

Министерство образования и науки Российской Федерации **ТОМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга
(РЭТЭМ)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой РЭТЭМ
_____ проф. В.И. Туев

САПР И ТЕХНОЛОГИЯ СВЧ УСТРОЙСТВ

Методические указания
по направлению подготовки

11.04.03 "Конструирование и технология электронных средств"

Профиль подготовки

Магистерская программа "Инновационные технологии в микро и
наноэлектронике"

Лабораторные работы

Разработчик
доцент кафедры РЭТЭМ
_____ В.М. Коротаев

2016

Коротаев В.М.

САПР и технология СВЧ устройств: учебно-методическое пособие для студентов специальности 11.04.03 - Конструирование и технология электронных средств. Лабораторные работы / В.М. Коротаев. – Томск: ТУСУР, 2016. – 18 с.

Содержит описания лабораторных работ по разделам курса «САПР и технология СВЧ устройств». В описании работ содержатся необходимые теоретические аспекты и методика выполнения, контрольные вопросы, рекомендуемая литература.

Указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению «Конструирование и технология электронных средств».

© Коротаев В.М., 2014

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники ТУСУР, 2016

Содержание:

1. Лабораторная работа №1: Исследование характеристик микрополоскового трехдецибельного направленного ответвителя методами численного моделирования в среде САПР. 4
2. Лабораторная работа №2: Определение основных параметров активного элемента СВЧ по одночастотным и двухчастотным нелинейным характеристикам его модели. 13
3. Список использованных источников 16

1. Исследование характеристик микро полоскового трехдецибельного направленного ответвителя средствами численного моделирования в среде САПР Microwave Office.

1.1 Цель работы

Изучить средств моделирования пассивных СВЧ устройств в пакете **Microwave Office**. Изучить правила ввода схемы устройства и исходных данных, также порядок вывода полученных результатов. Приобрести начальные навыки работы в системе САПР **Microwave Office** на примере моделирования направленных ответвителей.

1.2 Общие сведения о системе Microwave Office [1–3] Назначение.

Среда проектирования Microwave Office была разработана для того, чтобы обеспечить пользователя интуитивным интерфейсом при анализе линейных и нелинейных схем, электродинамическом анализе, а также при проектировании физических слоёв СВЧ устройств. Среда проектирования состоит из следующих ключевых компонентов.

Главное окно. Главное окно состоит из заголовка "Microwave Office" и включает все компоненты, которые составляют среду проектирования.

Главное меню и панель кнопок. **Главное меню** находится вверху экрана, под ним – **панель кнопок**. **Меню** содержит полный набор ниспадающих подменю для доступа ко всем командам, которые запускают на выполнение операции программы. Графическая строка, состоящая из «иконок», называемых **панелью кнопок**, обеспечивает альтернативный и быстрый доступ к большинству наиболее часто используемых команд. Эта **панель кнопок** будет динамически модифицироваться в зависимости от активного окна. Например, если активно окно **Schematic** (схема), то панель кнопок будет обеспечивать работу со схемами. Когда выбрано окно **EM Structure** (электродинамическая структура), то состав кнопок изменится, чтобы обеспечить электродинамический анализ.

Главное меню:

1. **File** – Файл
2. **Edit** – Правка
3. **Project** – Проект
4. **Simulate** – Моделирование
5. **Option** – Настройки
6. **Windows** – Окна

7. Help – Справка

1САЕ – система компьютерного моделирования.

Кроме этого, в левой части экрана расположено окно, в котором с помощью закладок может быть активизировано одно из четырёх проектных меню.

Закладки (расположены слева внизу):

А. **Proj** – Проекты

Б. **Elem** – Элементы схем

В. **Var** – Переменные

Г. **Layout** – Топология (расположение/конструкция)

Рассмотрим подробнее каждое проектное меню, активизируемое с помощью выше упомянутых закладок.

А. Состав ПРОЕКТА (Project View)

Project View (состав проекта) размещён с левой стороны от главного окна и содержит полную иерархическую организацию активного проекта, включая следующие пункты/группы:

1. *Design notes* (замечания к проекту);
2. *Project frequency* (проектные частоты);
3. *Global equations* (глобальные уравнения);
4. Data files (файлы данных);
5. Schematics (схемы устройств);
6. EM Structures (электродинамические структуры);
7. *Conductor materials* (проводящие материалы);
8. *Output equations* (выходные уравнения);
9. *Graphs* (графики);
10. *Optimizer goals* (целевые функции оптимизации);
11. *Yeild goals* (итоговые цели);
12. *Output files* (выходные файлы).

1. **Замечания к проекту (Design Notes)**. Это простой текстовый редактор для документов проекта, который активизируется выбором пункта Design Notes.

2. **Проектные частоты (Project Frequency)**. Проектные частоты специфицируют диапазон частот, который может быть использован как глобальный набор частот по умолчанию для линейного, нелинейного и электродинамического моделирования. Когда создаётся новый проект, частотный диапазон специфицируется по умолчанию.

3. **Глобальные уравнения (Global Equations)**. Группа **Global Equations** содержит любые уравнения и функции, которые создаются, чтобы специфицировать значения параметров.

4. **Файлы данных (Data Files)**. Группа **Data Files** содержит список любых объектов файловых данных, которые могут быть добавлены к проекту. Файлами

данных являются обычно файлы S-параметров или некоторые другие типы файлов, которые содержат параметры многополюсников в частотной области.

5. **Схемы (Schematics)**. Группа **Schematics** содержит все схемы, которые добавляются к проекту. **Default CKT Options** (СКТ опции по умолчанию) управляют параметрами моделирования, которые применяются ко всем схемам. Одиночный проект **Microwave Office** может включать множество схем.

6. **Электродинамические структуры (EM Structures)**. Группа **EM Structures** содержит все электродинамические структуры, которые добавляются к проекту. **Default EM Options** (опции электродинамики по умолчанию) управляют параметрами, которые применяются ко всем электродинамическим структурам. Одиночный проект **Microwave Office** может включать множество электродинамических структур, которые будут группироваться как подпункты группы верхнего уровня **EM Structures**.

7. **Материалы проводников (Conductor Materials)**. Свойства материалов, характеризующиеся потерями в планарных проводниках (в электродинамических моделях), специфицируются объектами **Conductor Materials**. По умолчанию материал проводников является идеальным проводником. Вы можете добавить дополнительные материалы.

8. **Выходные уравнения (Output Equations)**. Группа **Output Equations** используется для дополнительной обработки любых данных измерений, прежде чем отобразить их в табличной или графической форме.

9. **Графики (Graphs)**. **Graphs** представляет "выход" из Microwave Office. Существует шесть типов графиков: антенная диаграмма, прямоугольный график, диаграмма Вольперта-Смита, полярный график, гистограмма и таблица.

10. **Цели оптимизации (Optimization Goals)**. **Optimization Goals** используется для ввода желательных спецификаций в проект. Цели могут быть привязаны к любым величинам (measurements) или **Output Equation в Project**.

11. **Результирующие цели (Yield Goals)**. **Yield Goals** используется, чтобы ввести желательные спецификации в проект. Цели могут быть привязаны к любым величинам (measurements) или **Output Equation в Project**.

12. **Выходные файлы (Output Files)**. Используя опцию **Output File**, результаты моделирования схем и электродинамических структур могут быть записаны в стандартном формате S-параметров. Электродинамические структуры могут также генерировать SPICE-эквивалентные схемы. Результаты нелинейного моделирования могут быть записаны в выходные файлы данных AM-AM и AM-PM.

Б. Обзорщик ЭЛЕМЕНТОВ (Element Browser)

Element Browser (обзорщик элементов схемы) активизируется из **Project View** (которое расположено слева от главного окна) щелчком по закладке, обозначенной **Elem** в самом низу **Project View**. Этот **Element View**

содержит палитру выбора элементов из каталога элементов. Он разделен на верхнюю и нижнюю секции. Верхняя секция содержит **Element Browser** для просмотра иерархического каталога элементов. **Element Browser**, подобно **Windows Explorer**, помогает пользователям в этом просмотре посредством **Element Groups** (группы элементов) типа **Lumped Elements** (сосредоточенные элементы) или **Microstrip Elements** (микростриповые элементы). Линейные и нелинейные модели элементов могут быть отображены вначале выделением группы элементов в верхней части **Element View**, а затем выбором конкретной модели из нижней половины **Element View**. Пользователи могут переключаться обратно к **Project View** или **Variable View**, щелкая по закладкам, расположенным снизу окна **Element View**.

В. Обозреватель ПЕРЕМЕННЫХ (Variable Browser) Variable Browser (обозреватель переменных) активизируется из **Project View** (которое расположено слева от главного окна) щелчком по закладке, обозначенной **Var** в самом низу **Project View**. **Variable Browser** отображает текущие значения переменных и параметров элементов для элементов схем в активном проекте. Первые три колонки в **Variable Browser** показывают кнопки, которые указывают на то, что переменные установлены на настройку ("Т"), оптимизацию ("О") или ограничения ("С"). Эти кнопки активизируют переменные для настройки, или оптимизации выбором кнопки, содержащейся в соответствующих колонках. Чтобы ограничить переменную щелкают кнопкой "С" и вводят верхнее и нижнее ограничения в соответствующих колонках. Пользователи могут переключаться обратно к **Project View** или **Element Browser**, щелкая по закладке, расположенной снизу окна **Variable Browser**.

Г. Обозреватель ТОПОЛОГИИ (Layout Browser) Layout Browser (обозреватель топологии/расположения/конструкции) активизируется из **Project View** (которое расположено слева от главного окна) щелчком по закладке, обозначенной **Layout** (топология) в самом низу **Project View**. **Layout View** состоит из двух секций. Верхняя секция содержит группы **Layer Setup** (установки слоев) и **Cell Libraries** (библиотеки ячеек). Нижняя секция содержит средства управления для активизации и просмотра слоев в окне **Layout**.

Установка слоёв (Layer setup). Двойной щелчок по **Layer Setup** открывает диалоговое окно, которое управляет всеми функциями, ассоциированными с рисованием слоёв в **Layout view**. Файлы определения процесса (*.lpf) могут быть импортированы щелчком по этому объекту правой кнопкой мыши.

Библиотеки ячеек (Cell libraries). Конфигурация ячеек может быть создана и импортирована из этого меню. Библиотеки ячеек могут быть импортированы в GDSII или DXF. Новые ячейки могут быть созданы в графическом редакторе, активизируемом из этого меню. **Вид слоя (Layer view)**. **Layer View** размещен в нижней части **Draw Browser**. В **Layer view** слои можно показать и скрыть, а также активизировать их для рисования или редактирования. **Диалоговое**

окно установки слоёв (Layer setup). Двойной щелчок по **Layer Setup** активизирует диалоговое окно, которое управляет установками ряда опций.

1.3 Порядок выполнения работы в системе Microwave Office

Изучив необходимые сведения по использованию пакета **Microwave Office** для Windows, выполнить следующее:

- 1) создать новый схемный проект заданного для анализа устройства;
- 2) изобразить схему СВЧ устройства;
- 3) установить параметры анализа и построить графики частотных характеристик СВЧ устройства;
- 4) запустить на анализ и настроить параметры элементов схемы.

1.3.1 Создание нового схемного проекта [закладка: Proj (проекты)]

В главном меню выполнить последовательность действий: Project (проект) /Add_Schematic /New_Schematic в окне ввести имя вновь создаваемого файла со схемой электрической принципиальной. То же самое можно сделать, щелкнув левой кнопкой мыши по пункту Schematics, находящемуся в Project View (состав проекта).

1.3.2 «Рисование» схемы [закладка: Elem (элементы схемы)] В окне **Element Browser (обозреватель элементов)** выполнить

последовательность действий: Transmission_Lines /Physical /TLINP. Выбрать мышью элемент TLINP, переместить его на схемное поле и задать параметры линии: волновое сопротивление Z_0 , эффективную диэлектрическую проницаемость E_{eff} и геометрическую длину L . «Рисование» сосредоточенного элемента (индуктивности). В окне **Element Browser** выполнить последовательность действий: Lumped_Element (сосредоточенный элемент) / Inductor / IND. Выбрать мышью элемент IND [Inductor (Closed Form)] и переместить его на схемное поле, задать параметры индуктивности. Вращение элемента: выделив мышью элемент, щёлкнуть правой кнопкой и из появившегося контекстного меню выбрать пункт Rotate (вращение). Подсоединение входного и выходного плеч (портов). Из набора кнопок выбрать и щелкнуть мышью по кнопке **Port**, переместить изображение плеча (порта) на схемное поле и задать его параметры (волновое сопротивление Z). Подключение «земли». Из набора кнопок выбрать и щелкнуть мышью по кнопке **GND** (ground – «земля»), переместить изображение «земли» на схемное поле. Удаление элементов. Выделив левой кнопкой мыши элемент, удалить его, нажав комбинацию клавиш Ctrl+X.

1.3.3 Установка параметров анализа схемы и построение графиков частотных характеристик Установка диапазона проектных частот [закладка: Proj (проекты)]. Начиная с главного меню выполнить последовательность действий: Option /Set Project Frequency /Start(GHz)=4 Stop(GHz)=15

Step(GHz)=0.01 Apply OK. То же самое можно сделать, щелкнув левой кнопкой мыши по пункту Project Frequency, находящемуся в **Project View** (состав проекта) вторым по списку. Построение графиков частотных характеристик. Создать графическое поле. Начиная с главного меню выполнить последовательность действий: Project /Add_Graph/Rectangular (прямоугольный). Дать имя графическому полю. То же самое можно сделать, щелкнув правой кнопкой мыши по пункту Graphs находящемуся в **Project View** (состав проекта) девятым по списку. Желательно для построения АЧХ и ФЧХ создать отдельные графические поля. Ввести график в графическое поле. Начиная с главного меню выполнить последовательность действий: Project /Add_Measurement /Meas._Type: Port_parameters Measurement: S From_port_index: 2 To port index: 1. Для построения АЧХ выбрать Complex_modifier: Mag. (амплитуда), а для построения ФЧХ выбрать Complex_modifier: Angle (угол). В заключение нажать кнопки: Apply (применить) OK.

1.3.4 Запуск на анализ и настройка параметров элементов схемы

Запуск на анализ. Из главного меню выполнить последовательность действий: Simulate /Analyze (синоним – F8). Настройка параметров элементов схемы. Выбрать из набора кнопок кнопку с изображением отвёртки – **Tune Tool** (инструмент настройки) и, щелкнув по ней мышью, привести изменившийся курсор мыши на настраиваемый параметр элемента схемы (при этом цвет текста изменится с черного на синий). Теперь, чтобы появилось окно тюнера (Variable Tuner), необходимо щелкнуть мышью по кнопке **Tune** из набора кнопок. Далее, перемещая движок в этом окне, можно наблюдать в других соответствующих окнах, как изменяется варьируемый параметр схемного элемента и вместе с ним все частотные характеристики схемы

1.4 Задание

Провести численное моделирование 3дБ направленного ответвителя (НО) типа Ланге являющегося восьмиполосником реализованном на отрезках, связанных микрополосковых линий (рис. 1), в **Microwave Office**, рассчитать и построить амплитудно-частотные характеристики в диапазоне 4–15 ГГц, выражаемые через следующие S-параметры: $|S_{11}|$ (коэффициент отражения), $|S_{21}|$ (связь), $|S_{31}|$ (рабочее затухание), $|S_{41}|$ (развязка). Волновые сопротивления всех подводящих линий (портов) принять равным 50 Ом. Все графики построить в нескольких окнах (основываясь на соображениях информативности и удобства сравнения), объяснив поведение АЧХ. Для тех же S-параметров построить фазо-частотные зависимости, выявив величину разности фаз в диагональных выходных плечах (портах) 2 и 3

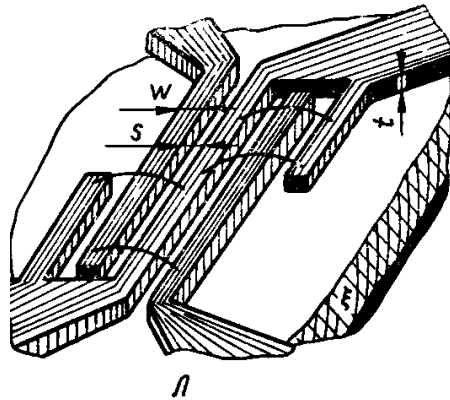


Рис.1

1.4.1. Создать новый схемный проект заданного для анализа устройства.

В проекте обычно бывает несколько схем, использующих одну и ту же подложку. Поэтому поместим элемент подложки в глобальные определения, откуда он будет доступен для всех схем.

1. В окне просмотра проекта дважды щёлкните по **Global Definitions**, откроется окно глобальных определений.
2. В левом окне откройте окно просмотра элементов, щёлкнув мышкой по кнопке **Elements** в нижней части левого окна.
3. Щёлкните мышкой по группе **Substrates**, чтобы отобразить элементы подложек.
4. Перетащите элемент **MSUB** в окно глобальных определений и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы закрепить его.
5. Дважды щёлкните мышкой по элементу **MSUB** и в открывшемся окне свойств элемента введите: **Er=10, H=0.5 mm, T=0.025 mm, Tand=0.001** и **ErNom=10**. Нажмите **OK**.

1.4.2. Изобразить схему СВЧ устройства.

Теперь создадим схему ответвителя Ланге. Эта схема будет состоять только из одного элемента, и её будем использовать, чтобы правильно подобрать значения параметров этого элемента.

1. Щёлкните мышкой по значку Add New Schematic на панели инструментов и создайте схему с именем Lange Coupler.
2. В окне просмотра элементов раскройте группу Microstrip и щёлкните мышкой по под-группе PwrDivider.
3. Перетащите в окно схемы элемент **MLANGE** в окно схемы и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы закрепить его.
4. Щёлкните мышкой по значку Port на панели инструментов и подключите порт к плечу 1 элемента **MLANGE**. Аналогично подключите порт к плечу 2. Затем подключите порты к плечам 3 и 4, два раза щёлкая мышкой, чтобы развернуть эти порты на 180 градусов. Полученная схема показана на рис. 2

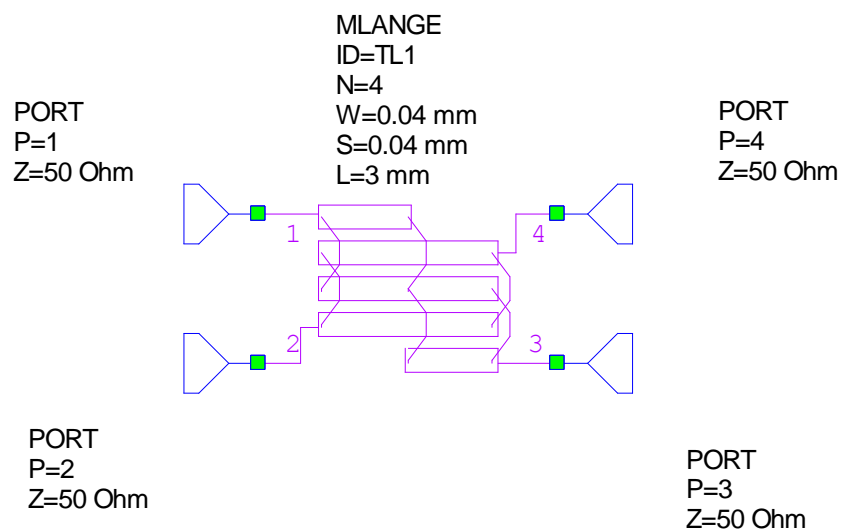


Рис.2

1.4.3. Установить параметры анализа и построить графики частотных характеристик СВЧ устройства

5. Щёлкните мышкой по значку Add New Graph на панели инструментов и создайте прямоугольный график с именем Lange Coupler S Parameters.
6. Откройте окно просмотра проекта, щёлкнув мышкой по панели Project в левой нижней части окна.
7. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени созданного графика в окне просмотра проекта и выберите Add Measurement.
8. В открывшемся окне в области Measurement Type отметьте Linear>Port Parameters, в области Measurement отметьте S, в поле Data Source Name введите Lange Coupler, в поля To Port Index и From Port Index введите 1, отметьте dB и нажмите Apply. Затем в поле To Port Index поочередно введите 2, 3 и 4, нажимая после каждого ввода Apply.
9. Нажмите ОК.

1.4.4. Запустить на анализ и настроить параметры элементов схемы.

10. Щёлкните по значку Analyze на панели инструментов
11. Щёлкните мышкой по значку Tune Tool на панели инструментов и, щёлкая мышкой, назначьте параметры W, S и L элемента MLANGE для настройки
12. Добейтесь за счет варьирования параметров W, S равного деления мощности между плечами 2 и 3. Результирующие характеристики отобразите на графиках.
13. Рассчитайте и изобразите на графике фазочастотные характеристики коэффициентов передачи в плечи 2 и 3 направленного ответвителя.

14. Исследуйте согласующие свойства НО. Для этого создайте новую схему с НО и варьируемыми нагрузками в плечах 2 и 3. входным узлом 1 и выходным 4. Результаты отобразите на графиках коэффициентов отражения и передачи НО.

1.4.5 Составить отчет, защитить и сдать его преподавателю.

1.5 Контрольные вопросы

1. Как называется отрезок связанных линий с 3-дБ связью?
2. Какие функции на СВЧ может выполнять отрезок связанных линий?
3. Перечислить основные параметры отрезка связанных линий в терминах матрицы рассеяния? Как они связаны с основными параметрами направленного ответвителя?

Список использованных источников

1. В.Д. Разевиг, Ю.В. Потапов, А.А. Курушин Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office под ред. В.Д. Разевига. - М.: СОЛОН-Пресс, 2003. - 469с.: ил. - (Серия «Системы проектирования»).

2. Григорьев, А.Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2007. — 704 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/118> — Загл. с экрана.

3. Фальковский, О.И. Техническая электродинамика. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2009. — 432 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/403> — Загл. с экрана.

2. Определение основных параметров активного элемента СВЧ по одночастотным и двухчастотным нелинейным характеристикам его модели..

2.1 Цель работы

Используя пакет анализа и моделирования СВЧ устройств **Microwave Office**, выполнить анализ динамических и спектральных характеристик усилительного элемента при одночастотном и двухчастотном воздействии с целью изучения свойств модели усилительного элемента и получения его основных энергетических параметров.

2.2 Порядок выполнения работы в системе Microwave Office

Изучив необходимые сведения по использованию пакета **Microwave Office** для Windows [1] и материалы лекций по моделированию усилителей мощности выполнить следующее:

- 1) создать схемный проект для моделирования статических ВАХ и нагрузочной характеристики усилительного элемента заданного его нелинейной моделью;
- 2) добавить в этот же проект в отдельном окне схему для определения нелинейных характеристик усилительного элемента, задав соответствующий порт для моделирования при одночастотном воздействии;
- 3) добавить в этот же проект в отдельном окне схему для определения нелинейных характеристик усилительного элемента, задав соответствующий порт для моделирования при двухчастотном воздействии;
- 4) установив параметры анализа СВЧ устройств, создать окна для построения графиков характеристик проиллюстрировав результаты на графиках динамических характеристик и в спектральной областях представления сигналов при одночастотном и двухчастотном воздействии .
- 5) исследовать величину выходной мощности по критерию компрессии коэффициента передачи на 1 дБ при разных нагрузках для одночастотного воздействия. (три нагрузки: с симметричным использованием ВАХ, с доминирующим влиянием насыщения тока и доминирующим влиянием отсечки тока)
- 6) определить уровни выходной мощности при заданных значениях интермодуляционных искажений (-30 дБн, -40 дБн) и OIP_3 .

2.3 Задание

3.3.1 Рассчитать вольтамперные характеристики заданной нелинейной модели полевого транзистора СВЧ. Рис. 1

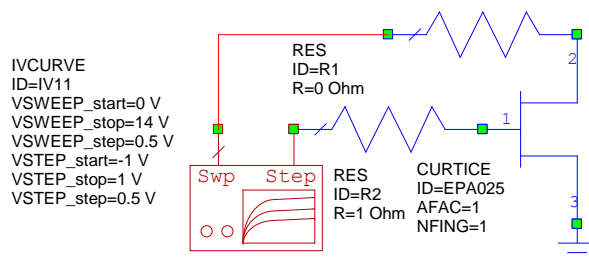


Рис. 1

2.3.2 Рассчитать и вывести на график динамическую нагрузочную характеристику схемы с одночастотным воздействием. Рис. 2

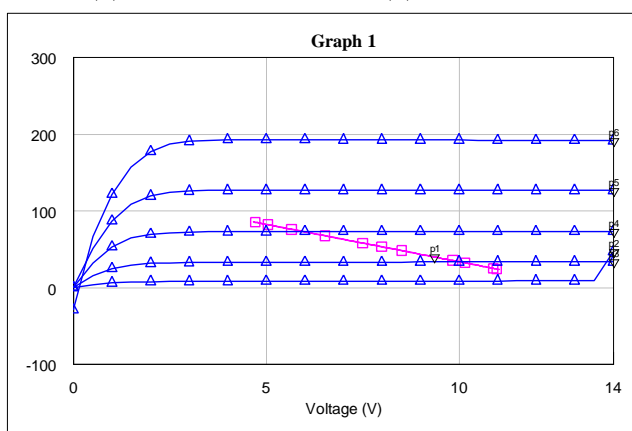


Рис. 2

2.3.3 Рассчитать и вывести на график спектр выходного сигнала при одночастотном воздействии. Примерный вид характеристики показан на Рис. 3

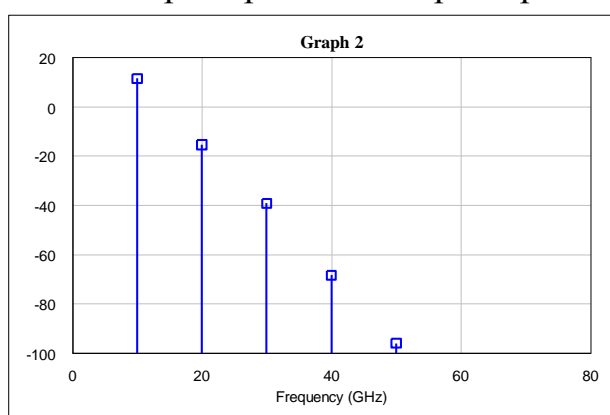


Рис.3

2.3.4. Рассчитать и вывести на график динамическую характеристику при одночастотном воздействии. Примерный вид характеристики показан на Рис.4

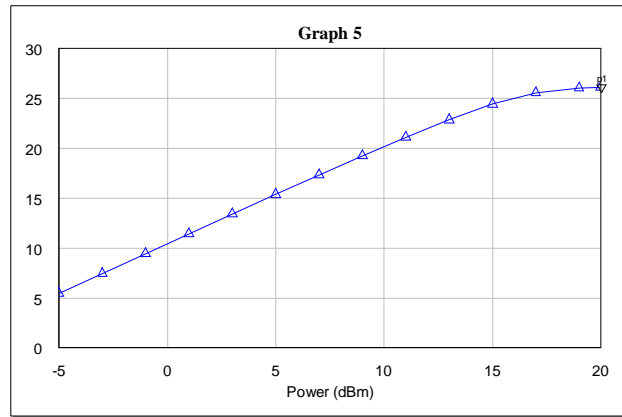


Рис.4

2.3.5 . Рассчитать и вывести на график спектр выходного сигнала при двухчастотном воздействии. Примерный вид характеристики показан на Рис.5

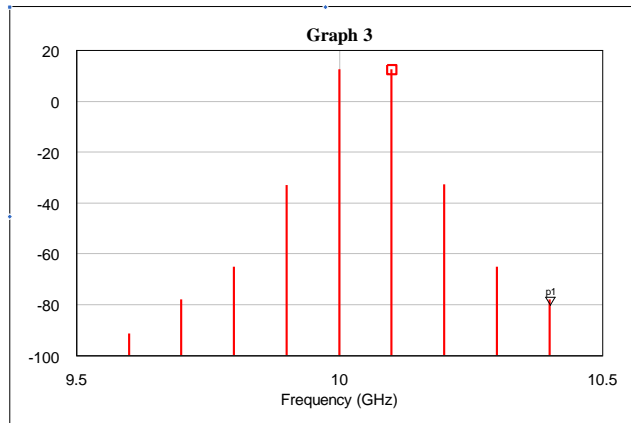


Рис.5

2.3.6 Рассчитать и вывести на график динамические характеристики при двухчастотном воздействии. Примерный вид характеристики показан на Рис.6

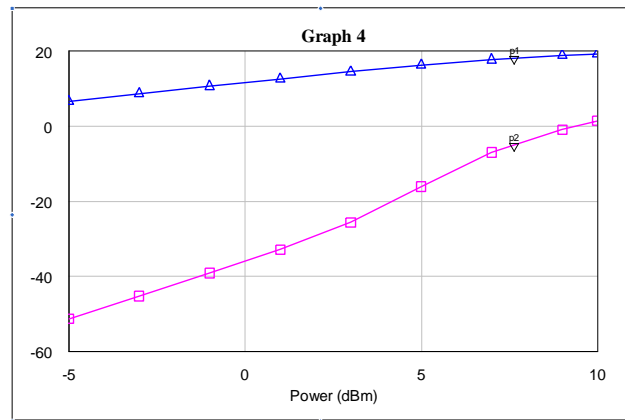


Рис.6

2.3.7. По результатам моделирования определить уровни выходной мощности
 - при одночастотном воздействии по критерию сжатия на 1 дБ
 - при двухчастотном воздействии по заданному уровню нелинейных искажений третьего порядка (-30дБ, -40дБ)

2.4. Составить отчет, защитить и сдать его преподавателю

2.5. Контрольные вопросы

1. Какими основными параметрами характеризуется нелинейный усилительный элемент и усилитель мощности?
2. Определение максимальной выходной мощности по критерию компрессии коэффициента передачи на 1дБ?
3. Каким параметром устанавливается связь уровня выходной мощности и нелинейных искажений третьего порядка для усилительного элемента в квазилинейном режиме?
4. Как можно определить OIP_3 при наличии динамических характеристик нелинейного усилительного элемента при двухчастотном воздействии?
5. Как можно определить OIP_3 при наличии спектральных характеристик нелинейного усилительного элемента при двухчастотном воздействии?

Список использованных источников

1. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office, М.: Солон.– 2003.– 500
2. Григорьев, А.Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2007. — 704 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/118> — Загл. с экрана.

3. Фальковский, О.И. Техническая электродинамика. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2009. — 432 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/403> — Загл. с экрана.

