

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
В СРЕДЕ ADVANCED DESIGN SYSTEM

*Рекомендовано редсоветом МГТУ им. Н.Э. Баумана
в качестве учебного пособия*

Москва
Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана
2006

УДК 621.396.029(075.8)

ББК 30.2

П79

Рецензенты: *С.И. Масленникова, В.Б. Стешенко*

П79 **Проектирование радиотехнических устройств в среде
Advanced Design System:** Учеб. пособие / А.Д. Головин, О.А. Смирнова, А.Н. Глотов, Р.Ш. Загидуллин; Под ред. В.Н. Рождествина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 44 с.: ил.

ISBN 5-7038-2869-4

Изложены вопросы проектирования радиотехнических устройств с использованием системы Advanced Design System (ADS) фирмы Agilent Technologies. Рассмотрены основные этапы создания и редактирования проектов, моделирования и отображения результатов в среде ADS, основные виды анализа, а также практические задачи по моделированию радиотехнических устройств.

Для студентов радиотехнических специальностей.

Ил. 29. Библиогр. 4 назв.

УДК 621.396.029(075.8)

ББК 30.2

ВВЕДЕНИЕ

Advanced Design System (ADS) фирмы Agilent Technologies представляет собой одну из самых мощных систем проектирования с расширенными возможностями, которая предлагает разработчикам передовые технологии моделирования.

Система ADS содержит все функции, которые необходимы для разработки и проектирования аналоговых и цифровых радиотехнических устройств, всего сигнального тракта устройств, проводной или радиосвязи (включая связанные системы и цифровую обработку модулирующих сигналов), проектирование печатных плат, разработку монолитных интегральных схем и пространственных электромагнитных структур, а также разводку печатных плат. Уникальные свойства системы ADS позволяют применять ее во многих областях техники, включая радиоэлектронику и лазерную технику.

В библиотеках элементов ADS содержится описание более 100 000 комплектующих изделий, а также средства разработки интегральных микросхем от ведущих производителей. Библиотеки проектирования ADS позволяют осуществлять разработку в соответствии с новейшими стандартами. Модели и методы моделирования, используемые в ADS, обладают высокой точностью и степенью достоверности.

ADS является средой, которая совмещает несколько эффективных технологий моделирования. Она позволяет определять или импортировать высокочастотные, аналоговые и цифровые параметры, а также ключевые параметры взаимодействия моделей.

ADS предоставляет широкие возможности моделирования на системном, схемном и физическом уровнях в целях определения всех характеристик разрабатываемого изделия. Система ADS предлагает наиболее полный спектр технологий моделирования.

При совместном использовании они позволяют полностью характеризовать и оптимизировать проектирование при множестве условий.

Важным качеством системы ADS является простота проектирования, что способствует сокращению сроков разработки. Развитая архитектура системы ADS дает возможность совместного моделирования, что позволяет объединять типы и области моделирования.

Связь со средой Agilent VEE обеспечивает управление приборами, комплексное манипулирование данными и их совместное применение, а также автоматизацию настройки схем измерения, позволяя создавать технические решения с учетом конкретных требований, необходимых для проверки правильности разработок.

На всех стадиях процесса разработки анализ подсоединенных сигналов позволяет совместно использовать реальные и полученные в результате моделирования сигналы, устройства и функциональные блоки. Варианты технических решений могут быть полностью исследованы без создания дорогостоящих макетов и выполнения дополнительных этапов проектирования.

1. СРЕДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Среда проектирования имеет оконный интерфейс. Все операции осуществляются внутри рабочей области текущего окна.

1.1. Основы интерфейса ADS

Главное окно, называемое Advanced Design System (Main), содержит главное меню и панель инструментов для быстрого доступа к основным операциям. Необходимые данные представлены в виде дерева каталогов, где показана иерархия текущего проекта (рис. 1.1).

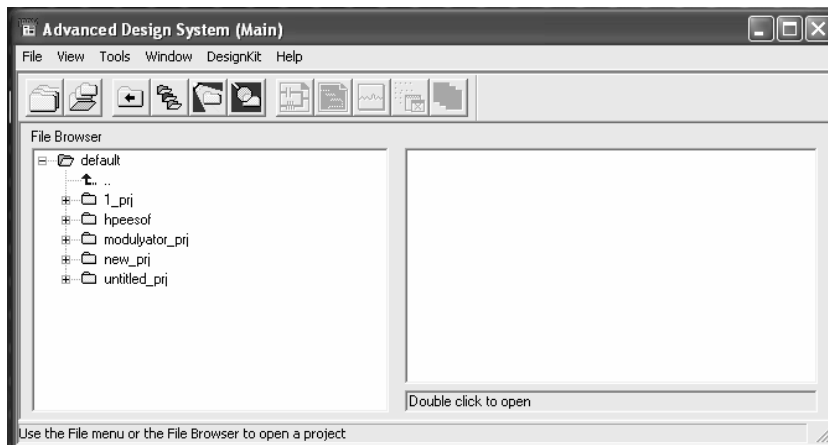


Рис. 1.1. Главное окно среды проектирования

Из главного окна можно создавать проекты и управлять проектами верхнего уровня и схемами; устанавливать набор необхо-

димых пунктов меню; конфигурировать панели инструментов и назначать горячие клавиши; выбирать типы компонентов, загружаемых во время запуска пакета; воспроизводить макросы, созданные с помощью встроенного языка (Application Extension Language — AEL); формировать AEL-команды; запускать текстовый редактор; открывать окно вывода результатов (Data Display Window) и др.

Перед тем как начать работать с приложениями, необходимо выбрать тип проекта: Analog/RF, Digital Signal Processing или Both. Тип Analog/RF определяет работу в подсистеме моделирования аналоговых устройств. Тип Digital Signal Processing или Both задает работу в подсистеме проектирования цифровых устройств Ptolemy. Кроме того, тип Both используется для проектирования смешанных аналого-цифровых устройств. Уже созданный проект может работать только при совпадении текущего типа проекта с типом, определенным при создании проекта. Можно изменить эти опции, используя пункт меню Tools → Advanced Design System Setup в главном окне, при этом необходимо перезагрузить систему.

При загрузке ADS также открывается выпадающее окно проектов (рис. 1.2).

Назначение кнопок панели инструментов показано на рис. 1.3.

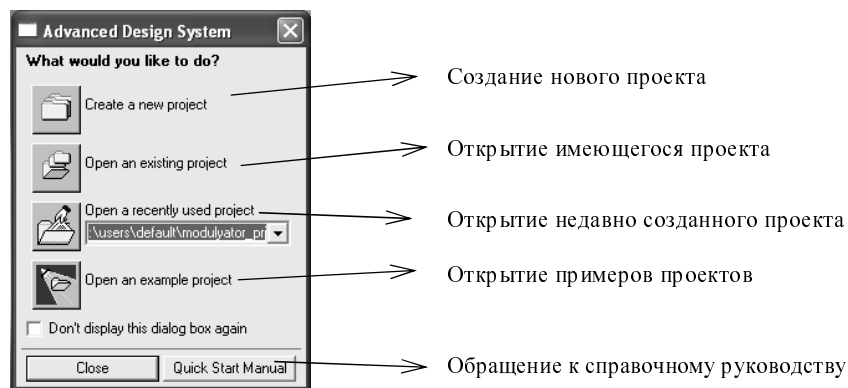


Рис. 1.2. Окно проектов

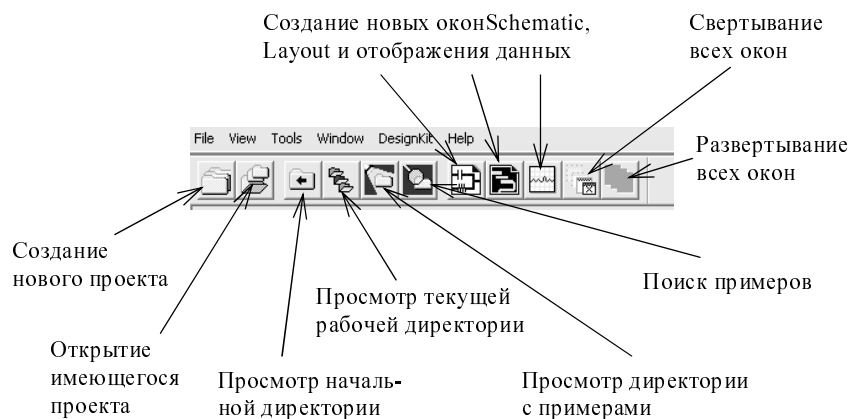


Рис. 1.3. Главное меню и панель инструментов

Открыть окно справочного руководства можно, щелкнув мышью по кнопке Quick Start Manual, которая находится в окне Advanced Design System (окно проектов). Также можно вызвать контекстную справку, нажав кнопку Help в любом месте области проектирования и отображения данных. Окно справочного руководства имеет вид, показанный на рис. 1.4.

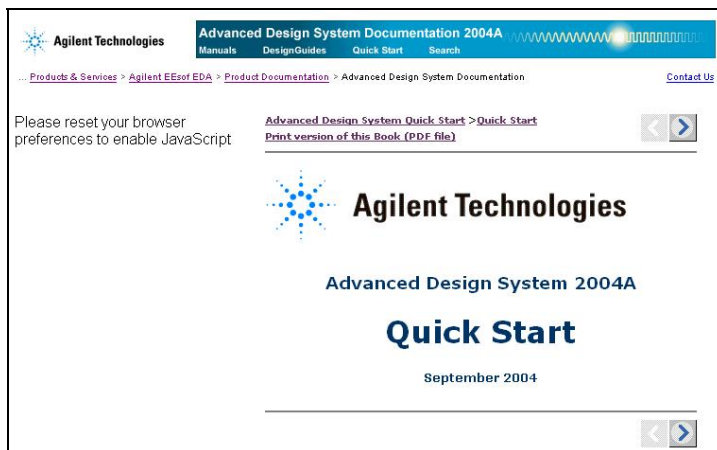



Рис. 1.4. Окно справочного руководства


Файлы с примерами проектов можно открыть несколькими способами.

Первый способ — выбрать кнопку , которая находится в главном окне Advanced Design System (окно проектов). Откроется окно файлов с примерами проектов (рис. 1.5).




Примеры проектов

Рис. 1.5. Окно примеров проектов

Второй способ — выбрать кнопку , которая находится в окне Advanced Design System (Главное меню). Откроется окно файлов с примерами проектов (рис. 1.6).

Чтобы открыть файл проекта из примеров к программе Advanced Design System, необходимо выбрать из списка нужный проект и дважды щелкнуть на его имени левой кнопкой мыши.

Для поиска файлов с примерами проектов необходимо выбрать кнопку  в главном окне программы. Откроется окно поиска примеров проектов Example Search. Для примера выполним поиск проектов, в которых используется транзистор. В строку Query (Запрос) введем ключевое слово «transistor» и нажмем кнопку Search Now. В окне Results отобразятся все проекты с транзистором. Окно Example Search имеет вид, показанный на рис. 1.7.

Примеры проектов

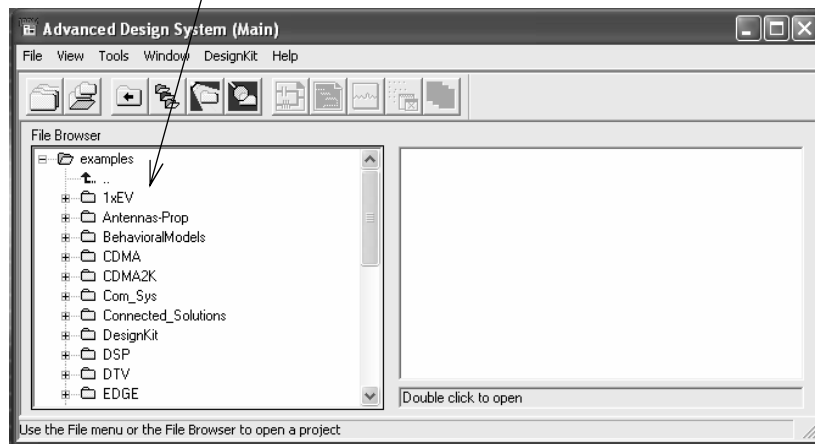


Рис. 1.6. Окно примеров проектов в главном окне

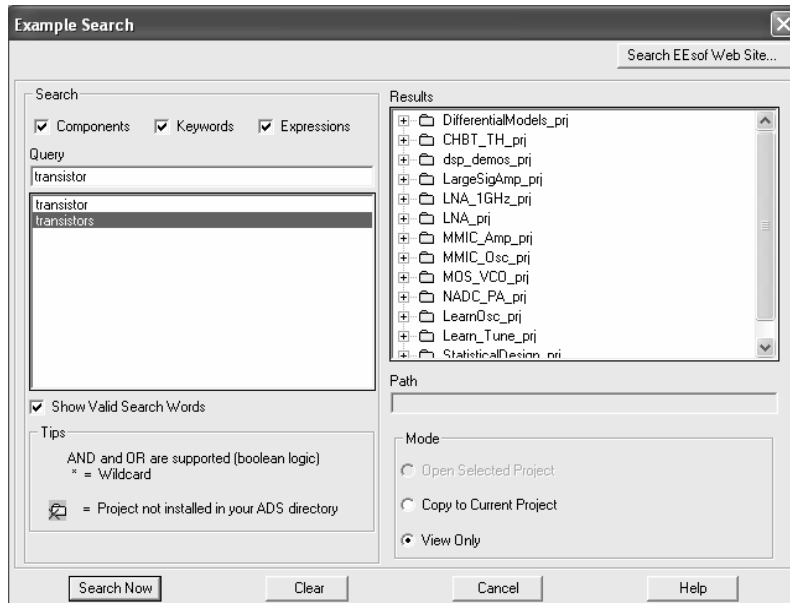


Рис. 1.7. Окно более точного поиска примеров проектов

1.2. Окно схемного редактора

Окно схемного редактора содержит заголовок, меню, панель инструментов, панель быстрого доступа к необходимым компонентам и область проектирования схемы. В окне схемного редактора можно создавать и редактировать схему проекта, задавать переменные и уравнения, моделировать, открывать окно вывода результатов (рис. 1.18).

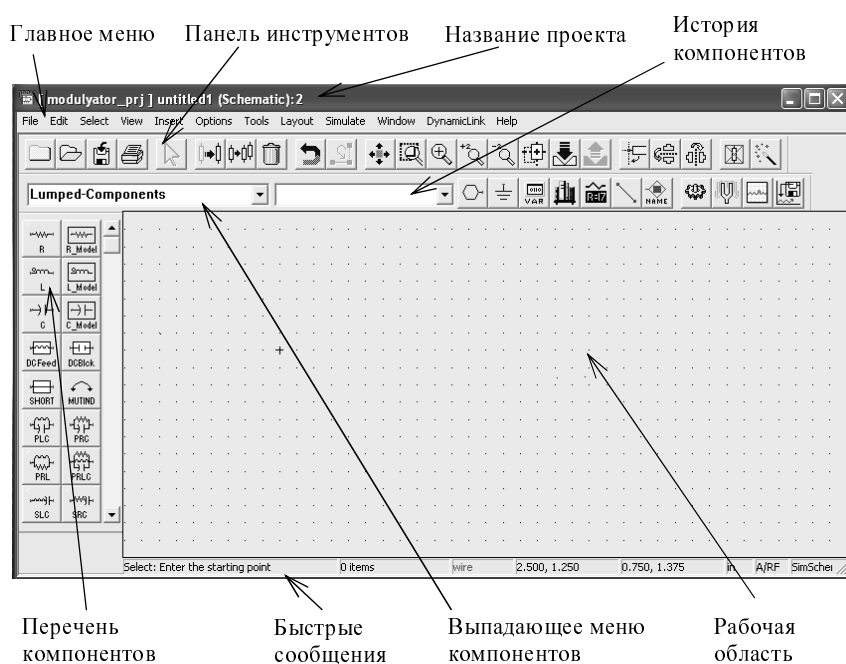


Рис. 1.8. Окно схемного редактора

В строке «Название проекта» указаны тип окна, тип проекта, имя файла и число-идентификатор, которое показывает, какое по счету окно проекта загружено. В главном меню отображаются пункты меню, доступные в данном редакторе. Выпадающее меню компонентов позволяет выбирать категорию компонентов, отображаемых в списке палитры. Выпадающее меню «История ком-

понентов» содержит список компонентов, которые уже были использованы в данном сеансе работы.

Рабочая область (область проектирования) — область, где располагается проект.

Перечень компонентов содержит кнопки компонентов для размещения их в рабочей области окна.

В строке «Быстрые сообщения» появляются сообщения о тех или иных командах, используемых в течение рабочего сеанса.













Для открытия уже созданной схемы в меню File или File Browser следует выбрать имя нужного файла.

В окне схемного редактора создается схема проекта. Панель инструментов окна схемного редактора показана на рис. 1.9.



Рис. 1.9. Панель инструментов окна схемного редактора

Кнопки панели инструментов окна схемного редактора имеют следующее назначение:

-  — создание новой схемы;
-  — открытие имеющейся схемы;
-  — сохранение текущей схемы;
-  — печать текущей схемы;
-  — окончание выполнения команды и возврат к выбранному режиму;
-  — передвижение объекта;
-  — копирование объекта;
-  — удаление объекта;
-  — возврат к предыдущему шагу;
-  — отмена изменения точки входа;
-  — просмотр всей схемы;
-  — масштабирование указанной области;
























-  — масштабирование относительно указанной точки;
-  — увеличение в 2 раза;
-  — уменьшение в 2 раза;
-  — крупный (панорамный) вид указанного объекта;
-  — развертывание иерархии объекта;
-  — свертывание иерархии;
-  — вращение объекта по часовой стрелке
-  — зеркальное отображение объекта относительно оси x;
-  — зеркальное отображение объекта относительно оси y;
-  — деактивация или активация объекта;
-  — интеллектуальное моделирование;
-  — вставка порта (вход системы);
-  — вставка элемента заземления;
-  — вставка переменной величины;
-  — обращение к библиотеке компонентов;
-  — изменение параметров компонента;
-  — вставка (соединение) проводника;
-  — вставка названия провода;
-  — моделирование (симуляция);
-  — настройка параметров;
-  — открытие нового окна отображения данных;
-  — запуск сервиса обработки данных из файла.

Схема создается размещением компонентов, портов, источников данных, модулей, переменных и т. д. При запуске программы загружается набор библиотек и компонентов по умолчанию. Можно также конфигурировать загружаемые опции, при этом наиболее удобно выбирать тип проекта при старте системы ADS.

Допуск к библиотеке элементов открывается нажатием кнопки Display Component Library List , которая находится на панели инструментов (рис. 1.10).

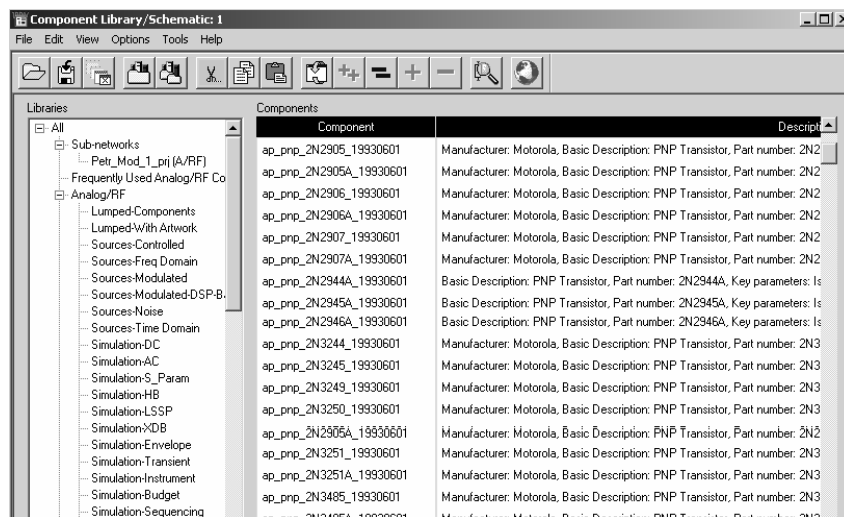



Рис. 1.10. Окно компонентов библиотеки ADS (фрагмент)

Для быстрого поиска моделей компонентов нужно нажать кнопку Find Component(s) , появится окно, показанное на рис. 1.11.

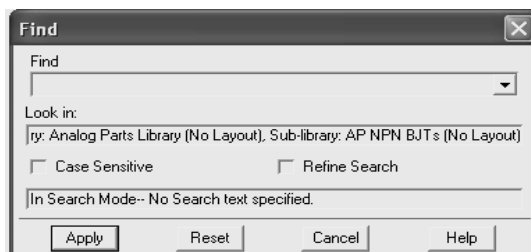


Рис. 1.11. Окно быстрого поиска компонента

Когда модель компонента найдена, нужно выделить ее в окне Components и щелкнуть мышью в нужном месте схемы в рабочей области. Появится значок выбранного компонента и его модель. Проект создается размещением отдельных элементов в рабочей области окна.

Для доступа к отдельным компонентам используются специальные команды: Browsing, Searching, Component Palette, Component History. Все эти средства позволяют размещать отдельные элементы в рабочей области.

Параметры компонентов можно редактировать, когда компонент включается в схему и его параметры отображаются под его графическим обозначением. Значениями параметров могут быть арифметические выражения. Это особенно важно в иерархических проектах для передачи параметров компонентов верхнего уровня в компоненты нижнего уровня. Примером правильной записи в качестве значения параметра является выражение $x = \pi / (2 * \text{order})$, где *order* — параметр, определенный для схемы или для символа верхнего уровня, π — встроенная константа. Основные арифметические операции — сложение (+), вычитание (-), умножение (*), деление (/) и возведение в степень (^). Эти операторы предназначены для работы с целыми и вещественными (с плавающей точкой) числами.

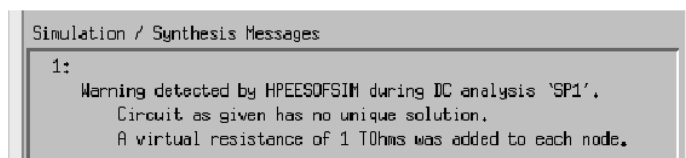
В настоящее время все промежуточные вычисления выполняются с двойной точностью, и только по окончании вычислений результат преобразуется к типу того параметра, который вычислялся. Следовательно, необходимо соблюдать осторожность, например, используя для вычисления целочисленного параметра выражения, оперирующие вещественными числами. Для целочисленного параметра все промежуточные значения вычисляются с двойной точностью, после чего результат приводится к целочисленному значению.

1.3. Окно моделирования

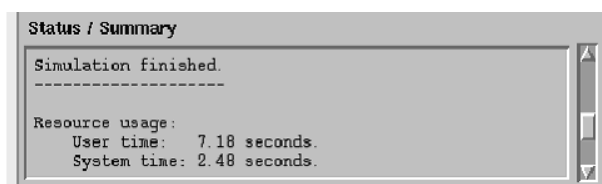
Моделирование выполняется из окна схемного редактора. В рабочей области размещается необходимый элемент контроля результатов моделирования в проекте, определяется имя проекта с данными, которые будут сгенерированы при моделировании. Для аналоговых схем используются категории элементов контроля: Envelop Simulation и Transient Simulation (для моделирования во временной области). Все данные, получаемые при моделировании, хранятся как Data Set (набор данных). Можно изменить имя проек-

та до моделирования или оставить его по умолчанию, т. е. использовать имя текущего проекта с расширением .ds.

Окно моделирования появляется во время моделирования проекта и загружается автоматически. Окно содержит две информационные панели: Simulation / Synthesis Messages и Status / Summary. В первом окне соответственно отображаются сообщения об ошибках и проблемах, возникающих во время моделирования или синтеза, а также причина, по которой возникла та или иная ошибка. В окне Status / Summary сообщается о ходе моделирования; если моделирование прошло успешно, в нем появляется сообщение Simulation finished.



a



б

Рис. 1.12. Окно моделирования:

- a* — информационная панель сообщения об ошибках;
- б* — информационная панель хода моделирования

Отдельные элементы в окне схемного редактора можно деактивировать, исключая их из моделирования, но не удаляя из проекта. Для этого нужно нажать кнопку Deactivate на панели инструментов или выбрать пункт меню Edit → Component → Deactivate, затем выбрать отдельный элемент или несколько элементов, которые необходимо деактивировать. Для обратной операции — активации деактивированных элементов — используется команда Active из меню Edit → Item → Activate.

1.4. Окно отображения результатов моделирования

Это средство служит для просмотра результатов моделирования. Данные могут быть представлены в различных форматах, координатных сетках, можно сохранить их в файлах и затем использовать в качестве шаблонов. Открыть окно Data Display можно из главного окна или из окна схемного редактора, выбрав пункт меню Window → New Data Display или нажав соответствующую кнопку панели инструментов (рис. 1.13).

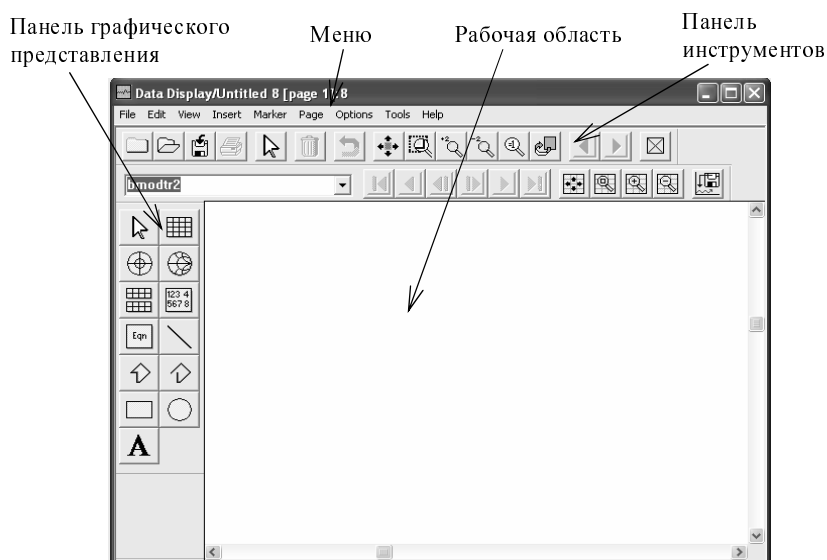


Рис. 1.13. Окно отображения результатов моделирования

В строке-заголовке отображаются тип окна, имя файла и числовой идентификатор. В меню File существуют три команды для сохранения отображаемых данных: Save (сохраняет изменения в текущем файле); Save As (сохраняет данные в файле с новым именем); Save As Template (сохраняет некоторую информацию из области рисования). Автоматически будет создан файл с расширением .ddt, информацию из которого при необходимости можно вставлять в любое окно данных.

Открыть существующий файл данных в окне Data Display можно, выбрав Window → Open Data Display, указав имя файла и нажав кнопку ОК. Для закрытия окна Data Display нужно выбрать пункт меню File → Close Window. Если данные в окне изменились, то система предложит сохранить их.

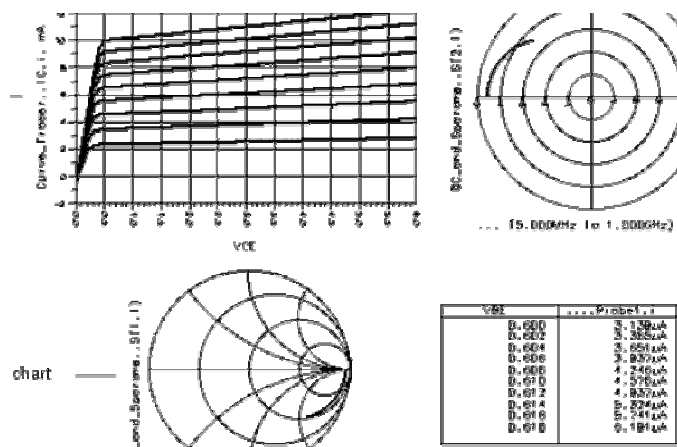


Рис. 1.14. Разные виды отображения результатов моделирования

Результаты моделирования сохраняются в специальном файле данных. Информацию из этого файла можно просмотреть в окне Data Display (рис. 1.14). В этом окне можно: отображать данные в виде различных графиков и в различных форматах; вставлять маркеры на графике для чтения данных в точке; записывать математические выражения, которые позволяют выполнять сложные операции над данными; добавлять комментарии и рисованные объекты для улучшения документации.

2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ АНАЛИЗА ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

В среде ADS поддерживаются следующие методы и виды анализов.

Анализ по постоянному току (DC Simulation) является начальным для всех остальных видов анализа; в процессе него быстро проверяется топология устройства и проводится расчет рабочих точек схемы.

Анализ по переменному току (AC Simulation) позволяет получить малосигнальные передаточные характеристики, такие как коэффициенты передачи по напряжению, по току, шумовые напряжения и токи. Этот вид анализа полезен при проектировании пассивных устройств класса А (например, малошумящих усилителей — LNA).

Анализ S-параметров (S_Param Simulation) позволяет определить линеаризованные S- и шумовые параметры, передаточные проводимости и импедансы. Кроме того, он может быть использован и для достижения многих других целей малосигнального частотного анализа.

Анализ методом гармонического баланса (HB Simulation) используется для расчета установившихся режимов в нелинейных устройствах в частотной области. Этот вид анализа весьма полезен при проектировании радиочастотных усилителей, смесителей и генераторов. Реализованный в данной системе метод подпространств Крылова позволяет существенно уменьшить объем используемой памяти ЭВМ и увеличить скорость расчета по сравнению со стандартными подходами. Эта операция полезна при проектировании интегральных высокочастотных схем большой размерности, когда проектируемое устройство включает в себя большое количество активных приборов и необходимо учесть много гармонических и интермодуляционных составляющих.

Анализ большесигнальных S-параметров (LSSP Simulation) осуществляется на основе метода гармонического баланса. Он необходим для того, чтобы оценить значения большесигнальных параметров в нелинейных режимах мощных усилителей. Рассчитанные параметры могут быть использованы, например, в анализе на системном уровне.

Анализ динамической характеристики (XDB Simulation) позволяет пользователю эффективно определить точку сжатия передаточной характеристики (когда реальная нелинейная зависимость коэффициента передачи начинает отклоняться от идеализированной линейной), что очень важно при проектировании усилителей мощности.

Анализ методом огибающей (Envelope Simulation) использует комбинацию анализов в частотной и временной областях, что позволяет эффективно проводить полный спектральный анализ сложных сигналов, таких как дискретно-модулированные высокочастотные сигналы. Смысл анализа заключается в последовательном применении метода гармонического баланса для ряда временных точек по несущей частоте на некотором отрезке. Это полезно при проектировании схем и систем, включающих модуляторы/демодуляторы или работающих под воздействием сигналов со сложной модуляцией.

Анализ во временной области (Transient Simulation) позволяет рассчитывать параметры нелинейных устройств методами численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений во временной области, когда элементы устройства моделируются приближенными эквивалентными схемами.

Рассмотрим подробнее два типа анализа радиотехнических устройств, наиболее часто используемые в практических задачах.

2.1. Анализ радиотехнических устройств по постоянному току

Для проведения анализа радиотехнической схемы по постоянному току необходимо выбрать из выпадающего меню компонентов в окне схемного редактора категорию DC Simulation. В результате такого анализа можно исследовать характеристики радиотехнических устройств по постоянному току, что позволит

определить потребляемую мощность схемы, получить передаточные вольт-амперные характеристики (ВАХ), определить токи и напряжения в исследуемых точках.

Анализ можно проводить при изменении значений источников токов и напряжений, а также других параметров схемы. В режиме анализа по постоянному току автоматически проводится анализ статического режима схемы.

В меню DC Simulation задаются следующие параметры (рис. 2.1–2.5).

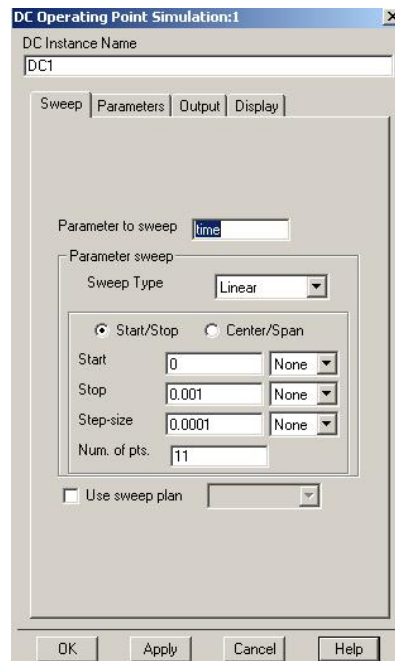


Рис. 2.1. Окно Sweep в меню DC Simulation

Sweep — задание изменяющихся параметров (см. рис. 2.1):

- Parameter to sweep — запись имени изменяющегося параметра;
- Parameter sweep — выбор разновидностей изменяемых типов и других параметров;

- Sweep Type (см. рис. 2.2):
 - Single Point — выбор фиксированного значения параметра;
 - Linear — выбор линейного закона изменения параметра;
 - Log — выбор логарифмического закона изменения параметра;

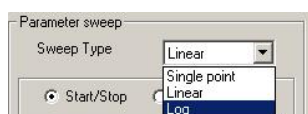


Рис. 2.2. Окно Sweep Type

- Start / Stop — выбор начального и конечного значений изменяемого параметра;
- Center / Span — выбор центрального значения параметра и отклонения при его изменении;
- Start — начальное значение параметра;
- Stop — конечное значение параметра;
- Step-size — размер шага изменения параметра;
- Num of pts — допускаемое число точек, для которых проводится анализ;

Parameters — задание параметров, соответствующих сходимости, статусу и уровням отображаемой информации (см. рис. 2.3):

- Convergence:
 - Max.delta V — максимальное изменение узлового напряжения, допускаемое на каждой итерации. По умолчанию принимается равным 0,1 В;
 - Max.iterations — максимальное число итераций, допустимое при проведении анализа;
 - Mode — выбор алгоритма, по которому достигается сходимость:
 - Quick convergence test — использует результаты предварительных тестов, чтобы помочь предсказать, какую комбинацию параметров сходимости нужно тестировать. При этом применяется алгоритм Ньютона — Рафсона для различных величин допускаемого шага (Max.delta V);

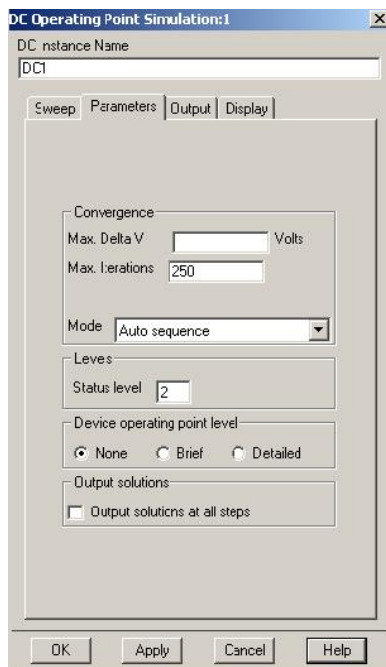


Рис. 2.3. Окно Parameters в меню DC Simulation

- Robust convergence test — использует различные комбинации параметров сходимости (см. ниже);
- Newton-Raphson — итеративный процесс, прекращается, когда сумма электрических токов в каждом узле равна нулю для каждого узла и значения узловых напряжений сходятся. Менее устойчив для средних и больших схем;
- Forward source — level sweep — при решении методом DC Simulation устанавливает начальные значения напряжений всех DC-источников равными нулю, затем изменяя их значения до требуемых;
- Rshunt sweep — включает 1-омный резистор между каждым узлом и элементом заземления. Затем сопротивление резистора меняется до бесконечной величины, соответствующей режиму холостого хода;

- Revers source — level sweep — позволяет учесть эффект отрицательного сопротивления в идеальных моделях генераторов, описываемых уравнениями Ван-дер-Поля. Напряжения источников меняются в обратном направлении. Применяется достаточно редко;
 - Hybrid solver — использует возможности большинства из вышеперечисленных алгоритмов для обеспечения высокой скорости сходимости;
 - Pseudo Transient — показывает хорошую сходимость при анализе больших интегральных схем;
- Levels — выбор уровня выводимой информации:
 - Status level — варьирование уровня выходной информации;
- Device operating point level — выбор уровня выводимой информации о рассчитанных рабочих точках. Определяется в окне Simulate в главном меню при редактировании дополнительных опций анализа статического режима:
 - None — отсутствие выводимой информации;
 - Brief — вывод рабочих точек только для определенных пользователем активных приборов;
 - Detailed — вывод рабочих точек для всех активных приборов схемы;
- Output solutions:
 - Output solutions at all steps — сохранение всех получаемых решений в блоке данных (повышает сходимость решения при повторном анализе).
- Output** — отображение выходных параметров (см. рис. 2.4):
 - Save by hierarchy — сохранение иерархии:
 - Maximum Depth — задание определенного уровня иерархии;
 - Node Voltages — вывод всех данных в иерархическом проекте до определенного уровня;
 - Measurement Equations — вывод всех данных в иерархическом проекте до определенного уровня;
 - Save by name — лист узлов и уравнений, явно указанных во вторичном диалоговом окне Add / Remove (Добавить / Удалить).

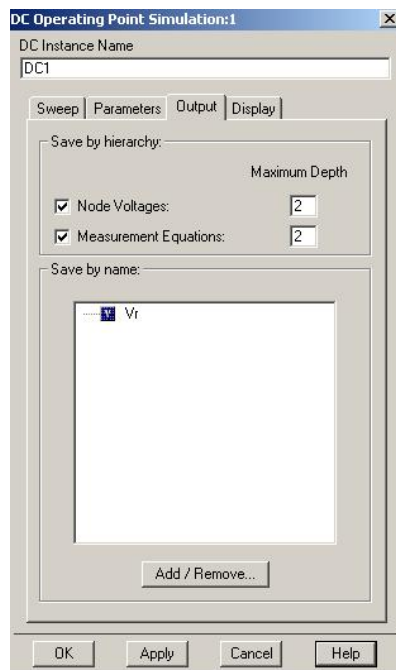


Рис. 2.4. Окно Output в меню DC Simulation

Display — отображает параметры в окне схемного редактора. Используется для того, чтобы показать или скрыть все возможные параметры при моделировании (см. рис. 2.5):

- **Display parameters on schematic** — позволяет выбрать те параметры, которые необходимо показать на изображении схемы;
- **Set All** — показывает все параметры;
- **Clear All** — скрывает все параметры.

Особенностью анализа по постоянному току является то, что он выполняется автоматически перед малосигнальным частотным анализом, анализом во временной области и анализом методом гармонического баланса. Поэтому при некорректном завершении анализа по постоянному току (например, неверное соединение элементов, отсутствие сходимости), все перечисленные выше виды анализов проводиться не будут.

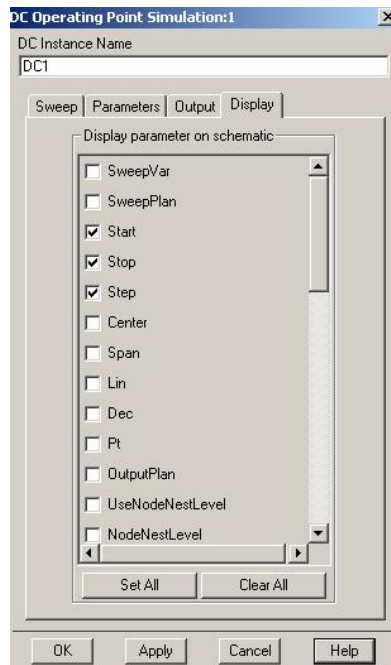


Рис. 2.5. Окно Display в меню DC Simulation

Линейные элементы замещаются их проводимостями на нулевой частоте. Конденсаторы, микрополосковые разрывы, связанные линии рассматриваются как разомкнутые цепи. Индуктивности, проводящие нерегулярности рассматриваются как короткозамкнутые цепи. Линии передачи замещаются элементами с постоянной проводимостью, значения которой определяется их длиной. «Черные ящики», представляемые файлами в виде S-параметров, должны иметь компоненты на нулевой частоте.

Анализ статического режима проводится на основании итерационной процедуры. Модифицируя рассмотренные ранее критерии сходимости, регулируют точность и скорость расчета. Так, можно увеличить максимальное число итераций. Если проводится анализ в диапазоне значений источников, то лучше всего уменьшать шаг их изменения, так как полученные на предыдущем шаге результаты используются в качестве начального приближения для

следующей точки. Допускается также регулировать уровень ошибки расчета.

Перед запуском анализа по постоянному току автоматически проверяется топология схемы по следующим критериям: в узле должно быть соединено не менее двух компонентов; DC-источники не должны быть заземлены. Проверка не выявляет вышеуказанные дефекты для трансформаторов или линий передач.

При обнаружении ошибок в топологии дефектные узлы подсвечиваются в окне Simulation / Synthesis Messages (см. рис. 1.12, а). Для их идентификации нужно выбрать опцию Simulate → Highlight Node. Для обнаружения несоединенных линий или выводов элементов нужно воспользоваться опцией Options → Check Representation → Unconnected pins.

Если сходимость решения не достигается за данное число итераций, то число итераций можно увеличить следующим образом: в окне DC Simulation выбрать команду Parameters и установить большее значение параметра Max.Iterations.

Если при анализе существенно нелинейных режимов алгоритмом по умолчанию обнаружена несходимость, следует воспользоваться другими алгоритмами с помощью опции Parameters.

Другой подход к решению проблемы сходимости — установка больших значений параметров контроля сходимости с помощью опции Component Palette List → Options → Convergence → DC Convergence → Tolerances с использованием следующих команд:

- Voltage relative tolerance — относительная ошибка расчета узловых напряжений методом Ньютона на итерации (по умолчанию 10^{-6});

- Voltage absolute tolerance — абсолютная ошибка расчета узловых напряжений (по умолчанию 10^{-6} В);

- Current relative tolerance — относительная ошибка определения токов ветвей (по умолчанию 10^{-6});

- Current absolute tolerance — абсолютная ошибка расчета токов (по умолчанию 10^{-6} А).

2.2. Анализ радиотехнических устройств во временной области

Анализ во временной области позволяет моделировать переходные процессы с помощью контроллера переходных процессов. Контроллер (Tran) моделирования переходных процессов позволяет определить следующие аспекты симуляции (рис. 2.5, 2.6).

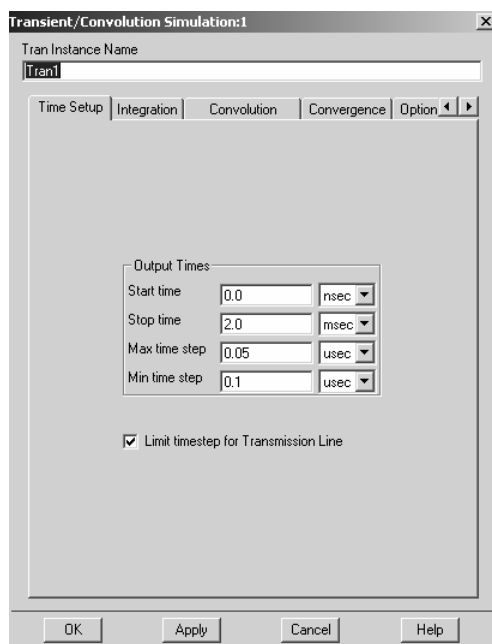


Рис. 2.6. Окно Transient / Convolution Simulation
(меню Time Setup, Integration, Convolution, Convergence, Options)

Time Setup (Установка временных параметров) — задание параметров, связанных со временем и частотой.

Integration (Интегрирование) — выбор метода интегрирования и диапазона изменения параметров, подключение шумов источника и резистора, задание параметров прибора. В этом режиме также доступны дополнительные варианты для анализа осцилляторов.

Convolution (Свертка) — определение параметров, относящихся к установкам с использованием механизма сверток.

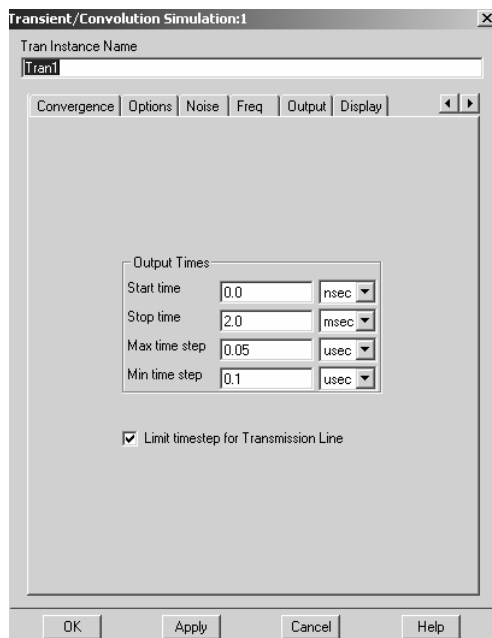


Рис. 2.7. Окно Transient / Convolution Simulation (меню Noise, Freq, Output, Display)

Convergence (Сходимость) — задание параметров, связанных с достижением сходимости.

Options (Опции) — задание параметров, связанных с имитацией, и сообщение об уровнях полноты отчетов и сохраняемых данных уровня рабочей точки.

Noise (Шум) — установка ширины полосы и задание масштаба шума.

Freq (Частота) — задание параметров для основных частот, которые используются для вычисления начальных частот в методе баланса гармоник.

Output (Выходные данные) — выборочное сохранение результатов симуляции в виде набора данных.

Display (Отображение) — отображение результатов симуляции работы схемы.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СРЕДЕ ADVANCED DESIGN SYSTEM

Цель работы — изучение физических процессов, происходящих в схемах амплитудной модуляции и детектирования амплитудно-модулированных сигналов с использованием моделирования в среде ADS.

3.1. Основные теоретические положения

Модуляция и детектирование — это нелинейные электромагнитные процессы, которые сопровождаются преобразованием спектра частот входного колебания.

Модуляция — это изменение одного из параметров высокочастотного колебания (амплитуды, частоты, фазы) по закону низкочастотного передаваемого сообщения.

Цель модуляции состоит в переносе спектра низкочастотного сигнала в область высоких частот для передачи сигналов. Высокая частота, на которой осуществляется передача сигнала, называется несущей частотой. Частота изменения параметра высокочастотного колебания называется модулирующей частотой.

При амплитудной модуляции (АМ) по заданному закону изменяется амплитуда несущего колебания.

Аналитическое выражение АМ-сигнала можно записать как

$$u_{\text{АМ}}(t) = U_0[1 + mf(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3.1)$$

где U_0 — амплитуда несущего колебания; m — коэффициент модуляции; $f(t)$ — модулирующая функция; ω_0 — частота АМ-сигнала; φ_0 — фаза АМ-сигнала.

При гармонической модуляции АМ-сигнал можно записать в виде

$$u_{\text{AM}}(t) = U_0[1 + mc \cos \Omega t] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3.2)$$

Коэффициент модуляции можно определить как

$$m = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}}, \quad (3.3)$$

где U_{max} и U_{min} — соответственно максимальное и минимальное значение амплитуды высокочастотного колебания.

АМ-колебание можно представить в графической форме (рис. 3.1).

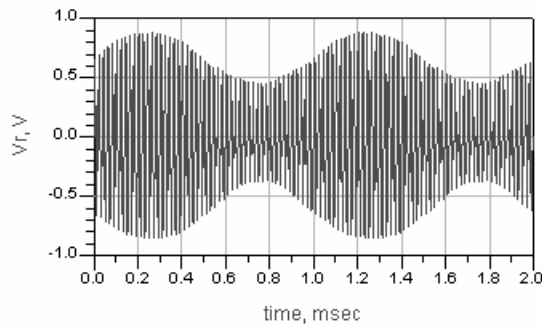


Рис. 3.1. Временное представление АМ-колебания

АМ-колебание можно представить в виде суммы гармонических колебаний:

$$u_{\text{AM}} = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{m}{2} U_0 \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0] + \frac{m}{2} U_0 \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0]. \quad (3.4)$$

Из выражения (3.4) видно, что АМ-колебание является суммой трех высокочастотных гармонических колебаний на близких частотах (так как $\Omega \ll \omega_0$):

U_0 — амплитуда несущего колебания с частотой ω_0 ;

$U_{\text{в}} = \frac{m}{2} U_0$ — амплитуда колебания верхней боковой составляющей с частотой $\omega_0 + \Omega$;

лющей с частотой $\omega_0 + \Omega$;

$U_{\text{н}} = \frac{m}{2} U_0$ — амплитуда колебания нижней боковой составляющей с частотой $\omega_0 - \Omega$.

лющей с частотой $\omega_0 - \Omega$.

Спектр АМ-колебаний показан на рис. 3.2. Ширина спектра равна удвоенной частоте модуляции: $\Delta\Omega_{\text{АМ}} = 2\Omega$. Амплитуда несущего колебания при модуляции не изменяется; амплитуды колебаний боковых составляющих спектра (верхней и нижней) пропорциональны глубине модуляции. При $m = 1$ амплитуды колебаний боковых составляющих спектра достигают половины амплитуды несущей.

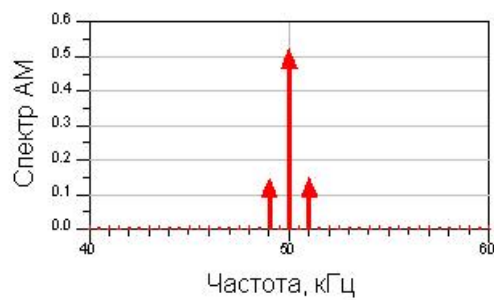


Рис. 3.2. Спектр АМ-колебания

Для осуществления АМ необходимо выполнить перемножение несущего и модулирующего колебаний (формула (3.2)). АМ можно получить, используя нелинейные цепи.

АМ можно осуществить с помощью цепей, содержащих нелинейные элементы, ВАХ которых можно аппроксимировать квадратичной зависимостью (диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы, лампы).

На практике в качестве нелинейных элементов модуляторов чаще всего используют не диоды, а транзисторы или лампы (триоды, пентоды). Модулируемое высокочастотное напряжение пода-

ют во входную цепь нелинейного элемента (в цепь базы, затвора, сетки). Модулирующий сигнал вводят в цепь различных электродов: в транзисторах — в цепь базы (затвора) или коллектора (стока); в электронных лампах — чаще всего в цепь управляющей сетки (сеточная модуляция) или анода (анодная модуляция). Коллекторная (анодная) модуляция обеспечивает более высокий КПД, чем базовая. Однако для ее осуществления требуется более мощный источник модулирующего сигнала. Отметим, что при малых уровнях входных сигналов для модуляции используется квадратичность входной характеристики прибора (как в диодных модуляторах).

Схема амплитудного модулятора с управлением по входу (базового модулятора на биполярном транзисторе) приведена на рис. 3.3. В этой схеме модулирующий низкочастотный и модулируемых высокочастотный сигналы подаются на базу транзистора.

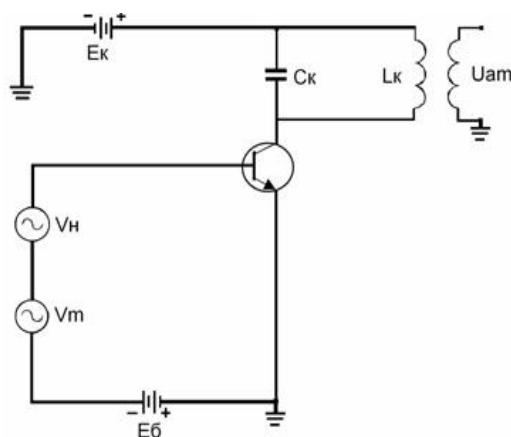


Рис. 3.3. Схема амплитудного модулятора с управлением по входу

Под воздействием модулирующего сигнала напряжение смещения на базе $U_б$ меняется с частотой модуляции Ω . Это приводит к тому, что импульсы коллекторного тока отличаются друг от друга амплитудой I_{\max} и углом отсечки θ . При подаче модулирующего сигнала u_Ω амплитуда I_{\max} и ширина θ импульсов тока меняются во времени, что приводит к изменению амплитуды первой гармоники

$I_{к1}$ с низкой частотой Ω . Поэтому выходное напряжение получается модулированным по амплитуде. Выделение высокочастотного АМ-колебания осуществляется колебательным контуром, включенным в коллекторную цепь и настроенным на частоту несущей.

При осуществлении модуляции могут возникнуть искажения, заключающиеся в отклонении формы огибающей АМ-колебаний от формы модулирующего сигнала U_{Ω} . Для получения неискаженной АМ требуется, чтобы $I_{к1}$ изменялась пропорционально изменению напряжения смещения.

Модуляционную характеристику представляет собой зависимость амплитуды первой гармоники $I_{к1}$ от напряжения смещения E_6 при постоянной амплитуде высокочастотного колебания U_{ω} (можно также строить зависимость амплитуды первой гармоники напряжения на контуре). При работе на линейном участке модуляционной характеристики АМ осуществляется без нелинейных искажений.

Детектирование — процесс восстановления низкочастотного сигнала по модулированному высокочастотному колебанию. Детектирование считается неискаженным, если напряжение на выходе детектора повторяет закон изменения амплитуды модулированного колебания в случае АМ.

Поскольку в спектре модулированного колебания содержатся только высокочастотные компоненты (несущая и боковые частоты), а результатом детектирования является получение низкочастотных колебаний, для детектирования необходимы нелинейные цепи. Схема амплитудного детектора состоит из нелинейного преобразователя, в выходном токе которого при воздействии на вход гармонического напряжения $U_{вх} = U \cos(\omega t + \varphi)$ появляется постоянная составляющая, и фильтра нижних частот, предотвращающего прохождение на выход детектора высокочастотных составляющих.

В качестве нелинейного элемента в детекторах наиболее часто используется полупроводниковый диод. Для выделения полезного низкочастотного сигнала последовательно с диодом включена RC -цепь. Для правильной работы схемы сопротивление R и конденсатор C должны удовлетворять следующим условиям:

$$1/(\omega_0 C) \ll R \ll 1/(\Omega_b C), \quad (3.5)$$

где Ω_b — наивысшая частота в спектре модулирующего колебания.

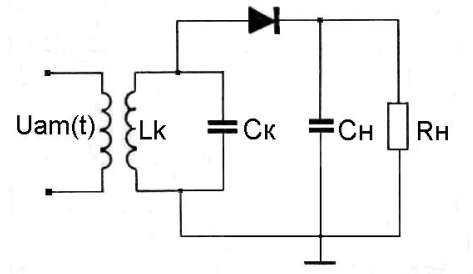


Рис. 3.4. Амплитудный детектор

При детектировании, как и при модуляции, происходит преобразование спектра входного колебания. На выходе получается колебание с частотой, отсутствующей во входном колебании (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Спектр сигнала на выходе амплитудного детектора

Основной характеристикой детектора является характеристика детектирования, которая представляет собой зависимость постоянной составляющей выходного тока от амплитуды напряжения U . В зависимости от амплитуды входного сигнала детектор может иметь линейную или квадратичную характеристику детектирования. При больших сигналах ($U > 0,5$ В) диодный детектор имеет линейную характеристику детектирования, при малых сигналах ($0 < U < 0,1$ В) — квадратичную.

3.2. Задание и порядок выполнения работы

1. Создать проект, присвоив ему имя, например `modulyator_prj`.
2. В среде ADS в окне схемного редактора подготовить схему (design) макета амплитудного модулятора с управлением по входу и амплитудного детектора с фильтром низких частот.
3. Проанализировать работу амплитудного модулятора с использованием ADS. Получить сигнал на выходе модулятора. Провести расчет модуляционной характеристики модулятора. Исследовать зависимость коэффициента модуляции от амплитуды модулирующего напряжения.
4. Проанализировать работу амплитудного детектора с использованием ADS. Получить сигнал на выходе детектора. Рассчитать характеристику детектирования амплитудного детектора.

3.3. Анализ работы амплитудного модулятора с амплитудным детектором

Для создания схемы в схемном редакторе ADS необходимо выполнить следующее.

1. Внести в схему транзистор `ap_npn 2N3946`, диод `ap_dio 1N649`, пользуясь библиотекой. Для этого нажать кнопку `Display Component Library List`. Для быстрого нахождения транзистора или диода нажать кнопку `Find Component(s)`. В появившееся окно записать название прибора. Когда модель компонента найдена, нужно выделить ее в окне `Components`. В рабочей области появится значок выбранного компонента и его модель.
2. Разместить в окне схемного редактора пассивные элементы с сосредоточенными параметрами из группы `Component Palette List` → `Lumped-Components`. Выбрав значок нужного пассивного элемента (R , L , C), перенести его в рабочую область. В окне параметров элементов задать значения их параметров.
3. Выбрать компонент `Component Palette List` → `Sources-TimeDomain` → `V_DC`. Разместить DC-источник на схеме в коллекторной цепи и задать требуемое значение (25 В). Разместить DC-источник на схеме в базовой цепи и задать требуемое значение его параметра (0,7 В).

4. Выбрать компонент Component Palette List → Sources-TimeDomain → VtSine. Разместить VtSine-источники (V2 — амплитуда 0,4 В, частота 1 кГц), (V3 — амплитуда 0,4 В, частота 50 кГц) на схеме в базовой цепи и присвоить требуемые значения его параметрам.

5. Выбрать компонент Component Palette List → Sources-Time Domain → I_DC. Разместить источник тока в базовой цепи и присвоить требуемое значение его параметру.

6. Выбрать компоненту Component Palette List → Probe Components → I_Probe. Расположить амперметр между коллектором и первичной обмоткой трансформатора.

7. Соединить проводниками компоненты, размещенные в окне схемного редактора, с помощью команды Wire.

8. Присвоить имена тем узлам схемы, в которых необходимо определить напряжение, используя опцию меню схемного редактора Insert → Wire/Pin Label или нажать пиктограмму Insert Wire/Pin Label.

9. Все изолированные замкнутые контурные цепи обязательно обеспечить заземлением. Общий вид скомпонованной схемы показан на рис. 3.6.

10. Для анализа переходных характеристик выбрать контроллер анализа переходных процессов Component Palette List → Simulation → Transient → Tran и задать временные параметры анализа в диалоговом окне Time Setup: Start Time, Stop Time, Max Time Step, Min Time Step.

11. Начать моделирование командой главного меню Simulate → Simulate или нажать кнопку Simulate меню инструментов.

12. Наблюдать в окне моделирования отображение процесса выполнения работы активных контроллеров, оценку общего времени, затраченного на симуляцию, общую оценку результата и сообщения об ошибках.

13. По завершении симуляции автоматически открывается новое или подготовленное ранее окно отображения результатов моделирования (данных). Форма представления — таблица или график. Вид графика в прямоугольных координатах можно выбрать в панели графического представления. Окно отображения результатов моделирования амплитудного модулятора и детектора показано на рис. 3.7.

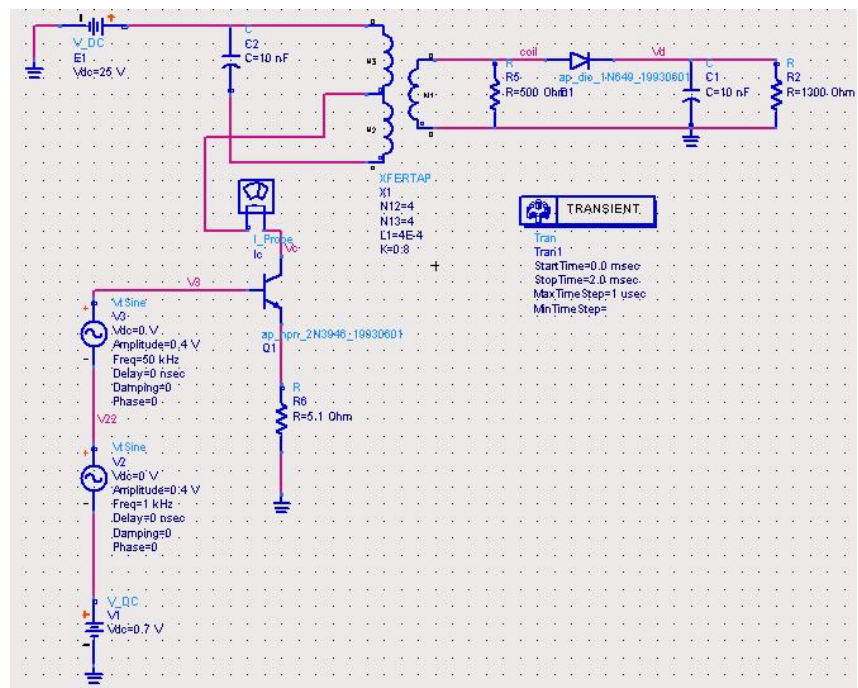


Рис. 3.6. Схема амплитудного модулятора и детектора в ADS

14. Для получения спектра сигналов в окне просмотра выходных данных нужно разместить компонент Eqn, описывающую вводимое уравнение: $\text{spectr2}=\text{fs}(\text{V3},\dots,0\text{ms},3\text{ms})$. Здесь spectr2 — имя рассчитываемой спектральной характеристики (назначается пользователем); fs — имя библиотечной функции, реализующей фурье-анализ, V3 — имя напряжения в узле, для которого производится вычисление спектра; 0ms, 3ms — начальное и конечное значения временного интервала для фурье-анализа. Можно изменить интервалы, не прибегая к повторному моделированию схемы. Из девяти аргументов функции fs() только один — имя преобразуемой переменной — является обязательным. Значения необязательных переменных функции fs() могут не подставляться, а их место отмечается запятыми. Для получения детальной информации в окне Eqn нужно нажать кнопку Functions Help.

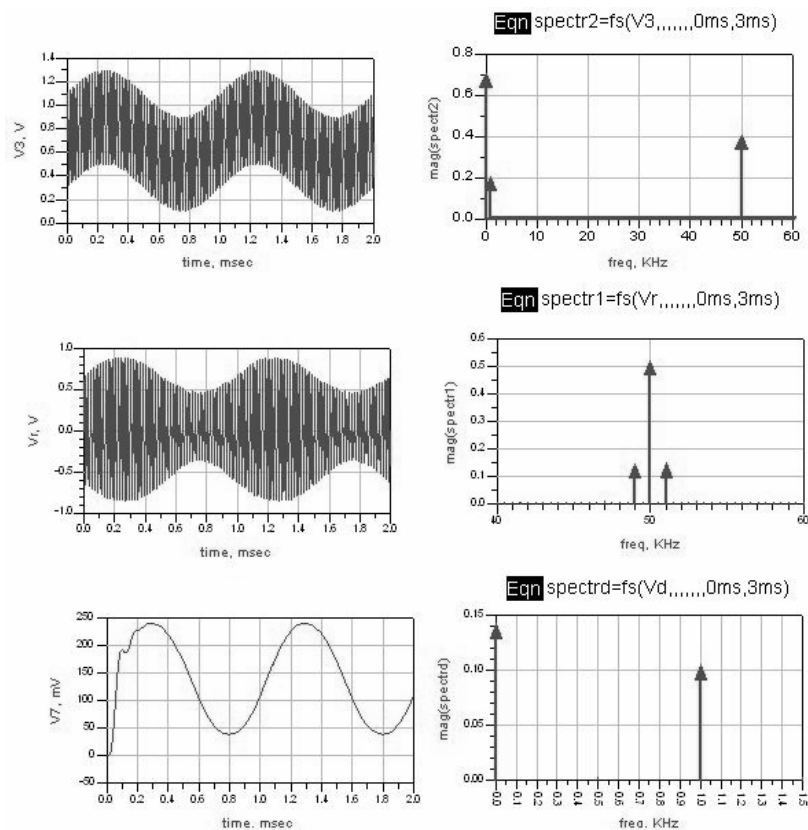


Рис. 3.7. Окно отображения результатов моделирования амплитудного модулятора и детектора

15. Получить модуляционную характеристику модулятора $I_{c1}=f(E_b)$, где $E_b=V_1$, а I_{c1} — амплитуда первой гармоники выходного тока модулятора. Получив входной сигнал V_3 и АМ-сигнал на выходе контура V_r , использовать спектральное представление АМ-сигнала на выходе колебательного контура, полученное при подключении функции $\text{fs}()$ (функция Фурье-преобразования) на этапе отображения данных. Амплитуду модулирующего колебания V_2 задать равной нулю. Изменить напряжение V_1 от 0,4 до 1,2 В с помощью операций моделирования Var , DC , Parameter Sweep .

16. Для изменения параметра V_{DC} источника необходимо внести в окно схемного редактора контроллер описания переменной величины VAR. В окно свойств контроллера VAR ввести имя переменной и ее начальное значение. Внести в окно схемного редактора контроллер DC-анализа, в окно свойств DC-контроллера — имя изменяемой переменной (Parameter to Sweep), тип и диапазон значений изменения параметра в соответствии с заданием. Внести в окно схемного редактора контроллер изменения параметров Parameter Sweep, в окно свойств контроллера Parameter Sweep ввести имя изменяемой переменной (Parameter sweep), тип и диапазон значений изменения параметра в соответствии с заданием. На закладке Simulations ввести имена контроллеров DC-анализа (DC1) и Transient-анализа (Tran1).

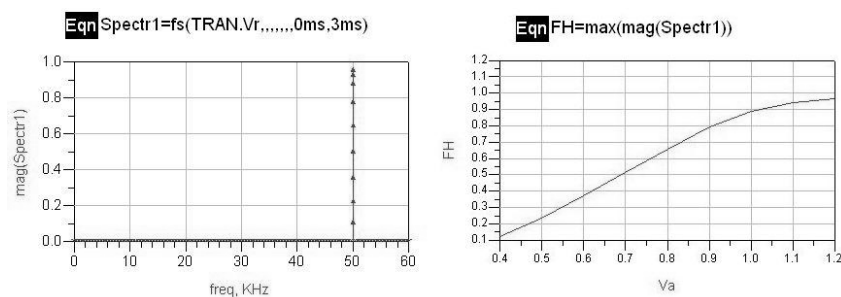


Рис. 3.8. Спектр выходного сигнала и модуляционная характеристика амплитудного модулятора

17. Провести моделирование. Построить модуляционную характеристику как зависимость амплитуды первой гармоники выходного тока I_{c1} от изменения напряжения смещения E_0 на входе модулятора (V1) в окне отображения данных, используя результаты моделирования, полученные в спектральной форме.

18. Результат моделирования получить в окне отображения данных (рис. 3.8). По модуляционной характеристике найти значение постоянного смещения E_0 (V1), обеспечивающего модуляцию без искажений (середица линейного участка) и значение допустимого коэффициента модуляции m , при котором не происходит нелинейных искажений.

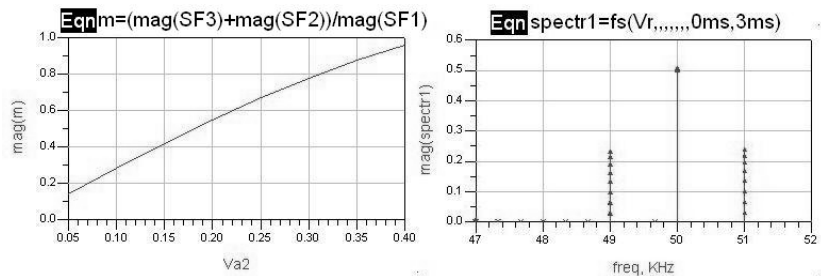


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента модуляции от амплитуды модулирующего напряжения

19. Исследовать зависимости коэффициента модуляции m от амплитуды модулирующего напряжения (V_2). Исследование проводить для напряжения смещения (V_1), соответствующего середине линейного участка модуляционной характеристики. Модулирующий сигнал (амплитуда генератора V_2) изменять в диапазоне 0,05...0,4 В. Измерение коэффициента модуляции m проводить по спектральным компонентам выходного сигнала, снимаемого с колебательного контура. Амплитуду несущего колебания задать в виде $A_1=0.4$ В (V_2) — рис. 3.9.

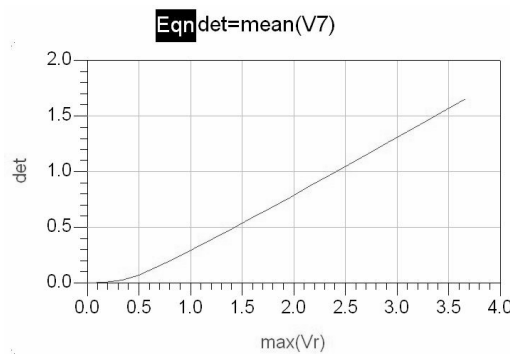


Рис. 3.10. Характеристика детектирования амплитудного детектора

20. Получить характеристику детектирования как зависимость напряжения на выходе детектора det от амплитуды высокочастотного сигнала V_r (рис. 3.10). Задать напряжение постоян-

ного смещения на базе E_6 (V1) равным значению, соответствующему середине линейного участка модуляционной характеристики. Амплитуду высокочастотного сигнала изменять в пределах от 0,05 до 0,4 В. Определить границы линейного участка характеристики.

3.4. Содержание отчета

1. Цель работы и задание.
2. Краткие сведения о методах анализа переходных процессов.
3. Графики зависимостей, расчетные параметры, полученные на каждом этапе выполнения задания.
4. Выводы по каждому пункту исследований.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев В.С.* Теория нелинейных электрических цепей: Учеб. пособие. М.: Радио и связь, 1982.

2. *Гусев В.Г., Гусев Ю.М.* Электроника: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1991.

3. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1990.

4. *Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И.* Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): Учеб. для вузов / Под ред. О.П. Глудкина М.: Горячая Линия — Телеком, 1999.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СРЕДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ	5
1.1. Основы интерфейса ADS	5
1.2. Окно схемного редактора.....	10
1.3. Окно моделирования	14
1.4. Окно отображения результатов моделирования	16
2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ АНАЛИЗА ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ	18
2.1. Анализ радиотехнических устройств по постоянному току.....	19
2.2. Анализ радиотехнических устройств во временной области	27
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СРЕДЕ ADVANCED DESIGN SYSTEM	29
3.1. Основные теоретические положения	29
3.2. Задание и порядок выполнения работы	35
3.3. Анализ работы амплитудного модулятора с амплитудным детектором	35
3.4. Содержание отчета	41
Список рекомендуемой литературы	42

Учебное издание

**Александр Дмитриевич Головин
Ольга Алексеевна Смирнова
Александр Николаевич Глотов
Равиль Шамильевич Загидуллин**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
В СРЕДЕ ADVANCED DESIGN SYSTEM**

Редактор *С.А. Серебрякова*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

Подписано в печать 09.06.2006. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печ. л. 2,75. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,08. Тираж 300 экз.
Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.