepped(2,18,2)). Расчет характеристики SER начинается со значения SER= 2 и приращивается на 2 при каждом шаге расчета. Блок SER продолжает считать до получения 50 ошибок. Моделирование заканчивается на значении Es_N0=18. Спектральная плотность шума AWGN сохраняется на постоянном значении 0 дБ. Фактически, во время

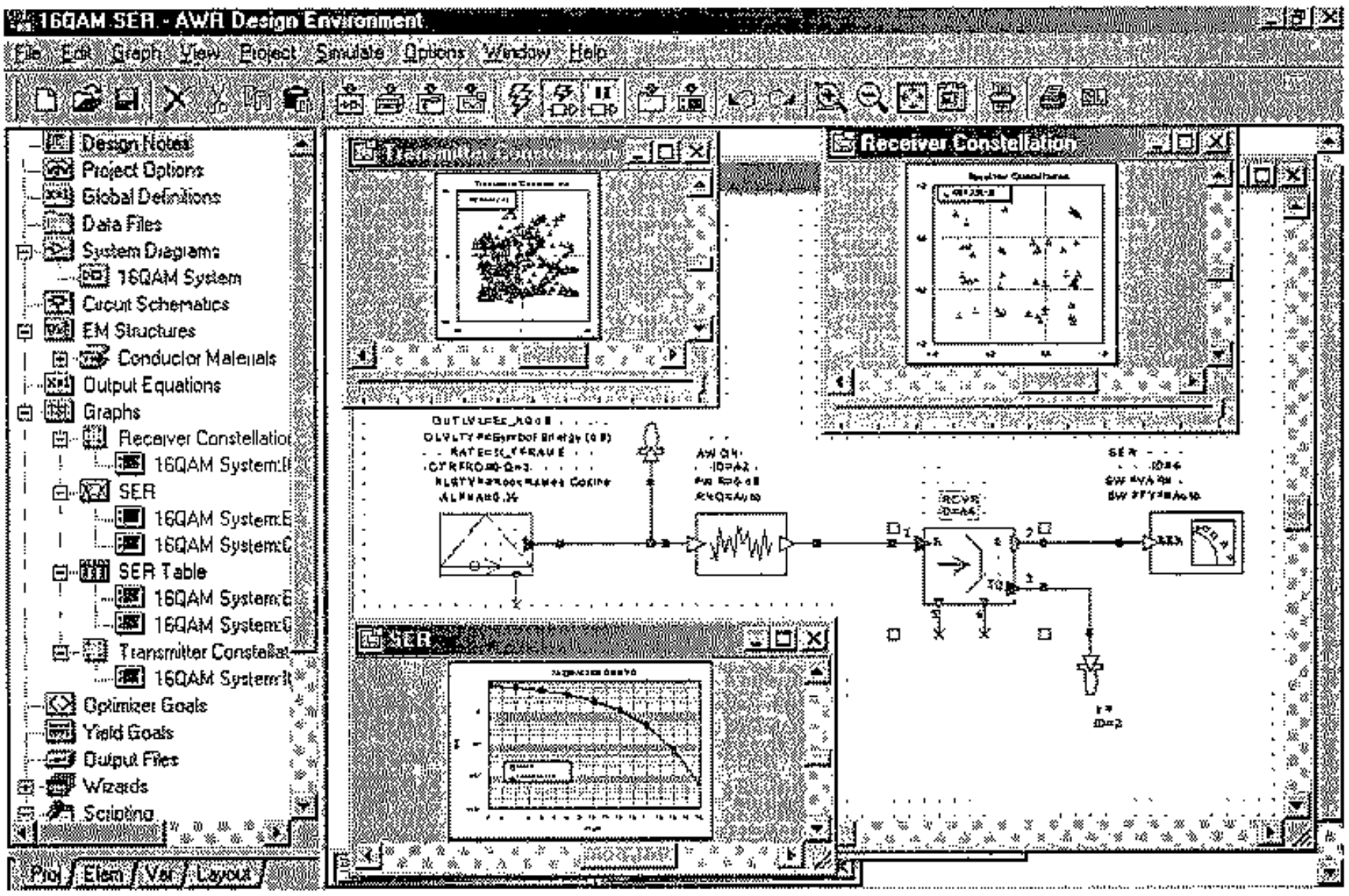


Рис. 10.3. Использование VSS для расчета характеристики Symbol Error Rate (SER) для сигнала с амплитудной и фазовой модуляцией 16QAM

моделирования SNR уровень AWGN изменяется в диапазоне 2, 4, 6...18, и в блоке SER выполняется расчет для каждого SNR.

Если вы желаете получить более низкий SER, тогда надо увеличить число максимальных символов в моделировании SER, а также выбрать более высокое значение Es_N0. Чем выше SNR и ниже желательный SER, тем больше символов вы должны сравнить для получения 50 ошибок.

Для сравнения опорная характеристика 16QAM SER наносится на том же графике.

VSS можно использовать также для анализа нелинейного усилителя с широкополосным сигналом на входе (рис. 10.4).

В этом примере на вход нелинейного усилителя мощности подается широкополосный сигнал стандарта EDGE, используемый в сотовой связи. Сигнал EDGE подается также на вход идеального неискажающего усилителя. Используя такую идеальную модель, мы можем сравнить степень искажения широкополосного сигнала на выходе усилителя по сравнению со случаем отсутствия искажений. Нелинейность усилителя устанавливается параметрами входной мощностью по сжатию усиления на 1 dB, равной 15 dBm, точкой пересечения второго порядка IP2=40 dBm, точкой пересечения третьего порядка IP3=30 dBm. Хотя эти характеристики и тестируются для гармонических сигналов на входе, их можно использовать для установки степени искажений и для случая широкополосного сигнала. Усиление усилителя равно 5 dB.

Блок анализатора цепей при воздействии большого сигнала позволяет рассчитать мгновенную мощность на выходе усилителя по отношению к мгновенной выходной мощности усилителя. Эта характеристика показывают, что для случая ши-

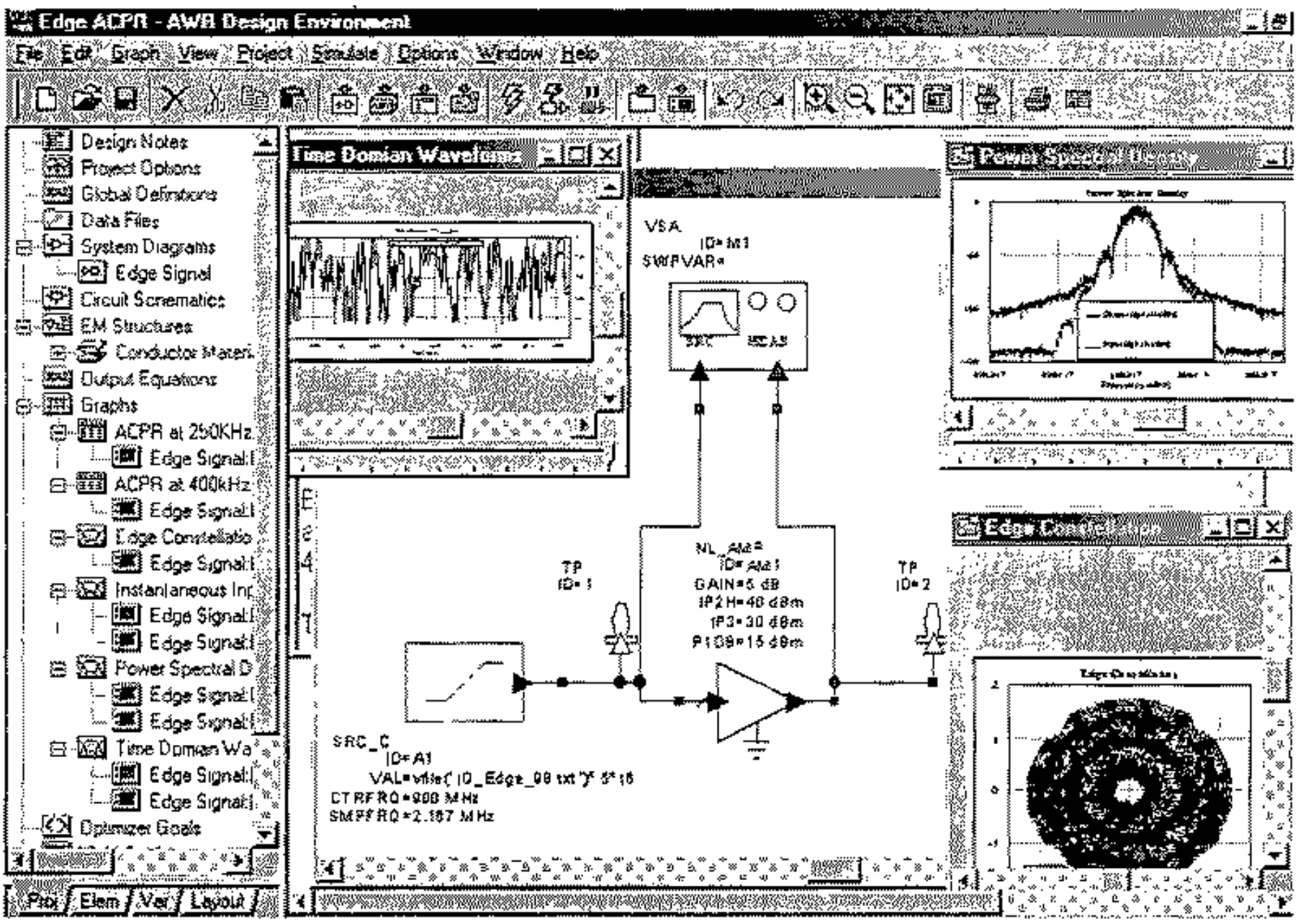


Рис. 10.4. Анализ нелинейного усилителя в цифровой области

рокополосного сигнала начинает входить в насыщение при меньшей мощности на входе, чем входная мощность при которой наблюдается сжатие усиления 1 dB. Поэтому для оценки нелинейных искажений реального широкополосного сигнала необходимо использовать более сложные критерии оценки нелинейных искажений, например ACPR — Adjucent Channal Power Ratio (рис. 10.4). Можно вывести форму волны во временной области. После 3 секунд расчета имеется возможность вывести спектральную плотность, полученную БПФ по 4096 точкам и увидеть искажение спектра.

10.3. Создание проектов VSS

Первый шаг в моделировании системы — создание проекта. Чтобы создать новый проект, выберите **File > New Project** (рис. 10.5) и присвойте ему имя, выбирая **File > Save Project As...** Чтобы открыть существующий проект, выберите **File > Open Project...**, а чтобы его сохранить — **File > Save Project**.

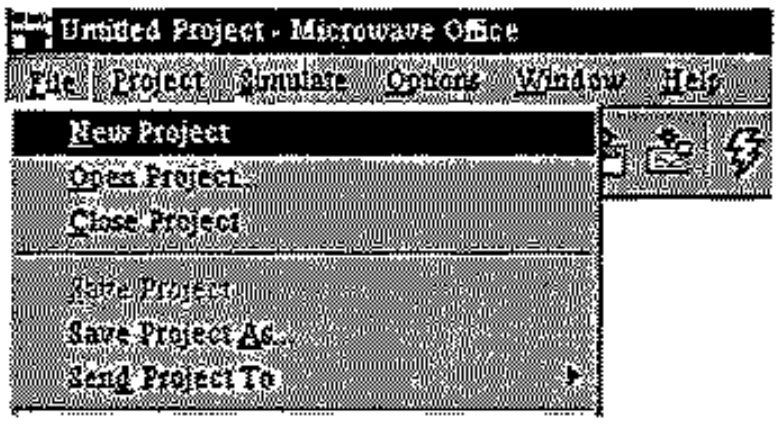


Рис. 10.5. Создание нового проекта для анализа системы

Проект VSS может включать несколько систем, линейных и нелинейных схем. Чтобы создать блок-схему новой системной диаграммы, щелкните правой кнопкой мыши на узле **System Diagrams** в дереве проекта и выберите **New System Diagram** (рис. 10.6).

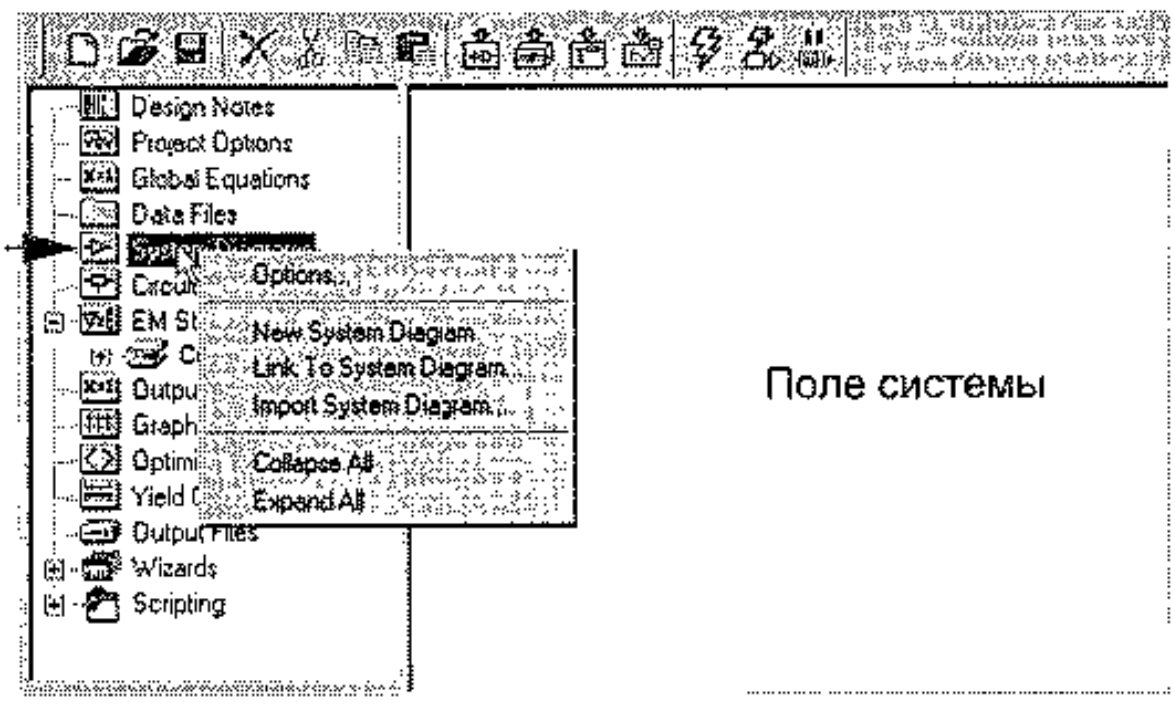


Рис. 10.6. Создание новой структуры (системной диаграммы)

После того, как вы присвоили системной диаграмме имя, открывается окно новой системной диаграммы. В левом верхнем окне в дереве проекта содержатся все блоки и параметры, которые определяют структуру системы. Меню и инструментальная панель видоизменяются и появляются новые кнопки для контроля и моделирования системы.

Чтобы добавить блок к системной диаграмме, нажмите закладку **Elem** в нижнем левом окне и вместо дерева проекта появится браузер системных блоков.

Чтобы поместить блок в систему, щелкните курсором по его символу, который находится в нижнем левом окне и переместите его в окно системной диаграммы, отпустите левую кнопку мыши, щелкните правой кнопкой, чтобы вращать элемент (если необходимо) и поместите его в нужной точке очередным щелчком.

Для редактирования параметров блока дважды щелкните на его символе. Раскрывшееся диалоговое окно показывает, какие параметры можно изменить.

Добавление подсистем в System Diagrams

Подсистемы позволяют создавать иерархические системы и импортировать результаты схемотехнического моделирования непосредственно в блок-схему системы (рис. 10.7).

Имеющиеся подсистемы показываются в собственных окнах, вложенных в проект. Это детекторы, генераторы сложных сигналов, согласованные фильтры и т. п.

Чтобы добавить к системной диаграмме подсистему, сначала нужно создать новый проект командой **Project > Add System Diagram > New** или импортировать командой **Import System Diagram** и затем добавить порты в данной подсистеме.

Созданная подсистема появляется в списке **Subcircuit** в закладке Elem. Чтобы редактировать параметры подсхемы, выберите эту подсхему в окне System Diagram, а чтобы поместить ее на основную систему, просто перетащите из нижнего левого окна в окно системной диаграммы.

Чтобы подключить систему, рассматриваемую как подсистему, к другой системе, необходимо подключить сначала к подсистеме порты, которые обозначают подсхему.

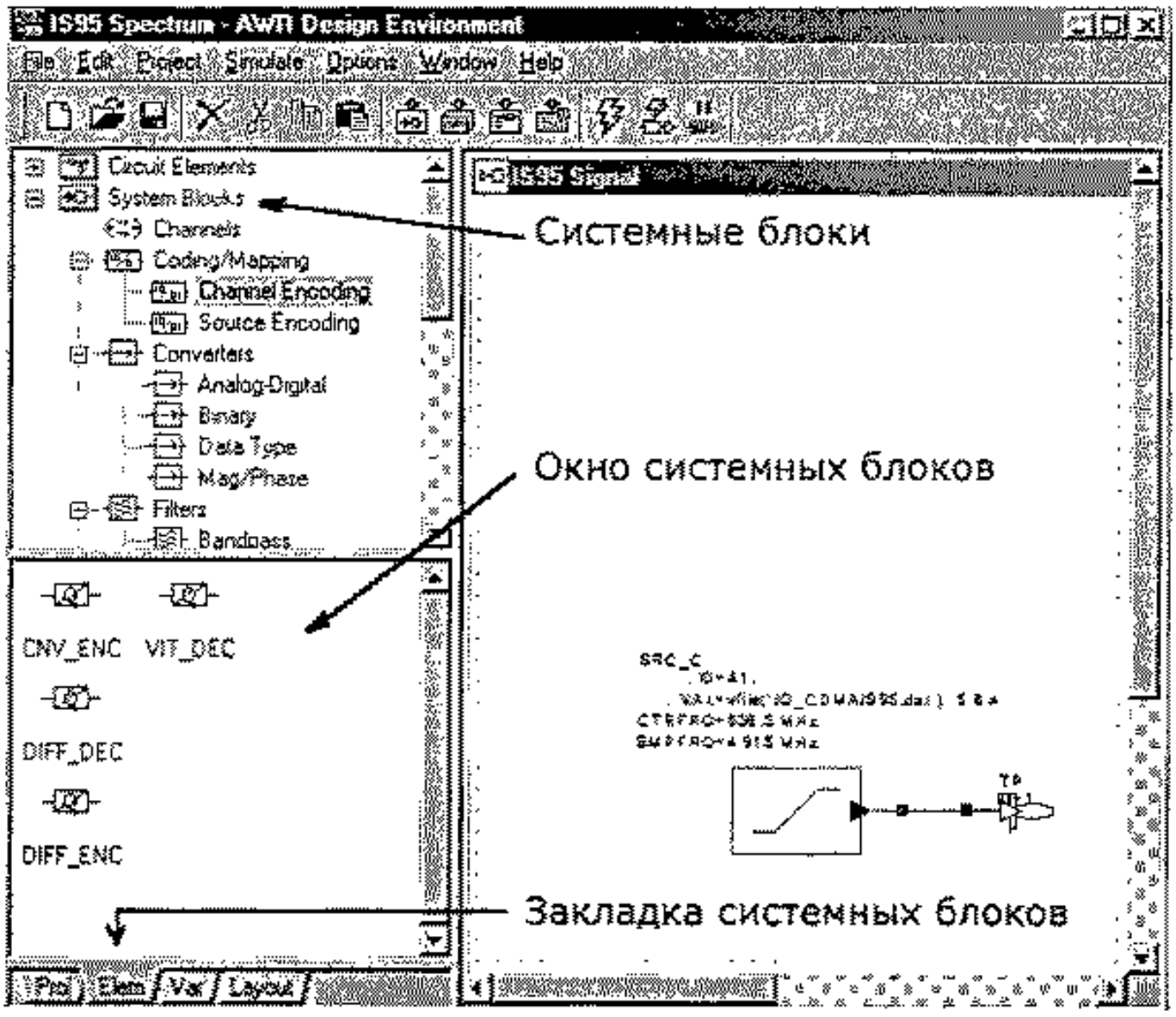


Рис. 10.7. Окно VSS и добавление подсхемы из окна системных блоков

Нажмите в инструментальной панели кнопку **Port** и поместите порт в нужном месте, щелкнув курсором на **Ports** в System Block Browser, и подключив входной (PORTDIN) и выходной (PORTDOUT) порты в соответствующих точках системе.

Создание графиков

VSS выводит различные графики для просмотра результатов моделирования (с помощью диалога, общего с MWO, рис. 10.8). Чтобы выполнить расчет, сначала задается вид графика и определяются выводимые данные. Чтобы построить график, щелкните правой кнопкой мыши на узле **Graphs** в закладке Project и выберите **Add Graph**, а затем задайте имя графика.

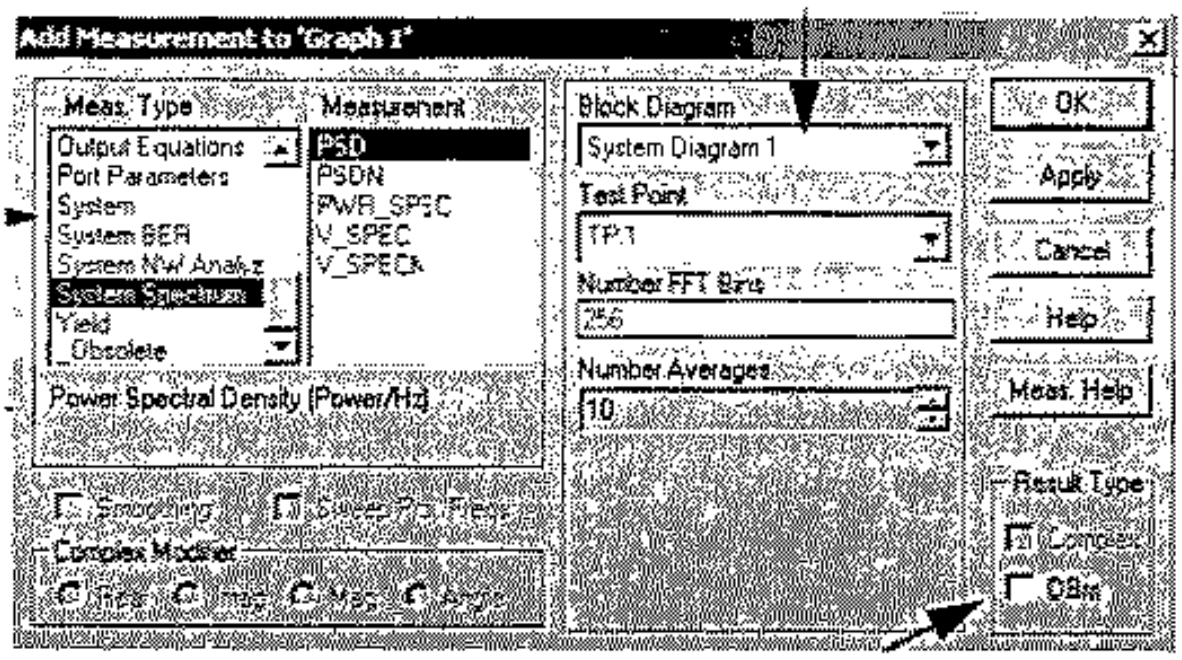


Рис. 10.8. Создание графиков характеристик системы

10.4. Построение системы и моделирование

Рекомендуется перед моделированием всегда устанавливать заданные по умолчанию системные параметры.

Выберите **Options > Project Options**. Появится окно Project Options. Выберите закладку **Global Units**, в которой выбирается система единиц (см. рис. 1.13, в главе 1).

Создание системных диаграмм (System Diagrams)

Системная диаграмма — это система связей и графически обозначенный алгоритм моделирования. Проект VSS может включать несколько системных диаграмм, линейные и нелинейные схемы, а также задания в виде текстового файла. Пояснение шагов создания системной диаграмме будем сопровождать примером. Окончательный файл этого примера **qpsk.emp** имеется в каталоге ...\AWR2002\Examples\QPSK.

1. Выберите **Project > Add System Diagram > New System Diagram**. Появляется окно новой системной диаграммы.
2. Напечатайте имя «QPSK» и нажмите **OK**. В рабочем пространстве открывается окно System Diagram (рис. 10.9).

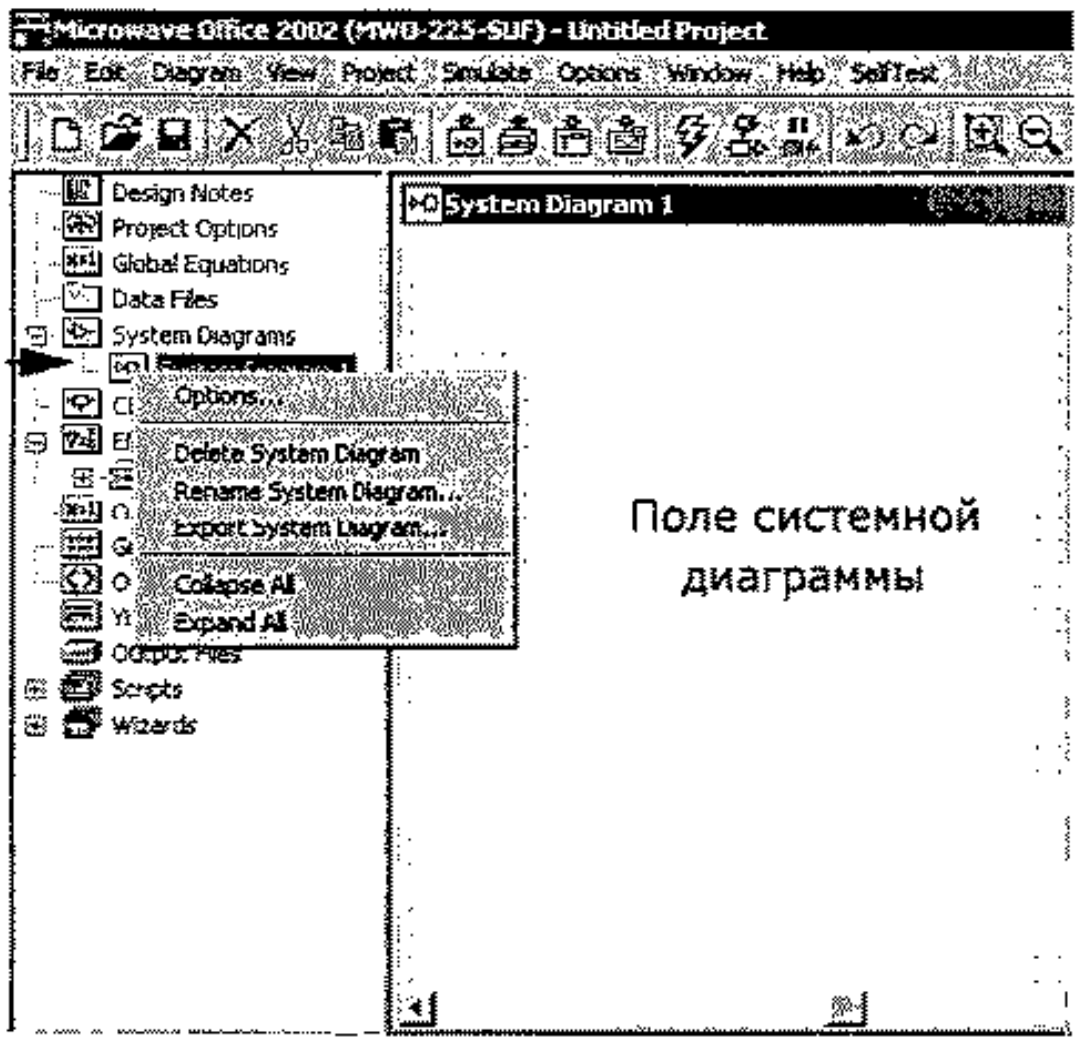


Рис. 10.9. Создание новой системной диаграммы

Размещение блоков в поле System Diagram

Каталог элементов VSS, список которых имеется в таблице 10.1 — разбит на группы в соответствии с их функциональными назначениями. Чтобы поместить блок в систему, он перетаскивается и опускается в окно системной диаграммы. Для этого:

1. Нажмите закладку **Elem**, чтобы увидеть браузер системных блоков.

2. Нажмите символ «+» слева от узла **System Blocks**, чтобы развернуть системные блоки, которые можно использовать в проекте. Отметим, что элементы из **Circuits Elements** не могут использоваться непосредственно в схемной диаграмме, а включаются в виде подсхемы в проект.
3. Разверните категорию источников цифровых данных **Sources**, затем нажмите подгруппу **Random**. В результате в нижней части окна появляется несколько цифровых источников.
4. Выберите блок псевдослучайного генератора **RND_D** и расположите его так, как показано на рис. 10.10.

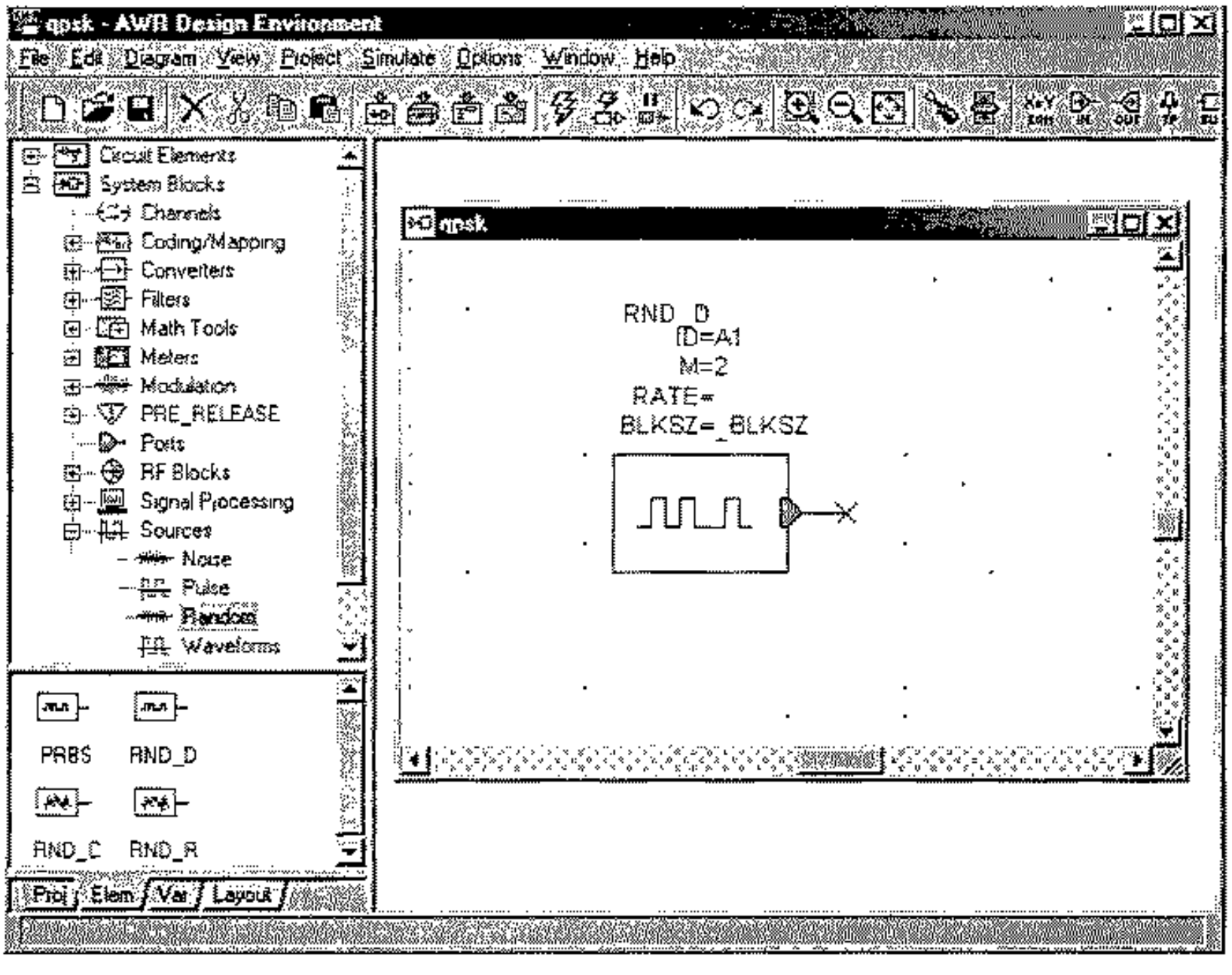


Рис. 10.10. Помещение цифрового генератора RND_D на системную диаграмму

5. Из списка системных блоков выберите категорию **Modulation** и разверните подгруппу **QPSK**, после этого выберите блок **QPSK _TX** и поместите его в поле системы.
6. Выберите категорию каналов связи (категория **Channels**), затем модель генератора белого шума **AWGN**, поместите его после блока QPSK _TX.
7. Выберите категорию **Modulation**, из подгруппы **General Receivers** выберите приемник модулированных I/Q сигналов (RCVR) и поместите его после блока AWGN.
8. Активизируйте категорию измерительных устройств Meter, выберите два элемента (TP — контрольные точки) и установите одну около блока **QPSK _TX**, а другую около блока **RCVR**. Вы можете также нажать кнопку TP на инструментальной панели и поместить контрольную точку в нужное место блок-схемы. После этого блок-схема должна соответствовать рис. 10.11.

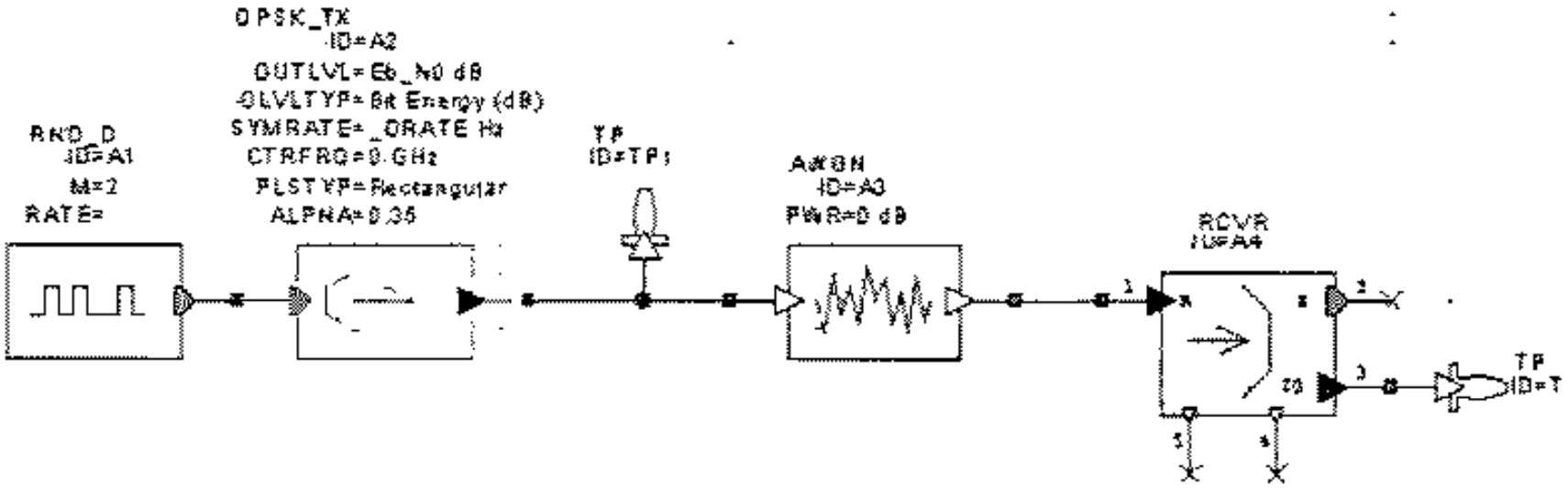


Рис. 10.11. Структурная схема демодулятора

Редактирование параметров блока

1. Дважды щелкните по блоку RND_D в окне системной диаграммы. Появится окно Element Options (рис. 10.12).

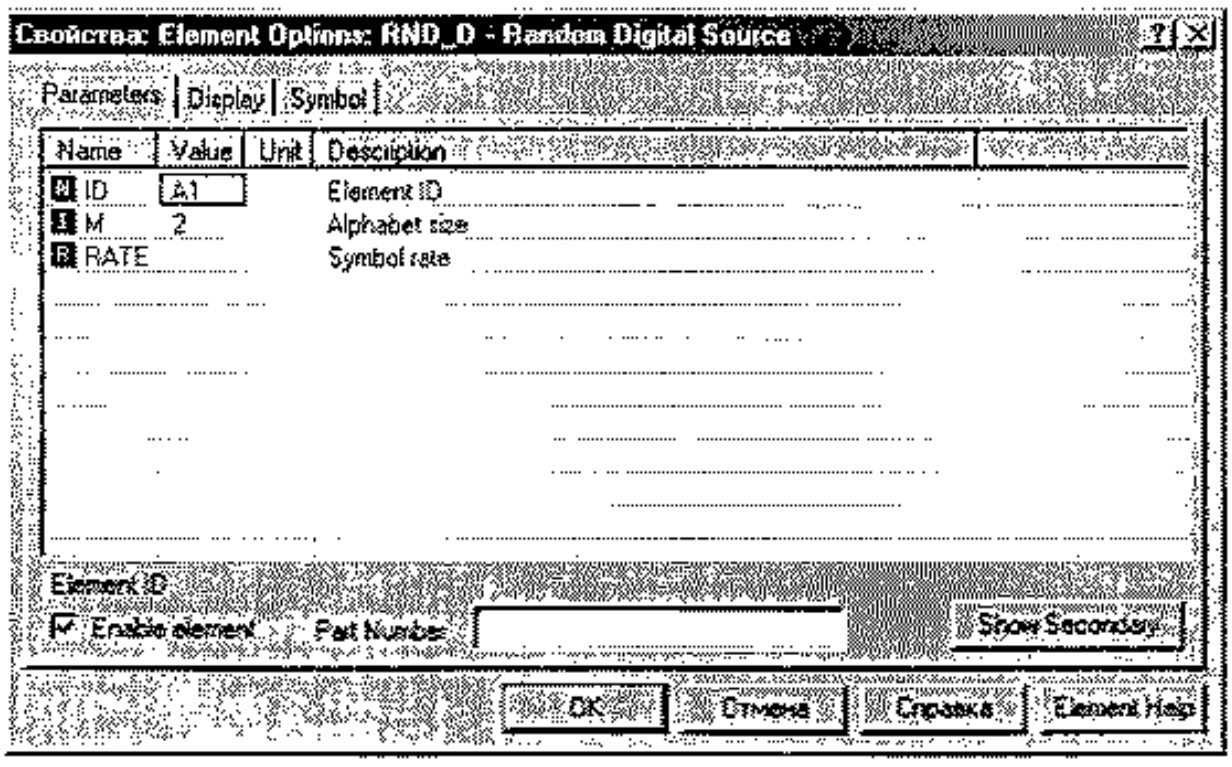


Рис. 10.12. Диалоговое окно установки опций источника случайной цифровой последовательности

Заметим, что параметр M = 2 по умолчанию, чтобы генерировать цифровой сигнал, который изменяется между «0» и «1». Если параметр M = 4, тогда блок DSRC генерирует сигнал с 4 уровнями между 0 и 3 (0, 1, 2, 3).

2. Нажмите кнопку Show Secondary на панели рис. 10.13. В этом же окие появятся дополнительные параметры генератора. вы можете управлять начальным числом у генератора случайных чисел, который используется блоком RND_D. Оставьте значения параметров RATE и BLKSZ по умолчанию.
3. Дважды щелкните по блоку **QPSK _TX** и затем нажмите Show Secondary в окне Parameters. Вы можете управлять несколькими параметрами, такими как параметры импульса и формирующих фильтров, используемых в синфазном и квадратурном каналах.

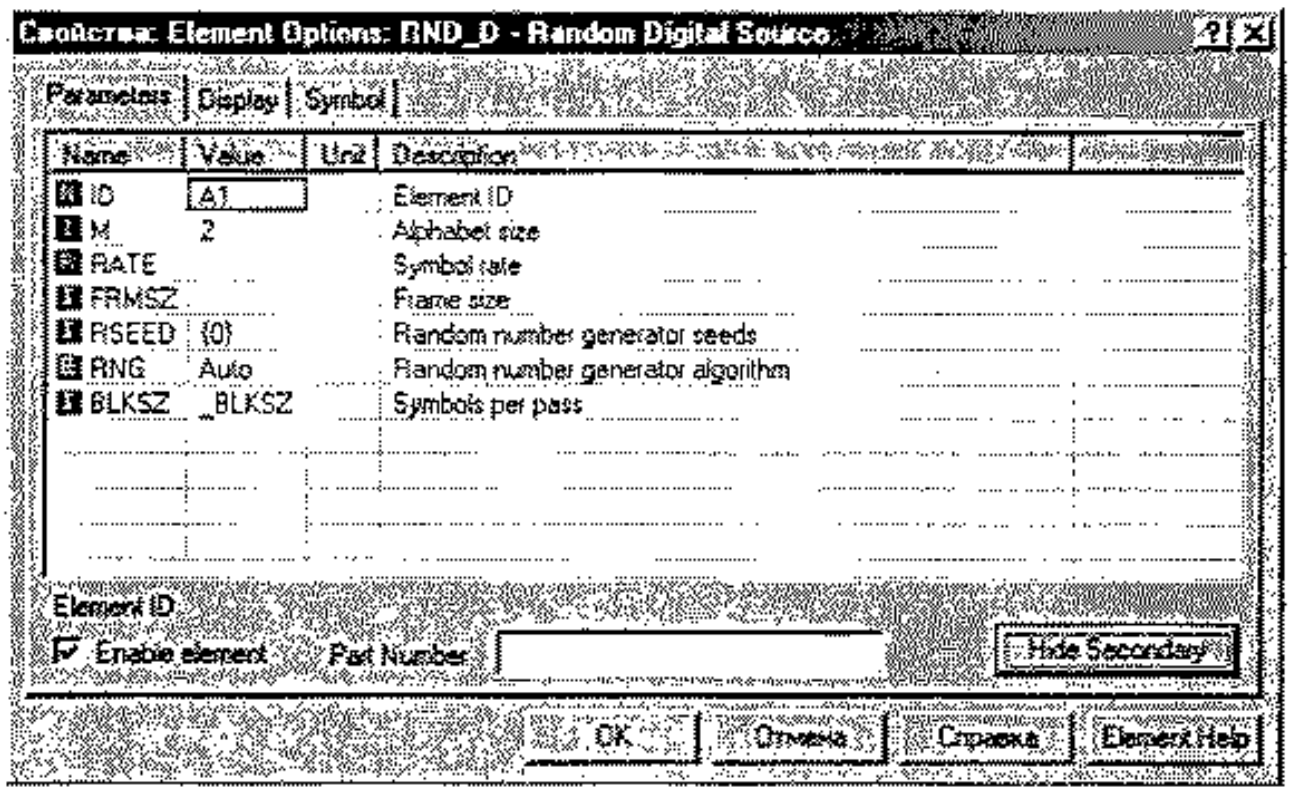


Рис. 10.13. Основные и дополнительные опции при нажатии на кнопку Show Secondary

4. В строке параметра OLVLTYP кликните в столбце **Value** чтобы увидеть возможные опции. Выберите **Bit Energy.** В строке параметров PLSTYP щелкните в столбце *Value* и выберите **Rectangular** (рис. 10.14).
5. Пока не изменяйте блок AWGN. Он будет использоваться для управления спектральной плотностью мощности шума.
6. Дважды щелкните по блоку приемника RCVR. Для него не нужно устанавливать никаких параметров, потому что блок RCVR автоматически их скорректирует, чтобы согласовать с параметрами передатчика.

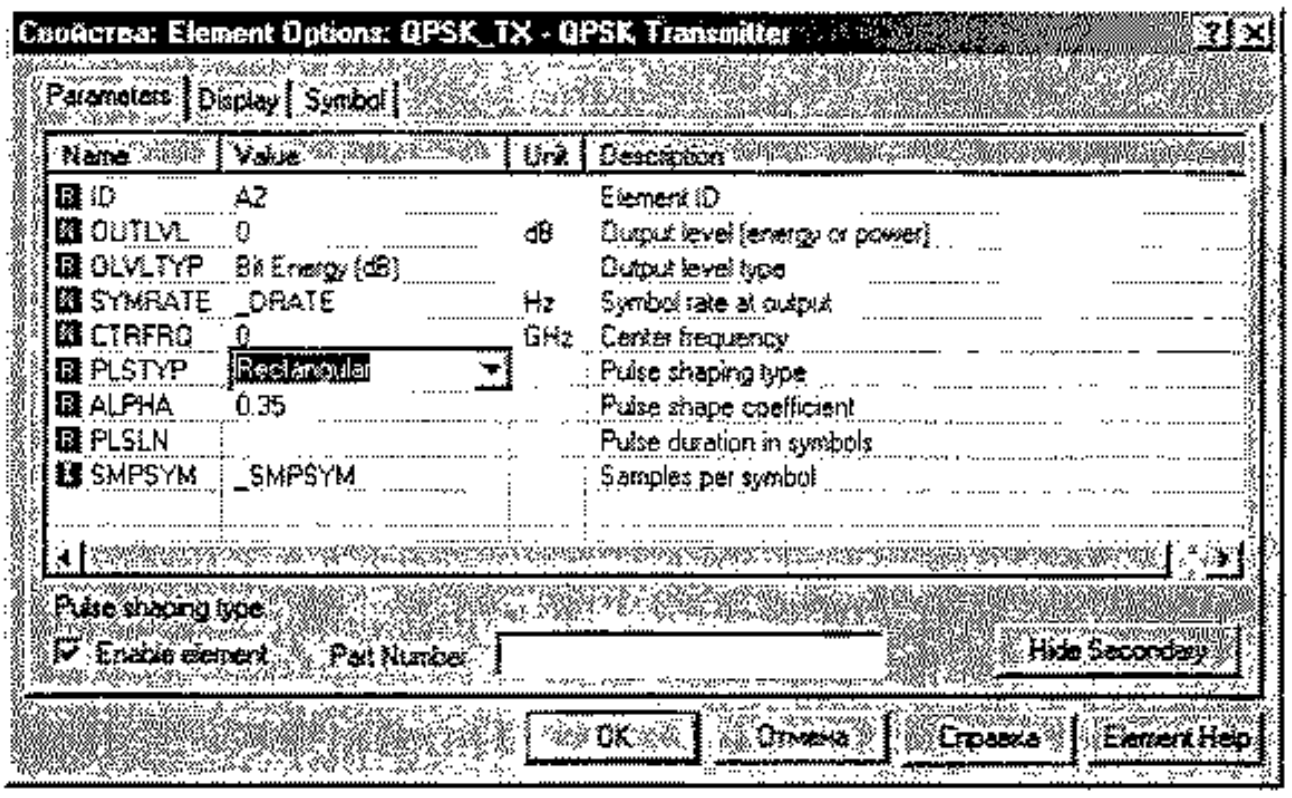


Рис. 10.14. Установка параметров блока QPSK_TX

Особенностью моделирования в среде VSS по сравнению с традиционными методами анализа состоит в том, что VSS имеет два способа вывода данных — интерактивный вывод в реальном времени, и вывод расчетных результатов после сбора потока данных в указанных элементах.

Задание режимов VSS

1. Выберите **Options > Default System Options**. Появится окно System Simulator Options.

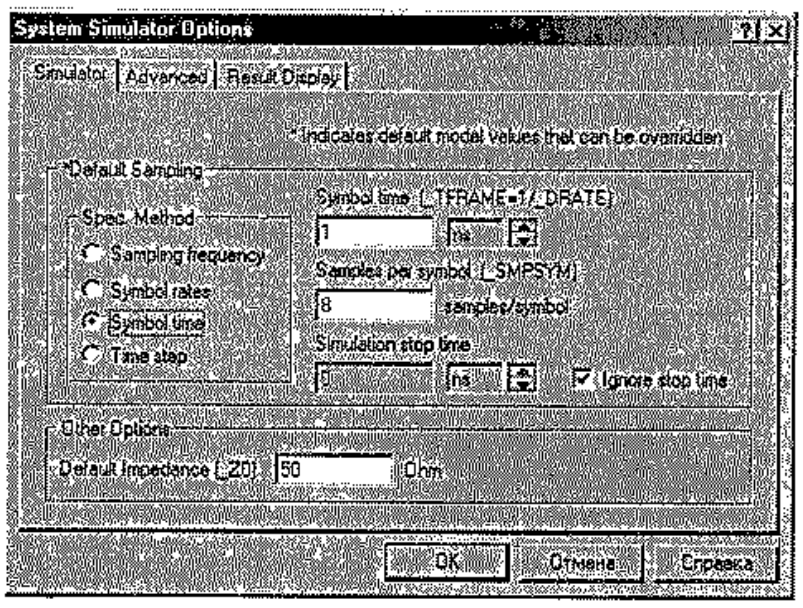


Рис. 10.15. Установки моделирования VSS

2. Выберите закладку **Simulator** и в разделе задания метода синхронизации цифровых потоков **Spec. Method** выберите метод **Symhol time**. Заметим, что имеются четыре опции моделирования, определяющие частоту дискретизации. Эти параметры взаимосвязаны и изменение одного параметра меняет другой, выводимый в окно. Длительность символа комплексной огибающей передатчика QPSK _TX определяется шириной полосы модулирующих частот, она установлена равной 1 нсек и каждый символ состоит из 8 выборок.

Чтобы выполнить моделирование системы на активном проекте выберите команду **Simulate > Run System Simulators** или нажмите кнопку на инструментальной панели. Но прежде необходимо задать характеристики, которые вы желаете просмотреть.

Вывод результатов

VSS позволяет выводить результаты моделирования в различных графических форматах. И перед выполнением моделирования необходимо создать график и определить данные или результаты расчетов, которые необходимо на него вывести.

1. Щелкиите правой кнопкой мыши на узле **Graphs** в дереве проекта и выберите **Add Graph**.
2. Напечатайте «**Complexbaseband**» в поле Graph Name диалогового окна Create Graph. Выберите прямоугольный тип графика (Rectangular).
3. Создайте график звездной диаграммы (сигнального созвездия) и назовите его «**ReceiverConstellation**», а Graph Type выберите как Complex.
4. Выберите **Windows > Vertical Line**, чтобы настроить окна. Окно VSS должно напоминать рис. 10.16.

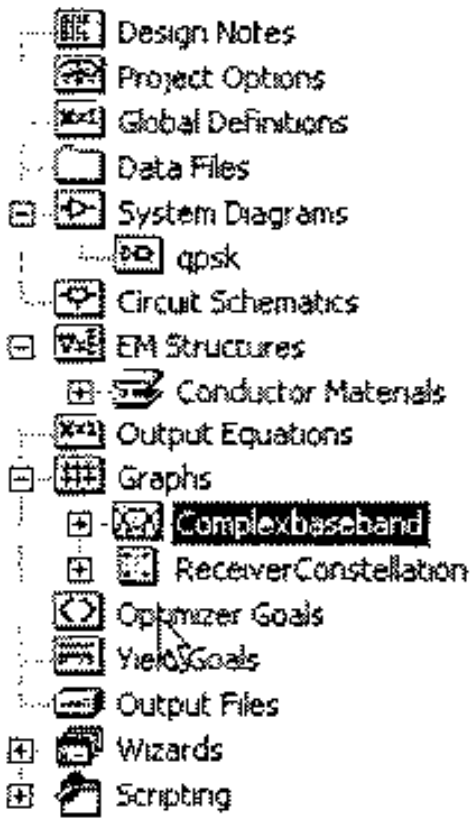


Рис. 10.16. Создание заготовок графиков для характеристик системы

Добавление рассчитываемых характеристик

1. Щелкните правой кнопкой мыши на подгруппе **Complex base band** в **Project Browser** и выберите **Add Measurement** (рис. 10.17).

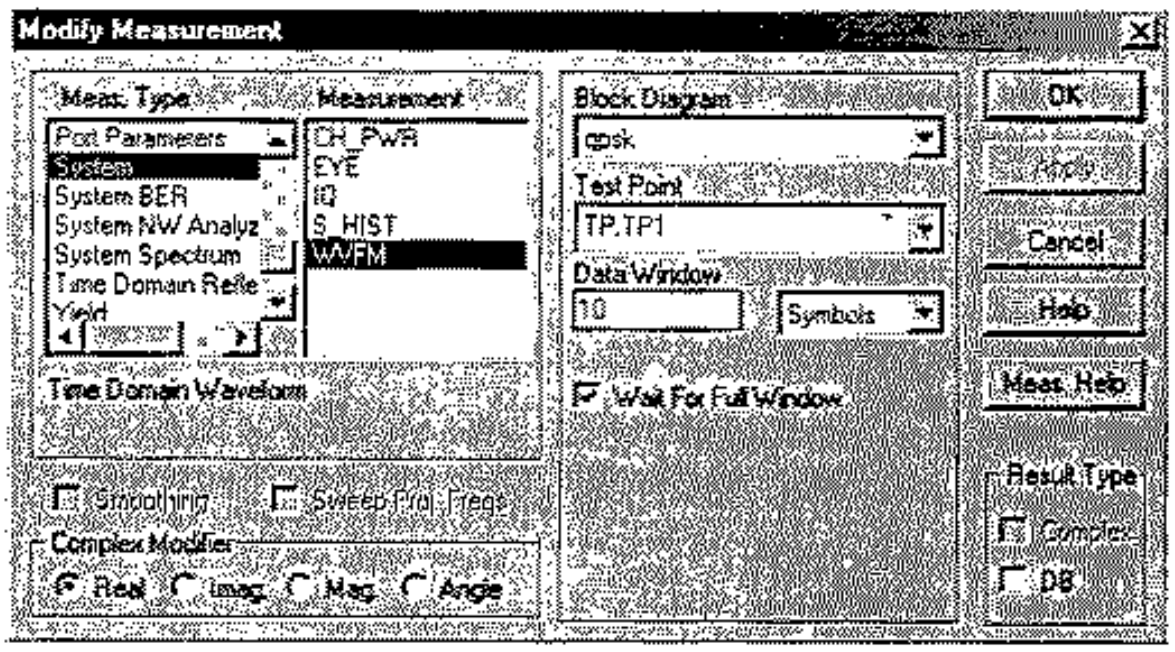


Рис. 10.17. Вывод на график результатов расчета WVFM

2. Для выбора типа характеристики выберите **System** в разделе **Meas.Type** и **WVFM** (вид сигнала во временной области) в разделе **Measurement**.
3. Убедитесь, что в окне **Test Point** установлена контрольная точка TP.TP.1 и нажмите **OK**.

Вы можете также присвоить тестируемой точке другое имя.

Характеристика Re[WVFM [TP.1,10,1] показывает характеристики подгруппы Complexbaseband в разделе Project Browser сигнала QPSK.

4. Щелкните правой кнопкой мыши на графике ReceiverConstellation и выберите Add Measurement для добавления звездной диаграммы на график IQ (рис. 10.18).

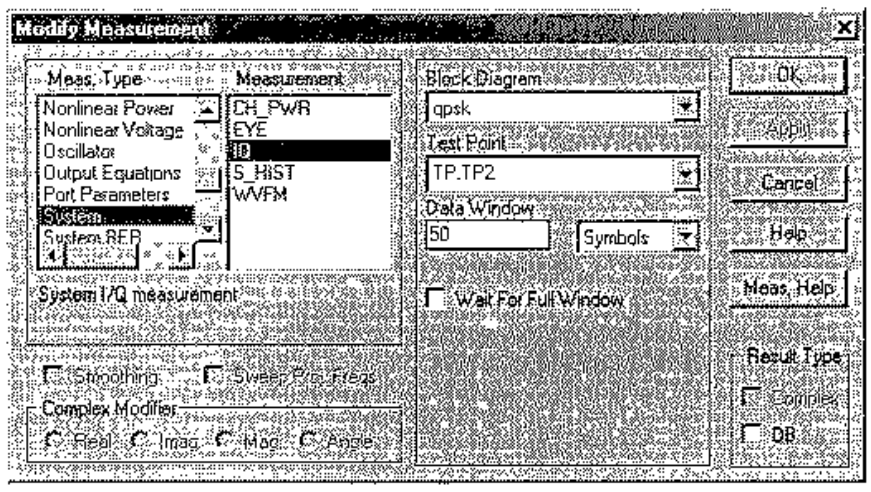


Рис. 10.18. Вывод расчета звездной диаграммы IQ

Моделирование и анализ результатов

Теперь выберите **Simulate > Run System Simulators** и запустите моделирование на 3 секунды, а затем снова кликните **Run System Simulators** для остановки моделирования.

По окончании моделирования выводятся графики его результатов (рис. 10.19), если предварительно выбраны настраиваемые параметры.

5. Графики модифицируются следующим образом.

Заметим, что полученное сигнальное созвездие, иногда называемое звездной диаграммой (рис. 10.19 слева) имеет вид, отличный от ожидаемого, поскольку спектральная плотность мощности источника шума установлена равной 0 dB.

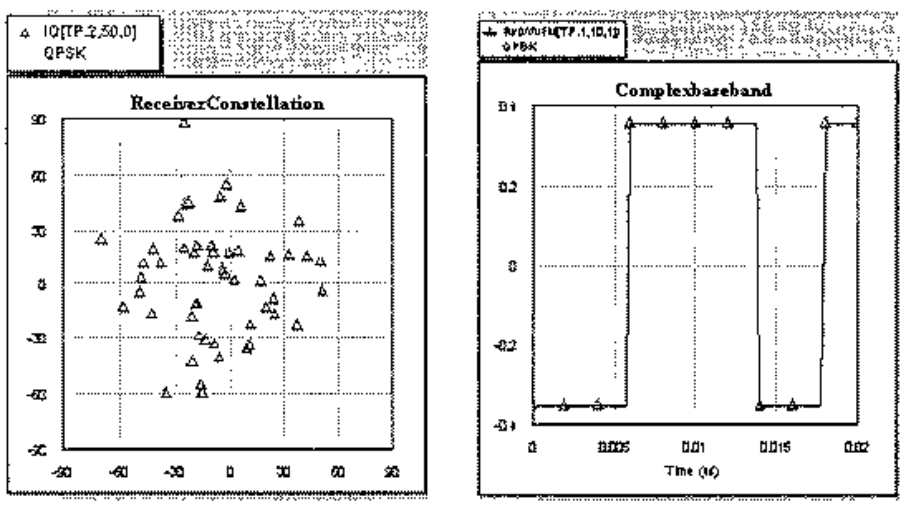


Рис. 10.19. Результаты моделирования: звездная диаграмма и комплексная огибающая

Также заметим, что модулирующий сигнал (справа) не имеет 8 отсчетов на символ, поскольку предварительно в диалоговом окне System Simulator Options определены другие данные.

6. Установите параметр PWR блока AWGN на значение −30 dB. Для этого дважды щелкните на значении параметра в блоке AWGN и измените его.

7. Выберите окно графика Complexbaseband и нажмите кнопку Graph Properties на инструментальной панели.
8. В диалоговом окне **Graph Properties** выберите Traces.
9. В разделе **Symbol** снимите галочку **Auto interval** (рис. 10.20) и установите Interval = 1. В этом случае выборки вывода на график будут точно синхронизованы с временными отсчетами.

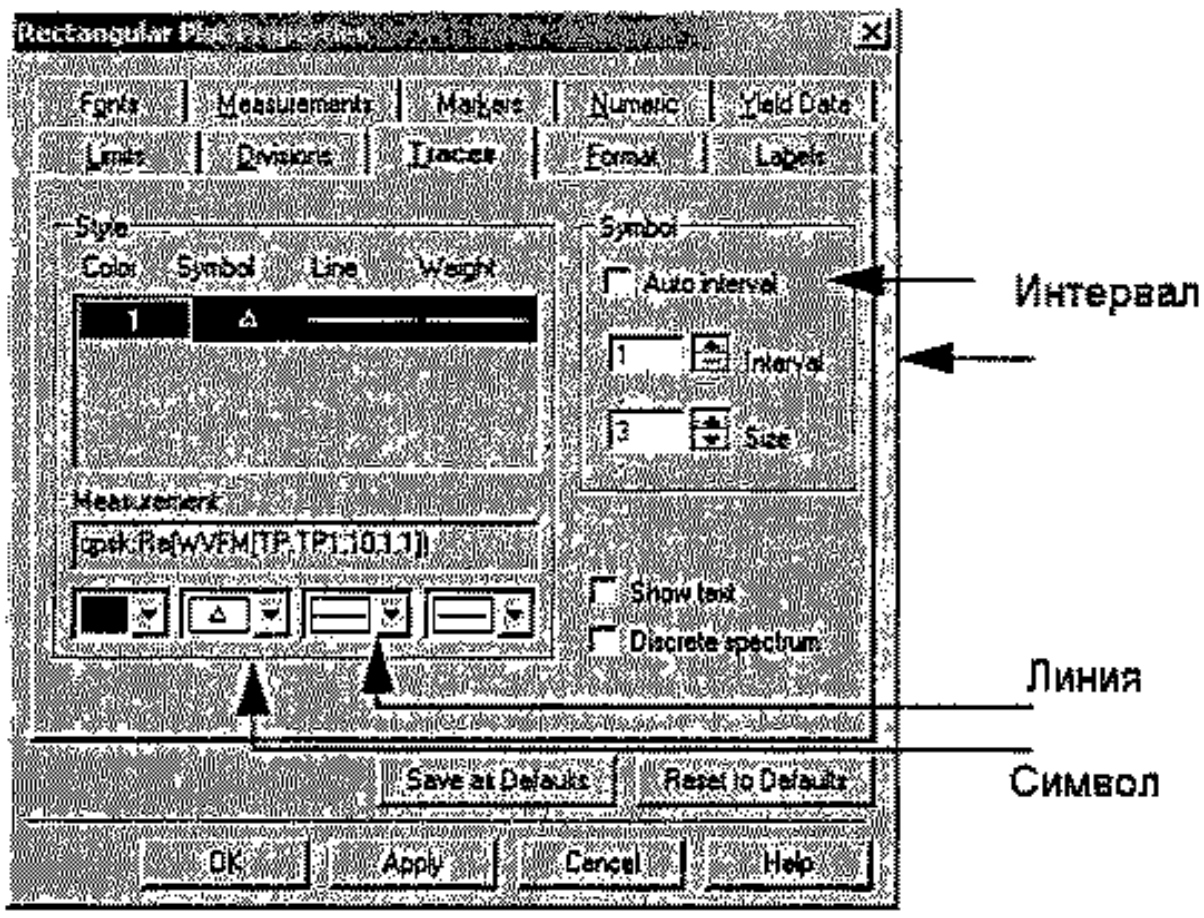


Рис. 10.20. Настройка параметров графика

10. Запустите моделирование приблизительно на 10 секунд и затем остановите расчет. Графики должны выглядеть так, как показано на рис. 10.21.

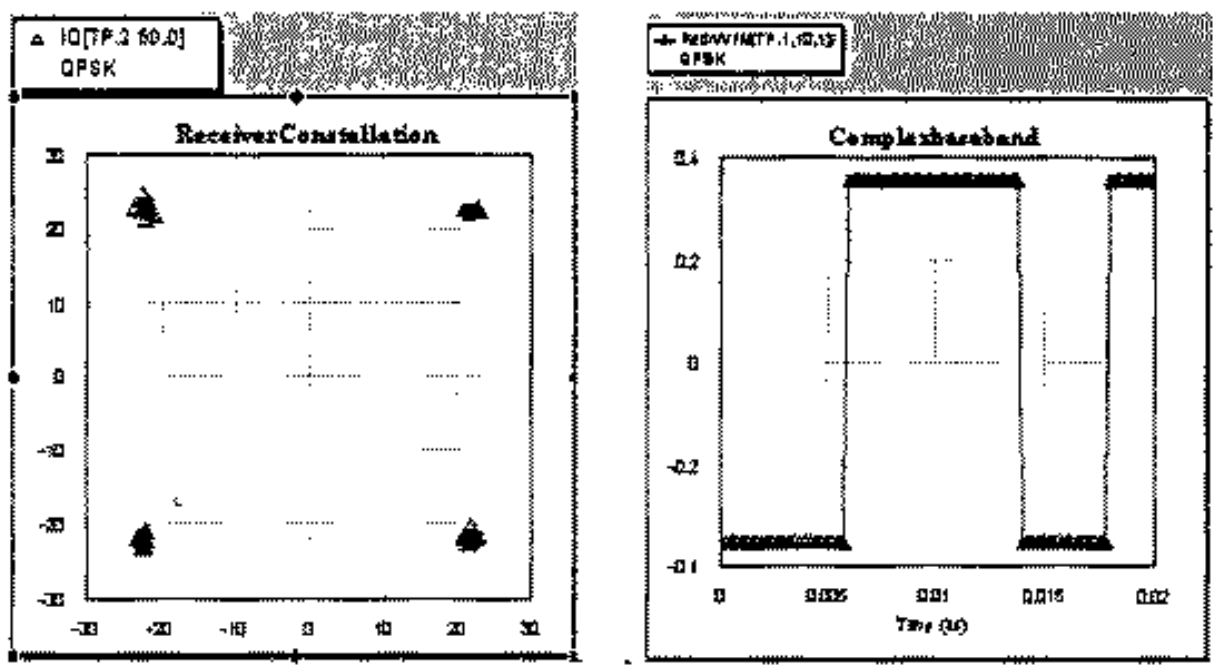


Рис. 10.21. Результаты моделирования звездной диаграммы

11. Теперь имеется 8 отсчетов на символ (справа). вы можете возвратиться в окно System Simulator Options и изменить значения параметров Symbol time и Samples per symbol.

Подстройка системы по выбранному критерию

1. Нажмите на системное окно диаграммы, чтобы сделать его активным.
2. Нажмите кнопку **Tune Tool** на инструментальной панели.
3. Переместить указатель поверх значения параметра PSD (мощность шума) блока AWGN. Указатель показывается как малое перекрестие на черном фоне.
4. Щелкните, чтобы инициировать параметр PSD для настройки. Значение параметра приобретает синий цвет. Чтобы выделить значок настройки, нажмите где-нибудь в области проекта.
5. Чтобы запустить моделирование, нажмите кнопку **Run System Simulators** на инструментальной панели. Заметьте, что графики рис. 10.21 изменяются.
6. Нажмите **Tune button** на инструментальной панели.
7. Появится диалоговое окно **Variable Tuner**.
8. Установите значения границ как показано на рис. 10.22, впечатывая их в верхнее и нижнее поля. Далее можно нажать на ползунок настройки и двигать его, чтобы корректировать значения. Результаты тут же отображаются на расчетном графике.

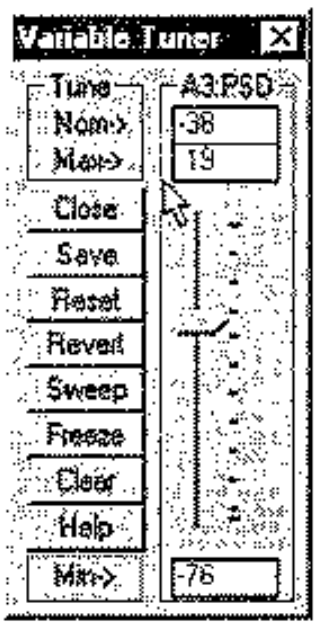


Рис. 10.22. Задание параметров тюнера

9. Нажмите крестик в верхнем правом окне **Variable Tuner**, чтобы закрыть его.
10. Остановите моделирование, нажимая кнопку **Run System Simulators**.
11. Чтобы изменить параметр PSD, нажмите кнопку **Tune Tool**, установите указатель сверху параметра PSD и когда указатель становится перекрестием на черном фоне, нажмите на значение параметра PSD. Двойной щелчок на параметре изменит его на **0**.

10.5. Расчет характеристик систем

Системотехникам часто требуется рассчитывать BER (частота передачи ошибочных битов), которая является важнейшей характеристикой системы передачи информации. Покажем пример расчета BER для системы с квадратичной фазовой манипуляцией QPSK.

1. Нажмите на окно System Diagram, чтобы делать его активным.
2. Дважды нажмите на **Output Equations** и установите окно редактирования уравнений сверху системной диаграммы. Теперь выберите из меню **Add** команду **Equation**.

3. Напечатайте в поле уравнение «**Eb_N0 = sweep (stepped(0, 8, 1))**».
   По этому уравнению будет меняться переменная Eb_N0 (отношение энергии бита к спектральной плотности шума) от 0 до 8 dB с приращением 1 dB. Заметим, что величина мощности белого шума канала AWGN установлена равной 0 dB.
4. Сделайте двойной щелчок на блоке **QPSK _TX** и убедитесь, что параметр **OUTLVL** (уровень на выходе передатчика) установлен на **Eb_N0**, а **OLVLTYP** (тип уровня) установлен на **Bit Energy (dB)**. Кликните **OK**.
   Из списка системных блоков, откройте категорию **Meters** и подгруппу **BER**, выберите блок BER (internal reference source) и замените его на системной диаграмме.
5. Подключите блок **BER** к порту «D» блока CRCVR.

Далее измените параметры блока BER так, чтобы они стали равны значениям, показанным в диалоговом окне Element Options на рис. 10.23.

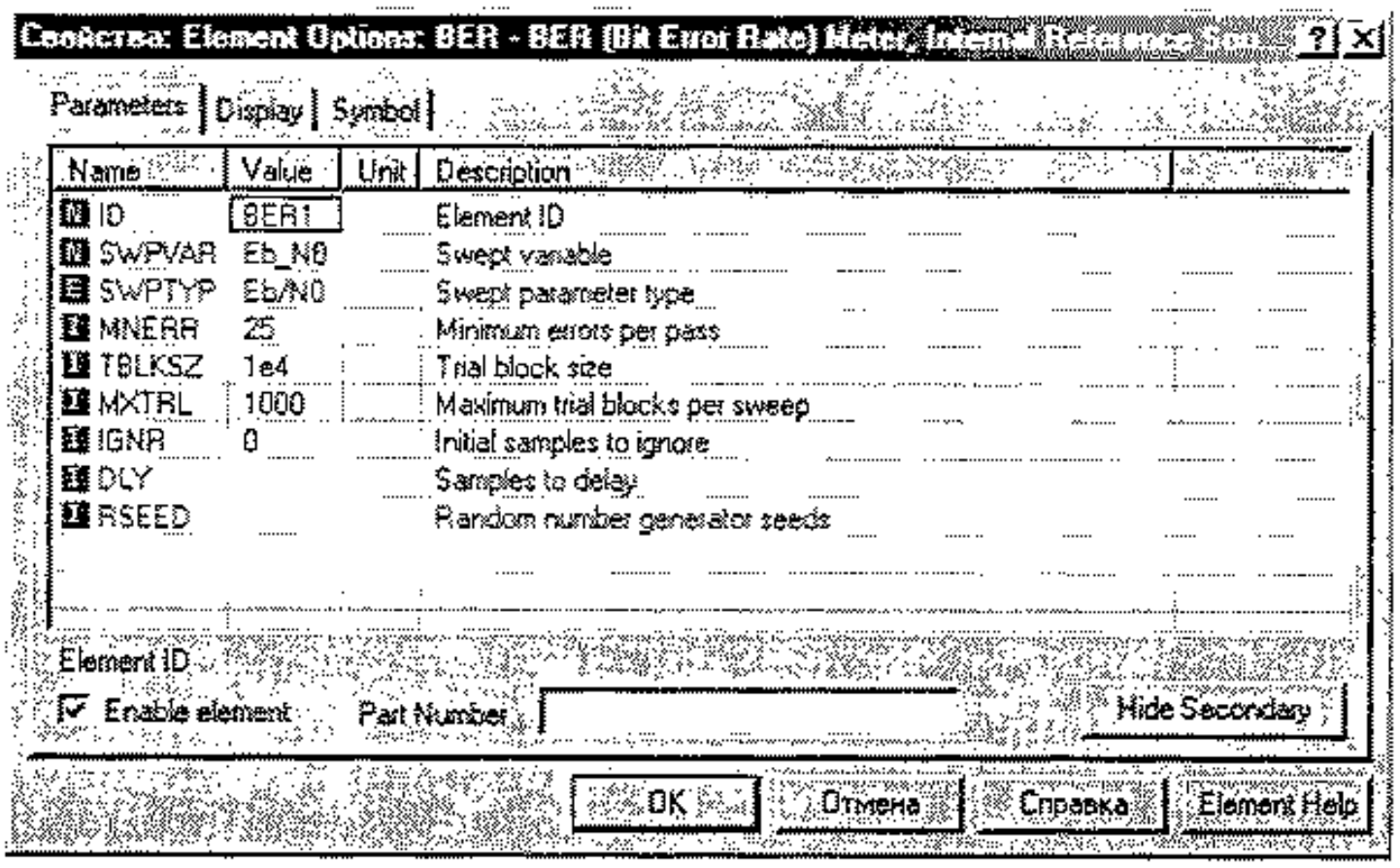


Рис. 10.23. Задание параметров блока BER

Блок BER теперь настроен так, чтобы просматривать 1e7 (MXTRL * TBLKSZ) битов и регистрировать 25 ошибок для каждого значения Eb_N0. Блок BER анализирует источник данных на входе и сравнивает полученные результаты с результатами, рассчитанными в сигнале на выходе тракта, фиксируя процент ошибочных битов. Последняя точка на характеристике BER рассчитывается при величине Eb_N0 = 8. Убедитесь, что ось X выбрана как Eb/NO. Теперь структура приобретает вид, показанный на рис. 10.24.

6. Чтобы добавить расчет характеристики BER к проекту, щелкните правой кнопкой мыши на узле **Graphs** в дереве проекта, выберите **Add Graph** и прямоугольный тип графика, и назовите его «BER». В дереве проекта щелкните правой кнопкой мыши на новом значке графика BER и выберите Add Measurement.
7. В разделе **Measurement** выберите имя BER (рис. 10.25). В разделе Block Diagram выберите метод модуляции: QPSK.

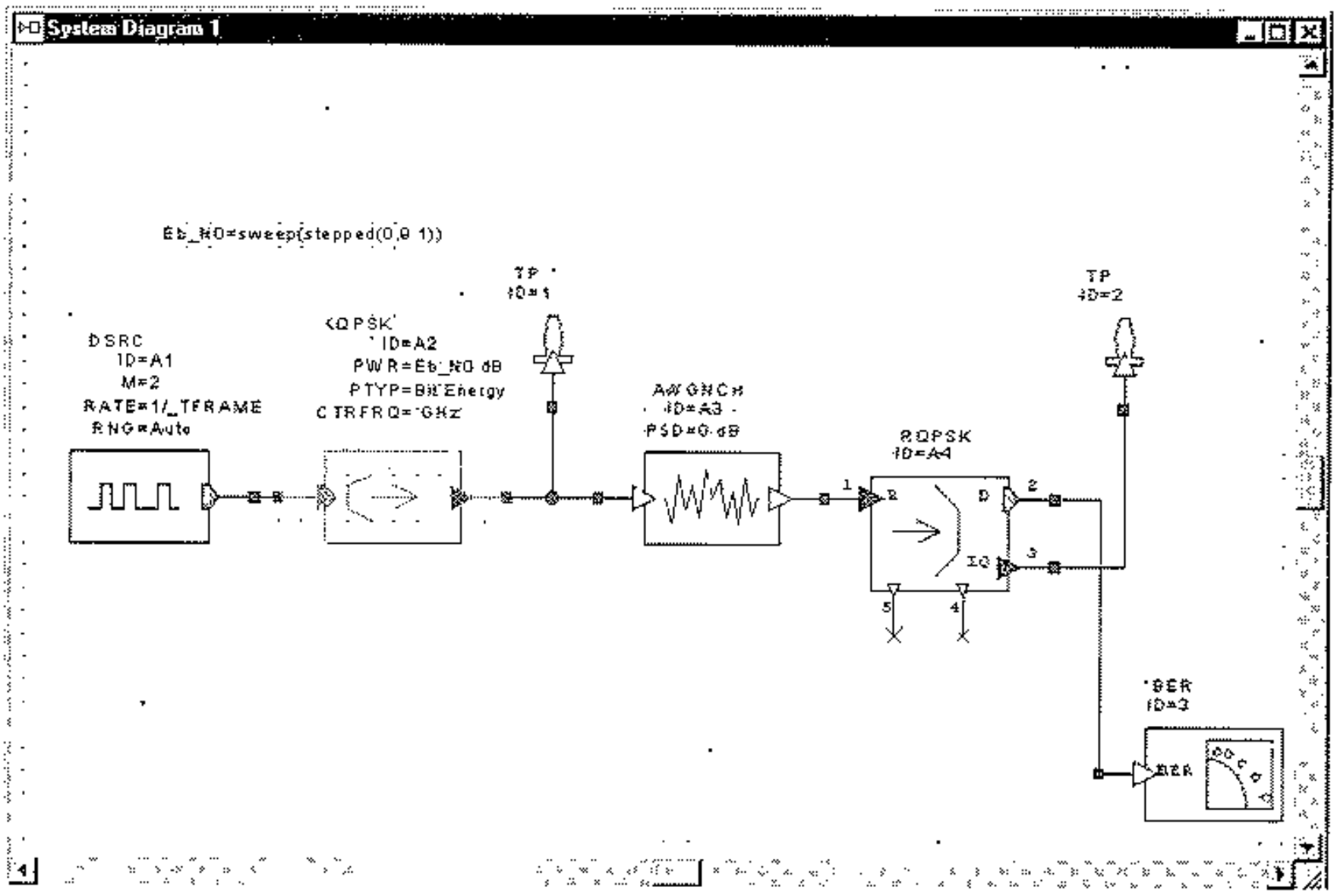


Рис. 10.24. Схема системной диаграммы для расчета BER

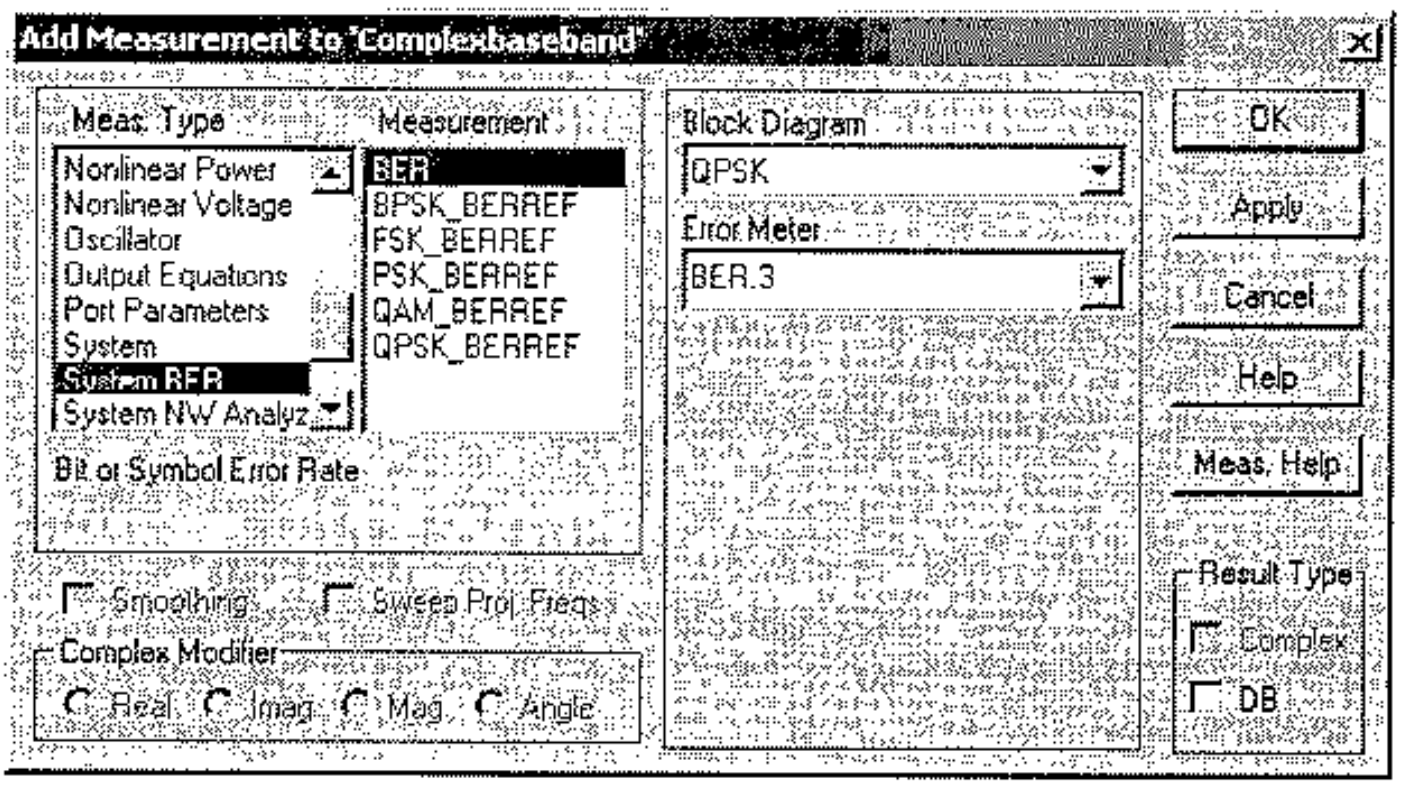


Рис. 10.25. Вывод расчета параметра BER

Выполнение моделирования

Перед началом моделирования необходимо скорректировать масштаб графика BER по оси Y.

1. Для этого сначала выберите график BER и затем выберите свойства **Properties** из инструментальной панели.
2. Выберите закладку **Limit** и установите шкалу Y-axis как **Log scale.**

3. Нажмите кнопку Run System Simulators, чтобы запустить моделирование. Заметьте, что полученные зависимости становятся более понятными, когда Eb_N0 изменяется от 0 до 8 dB. Моделирование останавливается, как только при Eb_N0 = 8 dB будет получено 25 ошибок. Примерный вид рабочего окна после проведения моделирования изображен на рис. 10.26.

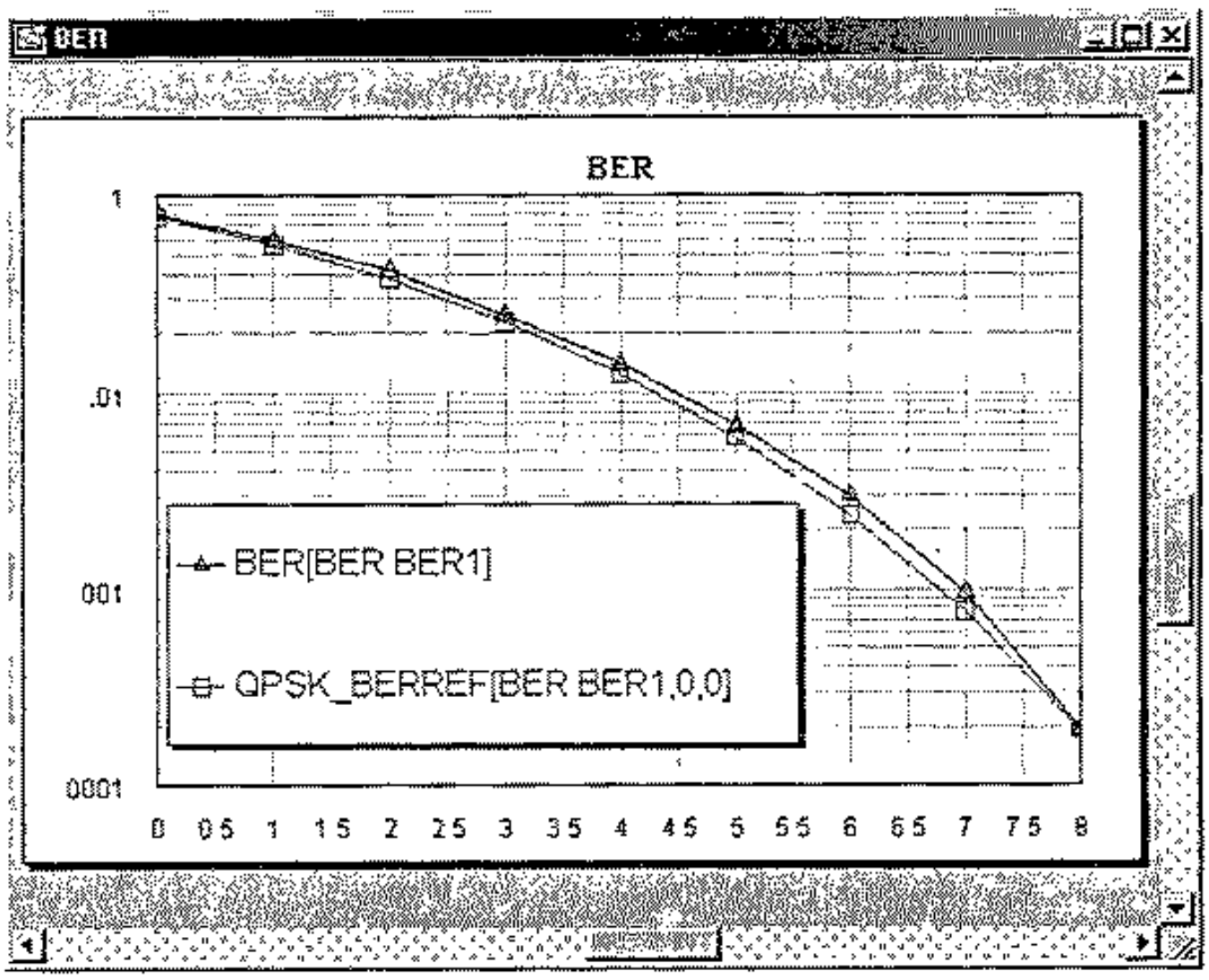


Рис. 10.26. Рассчитанные характеристики BER
(частота передачи ошибочных битов)

Преобразование характеристики BER в таблицу

Результаты моделирования BER можно представить и в виде таблицы. Для этого

1. Щелкните правой кнопкой мыши на подгруппе **BER**.
2. Выберите в качестве параметра Duplicate as параметр **Table**.
3. Для изменения точности данных, выводимых в таблицу, нажмите на значок свойств графика.

В следующем разделе к системе QPSK добавим фильтр и будем исследовать влияние его характеристик на величину BER.

Добавление подсхемы к системе MWO

Возможности схемотехнического моделирования MWO и расчета на системном уровне в VSS обеспечивают уникальную возможность для оценки влияния ВЧ компоненты на характеристики системы. Возможно, например, выполнить анализ влияния фазового шума на BER, влияние нелинейности усилителя и характеристик фильтра на спектр сигнала.

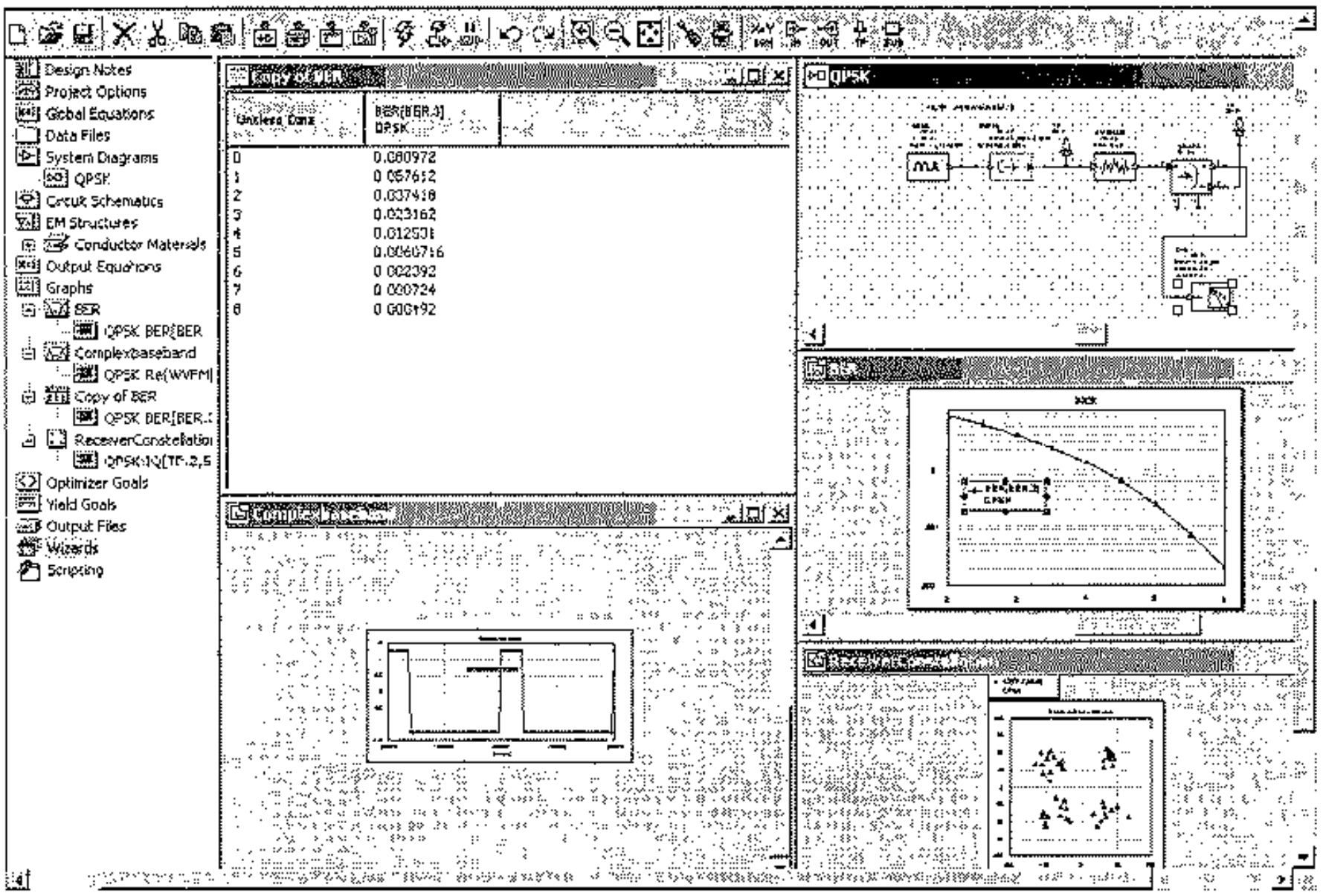


Рис. 10.27. Рабочее окно VSS после проведения моделирования

В этой главе рассматриваются возможности VSS в плане интегрирования со средой схемотехнического моделирования MWO. Добавим фильтр в виде схемы к системе QPSK и исследуем влияние его характеристик на BER. Для этого:

1. Откройте проект **qpsk.emp**, если он еще не открыт.
2. На системной диаграмме дважды щелкните на значении параметра центральной частоты блока **QPSK _TX** и установите значение 5 ГГц.
3. Нажмите на инструментальной панели кнопку **New Schematic**.
4. В графе **Schematic Name** задайте имя новой схемы «Ideal Filter».
5. Активизируйте окно схемы и затем выберите закладку **Elem tab**.
6. Далее разверните узел **Circuit Elements** и поместите в этом окне полосовой фильтр Баттерворта (**BPFB**), находящийся в группе блоков общего назначения **General**.
7. Подключите к фильтру BPFB два порта, щелкая кнопкой **Ports** на инструментальной панели.
8. Дважды щелкните по элементу BPFB и в диалоговом окне Element Options измените значение параметров: уменьшите нижнюю граничную частоту фильтра (FP1) до 4,5 ГГц и установите верхнюю граничную частоту (FP2) равной 5,5 ГГц; число резонаторов N=2; неравномерность затухания в полосе пропускания 1 дБ.
9. После этого схема фильтра и параметры будут соответствовать рис. 10.28.
10. Установите частоту проекта, выберите **Options>Project Options** и затем выберите закладку Frequency Values и установите частоты, как показано на рис. 10.29.

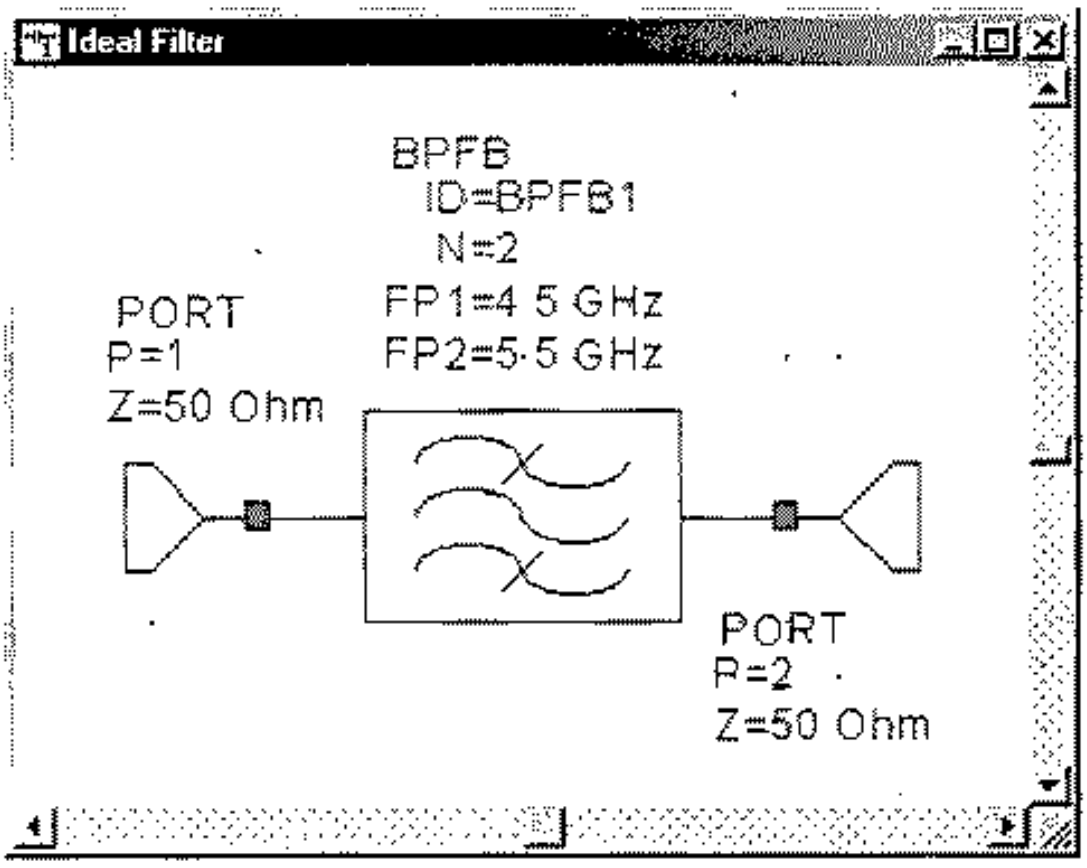


Рис. 10.28. Блок полосового фильтра

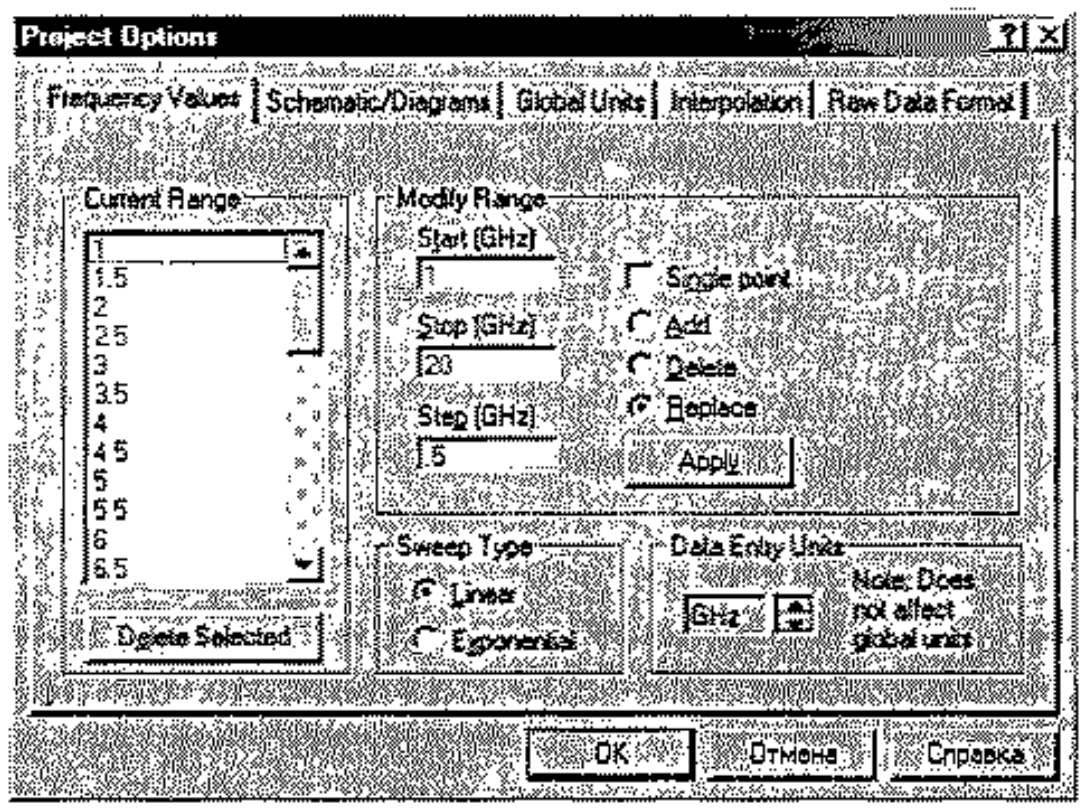


Рис. 10.29. Установка частот проекта

11. Щелкните левой кнопкой мыши на значке системной диаграммы и откройте закладку **Elem**. Из списка **System Block** разверните список **Subcirciut** и подгруппу LIN_S (линейные модели, описанные схемами). Подключите элемент Ideal Filter между блоками AWGNCH и CRCVR (рис. 10.30).
12. Дважды щелкните по элементу LIN_SP и введите NET как «Ideal Filter» (рис. 10.30).
13. Поставьте на выходе блока LIN_SP контрольную точку, используя кнопку **Test Point** на инструментальной панели.

Проанализируем теперь спектральную плотность мощности сигнала QPSK на входе и выходе полосового фильтра.

1. Добавьте новый прямоугольный график (щелкните правой кнопкой мыши по значку **Graph** и пометьте этот график как «**Power Spectrum**»).

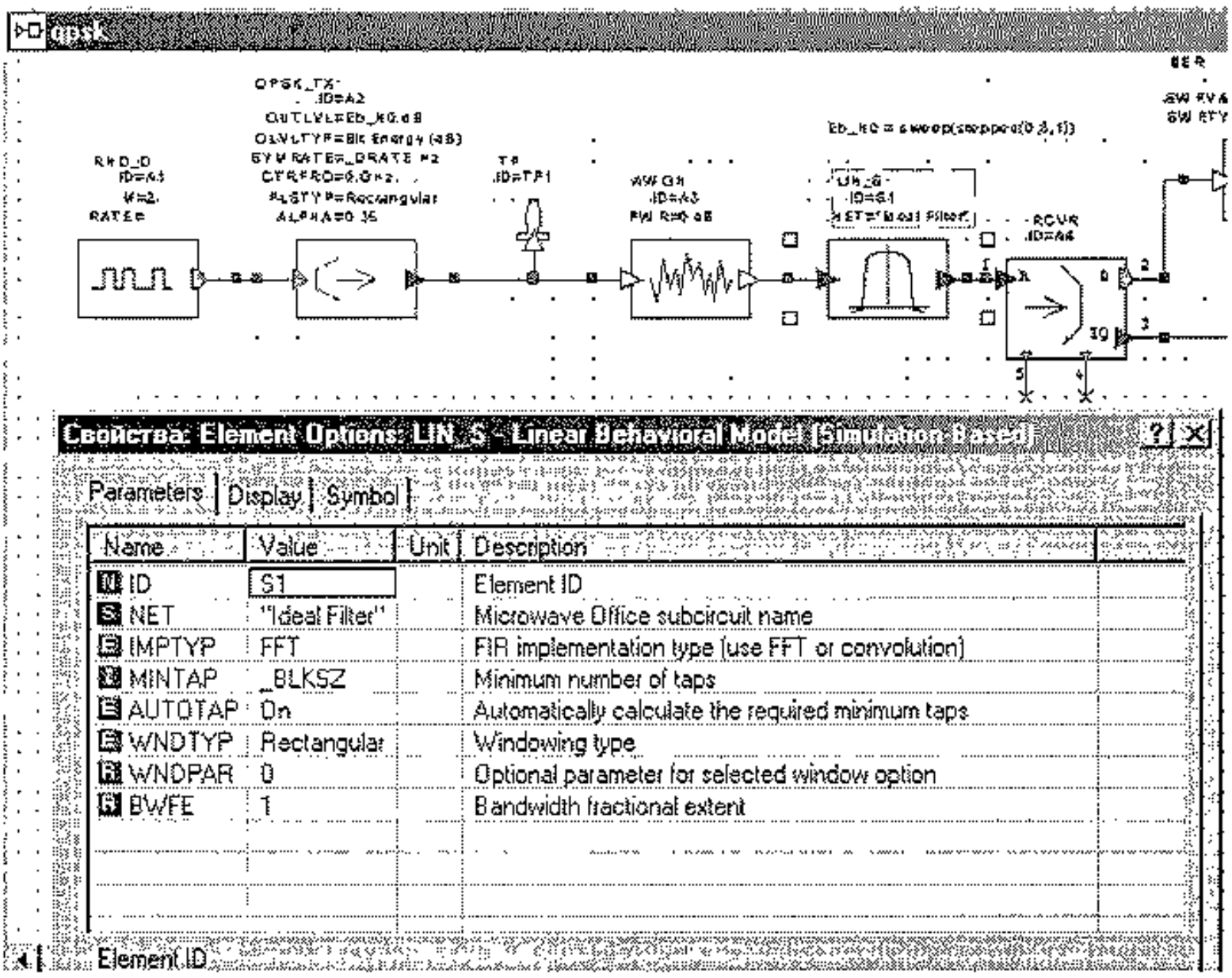


Рис. 10.30. Включение фильтра в систему

2. Выведите характеристику **PWR_SPEC** на этот график (из группы System Spectrum), рис. 10.31. Определите для **Test Point** тестовую точку TP1, чтобы выполнить расчет до блока LIN_SP. Выберите **dBm** в качестве единицы измерения.

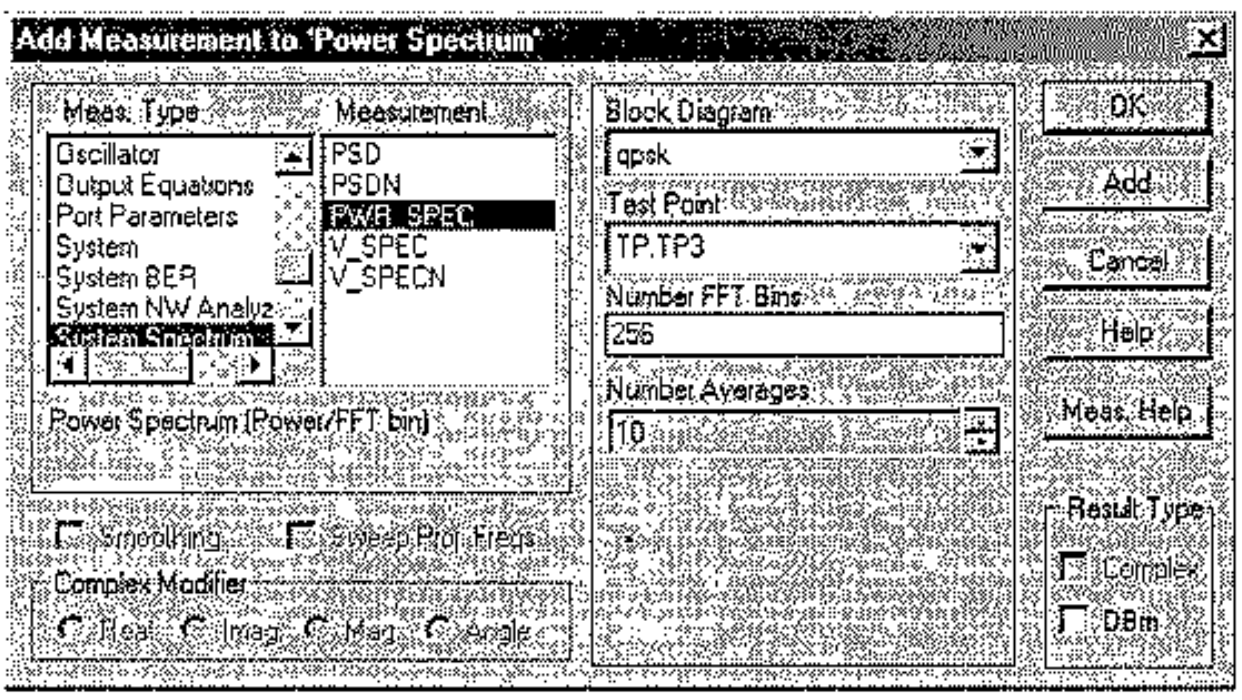


Рис. 10.31. Выбор параметров расчета

3. Добавьте вторую величину спектра PWR_SPEC на этот же график Power Spectrum, используя те же самые параметры настройки, но устанавливая контрольную точку TP2 после фильтра.

4. Выполните моделирование. График спектральной плотности должен выглядеть как на рис. 10.32.

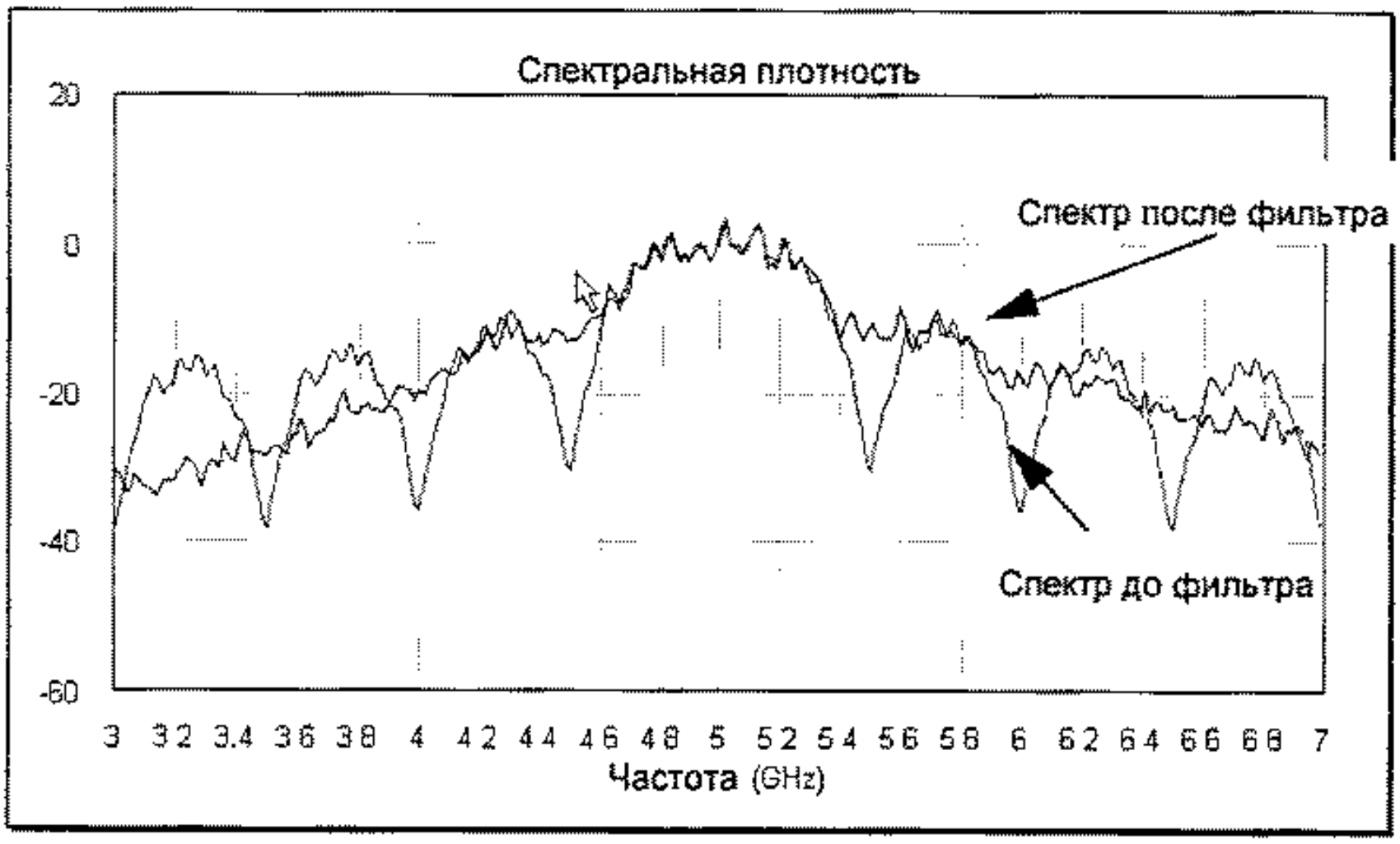


Рис 10.32. Графики спектральной плотности до и после фильтра. Изменяя задержку фильтра спектр значительно изменяется

Влияние фильтра на BER

Попробуем с помощью VSS изменять параметры фильтра, используя инструмент подстройки и наблюдая изменение величины BER.

Заметим, что при изменении параметров фильтра, характеристика BER системы может как улучшаться, так и несколько ухудшиться. Мы можем заменить идеальный фильтр фильтром реализованным в виде схемных компонентов. Расчеты показывают, что на BER сильное влияние оказывают фазовые характеристики фильтра.

10.6. Косимуляция нелинейных схем в VSS

Покажем, как используется метод гармонического баланса MWO в совместном моделировании на системном уровне VSS. Моделирование, которое выполняется частично в аналоговой, и частично в цифровой области, называется косимуляцией. В этом примере используется нелинейная модель усилителя и результаты анализа используются в анализе цифровых характеристик всей системы, в которую входит этот усилитель. Наша задача — получить спектр на выходе и сигнальное созвездие для широкополосного сигнала QPSK.

Процедуры, которые используются в этом разделе, включают:

- импорт схемы усилителя в проект анализа системы;
- компенсирование фазового сдвига;

- подстройка моделирования;
- работа с векторным анализатором сигналов (VSS Vector Signal Analyzer).

Добавим модель усилителя к системе QPSK, которая моделировалась в предыдущем разделе. Для этого:

1. Откройте проект **qpskfilter.emp** в каталоге ProgramFiles\AWR2002\ Examples\VSS\QPSK.
2. В дереве проекта щелкните правой кнопкой мыши по папке Circuit Schematics и выберите Import Schematic. Выберите в каталоге ProgramFiles\ AWR2002\ Examples\VSS\QPSK схему усилителя amplifier.sch (рис. 10.33).

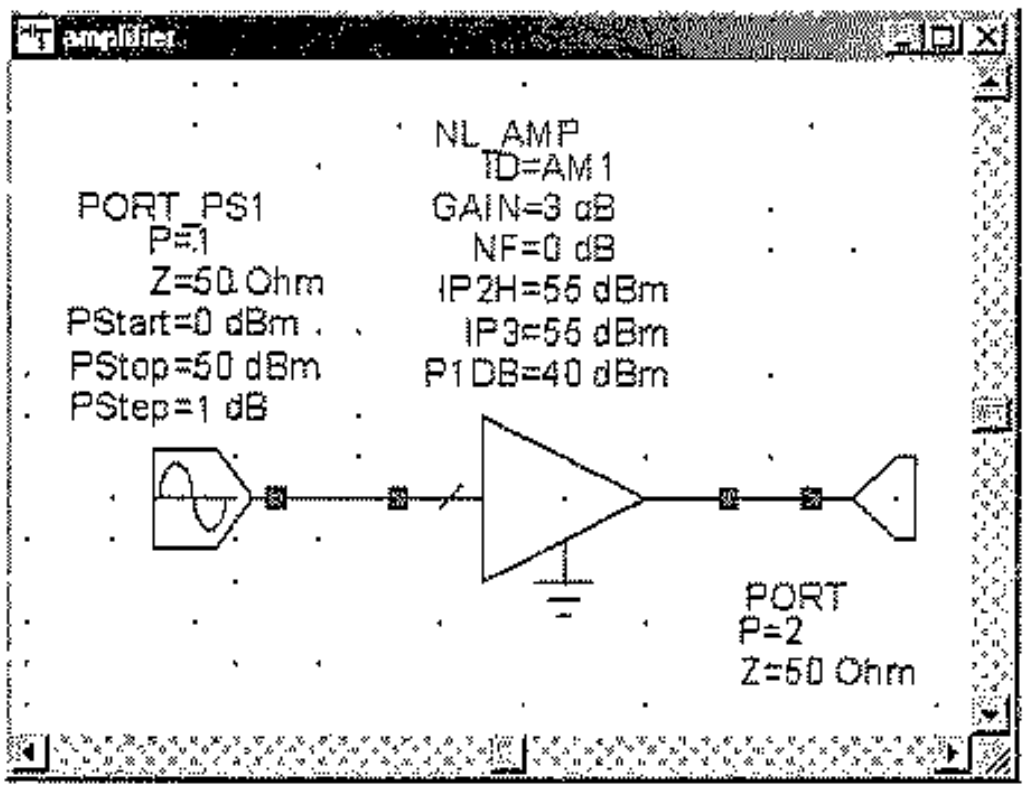


Рис. 10.33. Схема усилителя

3. Установите параметры усилителя так, как показано на рис. 10.34.
4. Передвиньте компоненты, чтобы получить пространство между блоками QPSK_TX и точкой TP1 системной диаграммы и разъедините провода между ними.

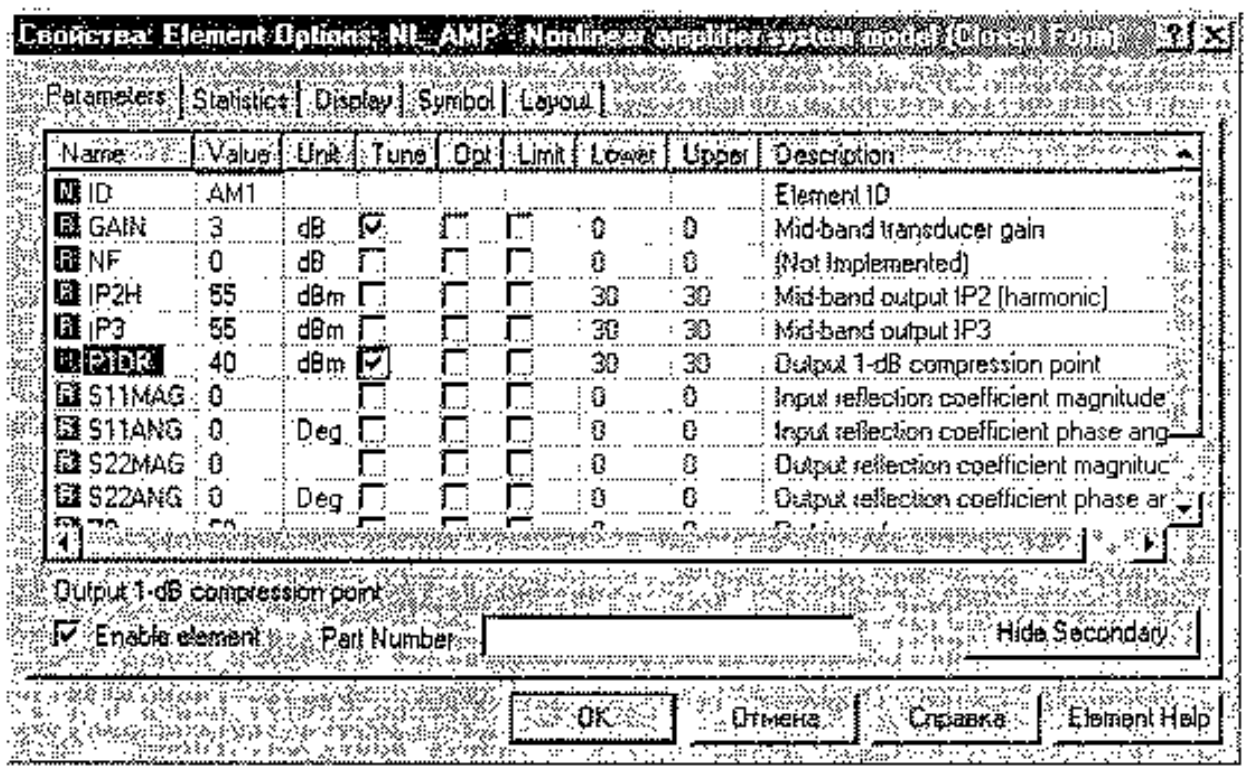


Рис. 10.34. Параметры усилителя NL_AMP

5. Из списка **System Blocks** выберите раздел **RF Blocks**, а затем подраздел **Simulation Based**. Выберите в нем **Non-linear Behavior ModelBlock** (NL_S), поместите этот блок между блоками QPSK_TX и AWGN.
6. Дважды щелкните по блоку NL_S и установите его параметры так, как показано на рис. 10.35.

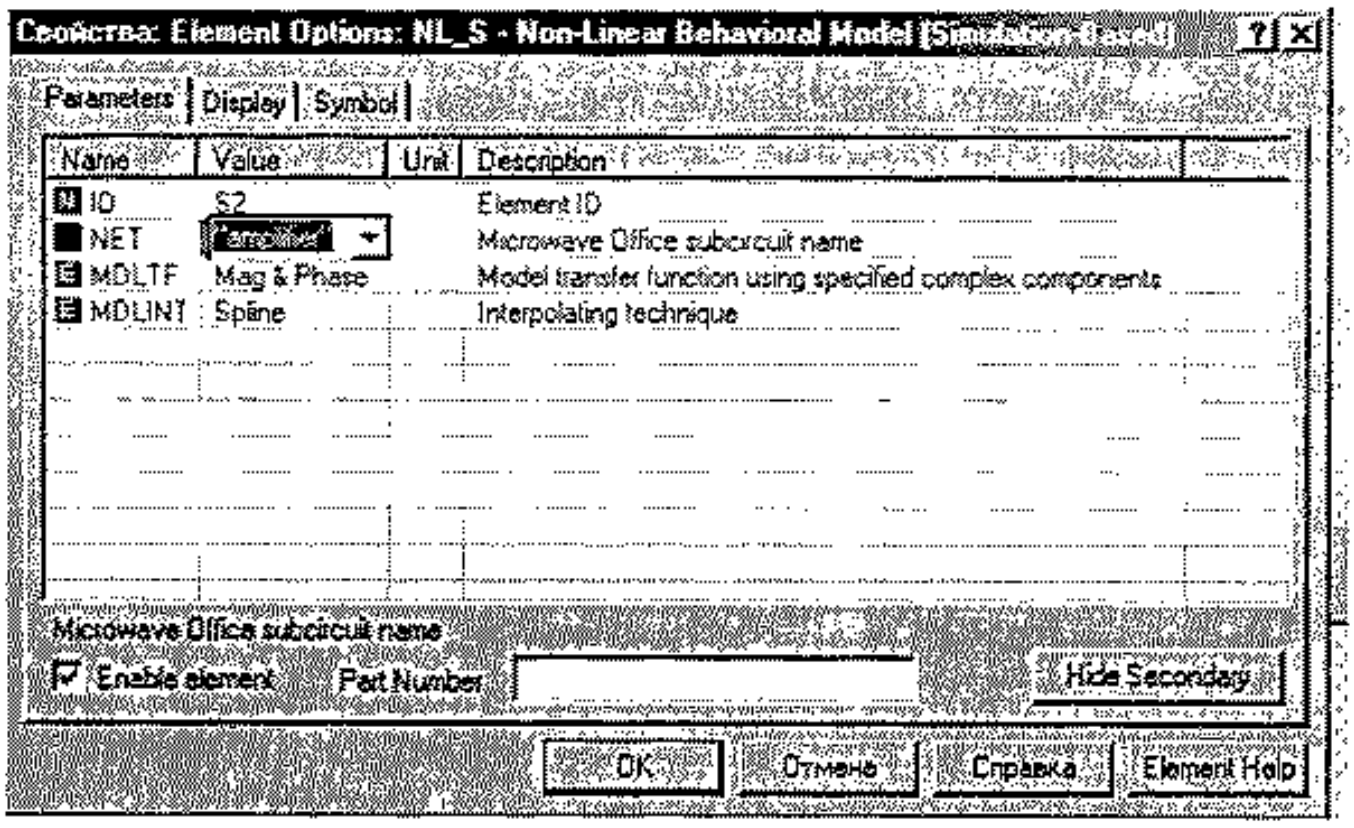


Рис. 10.35. Параметры блока NL_S. рассчитанного методом гармонического баланса

1. После этого схема для анализа усилителя, примет вид, изображенный на рис. 10.36.

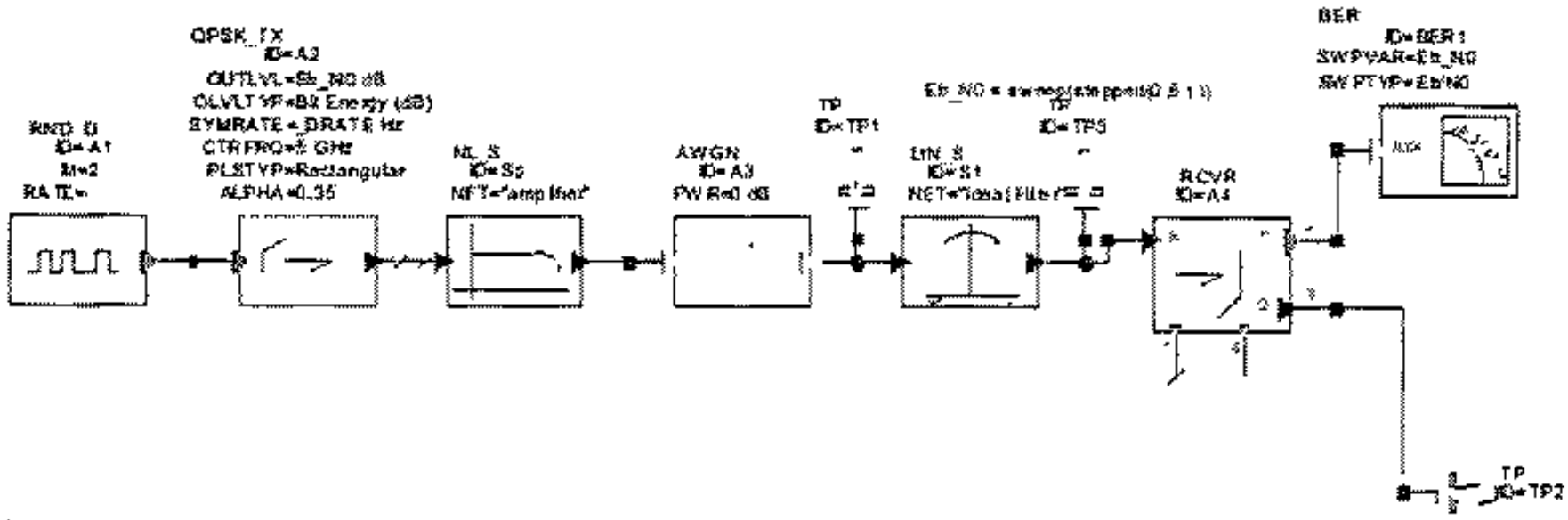


Рис. 10.36. Полная схема анализа усилителя при воздействии сложного сигнала: источник цифрового сигнала RND_D, передатчик-модулятор QPSK_TX, анализируемый нелинейный усилитель NL_S, источник гауссового шума AWGN, фильтр LIN_S, демодулятор-приемник RCVR и блок расчета BER

Компенсация фазового сдвига

Усилитель вносит сдвиг фазы сигнала на 180°. Чтобы скомпенсировать этот фазовый сдвиг, что необходимо для корректного расчета BER, поместим после блока NL_S фазовращатель PHASE.

1. Найдите блок **PHASE** в подгруппе Signal Processing, поместите его в системе так, как показано на рис. 10.37 и установите его параметр SHFT равным 180°.

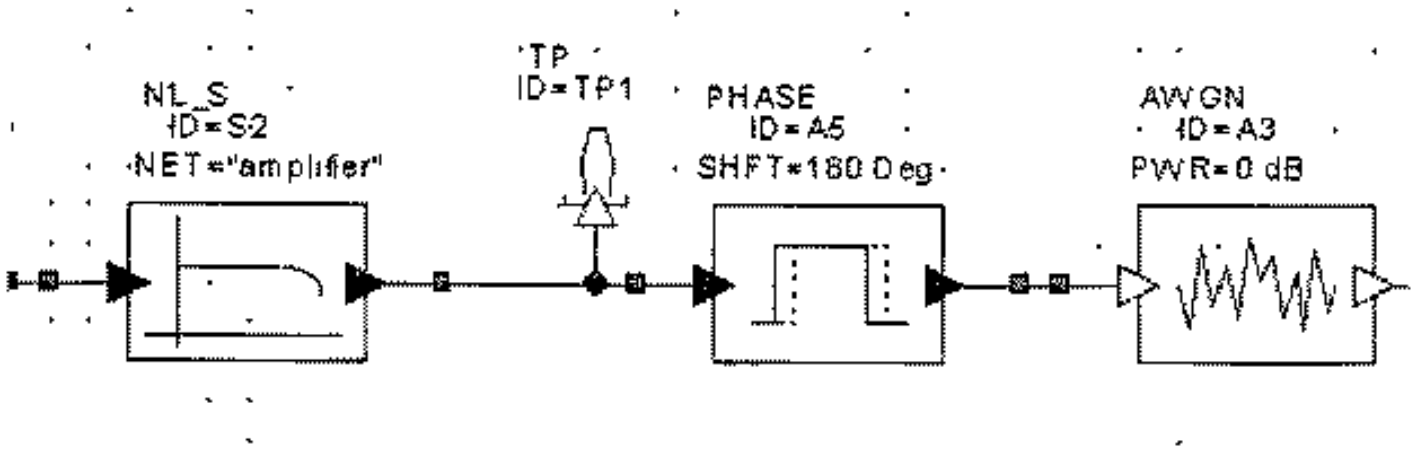


Рис. 10.37. Установка фазовращателя для компенсации фазового сдвига

2. Выберите **Options > Project Options** и установите список частот анализа, как показано на рис. 10.38, т. е. в одной точке 5 ГГц.
   Сохраните проект под именем **qpskfilter+amp**.

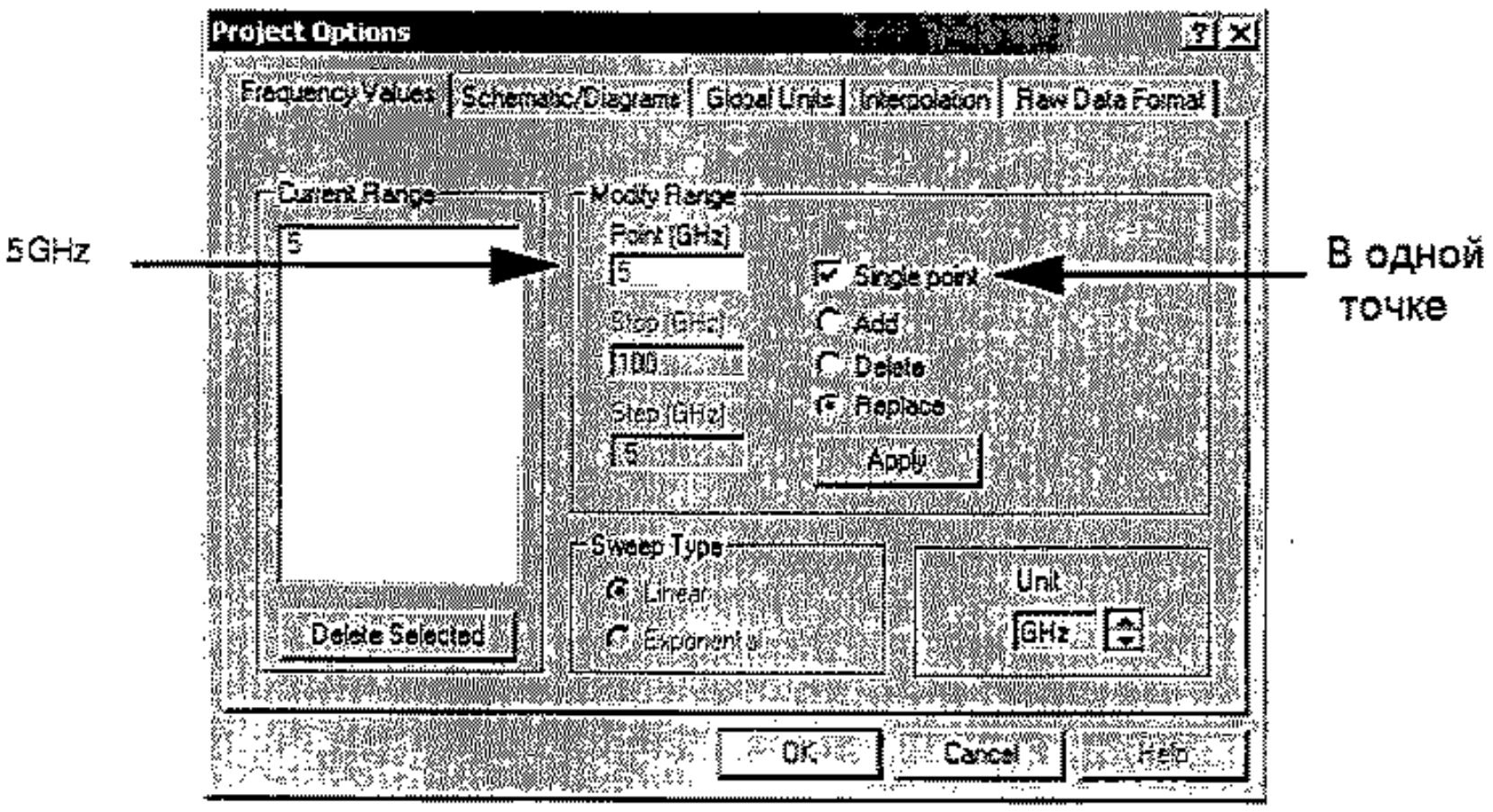
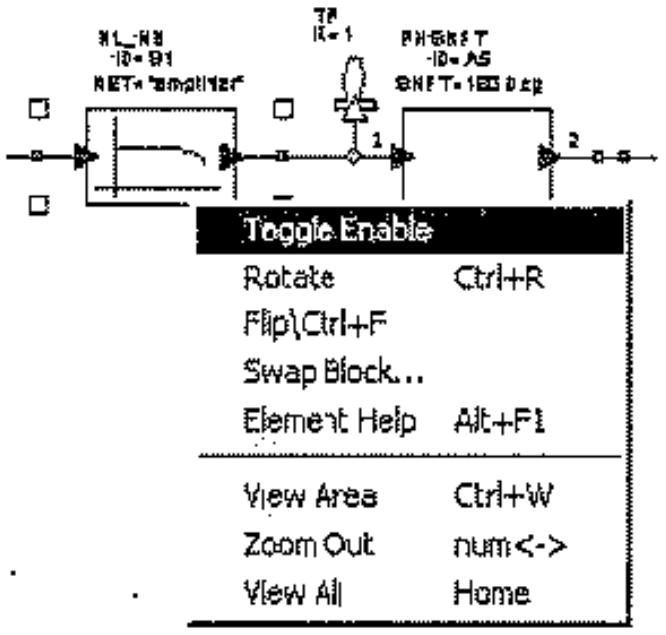
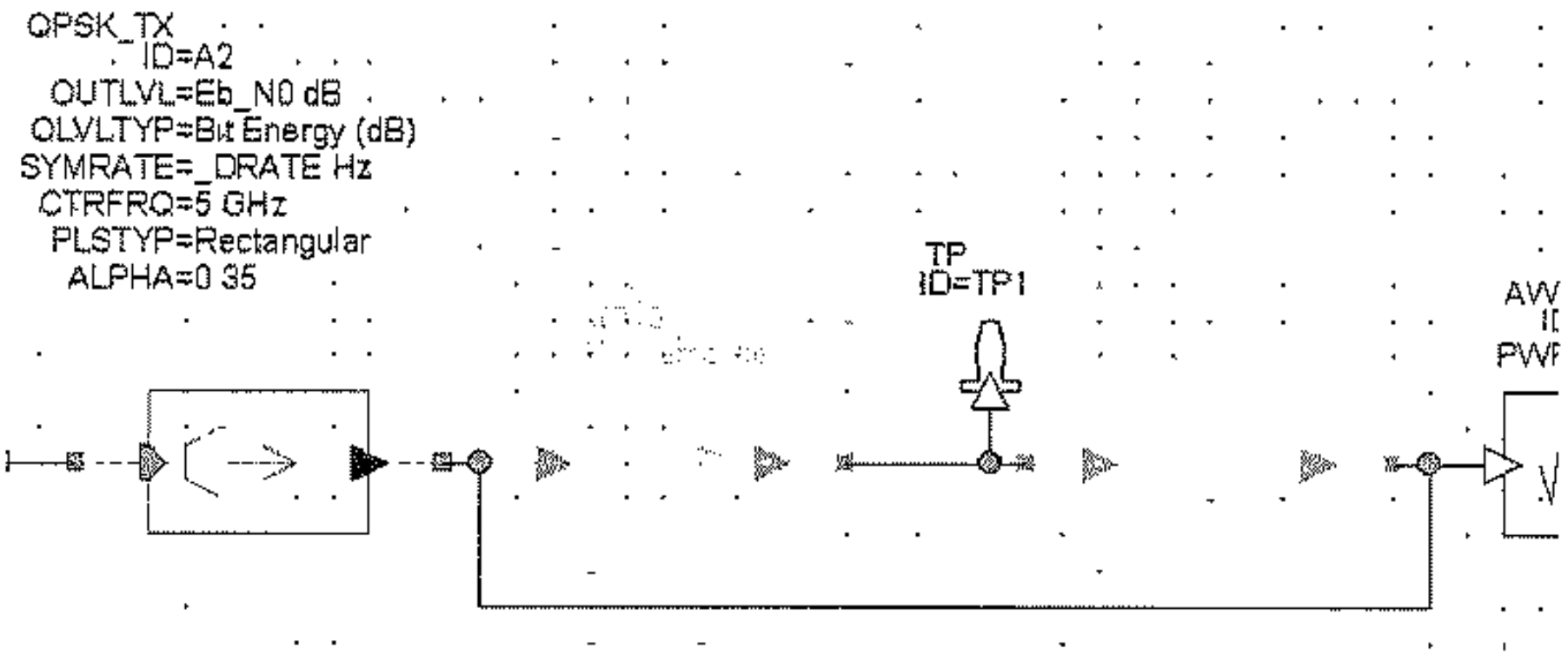


Рис. 10.38. Выбор частотной точки анализа

3. Запустите и затем остановите моделирование системы. Заметьте, что BER улучшился по сравнению со случаем моделирования усилителя только с полосовым фильтром.
4. Чтобы убедиться в этом улучшении, исключите блоки NL_S и PHASE. Для этого удобно использовать команду **Toggle Enable** (рис. 10.39), выделив исключаемый из расчета блок. Заметьте, что исключаемые блоки становятся серыми.
5. Соедините провод от блока **QPSK_TX** к блоку **AWGN**.
6. Запустите моделирование и заметьте величины BER.



а)



б)

Рис. 10.39. Дезактивация блоков из анализируемой системы

7. Разъедините провод между блоками QPSK_TX и AWGN. Чтобы исключить из моделирования блоки NL_S и PHASE, нажмите правой кнопкой мыши на блок и выберите **Toggle Enahle.**
8. Запустите моделирование.

Подстройка моделирования

1. Выберите усилитель, кликните на **Tune Tool** в инструментарии и активизируйте GAIN для подстройки.
2. Кликните кнопку **Tune** на инструментальной линейке для того, чтобы открыть Variable Tuner.
3. Запустите моделирование.
4. Подстройте усиление усилителя на 6 dB и рассмотрите улучшение BER.
5. Остановите моделирование и установите усиление на 3 dB.
6. Закройте окно подстройки.

Использование блока векторного анализатора VSA

Векторный анализатор огибающей сигнала используется, чтобы рассчитать зависимость мгновенной выходной мощности передатчика QPSK относительно AM/AM характеристик нелинейного усилителя.

1. В списке системных блоков откройте категорию **Meters**, разверните подгруппу **Network Analyzers**, в ней выберите блок Vector Complex Envelope Signal Analyzer (VSA) и поместите его выше блока NL_S (рис. 10.40).

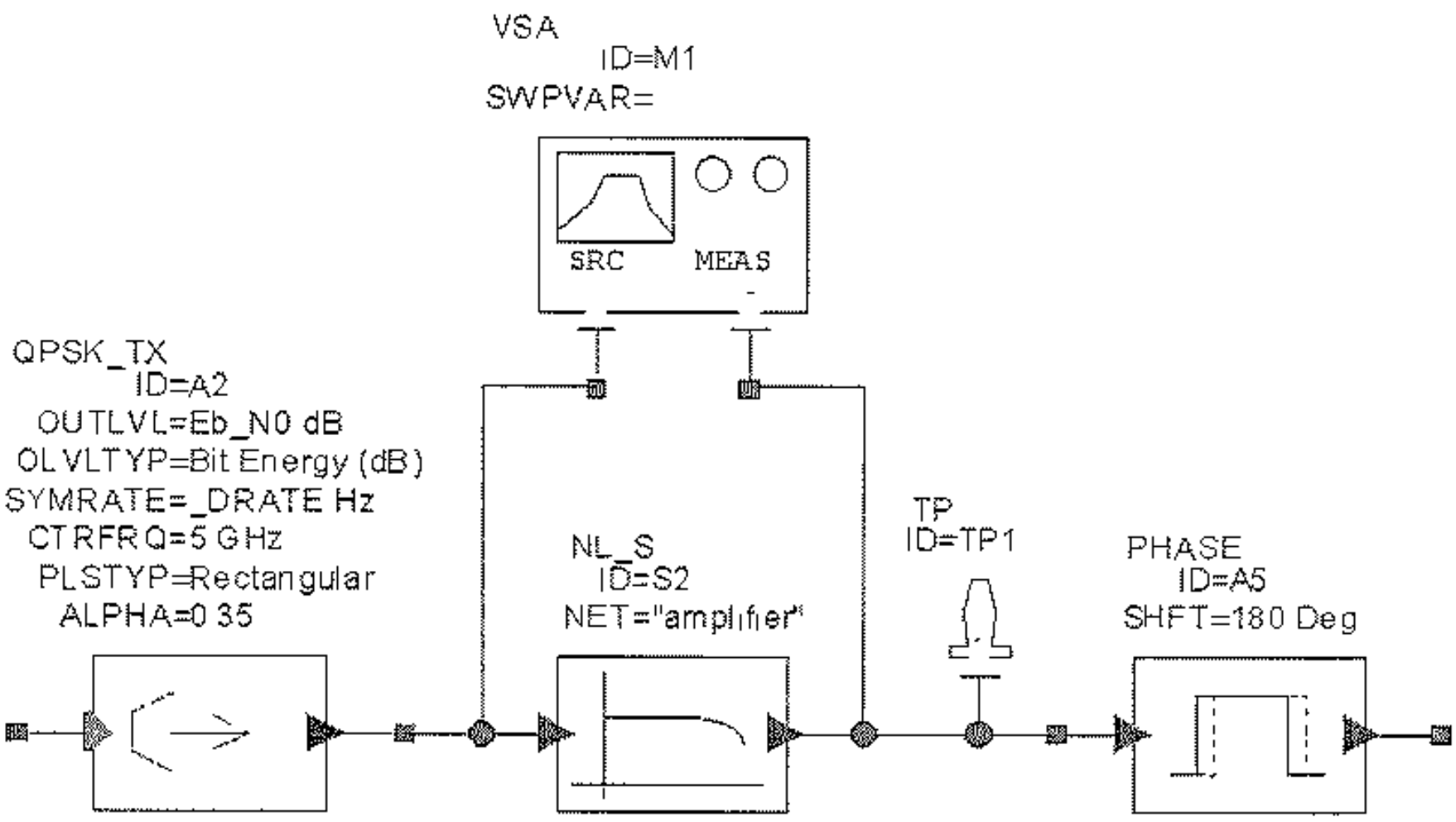


Рис. 10.40. Подключение векторного анализатора огибающей сигналов

2. Подключите два порта блока VSA к двум выводам блока NL_S.
3. Добавьте прямоугольный график и обозначьте его как «**AMtoAM**».
4. Чтобы вывести на этот график характеристики, нажмите на инструментальной панели кнопку Add Measurement. Для **Meas.Type** выберите **Nonlinear Power** и в графе Measurement выберите **AMtoAM**.
5. В строке **Data Source Name** выберите имя схемы усилителя **amplifier**, как показано на рис. 10.41.
6. Для **Power Output Component** выберите **Port_2** и выберите **1** для **Frequency Swp Index**.
7. Нанесите на этот же график AMtoAM другую характеристику системы AMtoAM_LS. Установите параметры этой характеристики в соответствие с рис. 10.42.
8. Запустите расчет. Моделирование начинается с расчетов методом гармонического баланса, в результате чего модифицируется график **AMtoAM** (см. рис. 10.43).
9. Для лучшего графического представления, выберите граф **AMtoAM**, кликните Properties на инструментальный линейке, выберите закладку **Traces** и измените символ с треугольника на **none**.

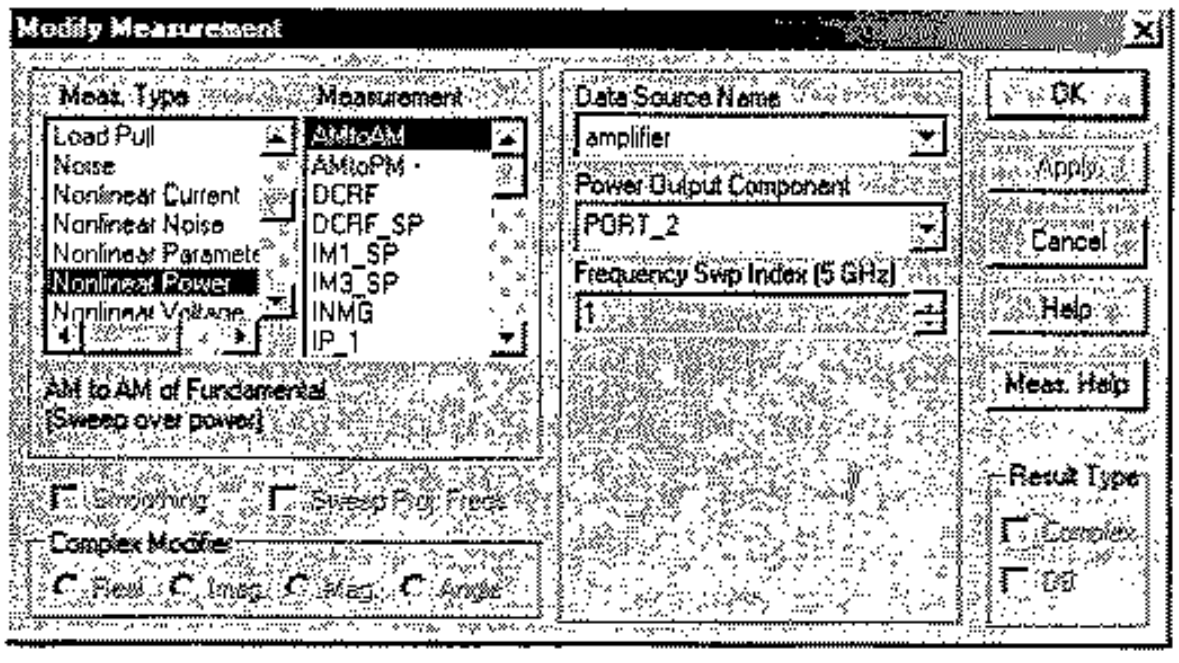


Рис. 10.41. Настройка выводимых на график характеристик

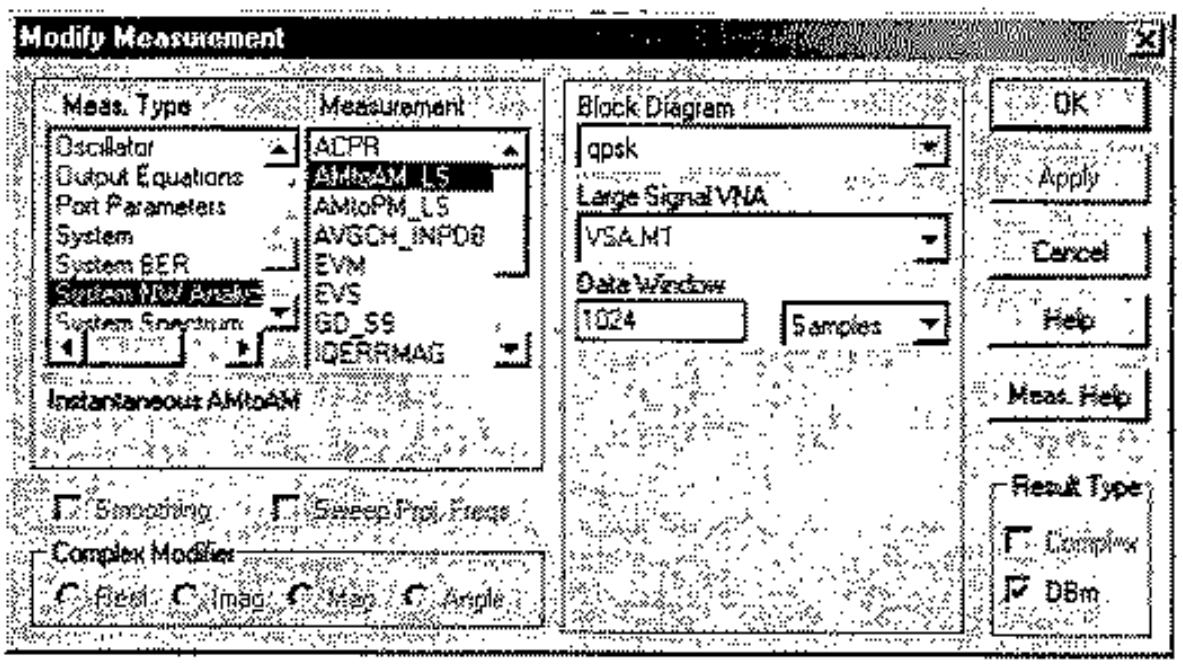


Рис. 10.42. Нанесение на график характеристики AMtoAM_LS

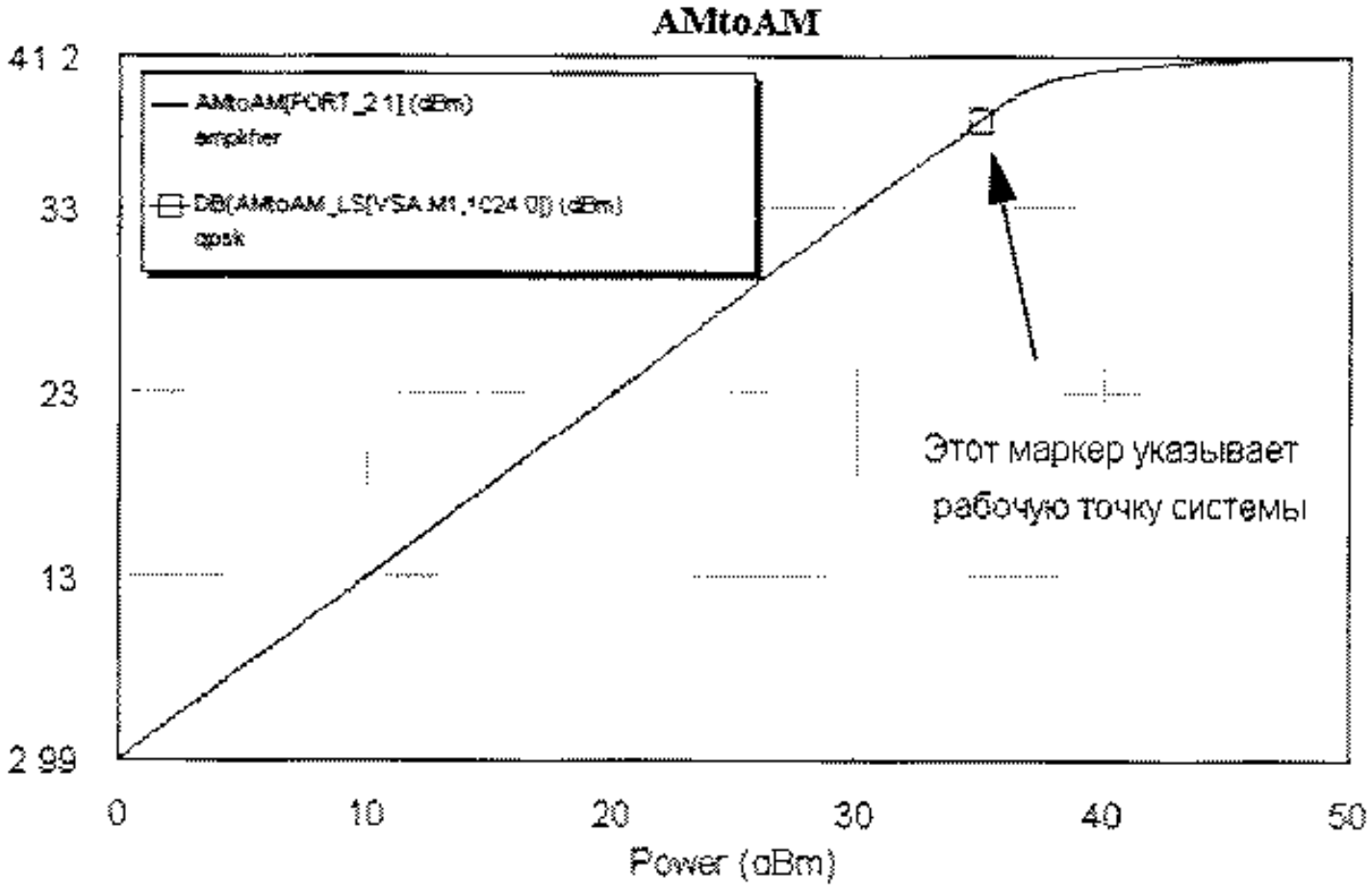


Рис. 10.43. Результаты моделирования усилителя мощности на системном уровне

10. Запустите моделирование системы. Когда моделирование начинается, маркер перемещается по графику, который получен из моделирования методом гармонического баланса. Маркер перемещается, потому что изменяется переменная Eb_N0 в диапазоне от 0 до 8 с шагом 1. В каждой точке рассчитывается величина BER, которая выводится в таблицу. Маркер останавливается, когда BER достигает заданного значения BER=0.001 и указывает рабочую точку системы вблизи точки сжатия усилителя на 1 дБ. Если вы уменьшаете значение величины сжатия, обратите внимание, что рабочая точка системы сдвигается в нелинейную область усилителя.

Данный пример qpskfilter+amp.emp находится в каталоге ...\AWR2002\ Examples\VSS\QPSK.

Заметим, что в показанных здесь примерах для фильтра и усилителя используются идеальные модели. Вы можете также использовать для них реальные модели компонентов схемы для фильтра и усилителя, как в проекте BJTPAverify.emp из каталога ...\AWR2002\ Examples\VSS\Amplifier.

Заключение

Возможности, которые предоставляют современные компьютеры разработчикам радиоаппаратуры, позволяют говорить не только об анализе, но и синтезе устройств СВЧ на электродинамическом уровне. Развитие и реализация методов анализа нелинейных устройств в скором будущем приведут к исключению всякого рода упрощений, типа линеаризации и квазинелинейного подхода в моделировании СВЧ устройств. Моделирование более приближается к электрофизическому представлению всех электронных приборов, входящих в микросхему. Измерительные стенды, оснащенные самыми современными программами, к которым относится и ***Microwave Office***, позволяют свести процесс проектирования сложной СВЧ конструкции по времени до месяца со дня получения задания и кончая экспериментальным образцом. Расчет, моделирование и измерение характеристик сливаются в единый процесс и требуют высокой квалификации исследователя.

Инженер, способный общаться с программой, а по сути с разработчиками программы, как равный с равными, должен знать не только интерфейс, но и методы, заложенные в основу решения задач. Хорошо подготовленный пользователь может не только задействовать все потенциальные возможности программы, но и расширить рамки ее применения.

Создание нового часто совпадает с разрушением старого. Так и сейчас, в момент критического положения в техническом образовании на помощь пришел новый инструмент в педагогической работе — компьютер. Стремительное внедрение компьютера в жизнь уже ничто не остановит, сомнения любого рода уже отброшены. Осталось только прыгнуть на подножку этого экспресса времени и со все увеличивающей скоростью нестись по дороге познания.

Нельзя сказать, что в России компьютер появился как что-то новое в последние 10—15 лет.

Развитие космоса, мощной индустрии, фундаментальной науки — то, чем гордится наша страна — всегда шло параллельно с мощной теоретической поддержкой, начиная с физико-математических и кончая социально-экономическими науками. Академики Л. С. Понтрягин, А. Н. Колмогоров, лауреат Нобелевской премии В. В. Леонтьев — это люди, внесшие значительный вклад в кибернетику в 20 веке, также как в конце 19 века существенный вклад в ее фундамент внес наш соотечественник — изобретатель радио А. С. Попов. Мощные автоматизированные системы «Буран», космическая станция «Мир», современные средства ПВО, лазерные системы обнаружения и обработки — эти достижения человеческой мысли требовали предельной концентрации аналитического, а затем и цифрового моделирования во всех звеньях разработки и эксплуатации радиотехнических систем.

Современные радиотехнические системы гражданского применения по своей сложности и уникальности выполняемых задач подчас не уступают военным. Системы сотовой связи, системы Глобальной связи и сети Интернет, устройства сбора и защиты информации, охранные системы, современные автономные автоматизированные системы, сама компьютерная техника, скорости передачи информации в которой уже заставляют говорить о сверхвысоких частотах в компьютере, робототехника — соперничают с самыми смелыми идеями фантастов.

Таким образом, современный специалист выпускник ВУЗа, имея универсальный метод цифровой обработки и передачи сигналов, получил в помощники устройство, которое может не только восполнить знания, но и сопровождать решение сложнейших задач и давать направления оптимального решения. Компьютер дал универсальный, единый метод и подход к любой задаче: метод аналитического решения заменяется системой поиска уже готового решения. Не случайно компьютер смело шагнул во все преподаваемые предметы — не только в математику, а даже и в историю, географию и литературу.

С широким внедрением *персонального* компьютера достижения математики, накапливаемые десятилетиями, расчеты, проводимые на «БЭСМ-6», алгоритмы, предназначенные для ЭВМ «Эльбрус», лучшей и пока не достигнутой мировым уровнем компьютерной системы параллельной обработки информации, теперь стали доступны любому инженеру, любому студенту.

Поэтому лабораторные работы, лабораторные стенды, практические занятия и даже весь учебный процесс можно и нужно смело пересмотреть и начать широкое внедрение компьютера во все звенья педагогической деятельности.

Такое требование жизни, к счастью, очень соответствует интересу учащихся. Подчас студент относится к компьютеру как к новой игрушке, как к чему-то, что облегчит его обучение (как совсем недавно надеялись на калькулятор). Затем компьютер захватывает его, простой человеческий интерес сочетается здесь с соревнованием с машиной. Интуиция и неплохая подготовка студентов в освоении стандартных интерфейсов становятся полезными и для преподавателей, которые, что неудивительно, с большим трудом осваивают тонкости компьютерной техники.

Таким образом, без специальной директивы о включении в учебные планы, повсеместно стали использоваться популярные пакеты WORD, MATHCAD, MATLAB. В ВУЗах на этих пакетах студенты рассчитывают домашние задания, курсовые работы, лабораторные и дипломные проекты. На примере пакетов MATHCAD и MATHLAB можно видеть трансформацию традиционного обучения дифференциальному и интегральному исчислению: студент меньше теперь занимается отработкой искусства подстановок, а больше — рассмотрению окончательного результата — благо, все эти решения получаются в трехмерном пространстве, в цвете и можно просматривать в любых координатах. Можно сказать, что современная программа дает возможность видеть дальше, ближе к конечному практическому результату.

Значит, нужно подтягивать и другие традиционные предметы, начиная с 1 курса включить в учебные планы, с начертательной геометрии, ее нужно заменять курсом освоения современных пакетов AutoCAD. Это даст первые и важные предпосылки освоения методов сквозного проектирования.

Далее, в процессе освоения таких базовых дисциплин, как «Теоретические основы электротехники», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Электродинамика и распространение радиоволн» важно дать образное интуитивное понимание фундаментальных физических явлений и понятий. Эффект от практических занятий,

как это видно уже сейчас, значительно усиливается, если, например, студент видит распространяющиеся радиоволны в сложной волноводной структуре.

В учебных исследовательских работах, как уже очевидно, нужно ставить задачи, только опираясь на применение современного программного обеспечения. В отличие от программистов, будущим радиоспециалистам, как мы считаем, не нужно знать все тонкости написания программ, но им нужно стать *хорошими пользователями* специализированного программного обеспечения. Причем надо учитывать, что за годы обучения на 3, 4, 5 курсе, может смениться не только парк компьютеров и программного обеспечения, но даже методы расчета. Однако хорошо сделанная программа сейчас становится сама учителем. Не только с помощью системы помощи, но главным образом с помощью примеров, студент способен самостоятельно освоить новое программное обеспечение. Научиться же без комплексов работать на любой новой программе — это должно быть заложено в ВУЗе.

Если говорить о проектировании радиосистем и узлов радиотракта, то в России широко известны такие отечественные комплексы как **ПРАМ, МАКЕТ, МАРС, КОМПАС**, однако объективно мы сейчас стоим перед необходимостью внедрения в учебный процесс продуктов таких крупных фирм, как Hewlett Parcard, Agilent. AWR, Eagleware, и причин здесь несколько. Эти разработчики обычно создают демонстрационную, или как часто называют студенческую версию, специально предназначенную для обучения. Конкуренция фирм за контингент студентов, которые по окончании учебы осваивают программу Microwave Office или APLAC (моделирование систем во временной области) и другие. достигло того, что разработчики бесплатно неограниченно распространяют эти программы любому студенту на определенное время. Интерфейс этих программ обычно очень современный, работают они в системах Windows-98. Версии их обычно часто обновляются. Поэтому, начиная с программ **Touchstone, PSPICE, P-CAD**, эти программы стали широко внедряться в учебный процесс в 1990-х годах во многих ВУЗах страны.

Тенденция применения компьютера в настоящее время связана по крайней мере еще с двумя прогрессивными нововведениями. Это — ***электронные книги*** и ***Интернет***.

Первые опыты создания электронных книг — учебников по техническим специальностям сводились к созданию справочников и сборников демоверсий программного обеспечения, собранного по сетям Интернета и электронным библиотекам.

Включение фотоальбомов, в т. ч. анимационных, готовых решений, электронных схем, видеоклипов, библиографии, учебников на русском языке с собственной системой поиска значительно усилило электронные книги. [Добавим, однако, о высокой ответственности авторов электронных книг, поскольку ошибки здесь могут тиражироваться неограниченно и мгновенно].

Примеры крупных фирм, усиление мощности персональных компьютеров позволило создать CD-ROMы, которые не ограничиваются презентациями, а всестороннее используют все мультимедийные возможности для проведения занятий, причем с учетом обратной связи от учащихся к преподавателю. Системы обучения иностранному языку со шлифовкой произношения известны давно, но сейчас уже есть и подобные CD-ROM диски для обучения техническим дисциплинам.

Технический прогресс, обусловленный борьбой за комфортное существование, что относится и к отдельным обществам, и к государствам и человечеству вообще, неуклонно ведет к усложнению систем, приборов, комплексов. Поэтому и такая традиционная форма обучения на радиотехнических факультетах, как лабо-

раторная работа претерпела в последнее время радикальную перемену — от снятия показаний приборов к моделированию систем на компьютере. Студенты, по сути, не имеют дело с реальными приборами, хотя на экране монитора формализация доведена до созерцания и манипуляции реальными приборами с помощью курсора и мыши.

Но компьютер — это не только прибор с монитором. Компьютер может быть и частью измерительного прибора. Автоматические анализаторы цепей, совмещенные с программами моделирования и создания фотошаблонов — типичный пример. Возможности работы с этими приборами для сквозного моделирования радиоустройств имеет, например, программа MMICAD (Monolithic and Microwave Integrated Circuit Analisys and Design), которая решает задачи самого широкого спектра, начиная от расчета генератора и кончая разводкой схемы, генерацией Gerber-файла многослойной многоиерархической интегральной схемы СВЧ. Разводка сложных многослойных схем и создание конструкторской документации сейчас просто немыслимо без работы не просто одного компьютера, а параллельной работы нескольких конструкторов над одной конструкцией одновременно в локальной сети.

Подобная постановка задач в учебной исследовательской работе, дипломном проектировании, требует разработки новой программы, выпуска новых пособий (в т. ч. и в электронном виде). Некоторый теоретический материал необходимо преподавать теперь с оглядкой на существующие точные численные расчета. Например, методы теории цепей, применяемые для расчета СВЧ схем, методы Олинера, реализованные в программах класса Touchstone становятся теперь методами эскизного проектирования, т. к. они дают существенные погрешности не только расчета, но и физической картины в радиосистемах. MWO и программы этого класса — это инструменты моделирования, которые ставят проектирование на новый уровень.

Несмотря на общую довольно оптимистичную картину внедрения компьютера в учебный процесс, хочется отметить и минусы этого явления. Пессимисты вполне обоснованно говорят о засилии компьютера и Интернета. Чрезмерное общение с компьютером вредит здоровью, падает зрение, появляется раздражительность, беспричинная тревога. Не является ли Интернет тем «зверем», который опутает весь мир, о котором написано в Библии? Не является ли он орудием маскульта, средством «промывания мозгов», деполитизации, деморализации? И неизбежно встает вопрос: что этому должен противопоставить человек? Какое стратегическое решение должно увести нас от дороги разрушения на дорогу созидания (к сожалению, все же за счет окружающего мира)?

И мы отвечаем так: Только бережное отношение к накопленному человеком, только оптимальное использование окружающей среды и достижений самого человека — разумно в человеческой деятельности и к решению этой задачи можно подключить все средства технического прогресса. Свободный доступ к накопленной человечеством базе данных, в том числе, ведет к исключению дублирования работ, экономии средств и в конечном итоге к гармоническому развитию человека. Компьютер сам продукт человеческого разума. Компьютер и программное обеспечение сами становятся учителями и подтягивают пользователей до уровня их создателей. Но не выше: современный компьютер будет казаться логарифмической линейкой через 50 лет.

Можно и нужно ставить задачу создания серверов в каждом учебном заведении, WEB-узлов каждого курса, лаборатории, компьютерных классов, объединен-

ных лабораторных классов, компьютеризированных лекционных помещений. Компьютер будет другом и помощником студента, если его хорошо знать.

Возрождение факультативной учебы, учебной исследовательской работы — здесь ВУЗы традиционно имеют большие возможности, поскольку в их стенах сосредоточены будущие кадры, которые, придя на производство, сразу садятся за компьютер.

От любительского подхода к дипломному проекту — мол, рассчитал на компьютере — хорошо, необходимо перейти к жесткому требованию: численное моделирование должно стать краеугольным камнем проектирования. Обучение программированию нужно перевести в практическую плоскость обучению пользователя.

Квалифицированный пользователь — это не программист низшей квалификации. Пользование современной программой — это еще и дополнение ее макросами, которые адаптируют программу для нужных целей. Программированию нужно обучать сквозь призму пользования программ. Надеемся, что внедрение программы ***MWO*** в учебный процесс обучения поможет подготовке высококлассных современных радиоинженеров.

Литература

1. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств. — М.: Радио и связь, 1987. 430 с.

2. Кврсон. Высокочастотные усилители. М. Радио и Связь, 1981, 216 с.

3. Gonsalez G. Microwave Transistor Amplifiers.Analysis and Design Prentice Hall, 1997, 506 pp.

4. S. Maas, *Nonlinear Microwave Circuits*. IEEE Press, New York, 1996

5. S. Maas, *Microwave Mixers*, Artech House, 1993

6. Текшев В. Б., Разевиг В. Д., Плигин С. Г. Автоматизированное проектирование микроминиатюрных полупроводниковых узлов СВЧ радиоприемных устройств. — М.: Изд-во МЭИ, 1987.

7. Дворников А. А., Коробов В. В., Разевиг В.Д. Проектирование СВЧ устройств с помошью программы PUFF. — М.: Изд-во МЭИ, 1994.

8. Курушин А. А., Подковырин С. И. Программа анализа и проектирования СВЧ схем Touchstone/DOS. — М.: МИЭМ, 1998. 251 с.

9. Фриск В. В. Методические указания по использованию пакета Microwave Office 2000 (3.22). — М.: МТУСИ, 2001.

10. Installation Guide. — El Segundo: Applied Wave Research, Inc., 2002, PDF файл.

11. Microwave Office Getting Started Guide. — El Segundo: Applied Wave Research, Inc., 2002, PDF файл.

12. Visual System Simulator Getting Started Guide. — El Segundo: Applied Wave Research, Inc., 2002, PDF файл.

13. Microwave Office 2001. Reference Guide. — El Segundo: Applied Wave Research, Inc., 2000.

14. Microwave Office 2001. EMSight. User's Guide. — El Segundo: Applied Wave Research, Inc., 2000.

15. Microwave Office 2001. Element Catalog. — El Segundo: Applied Wave Research, Inc., 2000.

16. P. Antognetti and G. Massobrio. Semiconductor Device Modeling with SPICE, Second Edition, McGraw-Hill, Inc., 1993.

17. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ./ под ред. Д.Д. Кловского. — М.: Радио и связь, 2000, — 800 с.

18. К. Феер. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. Пер. с англ. /Под ред. В.И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000, — 520 с.

Содержание

Введение 3

Глава 1
ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММЫ MICROWAVE OFFICE 6

1.1. Содержание проекта 7
1.2. Вкладка моделей элементов 10
1.3. Вкладка переменных проекта Var 11
1.4. Вкладка топологии проекта Layout 11
1.5. Командное меню и панель инструментов 13
1.6. Работа с проектами 16
1.7. Установка параметров проекта 18
1.8. Добавление и изменение комментариев 24
1.9. Начальные установки фундаментальных частот проекта 25
1.10. Глобальные выражения 27
1.11. Работа с внешними файламн данных 34

Глава 2
РЕДАКТОР ТОПОЛОГИИ EMSIGHT 41

2.1. Редактирование геометрии структуры 41
2.2. Редактирование параметров корпуса 42
2.3. Диэлектрические слои 43
2.4. Формы проводников 46
2.5. Реквизиты проводников 48
2.6. Перемычки 50
2.7. Порты 51
2.8. Перемычки-порты 53
2.9. Внутренние порты 53
2.10. Пример создания и анализа микрополоскового фильтра 55
2.10.1. Создание ЕМ структуры 55
2.10.2. Задание корпуса 55
2.10.3. Граничные условня 57
2.10.4. Добавление проводников к топологии 58
2.10.5. Добавление перемычек VIA 60

2.10.6. Добавление портов и плоскостей разгерметизации 61
2.10.7. Задание частот моделирования 62
2.10.8. Вывод результатов моделирования 64
2.10.9. Анимирование тока и просмотр электромагнитного поля 66
2.10.10. Завершение черчения топологии 67
2.11. Моделирование в EMsight.....69
2.12. Параметры ЕМ решающего устройства.....71
2.13. Страница параметров топологии (Layout).....74
2.14. Просмотр тока.....75
2.15. Исключение неоднородностей 76

Глава 3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ EMSIGHT.....81
3.1. Формулировка электромагнитной задачи.....82
3.2. Описание моделируемой структуры.....83
3.3. Разбиение форм на ячейки.....84
3.4. Формулировка метода моментов.....85
3.5. Алгоритм метода моментов.....87
3.6. Формирование матрицы моментов.....90
3.7. Определение портов в электродинамической задаче 91
3.8. Алгоритм исключения.....93
3.9. Численное решение матрицы моментов.....96
3.10. Практические замечания по работе EMSight 101
3.11. Исключение неоднородностей.....109
3.11.1. Реализация исключения.....109
3.11.2. Автоматическое исключение 110
3.11.3. Стандартный алгоритм исключения 111
3.11.4. Использование решающего устройства быстрого частотного сканирования 112
3.11.5. Создание производных матриц моментов.....113
3.11.6. Решение для производных тока 113
3.11.7. Алгоритм исключения, совмещенный с FFS.....114
3.12. Уменьшение времени решения.....114
3.12.1. Создание таблицы моментов 115
3.12.2. Заполнение матрицы моментов.....116
3.12.3. Метод решения «от точки к точке» 116

3.12.4. Уменьшение времени решения в методе «от точки к точке» 118
3.12.5. Уменьшение времени решения при использовании FFS 118
3.12.6. Эффективное использованне решающего устройства FFS 120
3.13. Ключевые моменты проектнрования 121
3.13.1. Толстые проводники 121
3.13.2. Компланарный волновод 122
3.13.3. Моделирование перемычек 123
3.13.4. Уход от резонансов 127
3.13.5. Моделирование потерь 128
3.13.6. Границы с потерями 128
3.13.7. Потери в проводниках 129
3.13.8. Анимация тока и визуализация E-поля 129
3.13.9. Рекомендации для ускорения моделирования 133

Глава 4
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ 135
4.1. Резонансные типы волн 136
4.2. Относительная диэлектрическая постоянная линии 137
4.3. Погрешность быстрой частотной развертки 137
4.4. Вектор электрнческого поля 138
4.5. Постоянная распространения со стороны порта 138
4.6. Плотность тока на металлических формах 139
4.7. Плотность тока в Z-направлении 140
4.8. Полюсы и нули S-параметров 141
4.9. Резонансы волн типа TE и TM 143
4.9. Импедансы портов 144
4.10. Характсристики излучения антенны 145
4.10.1. Коническое осевое отношение (при изменении ϕ): Con_AR 149
4.10.2. Диаграмма направленности касательной компоненты поля E-Phi (при изменении ϕ): Con_EPhi 150
4.10.3. Диаграмма направленности E-теты (при изменении Phi): Con_ETheta 152
4.10.4. Левая круговая поляризация (изменение угла Phi): Con_LHCP 152

4.10.5. Правосторонная круговая поляризация (при изменении Phi): Con_RHCP....154
4.10.6. Полная мощность излучения (при изменении ϕ): Con_TPwr....155
4.10.7. PPC осевое отношение (изменение угла Тета): PPC_AR....156
4.10.8. Угломестная диаграмма направленности E-Phi (при изменении Тета): PPC_EPhi....157
4.10.9. Диаграмма направленностн E-теты (развертка Тета): PPC_ETheta....158
4.10.10. Левосторонняя круговая поляризацня (изменение Тета): PPC_LHCP....159
4.10.11. Правостороння круговая поляризация (развертка по θ): PPC_RHCP....160
4.10.12. Полная мощность излучения (развертка по Тета): PPC_TPwr....161
4.10.13. Осевое отношение (развертка по частоте): SF_AR....161
4.10.14. Составляющая поля E-Phi (в полосе частот): SF_EPhi....162
4.10.15. E-тета составляющая поля (развертка по частоте): SF_ETheta....164
4.10.16. E-левая круговая поляризация (развертка по частоте): SF_LHCP....165
4.10.17. E-правая круговая поляризация (развертка по частоте): SF_RHCP....166
4.10.18. Полная мощность излучения (в полосе частот): SF_TPwr....167

Глава 5
ЛИНЕЙНЫЙ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ....168
5.1. Составление и решение схемы....168
5.2. Подсхемы, порты и соединения....169
5.3. Редактирование схемы....172
5.4. Примеры создания и моделирования схем....176
5.4.1. Пример анализа фильтра на сосредоточенных элементах..176
5.4.2. Усилитель, описанный в виде четырехполюсника....184
5.5. Описание схемы в виде текстового файла....186
5.6. Переменные и уравнения....192
5.7. Ассистенты линейного времени....198

Глава 6
ВЫВОД ЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....201
6.1. Расчет, создание графиков и днаграмм 201
6.2. Каталог линейных характеристик.....210
6.3. Линейные характеристики 211
6.4. Коэффициенты усиления линейных усилителей 220
6.5. Окружности характеристик на комплексной плоскости.....223
6.6. Шумовые характеристики 230

Глава 7
РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ СХЕМ 236
7.1. Методы анализа нелинейных схем.....236
7.2. Метод гармонического баланса 238
7.2.1. Особенности метода гармонического баланса.....238
7.2.2. Выбор значимых частот, скорость и сходимость.....240
7.2.3. Вычисление токов в нелинейных устройствах.....242
7.2.4. Сходимость.....243
7.2.5. Параметры гармонического баланса.....244
7.2.6. Установки гармонического баланса.....245
7.3. Примеры расчета методом гармонического баланса 247
7.4. Моделирование нелинейных приборов 252
7.5. Практические замечания.....268
7.6. Аналнз методом рядов Вольтерра.....269
7.6.1. Основы метода рядов Вольтерра.....270
7.6.2. Моделнрование схемы и прнборов в методе рядов Вольтерра.....274
7.6.3. Использование моделей рядов Вольтерра 275
7.7. Каталог нелинейных характернстик.....278
7.7.1. Приборы, устанавливаемые в схеме для измерения нелинейных характеристик 279
7.7.2. Характеристики нелинейного тока 283
7.8. Моделирование нагрузочных линии с помощью ассистента Load Pull Wizard.....290
7.9. Нелинейные характеристики по мощности 296
7.10. Нелинейные характеристики по напряжению 311
7.11. Большесигнальные нелинейные характеристики.....316

Глава 8
АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ШУМОВ 328
8.1. Шум в нелинейных устройствах 328
8.2. Моделирование шумовых характеристик 331
8.3. Нелинейный анализ генераторов 334
8.3.1. Генераторный зонд 335
8.3.2. Моделирование генератора 336
8.3.3. Параметры гармонического баланса прн анализе генератора 338
8.3.4. Ограничения и особенности анализа генератора 339
8.3.5. Пример генератора, управляемого напряжением 339
8.3.6. Использование элемеита OSCAPROBE 343
8.3.7. Решение проблем при проектировании генератора 345
8.3.8. Настраиваемый зонд (пробник) OSCTPROBE 346
8.4. Фазовый шум генератора 348

Глава 9
МОДУЛЬ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА LAYOUT 350
9.1. Основы построения топологии 351
9.2. Редактор топологии 355
9.3. Пример создання топологни 362
9.3.1. Импорт файла процессирования слоев 363
9.3.2. Редактирование единиц базы данных и размера сетки по умолчанию 363
9.3.3. Импорт библиотеки ячеек GDSII 364
9.3.4. Импорт файла данных 364
9.3.5. Изменение символа элемента 366
9.3.6. Помещение микрополосковых элементов в топологию 367
9.3.7. Установка соответствия топологии ячейки и элемента схемы 370
9.3.8. Просмотр топологии 370
9.3.9. Фиксация топологической ячейки 371
9.3.10. Создание топологнческой ячейки 372
9.3.11. Использование элемента MTRACE в трассировке топологии 376
9.3.12. Функции слияния для топологических ячеек 377
9.3.13. Экспорт топологии 379

9.4. Создание топологических ячеек 379
9.5. Соединение элементов топологии 382
9.6. Многослойная топологня 390
9.7. Экспорт топологии в MWO 396
9.8. Редакторы топологии в MWO 402
9.8.1. Редактор топологии (Layout View Editor) 402
9.8.2. Редактор топологических ячеек (Artwork Cell Editor) 403
9.8.3. Редактор топологии при решении электромагнитных задач 404
9.9. Инструменты черчения топологии 407
9.9.1. Состав инструментов 407
9.9.2. Режимы редактирования 411
9.9.3. Точки притяжения 413
9.9.4. Черчение с помощью ввода координат 416
9.9.5. Измерение размеров 419
9.9.6. Операции над формами 419
9.9.7. Инструменты выравнивания 421
9.10. Трассирование пути 422
9.11. Файл процессирования топологии (LPF) 428
9.12. Программное описание топологических ячеек 434
9.13. Проверка правнльности топологии 441

Глава 10
АНАЛИЗ СИСТЕМ СВЯЗИ 447
10.1. Введение в VSS 447
10.2. Структура VSS 2002 450
10.3. Создание проектов VSS 454
10.4. Построение системы и моделирование 457
10.5. Расчет характеристик систем 465
10.6. Косимуляция нелинейных схем в VSS 472

Заключение 480

Литература 485

Всеволод Данилович Разевиг
Юрий Владимирович Потапов
Александр Александрович Курушин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ MICROWAVE OFFICE

Ответственный за выпуск
В. Митин

Макет и верстка
С. Тарасов

Обложка
Е. Холмский

ООО «СОЛОН-Пресс»
123242, г. Москва, а/я 20
Телефоны:
(095) 254-44-10, (095) 252-36-96, (095) 252-25-21
E-mail: Solon-R@coba.ru

ООО «СОЛОН-Пресс»
127051, г. Москва, М. Сухаревская пл., д. 6, стр. 1 (пом. ТАРП ЦАО)
Формат 70×100/16. Объем 31 п. л. Тираж 3000 **Зак. 407**

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Типография ИПО профсоюзов Профиздат», 109044, Москва, Крутицкий вал, 18