

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 ВЧ И СВЧ УСТРОЙСТВ

Учебно-методическое пособие для студентов специальности **210201** – Проектирование и технология радиоэлектронных средств

Лабораторные работы

Разработчик
профессор кафедры КСУП

_____ А.Н. Сычёв

УДК 621.372.8: 681.3
С958

Сычёв А.Н. САПР и технология ВЧ и СВЧ устройств. Учебно-методическое пособие для студентов специальности 210201 – Проектирование и технология радиоэлектронных средств. Лабораторные работы.–Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектрон., 2012.– 28 с.

Содержит описание лабораторных работ по курсу «САПР и технология ВЧ И СВЧ устройств». Для выполнения работ используются новые программные продукты: Lines Designer, Linpar, MathCAD, Microwave Office.

Предназначено для студентов специальности **210201** – Проектирование и технология радиоэлектронных средств.

СОДЕРЖАНИЕ

1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТОВ <i>LINES DESIGNER</i> И <i>LINPAR</i>	3
1.1 Цель работы	3
1.2 Общие сведения по проблеме проектирования СВЧ устройств	3
1.3 Общее описание пакета моделирования Lines Designer	3
Сечение многопроводной линии передачи.....	6
1.4 Главное меню пакета Lines Designer	29
1.5 Главное меню пакета Linpar для Windows и порядок работы с программой [2].....	29
1.6 Порядок выполнения работы	30
1.7 Варианты заданий	30
1.8 Контрольные вопросы	32
Список использованных источников	32
2 АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ <i>MATHCAD</i> ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРА НА ПОЛУВОЛНОВОМ ОТРЕЗКЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ	33
2.1 Цель работы	33
2.2 Электрическая принципиальная схема полосно-пропускающего фильтра и его математическая модель.....	33
2.3 Главное меню пакета MathCAD для Windows и порядок работы с программой	35
2.4 Порядок выполнения работы	35
2.5 Задание	35
Список использованных источников	36
3 АНАЛИЗ СВЧ УСТРОЙСТВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ.....	37
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ <i>MICROWAVE OFFICE-2001</i>	37
3.1 Цель работы	37
3.2 Общие сведения о системе Microwave Office-2001 [1–3]	37
Главное меню:.....	37
А. Состав ПРОЕКТА (Project View).....	38
Б. Обозреватель ЭЛЕМЕНТОВ (Element Browser).....	39
В. Обозреватель ПЕРЕМЕННЫХ (Variable Browser).....	40
Г. Обозреватель ТОПОЛОГИИ (Layout Browser).....	40
3.3 Порядок выполнения работы в системе Microwave Office-2001.....	41
3.3.1 Создание нового схемного проекта [закладка: Proj (проекты)]	41
3.3.2 «Рисование» схемы [закладка: Elem (элементы схемы)]	42
3.3.3 Установка параметров анализа схемы и построение графиков частотных характеристик	42
3.3.4 Запуск на анализ и настройка параметров элементов схемы	43
3.4 Задание	43
3.5 Контрольные вопросы	44

Список использованных источников	44
4 АНАЛИЗ СВЧ УСТРОЙСТВ НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ <i>MICROWAVE OFFICE</i> -2001	45
4.1 Цель работы	45
4.2 Порядок выполнения работы в системе <i>Microwave Office</i> -2001.....	45
4.3 Задание	45
4.4 Контрольные вопросы	47
Список использованных источников	47

1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТОВ *LINES DESIGNER* И *LINPAR*

1.1 Цель работы

Изучить пакеты моделирования полосковых линий передачи *Lines Designer* и *Linpar* для Windows. Изучить правила ввода исходных данных и порядок вывода полученных результатов. Приобрести начальные навыки работы в системах *Lines Designer* и *Linpar* на примере моделирования ряда одиночных, связанных и многопроводных линий.

1.2 Общие сведения по проблеме проектирования СВЧ устройств

Моделирование СВЧ компонентов (линий передачи), а также проектирование СВЧ устройств и систем в общем случае может выполняться тремя возможными способами: 1) расчётным; 2) экспериментальным; 3) комбинированным. Современное расчётное проектирование немислимо без компьютерного моделирования с помощью специально разработанных программных продуктов. Последние создаются на основе адекватных математических моделей, которые позволяют осуществлять разнообразные численные эксперименты.

1.3 Общее описание пакета моделирования *Lines Designer*

Назначение пакета. Пакет *Lines Designer* для Windows предназначен для расчета параметров полосковых линий передачи различных типов – как одиночных, так и многосвязных и представляют собой интегрированную среду моделирования. Существующая версия пакета поддерживает 28 типов линий передачи и позволяет проводить расчет всех необходимых для дальнейшего анализа СВЧ устройств параметров.

Интерфейс пакета для Windows. Интерфейс пакета отвечает стандартам приложений, созданных для работы в средах Windows 95/98/NT/2000 (рис.1.1).

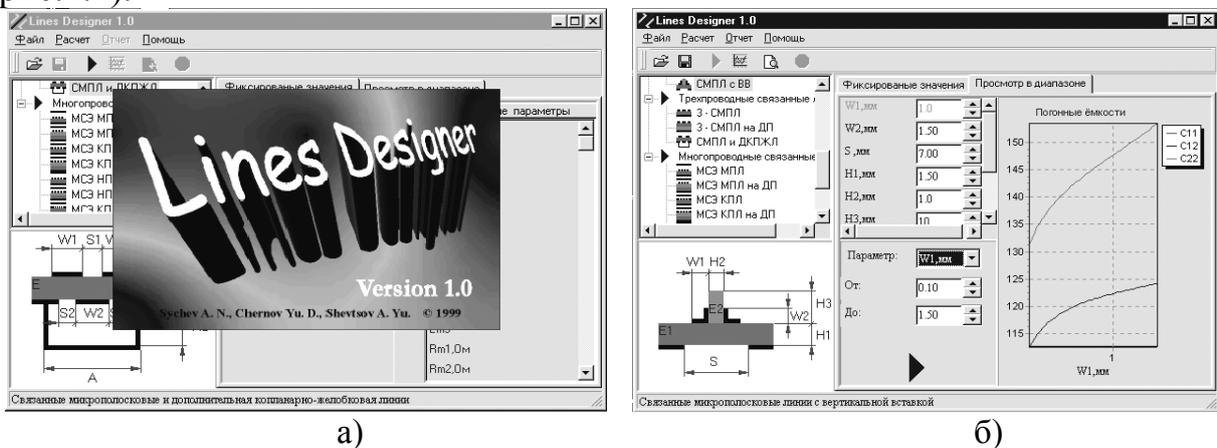


Рис.1.1 Интерфейс пакета *Lines Designer* для Windows (а), пример моделирования в режиме вариации одного из параметров (б)

Метод анализа. Анализ и моделирование многомодовых полосковых структур выполняется в квазистатическом приближении (предположение квази-Т волн). Наиболее подходящими алгоритмами для быстрого моделирования являются алгоритмы, базирующиеся на аналитических методах. Здесь при построении моделей применён новый аналитический метод, сочетающий методы вложенных подобластей и конформных отображений [1].

Состав пакета. Пакет программ *Lines Designer* для Windows состоит из программного ядра – управляющей программы LD.EXE, файла справочной информации LD.HLP, а также набора расчётных исполняемых EXE-модулей, каждый из которых соответствует своей линии передачи и вызывается управляющей программой (см. рис. 1.2 и табл. 1.1). В следующей версии, с целью совершенствования обмена данными, целесообразно перевести исполняемые EXE-модули в исполняемые DLL-модули. Используется оригинальная библиотека подпрограмм *ANSDEL1*, написанная на Фортран-90, для вычисления специальных функций (эллиптических функций, эллиптических и гиперэллиптических интегралов) и вычисления емкостей элементарных двух-, трёх- и многоэлектродных ячеек. Эта библиотека – *ANSDEL1* – используется при создании новых модулей для пакета *Lines Designer*.

Средства программирования, использованные при разработке пакета *Lines Designer* для Windows. Управляющая программа пакета, реализующая дружественный интерфейс, запуск исполняемых модулей анализа линий и генерацию отчётов, выполнена на языке объектно-ориентированного программирования Паскаль в среде визуального программирования Delphi. Модули пакета, реализующие моделирование линий передачи, запрограммированы на языке Фортран-90 (MS Fortran).

Требования к системе. Требуется персональный компьютер Pentium-90 или выше, операционная система Windows 95, 98, 2000 или выше, ОЗУ – 4 Мбайт требуется, 32 Мбайт рекомендуется, требуется 4 Мбайт дискового пространства плюс дополнительное дисковое пространство для виртуальной памяти. Кроме того, пакет *Lines Designer* имеет полнофункциональную версию для работы в операционной среде MS-DOS.

Рассчитываемые линии и входные данные. Рассчитываемые структуры группируются в следующие четыре блока (рис.1.2, табл.1.1): 1) одиночные линии (8шт.); 2) связанные линии (7шт.); 3) трёхполосковые связанные линии (3шт.); 4) многопроводные связанные линии (10шт.).

Пакет *Lines Designer* позволяет проводить анализ в диалоговом режиме – после выбора из меню той или иной линии, подлежащей анализу, в подокне автоматически выводится изображение её поперечного сечения и список ассоциированных параметров геометрии и диэлектрического заполнения. Это позволяет разработчику ясно представлять конструкцию структуры и её параметры (исходные данные).

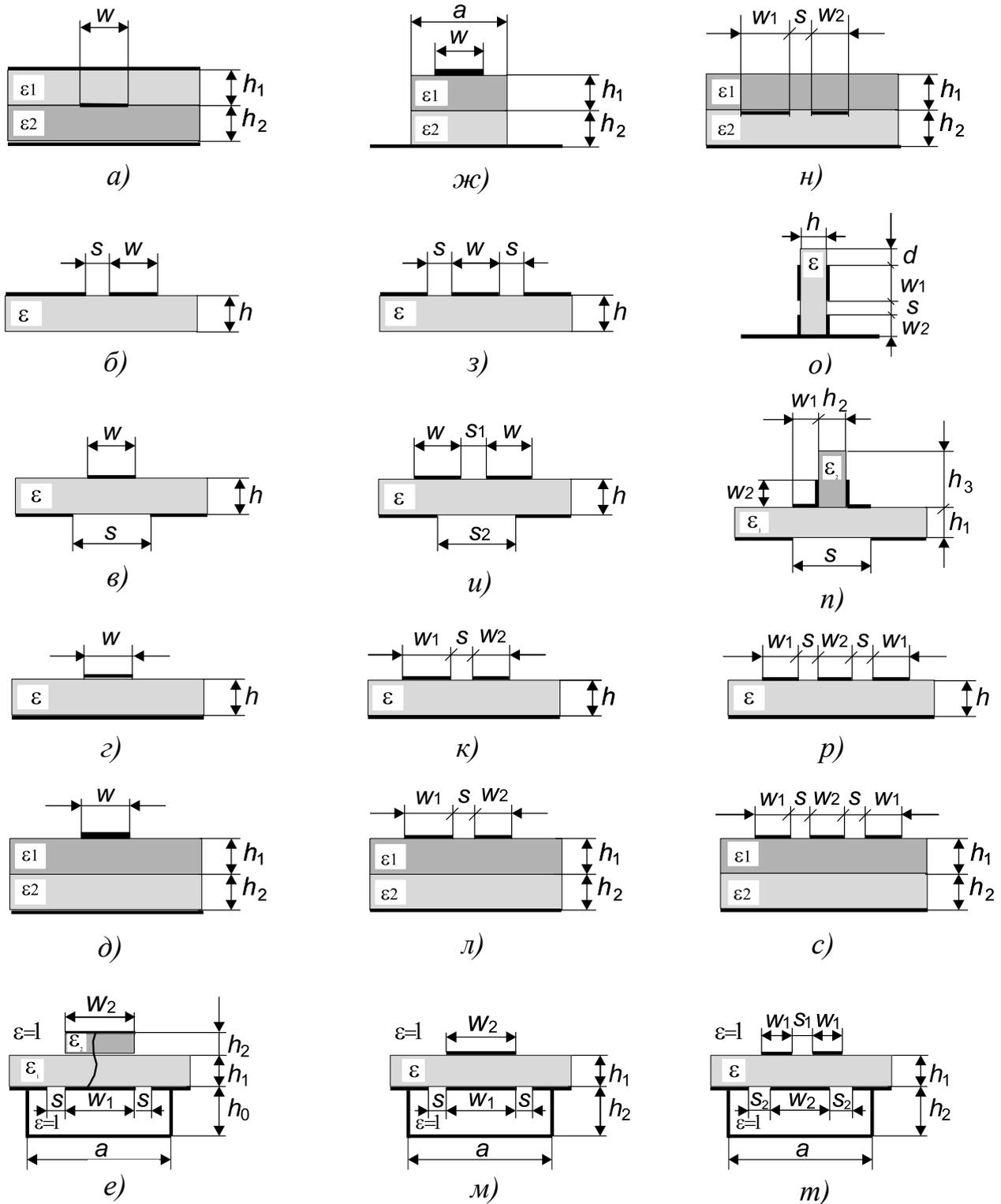


Рис.1.2 Однородные, двух- и трёхполосковые линии, рассчитываемые пакетом *Lines Designer*: а – несимметричная полосковая линия (НПЛ); б – несимметричная планарная полосковая линия; в – МПЛ со щелью в экране; г – микрополосковая линия (МПЛ); д – МПЛ на двухслойной подложке; е – брусчатая копланарно-желобковая линия (КПЖЛ); ж – брусчатая полосковая линия на двухслойном диэлектрике; з – копланарная линия (КПЛ); и – связанные МПЛ со щелью в экране, к – связанные МПЛ; л – связанные МПЛ на двухслойной подложке; м – связанные МПЛ и КПЖЛ; н – связанные МПЛ с накладкой; о – связанные полосковые линии на вертикальной подложке; п – связанные трёхполосковые МПЛ; р – связанные трёхполосковые МПЛ на двухслойной подложке; т – связанные МПЛ с дополнительной КПЖЛ на обратной стороне подложки

Т а б л и ц а 1.1. – Многопроводные полосковые линии передачи, входящие в состав рассчитываемых структур пакета Lines Designer

№ п/п	Сечение многопроводной линии передачи	Название линии передачи
1.		Многопроводные связанные экранированные микрополосковые линии (МПЛ)
2.		Многопроводные связанные экранированные МПЛ на двухслойной подложке
3.		Многопроводные связанные планарные полосковые линии на подвешенной подложке
4.		Многопроводные связанные экранированные копланарные полосковые линии (КПЛ)
5.		Многопроводные связанные экранированные КПЛ на двухслойной подложке
6.		Многопроводные связанные КПЛ на подвешенной подложке
7.		Многопроводные экранированные несимметричные планарные полосковые линии (НППЛ)
8.		Многопроводные связанные экранированные НППЛ на двухслойной подложке
9.		Многопроводные связанные НППЛ на подвешенной подложке
10.		Многопроводные связанные экранированные КПЛ с лицевой связью

Режимы проектирования. При работе с пакетом предусмотрены два режима проектирования: 1) режим с фиксированными значениями; 2) режим вариации одного из параметров линии в заданном диапазоне. В первом режиме – с фиксированными исходными данными – программа рассчитывает электрические параметры для выбранной структуры по параметрам её материалов и геометрии. Во втором режиме – вариации одного из параметров в заданном диапазоне – программа выдаёт графики характеристик структуры в зависимости от изменения выбранного параметра. Пример интерфейса в режиме вариации одного из параметров представлен на рис.1,б. Для наглядности и повышения графической точности любой участок графика может быть увеличен с использованием мыши.

Результаты проектирования представляются в виде списка или графических зависимостей, также предусмотрена возможность получения отчета о проектировании. Все исходные данные и результаты работы с программой могут быть сохранены в файле и впоследствии быстро вновь загружены. Кроме того, существует возможность создания отчёта проектирования, а также выдача его в файл или печать на принтере.

Выходные данные. Пакет в режиме фиксированных исходных данных выдаёт полный набор выходных электрических параметров, включая для одиночных линий (таких как микрополосковая, копланарная и т.п.) погонные ёмкость C и индуктивность L , волновое сопротивление Z_0 и эффективную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{эфф}$. Для более сложных связанных линий количество расчётных параметров равно 23 (матрицы погонных ёмкостей и индуктивностей, коэффициенты связи по ёмкости и индуктивности, модальные мощности, токи и напряжения, характеристические сопротивления и проводимости). Для трёхполосковых связанных линий количество этих параметров – более 50, а для многопроводных связанных линий, например десяти линий, оно достигает 100. Для многопроводных связанных линий рассчитываются матрицы погонных ёмкостей и индуктивностей, а также матрица волновых сопротивлений и вектор модальных диэлектрических проницаемостей ϵ_m .

Таким образом, специализированный пакет *Lines Designer* является достаточно эффективным завершённым Windows-приложением, позволяющим рассчитывать параметры 28 типов разнообразных полосковых структур, в том числе многопроводных линий на многослойном диэлектрике (многомодовые структуры с квази-Т волнами). Анализ некоторых структур реализуется впервые. Для расчета параметров линий передачи используются новые модели, построенные на основе метода, сочетающего метод вложенных подобластей и конформных отображений. Пакет является открытым с возможностью расширения, с другой стороны возможна интеграция отдельных модулей пакета в состав других систем моделирования компонентов и проектирования СВЧ устройств.

1.4 Главное меню пакета *Lines Designer*

Запуск системы *Lines Designer* осуществляется командой LD.EXE, после выполнения которой на экране появляется главное меню системы. Для выхода из системы следует нажать клавиши <Alt-X>.

Первая строка экрана содержит все команды главного меню, последняя – название выделенной линии передачи. Для входа в главное меню нажмите функциональную клавишу <F10>, при этом выделенный прямоугольник появится в первой строке экрана (главном меню). Для выхода из главного меню или любого подменю нажмите клавишу <Esc> (<Оставить>).

В главном меню содержатся следующие команды:

1. Файл (File);
2. Расчёт (Calculate);
3. Настройки (Settings);
4. Отчет (Report);
5. Помощь (Help).

Все они, кроме команды «Расчёт», имеют собственные подменю, команда «Отчет» до проведения расчётов неактивна.

1.5 Главное меню пакета *Linpar* для Windows и порядок работы с программой [2]

Запуск системы *Linpar* осуществляется командой LINPAR.EXE, после выполнения которой на экране появляется главное меню системы. Для выхода из системы следует нажать клавиши <Alt-F4>. Первая строка экрана содержит все команды главного меню. Для входа в главное меню нажмите функциональную клавишу <F10> или <Alt> при этом выделенный прямоугольник появится в первой строке экрана (главном меню). Для выхода из главного меню или любого подменю нажмите клавишу <Esc>.

В главном меню содержатся следующие команды:

1. File (Файл);
2. Compute (Вычислить);
3. Configuration (Конфигурация);
4. Help (Справка).

Порядок работы. После запуска программы LINPAR.EXE войти в главное меню и выполнить следующую последовательность действий: 1) выбрать набор параметров (матриц), подлежащих расчёту, в данном примере матрицы *L* и *C*: Configuration /Matrices /Matrix Selection: Matrices_[L]_and_[C] /OK; 2) выбрать рассчитываемую структуру, в данном примере микрополосковые линии: File /New /Microstrips (Zero Thickness) /OK.

В появившемся окне ввода данных ввести данные, например: Number of strips: 1; w1=1 мм; Substrate Thickness (h) = 1 мм; Substrate Permittivity (ϵ_r) = 10.

Далее, визуализировать численные исходные данные командой View, и, наконец, запустить на выполнение – Run. После расчета структуры командой List_Result просмотреть и зафиксировать следующие результаты: Matrix [L] (H/m); Matrix [C] (F/m); Characteristic impedance (Ω); Effective permittivity.

1.6 Порядок выполнения работы

1. Изучить необходимые сведения по использованию пакетов *Lines Designer* и *Linpar* для Windows.
2. Получить у преподавателя вариант задания.
3. Выполнить моделирование (анализ/синтез) заданных полосковых структур.
4. Составить отчет, защитить и сдать его преподавателю.

1.7 Варианты заданий

1. Рассчитать несимметричную полосковую линию (НПЛ), найдя эффективную проницаемость $\epsilon_{эфф}$, погонную ёмкость C , погонную индуктивность L и обеспечив ей заданное волновое сопротивление Z_0 (табл. 1.2). В качестве исходных геометрических и диэлектрических параметров взять параметры, заданные в табл.1.3, и найти соответствующую ширину проводника w .

Таблица 1.2

№ п/п	Z_0 , Ом
1	50
2	75

Таблица 1.3

№ п/п	h_1 , мм	h_2 , мм	ϵ_1	ϵ_2
1	1	0,5	9,6	9,6
2	1	1	10	10
3	1	1	10	1

2. Рассчитать микрополосковую линию (МПЛ), обеспечив ей заданное волновое сопротивление (см. табл. 1.2). В качестве исходных геометрических и диэлектрических параметров взять параметры, заданные в табл.5, и найти соответствующую ширину проводника w .

Таблица 1.4

№ п/п	h , мм	ϵ
1	1	9,6
2	1	10
3	2	16

Построить графики $Z_0(w/h)$ и $\epsilon_{эфф}(w/h)$, указав размерности на координатных осях, объяснив характер зависимостей.

3. Проанализировать МПЛ с помощью *Linpar* со следующими исходными параметрами $w = 1$ мм, $h = 1$ мм, $\epsilon = 10$. Сравнить с результатами, по-

лученными с помощью *Lines Designer*, представив вычисленные относительные погрешности по всем расчетным электрическим параметрам C , L , Z_0 , $\varepsilon_{эфф}$.

4. Рассчитать копланарную линию (КПЛ), обеспечив ей заданное волновое сопротивление (см. табл. 1.2). В качестве исходных геометрических и диэлектрических параметров взять параметры, заданные в табл.6, и найти соответствующую ширину проводника w .

Таблица 1.5

№ п/п	h , мм	s , мм	ε
1	1	1	9,6
2	1	1	10
3	2	1	16

Построить графики $Z_0(w/h)$ и $\varepsilon_{эфф}(w/h)$, указав размерности на координатных осях, объяснив характер зависимостей.

5. Рассчитать брусчатую копланарно-желобковую линию (БКПЖЛ), обеспечив ей заданное волновое сопротивление (см. табл. 1.2). В качестве исходных геометрических и диэлектрических параметров взять параметры, заданные в табл.7 и найти соответствующие ширины проводников $w_1 = w_2$.

Таблица 1.6

№ п/п	h_0 , мм	h_1 , мм	h_2 , мм	a , мм	s , мм	ε_1	ε_2
1	4	1	1	10	1	9,6	9,6
2	4	1	1	10	0,5	10	9,6
3	4	1	1	10	1	10	9,6

6. Рассчитать (проанализировать в режиме «Фиксированные параметры») связанные микрополосковые линии (СМПЛ) со следующими геометрическими и диэлектрическими параметрами $w_1 = w_2 = 1$ мм; $s = 0,2$ мм; $h = 1$ мм; $\varepsilon = 10$. Зафиксировать результаты: L , C , ε_1 , ε_2 , Z_{00} , Z_{0e} , Z_0 , k_L , k_C , k , S_{21} . Прочитать ту же структуру с теми же исходными данными только в режиме «Просмотр в диапазоне», изменяя параметр (зазор) s в диапазоне $0,1 \dots 4$ мм, зафиксировав график S_{21} и объяснив его поведение.

7. Проанализировать связанные трёхпроводные МПЛ со следующими геометрическими и диэлектрическими параметрами $w_1 = \dots = w_3 = 1$ мм; $s_1 = s_2 = 0,2$ мм; $h = 1$ мм; $\varepsilon = 10$. Зафиксировать численные результаты: матрицы погонных емкостей $[C]$ и индуктивностей $[L]$, а также вектор модальных эффективных диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_{m1} \dots \varepsilon_{m3}$.

8. Рассчитать четырёхпроводные связанные экранированные КПЛ на двухслойной подложке со следующими геометрическими и диэлектрическими параметрами $w_1 = \dots = w_4 = 1$ мм; $s_1 = \dots = s_5 = 0,2$ мм; $h_1 = h_2 = 1$ мм; $h_3 = 2$ мм; $\varepsilon_1 = 10$; $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 1$. Зафиксировать численные результаты: матрицы погонных ем-

костей $[C]$ и индуктивностей $[L]$, а также вектор модальных эффективных диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_{m1} \dots \varepsilon_{m4}$. Прочитать ту же структуру с теми же исходными данными только в режиме «Просмотр в диапазоне» ещё два раза, вначале задав $\varepsilon_2=10$ и варьируя ε_1 в диапазоне $1 \dots 20$, потом задав $\varepsilon_1=10$ и варьируя ε_2 в диапазоне $1 \dots 20$. Для двух последних случаев построить графики модальных эффективных диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_{m1} \dots \varepsilon_{m4}$ и объяснить их поведение.

9. Рассчитать четырёхпроводные связанные экранированные КПЛ с лицевой связью со следующими геометрическими и диэлектрическими параметрами: $N = 4$; $Nu = 2$ (т.е. две линии располагаются на верхней стороне подложки); $w_0=0$; $w_1=\dots=w_4=s_1=\dots=s_6=1$ мм; $h_1=1$ мм; $h_2=0,1 \dots 0,6$ мм (диапазон варьирования); $h_3=4$ мм; $\varepsilon_1=10$; $\varepsilon_2=\varepsilon_3=1$. Построить графики модальных эффективных диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_{m1} \dots \varepsilon_{m4}$, отметив их особенности.

1.8 Контрольные вопросы

1. Дать классификацию волноведущих структур по связности поперечного сечения и количеству линий передачи. Перечислить основные типы линий передачи.

2. Какие типы волн могут распространяться в волноведущих структурах? Какие волноведущие структуры называются многомодовыми?

3. Перечислить основные электрические параметры одиночной линии передачи?

4. Перечислить основные электрические параметры связанных линий передачи?

5. Перечислить основные электрические параметры многопроводных линий передачи?

Список использованных источников

1. Сычёв А.Н. Управляемые СВЧ устройства на многомодовых полосковых структурах.– Томск: Том. гос. ун-т, 2001.– 318 с.

2. Djordjevic A., Bazar M.B., Sarkar T.K., Harrington R.F. LINPAR for Windows: Matrix parameters for multiconductor transmission lines.– Software and user's manual. – 1995.

2 АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ *MATHCAD* ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРА НА ПОЛУВОЛНОВОМ ОТРЕЗКЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

2.1 Цель работы

Изучив пакет математического моделирования *MathCAD-2001*, освоить правила составления программ. Приобрести начальные навыки моделирования СВЧ устройств в системе *MathCAD* на примере полосно-пропускающего фильтра (ППФ).

2.2 Электрическая принципиальная схема полосно-пропускающего фильтра и его математическая модель

Расчётное проектирование СВЧ устройств, базирующееся на компьютерном моделировании, требует специально разработанных программных продуктов, которые позволяют осуществлять разнообразные численные эксперименты. В качестве примера выполним анализ полуволнового фильтра с торцевыми индуктивными связями, реализованного по микрополосковой технологии. Поперечное сечение микрополосковой линии (МПЛ) и схема электрическая принципиальная ППФ показаны на рис.2.1.

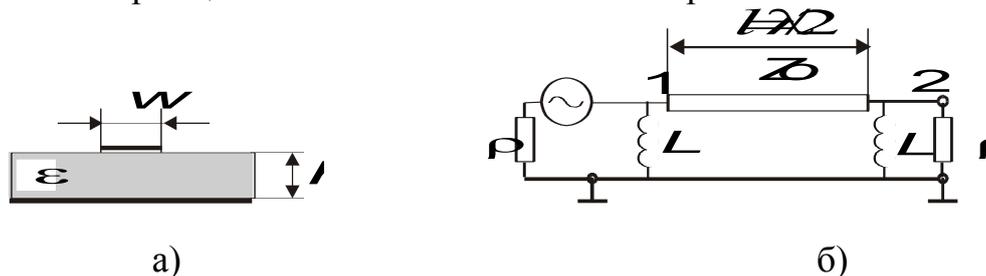


Рис.2.1 Поперечное сечение микрополосковой линии (МПЛ) (а); схема полуволнового ППФ с торцевыми индуктивными связями на МПЛ (б)

Здесь L – значения индуктивностей на входе и выходе отрезка линии передачи (ЛП), ρ – волновое сопротивление подводящих линий.

Одиночная линия передачи характеризуется следующими системами параметров: а) погонными (первичными) параметрами; б) волновыми (модальными, вторичными) параметрами.

Погонные (первичные) параметры ЛП:

$R1$ – погонное сопротивление линии передачи ЛП;

$G1$ – погонная проводимость линии передачи ЛП;

$L1$ – погонная индуктивность линии передачи ЛП;

$C1$ – погонная ёмкость линии передачи ЛП.

Волновые (модальные, вторичные) параметры ЛП:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R1 + i\omega L1}{G1 + i\omega C1}}; \quad \gamma = \sqrt{(R1 + i\omega L1)(G1 + i\omega C1)},$$

где Z_0 – волновое (характеристическое) сопротивление ЛП;
 γ – постоянная распространения ЛП.

Внешние параметры цепи описываются с помощью классических матриц, таких как проводимостей Y и сопротивлений Z , а также волновых – рассеяния S . Выберем за основу матрицу проводимостей, т.к. в цепи присутствуют только параллельные соединения:

$$Y_A = \begin{bmatrix} \frac{\text{cth}(\gamma l)}{Z_0} & -\frac{\text{csch}(\gamma l)}{Z_0} \\ -\frac{\text{csch}(\gamma l)}{Z_0} & \frac{\text{cth}(\gamma l)}{Z_0} \end{bmatrix} \cdot \rho; \quad Y_B = \begin{bmatrix} \frac{1}{j\omega L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{j\omega L} \end{bmatrix} \cdot \rho; \quad Y = Y_A + Y_B,$$

здесь Y_A – нормированная (безразмерная) матрица проводимостей отрезка линии передачи (ЛП) длиной l ; Y_B – нормированная матрица проводимостей цепи, содержащей две индуктивности L на входе и выходе; Y – суммарная матрица проводимостей фильтрующей цепи, содержащей отрезок ЛП и две параллельные индуктивности на входе и выходе.

В итоге осуществляем переход к волновой матрице рассеяния S

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = (E - Y)(E + Y)^{-1} = 2 \cdot (E + Y)^{-1} - E,$$

в которой каждый элемент (S -параметр) является комплексной величиной и имеет определённую физическую интерпретацию:

$$\begin{aligned} S_{11} &= |S_{11}|; & \varphi_{11} &= \arg(S_{11}); \\ S_{21} &= |S_{21}|; & \varphi_{21} &= \arg(S_{21}), \end{aligned}$$

где $E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ – единичная матрица;

S_{11} – комплексный коэффициент отражения по напряжению;

$|S_{11}|$ – модуль коэффициента отражения. Его частотная зависимость называется амплитудно-частотной характеристикой коэффициента отражения;

$\arg(S_{11})$ – фаза коэффициента отражения. Его частотная зависимость называется фазочастотной характеристикой коэффициента отражения;

S_{21} – комплексный коэффициент передачи по напряжению, при этом $|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1$;

$|S_{21}|$ – модуль коэффициента передачи. Его частотная зависимость называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ);

$\arg(S_{21})$ – фаза коэффициента передачи. Его частотная зависимость называется фазочастотной характеристикой (ФЧХ).

2.3 Главное меню пакета MathCAD для Windows и порядок работы с программой

Запуск пакета *MathCAD-2001* осуществляется командой MATHCAD.EXE, после выполнения которой на экране появляется главное меню системы. Для выхода из системы следует нажать клавиши <Alt-F4>.

Первая строка экрана содержит следующие команды главного меню: 1) Файл; 2) Правка; 3) Вид; 4) Вставка; 5) Формат; 6) Математика; 7) Символика; 8) Окно; 9) Помощь.

2.4 Порядок выполнения работы

1. Изучить необходимые сведения по использованию пакетов *MathCAD* для Windows. На основе математической модели полуволнового ППФ с торцевыми индуктивными связями разработать MathCAD-программу его анализа.

2. Выполнить моделирование (анализ) ППФ в диапазоне 0,001–1 ГГц по 200 частотным точкам.

3. Вычислив коэффициенты передачи и отражения построить АЧХ и ФЧХ. Пересчитать значения модулей из безразмерных величин в децибелы по формуле $a, дБ = 20 \lg(a)$. Пересчитать значения аргументов из радиан в градусы по формуле $\phi, град = \frac{180}{\pi} \cdot \phi, рад$. После этого построить графики всех частотных зависимостей.

4. Составить отчет, содержащий цель работы, схему электрическую принципиальную ППФ, текст MathCAD-программы, результаты моделирования (включая графики) с выводами.

2.5 Задание

1. Рассчитать с помощью пакета *Lines Designer* [1, 2] микрополосковую линию (МПЛ), обеспечив ей волновое сопротивление Z_0 равное 50 Ом с погрешностью 1%. Выбрав в качестве исходных диэлектрических и геометрических параметров подложку толщиной $h = 1$ мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10$, найти соответствующую ширину w проводника МПЛ. Для дальнейшего анализа взять рассчитанные значения погонной емкости $C1$ и индуктивности $L1$; погонное сопротивление $R1$ и проводимость $G1$ принять изначально равными нулю. Длину линии принять равной $l = 12$ см.

2. Промоделировать следующие ситуации (провести численный эксперимент на математической модели, «поиграв» параметрами):

а) волновое сопротивление подводящих линий ρ принять равным 50 Ом, затем поварьировать в диапазоне 5...200 Ом. Объяснить изменения в частотных характеристиках (ЧХ);

б) ввести погонные потери $R1$ в диапазоне 1...10 Ом. Объяснить изменения в ЧХ;

в) варьировать значениями входной/выходной индуктивности в диапазоне 1...10 нГ. Объяснить изменения в ЧХ;

г) увеличить/уменьшить в два/три раза длину отрезка ЛП. Объяснить изменения в ЧХ.

2.6 Контрольные вопросы

1. Перечислить основные электрические параметры одиночной линии передачи.

2. Каким образом выполняется нормировка матрицы проводимостей?

3. Записать формулы перехода от нормированной матрицы проводимостей к матрице рассеяния.

4. Что такое S-параметры, какова их физическая интерпретация?

Список использованных источников

1. Сычёв А.Н. Управляемые СВЧ устройства на многомодовых полосковых структурах.– Томск: Том. гос. ун-т, 2001.– 318 с.

2. Сычёв А.Н. Моделирование параметров линий передачи с помощью пакетов *Lines Designer* и *Linpar*. – Методические указания к лабораторной работе №1 по дисциплине «САПР и технология ВЧ и СВЧ устройств». – Томск: ТУСУР. – 2003.– 10 с.

3 АНАЛИЗ СВЧ УСТРОЙСТВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ *MICROWAVE OFFICE-2001*

3.1 Цель работы

Изучить пакеты моделирования СВЧ устройств **Microwave Office-2001**. Изучить правила ввода схемы устройства и числовых исходных данных, а также порядок вывода полученных результатов. Приобрести начальные навыки работы в системе CAD/CAE¹ **Microwave Office-2001** на примере моделирования полосно-пропускающего фильтра (ППФ).

3.2 Общие сведения о системе **Microwave Office-2001** [1–3]

Назначение. Среда проектирования Microwave Office 2001 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

¹CAD – computer aided design (англ.) – проектирование с помощью компьютера, иначе система автоматизированного проектирования (САПР). CAE – 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 дру-

гие типы файлов, которые содержат параметры многополосников в частотной области.

5. **Схемы (Schematics)**. Группа **Schematics** содержит все схемы, которые добавляются к проекту. **Default CKT Options** (CKT 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-Смитта, 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** (микроразрывные 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. Обзорщик ПЕРЕМЕННЫХ (Variable Browser)

Variable Browser (обзорщик 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. Обзорщик ТОПОЛОГИИ (Layout Browser)

Layout Browser (обзорщик 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 импор-

тированы 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.

3.3 Порядок выполнения работы в системе Microwave Office-2001

Изучив необходимые сведения по использованию пакета Microwave Office-2001 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.

В качестве примера представим последовательность создания проекта для анализа полосно-пропускающего фильтра (ППФ), показанного на рис.3.1.

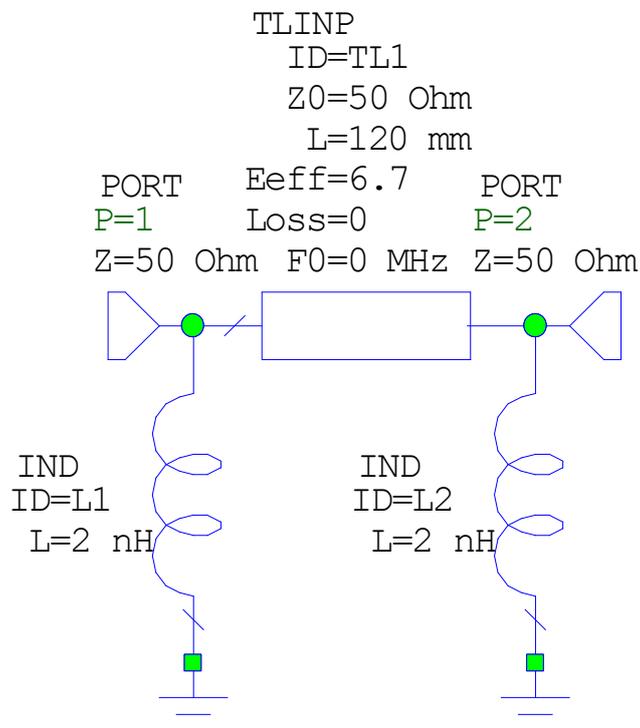


Рис.3.1 Схема полуволнового ППФ с торцевыми индуктивными связями

3.3.1 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) пятым по списку.

3.3.2 «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.

3.3.3 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)=0.1 Stop(GHz)=1 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) ОК.

3.3.4 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.

3.4 Задание

3.4.1 Рассчитать с помощью утилиты **TXLine** из пакета **Microwave Office-2001** микрополосковую линию (МПЛ) с медным проводником (Conductor: copper) толщиной 1 мкм (Thickness), обеспечив ей волновое сопротивление Z_0 равное 50 Ом. Выбрав в качестве исходных диэлектрических и геометрических параметров подложку толщиной $h = 1$ мм с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 10$, найти соответствующую ширину w проводника МПЛ. Чтобы реализовать указанные расчёты необходимо, начиная с главного меню выполнить следующую цепочку действий: Window/ TXLine/ Microstrip. Для дальнейшего анализа берутся волновое сопротивление (Impedance) равное 50 Ом и рассчитанное значение эффективной диэлектрической проницаемости (Effective Diel. Constant). При этом геометрическую длину линии принять равной $l = 12$ см.

3.4.2 Рассчитать схему, показанную на рис.3.1. и промоделировать следующие ситуации (провести численный эксперимент на математической модели, «поиграв» параметрами):

а) волновое сопротивление подводящих линий (портов) принять равным 50 Ом, затем поварьировать в диапазоне 5...200 Ом. Объяснить изменения в частотных характеристиках (ЧХ);

б) значения входной/выходной индуктивностей принять равными 2 нГ, затем поварьировать ими в диапазоне 1...10 нГ. Объяснить изменения в ЧХ;

в) увеличить/уменьшить в два/три раза длину отрезка ЛП. Объяснить изменения в ЧХ.

3.4.3 Рассчитать схему, показанную на рис.3.2, которая является дуальной схеме, показанной на рис.1, и промоделировать следующие ситуации:

а) волновое сопротивление подводящих линий (портов) принять равным 50 Ом, затем поварьировать в диапазоне 5...200 Ом. Объяснить изменения в частотных характеристиках (ЧХ);

б) поварьировать значениями входной/выходной емкости в диапазоне 1...10 пФ. Объяснить изменения в ЧХ. Найти те значения емкостей, при которых обеспечивается идентичность АЧХ фильтров с индуктивными (см. рис.1) и емкостными связями (см. рис.2);

в) увеличить/уменьшить в два/три раза длину отрезка ЛП. Объяснить изменения в ЧХ.

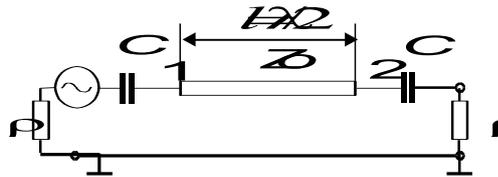


Рис.3.2 Схема полуволнового ППФ с торцевыми емкостными связями

3.4.4 Составить отчет, защитить и сдать его преподавателю.

3.5 Контрольные вопросы

1. Какие два основных подхода для анализа СВЧ устройств реализованы в системе **Microwave Office-2001**?

2. Нужно ли при использовании **Microwave Office-2001** знать математическую модель СВЧ устройства?

3. Какая утилита для анализа линий передачи прилагается к системе **Microwave Office**? Какие типы линий она позволяет рассчитывать?

4. Какие типы графиков могут быть построены в **Microwave Office**?

5. Записать формулу, по которой можно рассчитать значения сосредоточенных емкостей дуального фильтра (рис.3.2), зная значения индуктивностей в исходной схеме ППФ (рис.3.1).

Список использованных источников

1. An advanced integrated layout editor.– Applied Wave Research Inc. / Microwave J.– 1999.–V.42.– N7.– P.166–170.

2. Microwave Office 2000 –AWR // Microwave J.– 2000.–V.43.–N3.– P.186.

3. Bazdar M.B., Djordjevic A.R., Harrington R.F. et al. Evaluation of quasi-static matrix parameters for multiconductor transmission lines using Galerkin's method // IEEE Trans.– 1994.– V.MTT-42.– N7.– P.1223–1228.

4 АНАЛИЗ СВЧ УСТРОЙСТВ НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ *MICROWAVE OFFICE-2001*

4.1 Цель работы

Используя пакеты анализа полосковых линий **Lines Designer**, также моделирования СВЧ устройств **Microwave Office-2001**, выполнить анализ связанных линий и устройств мостового типа на их основе.

4.2 Порядок выполнения работы в системе **Microwave Office-2001**

Изучив необходимые сведения по использованию пакета **Microwave Office-2001** для Windows [1], выполнить следующее:

- 1) создать схемные проекты заданных для анализа схем на связанных линиях;
- 2) изобразить в каждом проекте схему устройства;
- 3) установив параметры анализа СВЧ устройств, создать окна для построения семейства графиков частотных характеристик. Графики АЧХ и ФЧХ строятся в отдельных окнах.

4.3 Задание

4.3.1 Рассчитать с помощью пакета **Lines Designer** связанные микрополосковую и копланарно-желобковую линии (МП КПЖЛ) со следующими конструктивными параметрами (рис.1): $w_1 = 3$ мм, $w_2 = 4$ мм, $s = 3$ мм, $h_1 = 1$ мм, $h_2 = 4$ мм, $a = 12$ мм, $\epsilon = 10$. Из вычисленных электрических параметров связанных линий, включающих погонные емкости, индуктивности и др. выбрать только четыре интересующих: эффективные диэлектрические проницаемости чётного и нечётного типов возбуждения ϵ_{m1} , ϵ_{m2} , а также соответствующие волновые сопротивления Z_{oe} , Z_{oo} . Эти параметры отрезка связанных линий (элемент CLINP) в **Microwave Office-2001** имеют следующие обозначения KE, KO и ZE, ZO. Погонные потери AE, AO принять равными нулю, а длину отрезка – 40 мм.

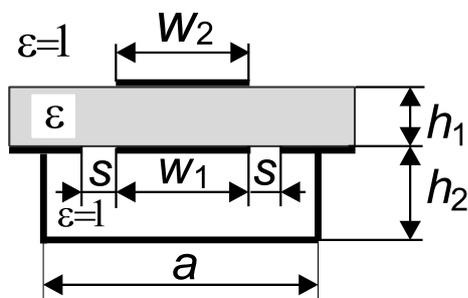


Рис.4.1 Поперечное сечение связанных микрополосковой и копланарно-желобковой линий

4.3.2 Для данного отрезка связанных линий (CLINP), являющегося восьмиполусником и выполняющего функции направленного ответвителя (НО) (рис.4.2), в **Microwave Office-2001** рассчитать и построить амплитудно-частотные характеристики в диапазоне 1–1500 МГц, 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 одном поле (окне), объяснив поведение АЧХ. Для тех же S -параметров построить фазочастотные зависимости, выявив и объяснив величину разности фаз в диагональных выходных плечах (портах) 2 и 3.

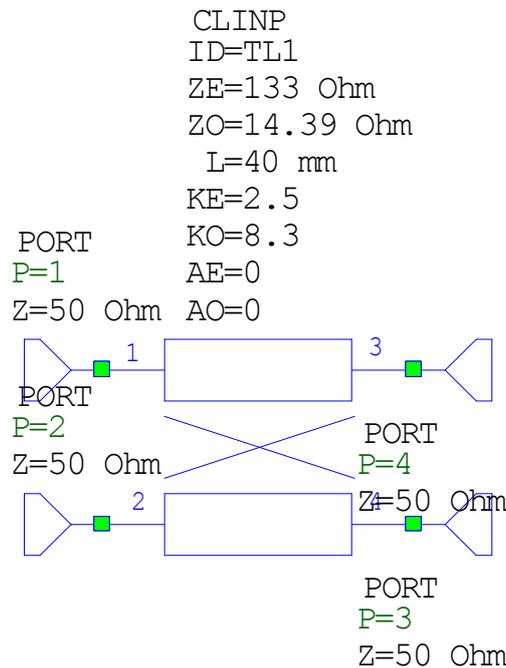


Рис.4.2 Схема отрезка связанных линий являющегося восьмиполусником (четырёх-портовым устройством) и выполняющего функции направленного ответвителя

4.3.3 Введя в диагональных плечах отрезка СЛ с 3-дБ связью идеальные отражающие реактивные нагрузки – КЗ и ХХ – получим идеальный фазовращатель (фазовый манипулятор), у которого амплитуда выходного сигнала при изменении состояния КЗ/ХХ почти не меняется, а фаза вращается на 180 град (рис.4.3). Убедиться в этом, построив графики АЧХ $|S_{21}|$ для режимов КЗ и ХХ в одном окне, а также ФЧХ $\phi_{21}=\arg(S_{21})$ для режимов КЗ и ХХ в другом окне.

4.3.4 Введя в диагональные плечи отрезка СЛ резистивные нагрузки (LOAD) – получим аттенюатор, у которого при синхронном изменении номиналов резисторов (50...1500 Ом) фаза почти не меняется, а амплитуда выходного сигнала изменяется значительно. Убедиться в этом, построив графики АЧХ $|S_{21}|$ в одном окне, а ФЧХ $\phi_{21}=\arg(S_{21})$ в другом окне.

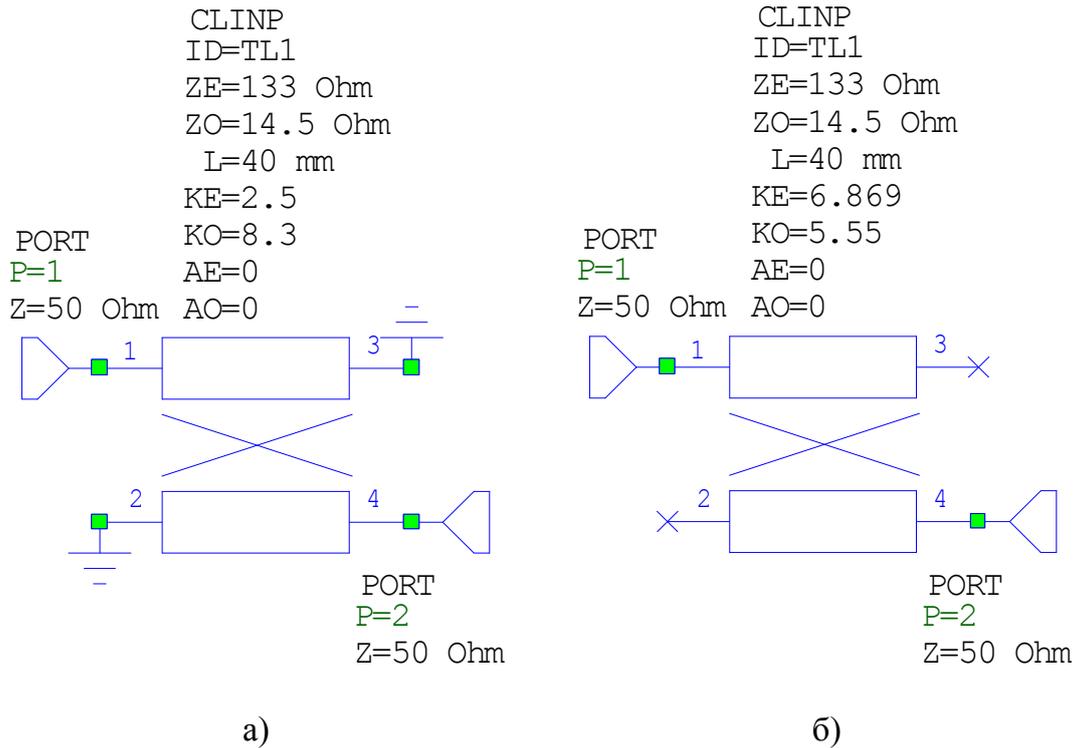


Рис.4.3 Четырехполюсники, образованные из восьмиполюсника, при нагружении его идеально-отражающими нагрузками: а) режим КЗ; б) режим ХХ

4.3.4 Составить отчет, защитить и сдать его преподавателю.

4.4 Контрольные вопросы

1. Какие функции на СВЧ может выполнять отрезок связанных линий? Как называется отрезок связанных линий с 3-дБ связью?
2. Перечислить основные параметры отрезка связанных линий в терминах матрицы рассеяния? Как они связаны с основными параметрами направленного ответвителя?
3. Какие СВЧ устройства можно построить на отрезке связанных линий с 3-дБ связью? Какова эквивалентная схема этих устройств?
4. Перечислить основные параметры СВЧ фазовращателя?
5. Какой полупроводниковый СВЧ элемент может быть использован в качестве управляемой реактивной (емкостной) нагрузки?
6. Каково назначение и основные параметры СВЧ аттенюатора?
7. Какой полупроводниковый СВЧ элемент может быть использован в качестве управляемой активной (резистивной) нагрузки?

Список использованных источников

1. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office, М.: Солон.– 2003.– 500 с.