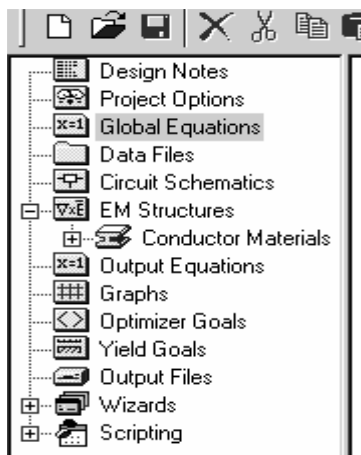


1 Переменные и уравнения

В Microwave Office 2002 можно определить переменные и уравнения, которые можно использовать в любой части проекта (глобальные) или только в какой-то конкретной схеме (локальные). Затем через определённые переменные и уравнения можно выражать параметры элементов схемы или использовать их для обработки результатов моделирования. Это бывает удобно, если в схеме имеется несколько элементов с одинаковым значением параметра. Или если требуется в результате моделирования получить характеристику измеряемой величины, не определённой в Microwave Office, например, получить график рабочего затухания вместо графика модуля элемента матрицы S_{21} .



Определённые в проекте переменные и уравнения могут вовлекаться в процесс настройки и оптимизации, как и параметры элементов схемы.

В окне просмотра проекта имеется два объекта, (группы) определяющие вводимые переменные и уравнения (рис. 1.1):

Рис. 1.1

1. **Global Equations**, определяет глобальные переменные и уравнения.
2. **Output Equations**, определяет переменные и уравнения для обработки результатов моделирования.

1.1 Определение переменных и уравнений

Определение глобальных переменных и уравнений в проекте.

Чтобы определить глобальную переменную или уравнение:

1. Дважды щёлкните по объекту **Global Equations** в окне просмотра проекта. На рабочем поле откроется окно глобальных уравнений **Global Equations**
2. Выберите **Add > Equation** в выпадающем меню или щёлкните по значку **Equation** на панели инструментов. В окне уравнений появится текстовое поле.
3. Наберите в текстовом поле переменную или уравнение, затем щёлкните левой кнопкой мышки вне текстового поля или нажмите клавишу **Enter**.

Определение локальных переменных и уравнений в схеме.

Чтобы определить переменную или уравнение, которые действуют только в какой-то определённой схеме (проект может содержать несколько схем), сделайте окно этой схемы активным и выполните пункты 2 и 3, описанные выше. Определённые таким образом переменные и уравнения действуют только в этой схеме и не могут использоваться в других частях проекта.

Редактирование локальных и глобальных переменных и уравнений.

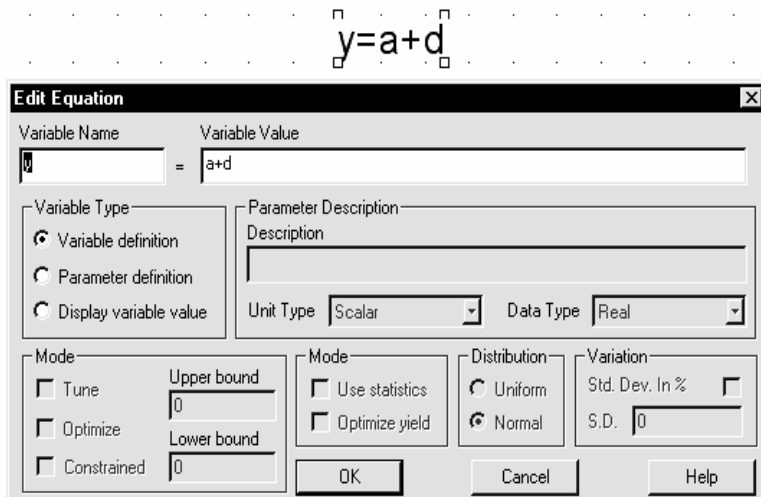


Рис. 1.2

Отредактировать локальную или глобальную переменную или уравнение можно двумя способами:

1. Дважды щёлкните по переменной или уравнению. Откроется текстовое поле для редактирования. Введите в этом поле необходимые изменения и затем щёлкните мышкой вне этого поля или нажмите клавишу **Enter**.

2. Щёлкните левой кнопкой мышки по переменной или уравнению, затем щёлкните по ним правой кнопкой и выберите **Properties** во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно **Edit Equation** (Рис 1.2). В поле **Variable Name** (Имя переменной) вы можете изменить имя переменной, а в поле **Variable Value** (Значение переменной) – изменить значение переменной или отредактировать уравнение.

Назначение параметру значения переменной.

Чтобы назначить значение переменной параметру элемента схемы, дважды щёлкните по этому элементу. Откроется диалоговое окно **Element Options**. Откройте страницу **Parameters** в этом окне, нажав на панель **Parameters** в верхней части окна, и введите имя переменной, значение которой вы хотите назначить параметру, в столбце **Value** напротив имени параметра.

1.2 Выходные уравнения

При моделировании иногда желательно получить результаты таких измеряемых величин, которые не определены в Microwave Office 2002, например, получить график рабочего затухания, развязки и др. Это можно сделать, используя выходные уравнения.

Полученные при моделировании данные (т.е. полученные значения измеряемых величин, например, значения элементов S-матрицы) нельзя непосредственно использовать в уравнениях, т.к. они не связаны ни с каким именем переменной. Для того чтобы связать полученные данные с именем переменной, нужно этой переменной присвоить значения нужной измеряемой величины, полученные при моделировании. Следующий пример присваивает переменной с именем *s_date* значения модуля элемента матрицы S_{11} для схемы усилителя, названной *Ampl*:

$$s_date = Ampl : |S[1,1]|$$

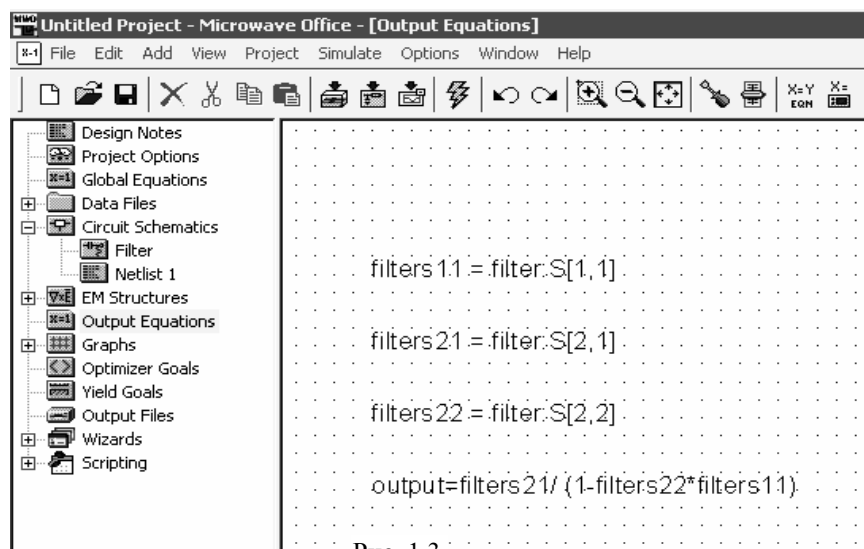


Рис 1.3

После окончания моделирования переменная *s_date* будет содержать значения модуля элемента матрицы S_{11} для каждой частотной точки.

Обратите внимание, что это присвоение указывает не только на то, какой переменной какие данные присвоены, но и имя схемы, при анализе которой эти данные получены.

Определённую таким образом переменную *s_date* теперь можно использовать в любом уравнении.

Можно также получить график этой переменной, но он ничем не будет отличаться от графика модуля S_{11} .

В окне выходных уравнений, показанном на рис. 1.3, *filters11* – переменная, которой присвоено значение элемента матрицы S_{11} для схемы фильтра с именем *filter*.

Конечное выходное уравнение для переменной *output* содержит три переменных, которым присвоены значения разных измеряемых величин (разных элементов S-матрицы), получаемых в результате моделирования.

Следующая таблица перечисляет единицы измерений, которые используются в выходных уравнениях для различных измеряемых величин:

| Измеряемая величина | Единица измерения |
|---------------------|-------------------|
| Частота | Герц (Hz) |
| Мощность | Ватт (W) |
| Напряжение | Вольт (V) |
| Ток | Ампер (Amp) |
| Фаза | Радян (Rad) |
| Время | Секунды (Sec) |
| Индуктивность | Генри (H) |
| Ёмкость | Фарады (F) |
| Температура | Кельвин (K) |

Присвоение переменной результата измеряемой величины.

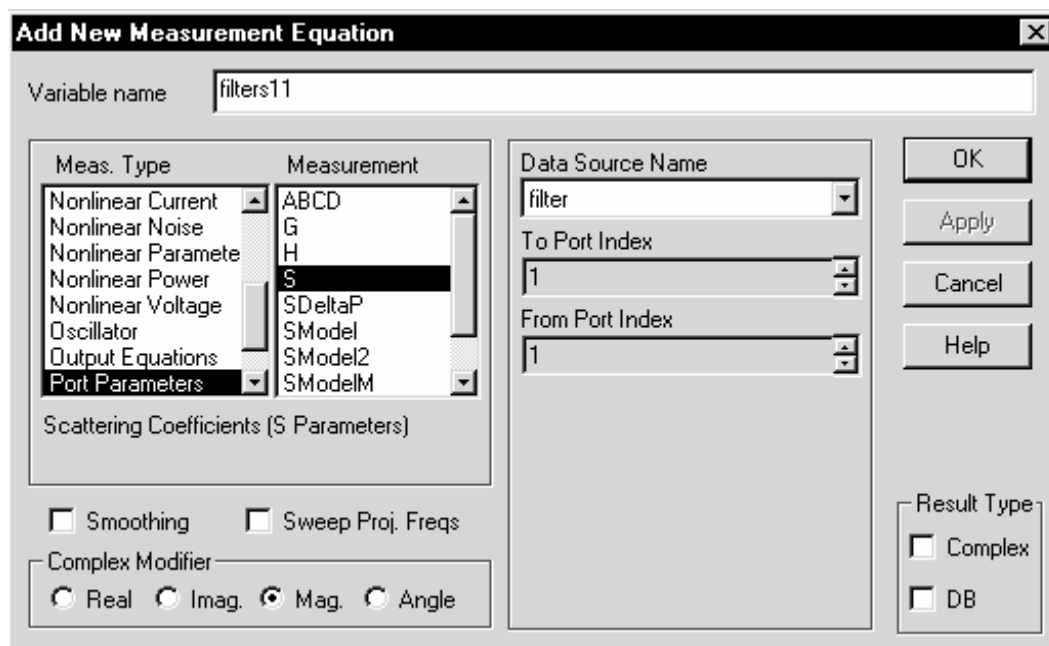


Рис. 1.4

Чтобы присвоить переменной результат измеряемой величины:

1. Дважды щёлкните по объекту **Output Equations** в окне просмотра проекта. На рабочем поле откроется окно выходных уравнений **Output Equations** (рис. 1.3).
2. Выберите **Add > Output Equation** в выпадающем меню. Откроется диалоговое окно **Add New Measurement Equation**, показанное на рис. 1.4.
3. Введите имя переменной в текстовое поле **Variable name** (латинскими буквами!), выберите тип нужной измеряемой величины в поле списка **Meas. Type** и нужную измеряемую величину в поле списка **Measurement**. В поле **Data Source Name** выберите имя нужной схемы из выпадающего списка, нажав на кнопку, справа в этом поле. В области **Result Type** (Тип результата) отметьте **Complex**, если хотите получить переменную в комплексном виде. Если **Complex** не отмечено, переменная будет действительной и в этом случае в области **Complex Modifier** (Модификация комплексного числа) вы должны отметить, что вы хотите присвоить этой переменной (**Real** – действительную часть комплексного числа, **Imag** – мнимую часть, **Mag** – модуль, **Angle** – аргумент). Если к тому же вы хотите, чтобы эта действительная переменная была выражена в дБ, отметьте **DB** в области **Result Type**. Нажмите **OK**.

Определение выходных уравнений для обработки результатов моделирования.

Чтобы определить выходное уравнение:

1. При активном окне выходных уравнений после присвоения переменным результатов измеряемых величин, как описано в предыдущем разделе, выберите **Add > Equation** в выпадающем меню или щёлкните по значку **Equation** на панели инструментов. В окне выходных уравнений появится текстовое поле.
2. Наберите в текстовом поле уравнение (на рис. 1.3 это уравнение $Output=...$), затем щёлкните левой кнопкой мышки вне текстового поля или нажмите клавишу **Enter**.

Замечание. Можно ввести и выходную переменную. Если, например, ввести константу $x=3.0$, то на графике можно получить горизонтальную прямую, показывающую уровень 3 дБ.

Редактирование уравнений для обработки результатов моделирования производится так же, как и редактирование глобальных и локальных уравнений, описанное выше.

Добавление выходной переменной к графику.

Определённая выходная переменная добавляется к графику точно так же, как и любая измеряемая величина:

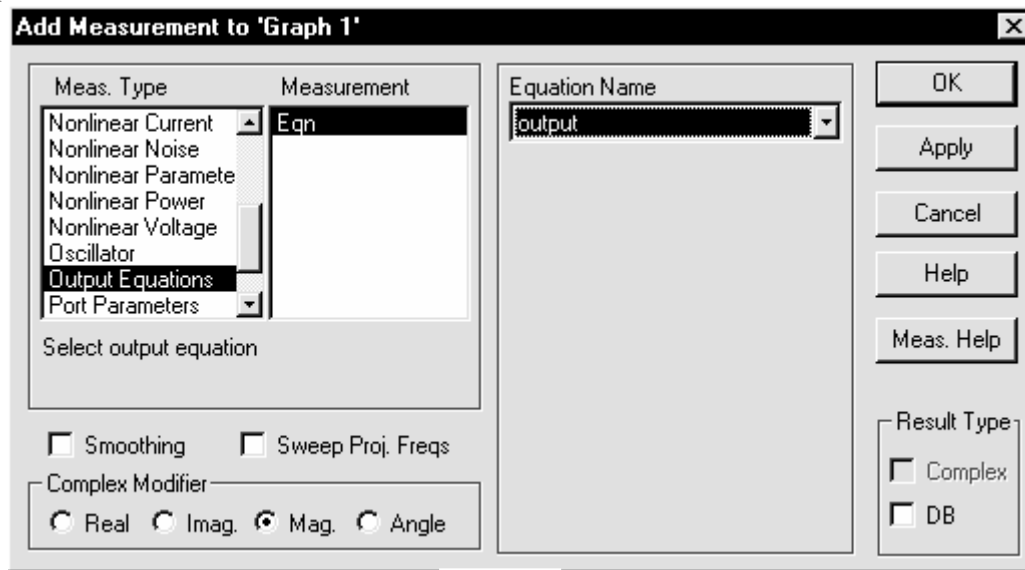


Рис. 1.5

1. Создайте график или сделайте его активным, если он уже создан.
2. Щёлкните правой кнопкой мышки по подгруппе графика в окне просмотра проекта и выберите **Add measurement** или щёлкните по значку **Add measurement** на панели инструментов. Откроется диалоговое окно **Add Measurement**, показанное на рис. 1.5.
3. Выберите **Output Equations** в окне списка **Meas. Type**, выберите **Eqn** в окне списка **Measurement**, выберите выходную переменную в выпадающем списке поля **Equation Name**, щёлкнув по кнопке справа в этом поле. Нажмите **Apply**.
4. Если на одном графике нужно получить характеристики нескольких переменных, выберите поочерёдно следующие переменные, нажимая **Apply** после каждого выбора.
5. Нажмите **OK**.
6. Чтобы выполнить анализ, выберите **Simulate > Analyze** в выпадающем меню или нажмите на значок **Analyze** на панели инструментов. Результаты будут отображены на графике.

1.3 Синтаксис уравнений

Уравнения состоят из имени переменной слева и оператора или математического выражения справа. Синтаксис математического выражения соответствует общим правилам алгебры. В именах не допускаются русские буквы.

Если выражение не верно, оно отображается зелёным цветом и выводится сообщение об ошибке. Если уравнение не видно на экране, дважды щёлкните по ошибке в сообщении, чтобы отобразить уравнение с ошибкой.

Операторы.

В уравнениях могут использоваться следующие операторы:

| Оператор | Описание |
|----------|----------------------|
| + | Сложение |
| - | Вычитание |
| * | Умножение |
| / | Деление |
| ^ | Возведение в степень |

Определение переменных.

Переменной можно присваивать значение константы или математического выражения:

```
A=6  
Val=x*(4+y)
```

Кроме переменных можно определять и функции. Функция состоит из имени функции со списком параметров, заключённым в скобки, слева и математического выражения, определяющего функцию, справа. Следующий пример показывает функцию с двумя параметрами:

```
Sum(a,b)=a+b
```

При использовании этой функции параметры «а» и «b» заменяются любыми справедливыми математическими выражениями. Следующее выражение использует эту функцию для вычисления переменной «С», являющейся суммой числа (-3) и произведения (2*4):

```
C=Sum(-3,2*4)
```

Вычисление даёт C=5.

Определение комплексных чисел.

Переменной можно присваивать комплексное число, используя мнимую глобальную переменную «i» или «j» в качестве множителя, например:

```
Z=50-j*1.3 или Z=50-i*1.3
```

Порядок вычисления выражений.

В математических выражениях действует обычный алгебраический порядок вычисления. Переменная, которую нужно использовать в другом уравнении, должна быть вычислена до её использования.

Порядок вычисления выражений определяется следующим образом:

- Выражения, которые расположены на странице ниже, вычисляются после того, как вычислены выражения, расположенные выше.
- Если два выражения расположены на одной строке, то сначала вычисляется то, которое расположено слева.

Если какой-то переменной присваивается значение другой переменной, которая вычисляется несколько раз, то присваивается последнее вычисленное значение перед присвоением. В следующем примере «b» получает значение 2, а «c» получает значение 3:

```
a=1      a=2      b=a  
a=3  
c=a
```

Встроенные функции.

При создании уравнений можно использовать следующие встроенные функции:

| Функция | Описание |
|-----------|---------------------------------------|
| sin(x) | Синус, x в радианах |
| cos(x) | Косинус, x в радианах |
| tan(x) | Тангенс, x в радианах |
| sinh(x) | Гиперболический синус, x в радианах |
| cosh(x) | Гиперболический косинус, x в радианах |
| tanh(x) | Гиперболический тангенс, x в радианах |
| arcsin(x) | Арксинус, x возвращает в радианах |

| | |
|--------------------------|--|
| arcsin(x) | Аркосинус, x возвращает в радианах |
| arctan(x) | Арктангенс, x возвращает в радианах |
| exp(x) | Экспонента x |
| log(x) | Натуральный логарифм x |
| Log10(x) | Десятичный логарифм x |
| sqrt(x) | Квадратный корень из x |
| stepped(start,stop,step) | Определяет вектор (одномерный массив) действительных значений. Все переменные в векторе должны быть действительными и скалярными. |
| if(cond,trueval,falsval) | Если «cond» – истина, то вычисляется «trueval», иначе – «falsval». «cond» должна быть действительной и скалярной. |
| sign(arg) | Возвращает 0, если $arg = 0$; 1, если $arg > 0$; -1, если $arg < 0$. Здесь «arg» должен быть действительным. |
| heaviside(arg) | Возвращает 1, если $arg \geq 0$ и 0, если $arg < 0$. Здесь «arg» должен быть действительным. |
| vlen(arg) | Возвращает количество переменных в векторе «arg». |
| der(x,y) | Возвращает производную функции x по y. |
| min(a,b) | Векторизует по уменьшению векторы «a» и «b» равного размера. Возвращает вектор значения $a[i] < b[i]$. |
| max(a,b) | Векторизует по увеличению векторы «a» и «b» равного размера. Возвращает вектор значения $a[i] > b[i]$. |
| unwrap(x,d) | Разворачивает фразу. «x» представляет перемещённые данные (обычно фаза) и должен быть действительным. «d» – разделитель, который заставляет добавить смещение $2*d$ к данным, если имеется изменение от одной точки до следующей больше d. «d» должен быть действительным и скалярным. |

Функции комплексной переменной.

Могут использоваться следующие функции комплексной переменной, где z – комплексное число. Эти функции можно использовать только в окне выходных уравнений.

| Функция | Описание |
|----------|--|
| real(z) | Возвращает действительную часть комплексного числа |
| imag(z) | Возвращает мнимую часть комплексного числа |
| angle(z) | Возвращает аргумент комплексного числа |
| conj(z) | Возвращает сопряжённое комплексное число |
| abs(z) | Возвращает модуль комплексного числа |

Встроенные переменные.

В переменных и уравнениях могут использоваться следующие встроенные переменные. Обратите внимание, что переменные _FREQH1, _FREQH2 и _FREQH3 можно использовать только в окне схемы.

| Переменная | Описание |
|------------|--|
| _FREQH1 | Переменная, содержащая первую гармонику в Гц при использовании гармонического баланса в моделировании. Может использоваться только в окне схемы. |
| _FREQH2 | Переменная, содержащая вторую гармонику в Гц при использовании гармонического баланса в моделировании. Может использоваться только в окне схемы. |
| _FREQH3 | Переменная, содержащая третью гармонику в Гц при использовании гармонического баланса в моделировании. Может использоваться только в окне схемы. |
| FREQ | Переменная, содержащая частоту проекта в Гц. |

Глобальные константы.

В переменных и уравнениях могут использоваться следующие глобальные константы:

| Глобальная константа | Описание |
|----------------------|---|
| _PI | Математическая константа $\pi = 3,14159\dots$ |
| i,j | Комплексное число, равное $\sqrt{-1}$ |

Строковые переменные.

В уравнениях кроме действительных и комплексных типов можно использовать строковые типы переменных. При загрузке проектов, созданных в версии 4.0 и более ранних, Microwave Office автоматически включает переменные строкового типа в кавычки. В версии 5.0 вы должны добавить кавычки вручную, чтобы отличить переменные строкового типа от уравнений строкового типа. Необходимо так же включать в кавычки параметр NET для элементов подсхемы, например:

NET="One"

Строки можно складывать (объединять), с помощью оператора «+».

Определение векторов.

Векторы могут содержать действительные, комплексные или строковые типы переменных. Чтобы определить вектор, используйте следующий синтаксис:

$x = \{10, 25, 30, 50\}$
 $x = (i, 3*i, 2*i)$
 $x = \{\text{"One"}, \text{"Two"}, \text{"Three"}, \text{"Four"}\}$

Вектор не может содержать смешанные типы, например, числа и строки. Вектор представляет собой одномерный массив чисел или строк. Чтобы сослаться на конкретное число или строку в массиве, используйте следующий синтаксис: имя вектора с индексом нужного элемента из массива (т.е. с его порядковым номером в массиве) в квадратных скобках. Например:

$x = \{10, 25, 30, 50\}$ $x[1]: 10$ – действительное число 10, стоящее на 1-м месте.
 $x = (i, 3*i, 2*i)$ $x[2]: (0, 3)$ – комплексное число $0 + 3*i$ стоящее на 2-м месте.
 $x = \{\text{"One"}, \text{"Two"}, \text{"Three"}, \text{"Four"}\}$ $x[3]: \text{"Three"}$ – строковая переменная, стоящая на 3-м месте.

Индекс элемента массива должен быть в пределах от 1 до N, где N – количество элементов в массиве.

Вектор можно также определить, используя «пошаговую» функцию stepped(start, stop, step). Если первый элемент в векторе (start) меньше последнего (stop), то шаг (step) должен быть больше нуля. Если первый элемент больше последнего, то шаг должен быть отрицательным.

Элементы массива являются независимыми переменными, которые можно использовать для настройки и оптимизации, не изменяя значения самих переменных в массиве. Т.е. при настройке и оптимизации из массива выбирается тот элемент, при котором характеристика получается лучшей (дискретная настройка или оптимизация). Это ограничение можно отменить, чтобы изменять значение переменной в массиве в пределах всего возможного диапазона её значений.

Оптимизаторы поддерживают дискретную оптимизацию векторных переменных, если они не используют градиентные методы, которые не могут функционировать с дискретными значениями. Указатели оптимизации и случайные оптимизаторы в Microwave Office 2002 поддерживают дискретные значения.

Замечание. В некоторых случаях бывает удобнее задать дискретные значения для изменения параметра вместо непрерывных. Например, если после линейного моделирования предполагается использовать электромагнитное для уточнения характеристики. При электромагнитном моделировании размеры топологических элементов должны быть кратны размерам ячеек сетки. Как правило, размеры, полученные при линейном моделировании, в электромагнитном приходится несколько корректировать. Чтобы избежать

этого, для настройки и оптимизации можно задать допустимые значения параметра в виде дискретного массива (вектора) с шагом, равным размеру ячейки сетки при электромагнитном моделировании. Например, длину отрезка линии задать так:

`lengL=stepped(10,15,0.1)`

Строковые векторы бывает удобно назначать параметру NET (т.е. имени подсхемы, если в схему включена какая-то подсхема). Это позволяет создать набор цепей для использования в качестве подсхемы в виде строкового вектора, в котором содержится список имён созданных цепей. Затем можно настраивать или оптимизировать схему по списку цепей, выбирая лучшую из них из этого списка. На рис. 1.6 показана схема, использующая этот способ. В этом примере S1 – подсхема, которая представляет собой цепь по имени “One”. Вы можете настраивать или оптимизировать параметр NET для любого значения (имени цепи) в векторе «x» (т.е. выбирать любую цепь из списка, определённого в этом векторе). Эта возможность относится к «swappable networks» («видоизменяемые цепи»).

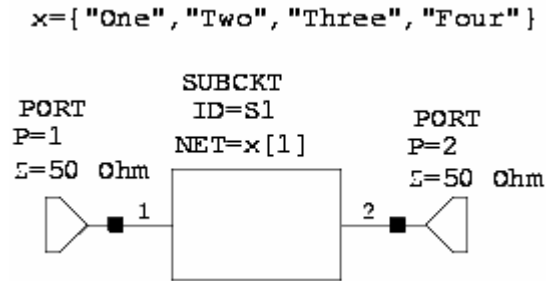


Рис. 1.6

networks» («видоизменяемые цепи»).

Пример 1.1

При моделировании микрополосковой схемы на подложке из поликора, используя переменные и уравнения, можно вместо постоянного значения диэлектрической проницаемости ввести значения, зависящие от частоты, определённые экспериментально. Проще всего это сделать, подобрав формулу, аппроксимирующую экспериментальные данные. Следующее выражение аппроксимирует экспериментальные данные с точностью не хуже 0,15% в диапазоне от 1 ГГц до 20 ГГц:

$$\epsilon_r = th\left(\frac{F-1}{19} * 1.6 - 0.8\right) - 0.041 * (F-1) + 10.914 + 0.00002 * \exp(1.267 * F - 0.053 * F^2)$$

где F – частота в ГГц.

В созданном проекте сделайте окно схемы активным и добавьте к схеме следующие переменные (рис.1.7):

Щёлкните по значку **Add Equation** на панели инструментов и переместите курсор в окно схемы. В поле ввода введите $F = \text{_FREQ} * 1e-9$ (переменная $_FREQ$ содержит частоту в Гц, а в формуле должна быть в ГГц).

`F=_FREQ*1e-9`
`Epsr=tanh((F-1)/19*1.6-0.8)-0.041*(F-1)+10.914+0.00002*exp(1.267*F-0.053*F^2)`

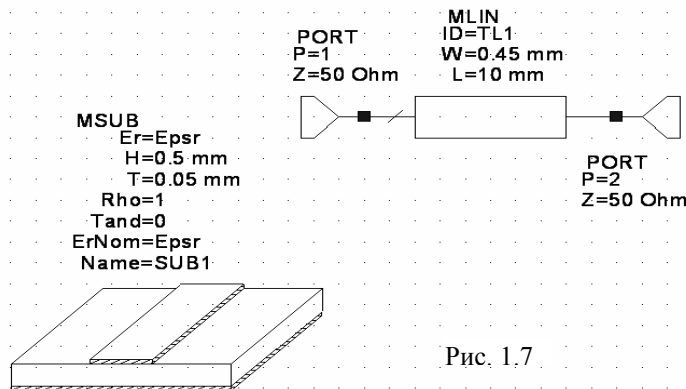


Рис. 1.7

Снова щёлкните по значку **Add Equation** на панели инструментов. В поле ввода наберите:

`Epsr=tanh((F-1)/19*1.8-0.8)-0.041*(F-1)+10.914+0.00002*exp(1.267*F-0.053*F^2)`

$$Epsr = \tanh\left(\frac{F-1}{19} * 1.8 - 0.8\right) - 0.041 * (F-1) + 10.914 + 0.00002 * \exp(1.267 * F - 0.053 * F^2)$$

Дважды щёлкните по подложке и в открывшемся диалоговом окне **Element Options** в столбце **Value** для параметров **Er** и **ErNom** введите **Epsr** (Рис 1.8).

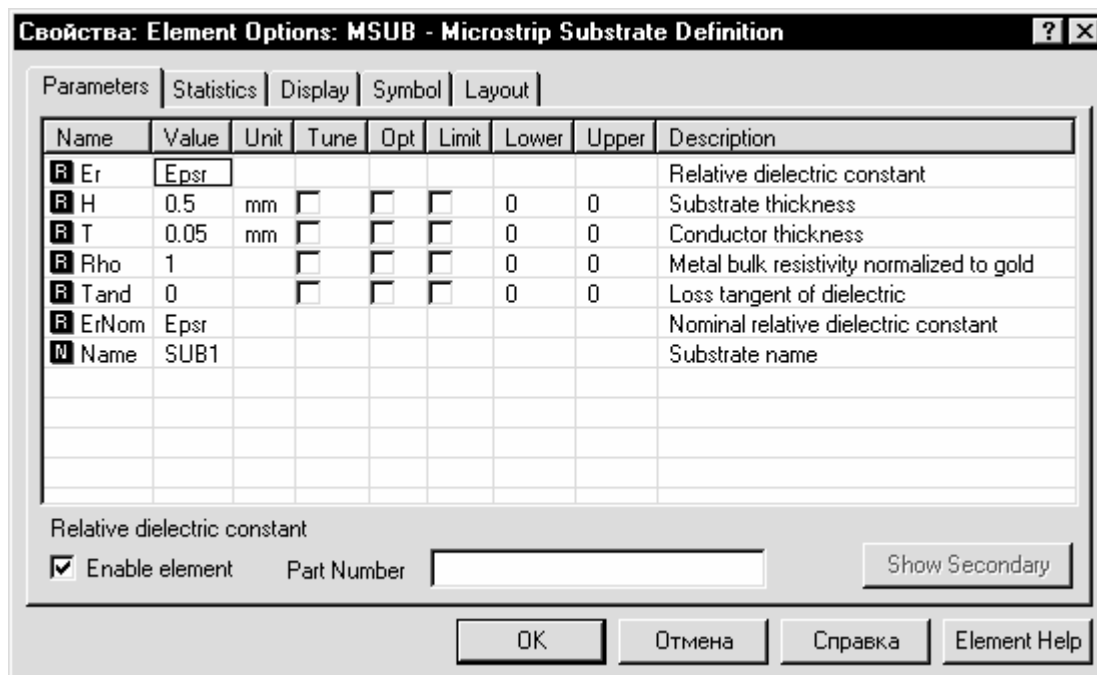


Рис. 1.8

Создайте график, например КСВН. Для этого щёлкните по значку **Add Graph** на панели инструментов. Создав график, щёлкните по значку **Add Measurement** на панели инструментов. В открывшемся окне **Add Measurement** в списке **Meas. Type** (рис. 1.9) отметьте **Linear**, в списке **Measurement** отметьте **VSWR**, в поле ввода **Data Source Name** выберите имя вашей схемы, в поле **Port Index** введите **1**, щёлкая по стрелкам в правой части этого поля, в окошке **DB** снимите галочку, если она стоит. Нажмите **Apply** и затем **OK**.

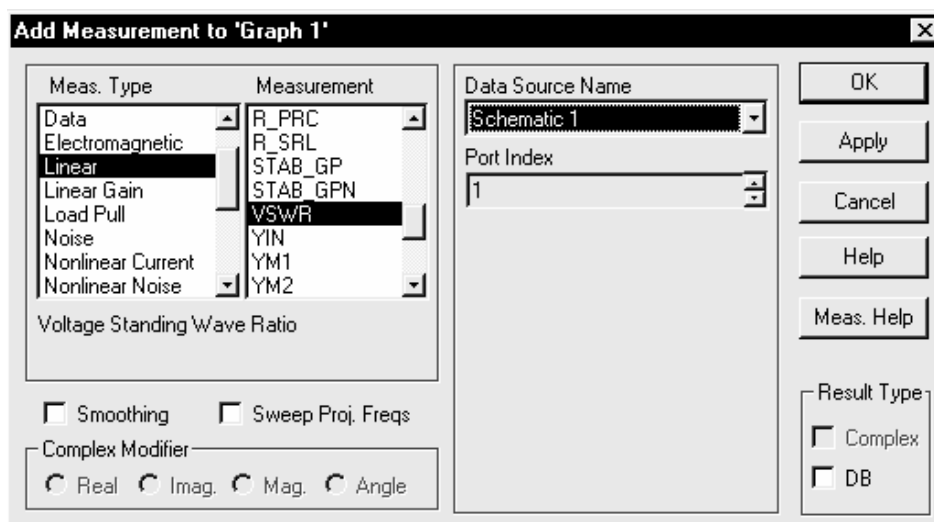


Рис. 1.9

Выполните анализ, щёлкнув по значку **Analyze** на панели инструментов. График КСВН по входу для отрезка линии на полукоре толщиной 0,5 мм с учётом зависимости диэлектрической проницаемости от частоты показан на рис. 1.10.

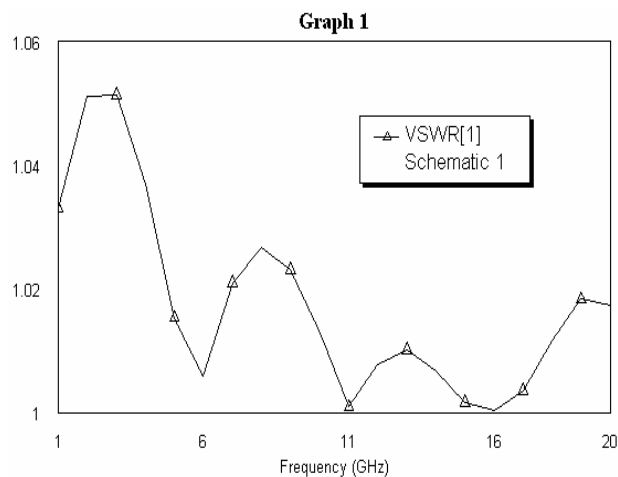


Рис. 1.10

При желании, чтобы проверить соответствие используемых в проекте значений диэлектрической проницаемости экспериментальным данным, можно вывести график диэлектрической проницаемости. Для этого в окне схемы выделите введённые переменные, установив курсор выше и левее этих переменных, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская её, переместите курсор правее и ниже переменных, нажмите на значок **Copy** на панели инструментов. Дважды щёлкните по группе **Output Equations** в окне просмотра проекта. Откроется диалоговое окно **Output Equations**. Щёлкните по значку

Paste на панели инструментов и поместите скопированные переменные в окне **Output Equations**.

Обратите внимание. Чтобы вывести график диэлектрической проницаемости, необходимо продублировать переменную и уравнения в окне выходных переменных. Из окна схемы график этих переменных не увидит.

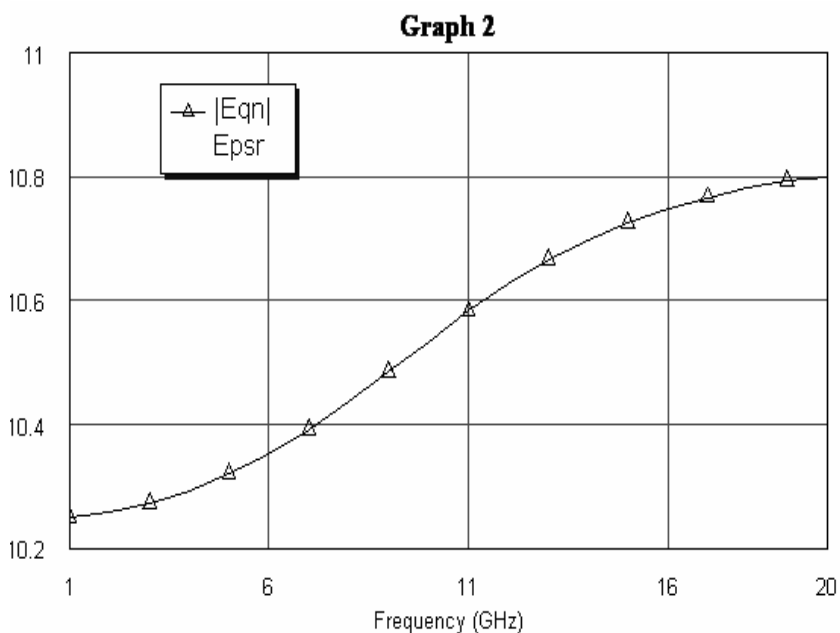


Рис. 1.11

Создайте график, щёлкнув по значку **Add Graph** на панели инструментов. Добавьте к графику измеряемые величины, щёлкнув по значку **Add Measurement** на панели инструментов. В открывшемся окне **Add Measurement** в списке **Meas. Type** отметьте **Output Equation**, в списке **Measurement** отметьте **Eqn**, в поле ввода **Equation Name** выберите **Epsr**, в окошке **DB** снимите галочку, если она стоит. Нажмите **Apply** и затем **OK**. Выполните анализ, щёлкнув по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график ди-

электрической проницаемости показан на рис. 1.11. Эти данные можно получить и в табличном виде.

2 Настройка

В Microwave Office имеется блок настройки, который позволяет производить настройку схемы, изменяя значение параметров её элементов, в реальном режиме времени, т.е. изменяя значение параметра можно сразу наблюдать изменение характеристики.

Прежде чем производить настройку, необходимо назначить для настройки те параметры элементов и независимые переменные, включённые в схему, значения которых вы хотите менять при настройке. Это можно сделать двумя способами.

1-й способ.

- Щёлкните левой кнопкой мышки по видимой части окна схемы или дважды щёлкните по подгруппе схемы в окне просмотра проекта, чтобы сделать окно схемы активным на рабочем поле.
- Щёлкните по значку **Tune Tool** (Инструмент настройки) на панели инструментов.

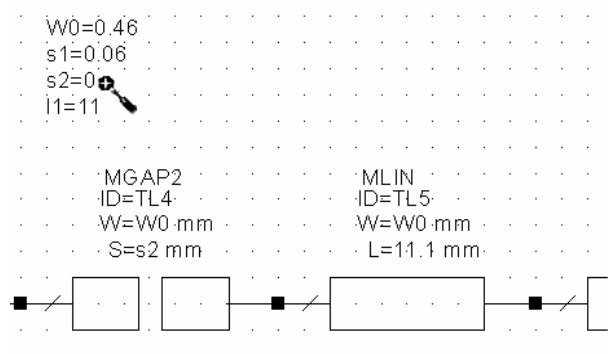


Рис. 2.1

как показано на рис. 2.1.

- Щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы включить параметр или переменную в настройку. Параметр или переменная будут отображаться другим (синим) цветом.

- Переместите курсор в окно схемы и установите его на параметр элемента схемы или на переменную, значение которых вы хотите изменять в процессе настройки. Курсор при правильной установке на изменяемый параметр или переменную меняет форму и отображается в виде белого перекрестия в чёрном кружке (напоминает шлицы на винтах под крестообразную отвёртку),

- Чтобы исключить назначенный параметр или переменную из настройки, снова щёлкните по ним инструментом настройки. При этом цвет параметра или переменной станет прежним.

| T | O | C | Elem... | Name | Value |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|-------|-------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | TL1 | L | 3 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | TL5 | L | 11.1 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | TL9 | L | 3 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | SUB1 | Er | 10.54 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | SUB1 | H | 0.5 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | SUB1 | T | 0.02 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | SUB1 | Rho | 1 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | SUB1 | Tand | 0 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | SUB1 | ErNom | 10.54 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | P1 | Z | 50 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | P2 | Z | 50 |

Рис. 2.2

2-й способ.

При этом способе на рабочем поле может быть активным любое окно, например, окно графика.

Нажмите на панель **Var** в нижней части левого окна. Откроется окно просмотра переменных, рис. 2.2. В верхней части этого окна отображается группа параметров схемы (на рис. 2.2 это группа **File**), которая включает в себя значения параметров всех элементов схемы. В нижней части окна просмотра элементов перечислены все параметры элементов, имеющихся в схеме. Здесь в первом столбце таблицы имеются три маленькие кнопки, определяющие режим, в котором может использоваться параметр (**T** – параметр может настраиваться, **O** – параметр может оптимизироваться, **C** – значения параметра должны иметь ограничения) и имя элемента схемы, в который входит параметр. Во втором столбце **Name** указано имя параметра. В третьем столбце **Value** указано значение параметра, которое ему было установлено в схеме. Чтобы включить параметр в настройку, щёлкните по кнопке **T** напротив имени параметра, который вы хотите настраивать. Кнопка при

этом изменит цвет. Чтобы исключить параметр из настройки, щёлкните по этой кнопке ещё раз.

Если в схеме определены независимые переменные, то они в окне просмотра параметров отображаются в виде подгруппы в группе параметров схемы (на рис.1.2 это подгруппа **File Equations**). Чтобы увидеть независимые переменные, разверните группу параметров схемы, щёлкнув по значку + слева от группы, и затем щёлкните по подгруппе независимых переменных. Установка независимых переменных для настройки делается точно так же, как и параметров элементов.

Оба способа включения параметра или переменной в настройку эквивалентны. Если вы назначили параметр или переменную в настройку в схеме, то в окне просмотра переменных кнопка **T** будет также нажата и отображена другим цветом (обычно синим), и наоборот.

Замечание. Значение параметра или независимой переменной можно также установить или изменить не в схеме, а в окне просмотра переменных в столбце **Value** и это будет немедленно отображено и на схеме.

Пример 2.1.

В качестве примера рассмотрим моделирование 3-х резонаторного микрополоскового полосно-пропускающего фильтра с емкостными связями.

Создайте новый проект и присвойте ему имя **CFil**, выбрав сначала **File > New Project** и затем **File > Save Project As** в выпадающем меню.

Создайте новую схему, выбрав **Project > Add Schematic > New Schematic** в выпадающем меню или щёлкнув по значку **New Schematic** на панели инструментов, и присвойте ей имя **Fil**. На рабочем столе откроется окно схемы, и новая схема появится как подгруппа **Fil** в группе **Circuit Schematics** в окне просмотра проекта.

Нарисуйте схему в окне схемы. Для этого нажмите на панель **Elem** в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра элементов. Разверните группу микрополосковых элементов **Microstrip**, щёлкнув по значку + слева от этой группы. Щёлкните по подгруппе **Lines** в этой группе. Найдите модель **MLIN** в нижней части левого окна, пользуясь полосой скроллинга. Нажмите на эту модель левой кнопкой мышки и, не отпуская кнопки, перетащите её в окно схемы, отпустите кнопку мышки, поместите модель в удобном месте окна схемы и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать. Щёлкните по подгруппе **Other** (Другие), выберите модель **MGAP2**, переместите её в окно схемы и подсоедините к правой клемме модели **MLIN**. Нажмите клавишу **Shift** и, не отпуская её, щёлкните по модели **MLIN** и затем по модели **MGAP2**. Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Поместите скопированные элементы в окно схемы и подсоедините их к правой части схемы. Дважды повторите эту операцию, щёлкая по значку **Paste** и подключая скопированные элементы к правой части схемы, чтобы получилось три резонатора в фильтре. Щёлкните по элементу **MLIN**, затем по значкам **Copy** и **Paste**, и подключите скопированный элемент к правой части схемы.

Подключите к схеме порты. Для этого щёлкните по значку **Add Port** на панели инструментов, переместите курсор в окно схемы и поместите его на левом конце схемы. Снова щёлкните по значку **Add Port** и поместите его на правом конце схемы, предварительно развернув порт на 180 градусов, щёлкая правой кнопкой мышки.

Поместите в схему описание подложки. Для этого щёлкните по группе **Substrates** (Подложки) в окне просмотра элементов, перетащите элемент **MSUB** в окно схемы и поместите его на любом свободном месте.

Схема фильтра является симметричной. Значения параметров симметричных элементов должны иметь одинаковые значения, и при настройке и оптимизации должны также изменяться на одну и ту же величину. Ширина проводников при изготовлении имеет примерно одинаковый разброс для всех элементов. Поэтому эти параметры должны быть введены в схему, как независимые переменные, т.е. не привязанные к какому-то конкретному элементу. Чтобы ввести в схему переменные, выберите **Schematic > Add Equation** в выпадающем меню и переместите курсор в окно схемы. Появится окошко редактора в виде небольшого квадрата. Поместите это окошко на свободном месте схемы и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать. Наберите **W0=0.46** в окне редактора и щёлкните мышкой вне этого окна или нажмите клавишу **Enter**. Аналогично введите переменные **s1=0.06**, **s2=0.3**, **L1=10.7**.

Теперь нужно назначить значения параметрам элементов схемы. Дважды щелкните по первому зазору схемы. Откроется окно свойств элемента **Element Options**. В столбце **Value** (Значение) введите **W0** для ширины проводника и **s1** для ширины зазора. Аналогично эти же значения назначьте последнему зазору. Двум средним зазорам назначьте значения **W0** и **s2**. Дважды щёлкните по первому резонатору и назначьте его ширине значение **W0**, а длине – **L1**. Эти же значения параметров назначьте последнему резонатору. Дважды щёлкните по среднему резонатору и назначьте его ширине значение **W0**, а длине – **10.7** мм (т.к. этот резонатор один и не имеет симметричной пары, то его длине не обязательно присваивать значение независимой переменной). Дважды щёлкните по первому входному проводнику и назначьте его ширине значение **W0**, а длине любое, например **3** мм. Эти же значения параметров назначьте последнему выходному проводнику. Дважды щёлкните по подложке и назначьте диэлектрической проницаемости **Er** значение **10.54**, толщине подложки **H** – **0.5** мм, толщине проводника **T** – **0.02** мм и **ErNom** – **10.54**.

Замечание. Чтобы назначить значение параметру элемента схемы или подложки, можно дважды щёлкнуть не по элементу, а по параметру, которому нужно назначить (или изменить) значение. В этом случае откроется небольшое окно редактирования, в котором можно ввести необходимое значение.

Полученная схема показана на рис. 2.3.

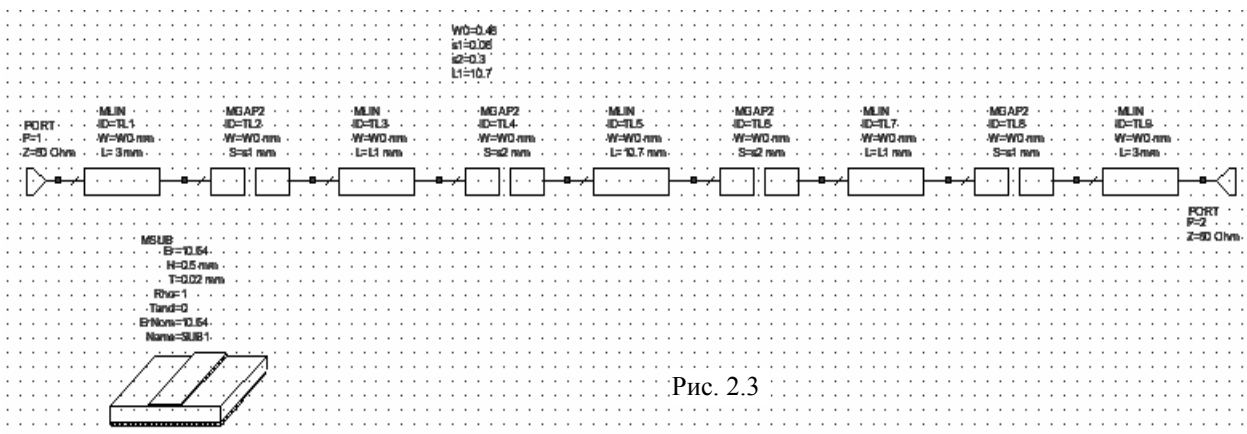


Рис. 2.3

Задайте диапазон частот для моделирования. Для этого дважды щёлкните по группе **Project Options** и в открывшемся диалоговом окне нажмите на панель **Frequency Values**. Наберите **9.7** ГГц в поле **Start**, **10.3** ГГц – в поле **Stop** и **0.01** ГГц – в поле **Step**. Нажмите **Apply** и затем **OK**.

Создайте график. Для этого щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Graphs** в окне просмотра проекта и выберите **Add Graph** во всплывающем меню или щёлкните по значку **Add Graph** на панели инструментов. В открывшемся окне **Create Graph** введите имя графика **S21** и отметьте **Rectangular** (Прямоугольный).

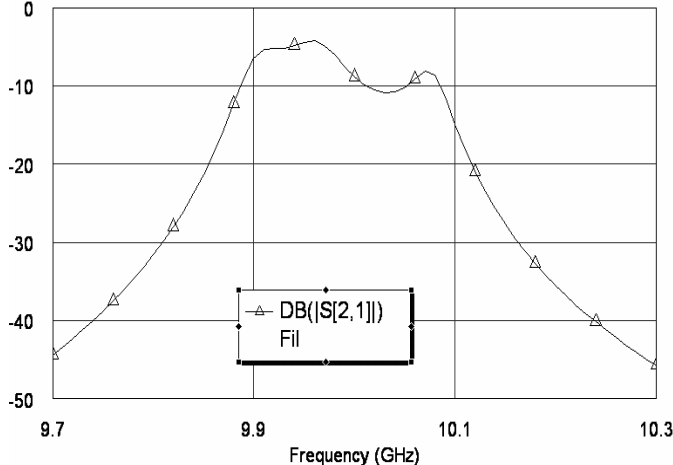


Рис. 2.4

Добавьте измеряемые величины. Для этого щёлкните правой кнопкой мышки по подгруппе **S21** в окне просмотра проекта и выберите **Add Measurement** во всплывающем меню или щёлкните по значку **Add Measurement** на панели инструментов. Выберите **Port Parameters** в окне списка **Meas Type**, выберите **S** в окне списка **Measurement**, выберите **Fil** в поле **Data Source Name**, выберите **2** в поле **To Port Index** и **1** в поле **From Port Index**, отметьте **Mag** и **DB**, нажмите **Apply** и затем **OK**.

Выполните анализ фильтра, выберите **Simulate > Analyze** в выпадающем меню, или щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика фильтра будет отображена на графике рис. 2.4.

Для настройки фильтра, нужно изменять ширины зазоров и длины резонаторов. Чтобы назначить соответствующие переменные для настройки, щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов при активном окне схемы и выделите независимые переменные, чтобы увеличить их отображение для более удобной работы. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Tune Tool** на панели инструментов, поместите курсор на переменную **s1**, и снова щёлкните левой кнопкой мышки. Аналогично назначьте для настройки переменные **s2** и **L1**. Цвет этих переменных изменится на синий. Теперь дважды щёлкните по среднему резонатору схемы и, в открывшемся диалоговом окне, щёлкните по небольшому квадратику в столбце **Tune** напротив параметра **L** и нажмите **OK**.

Сделайте активным окно графика. Для этого щёлкните левой кнопкой мышки по видимой части этого окна или дважды щёлкните по подгруппе графика **S21** в окне просмотра проекта.

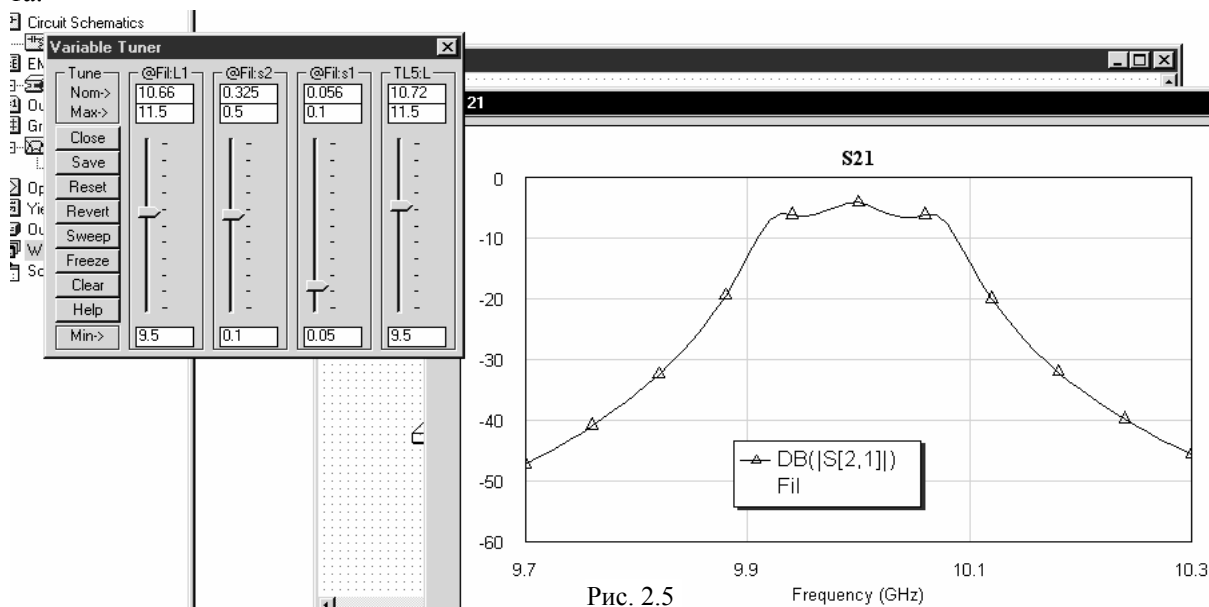


Рис. 2.5

Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Tune** на панели инструментов. Откроется окно блока настройки **Variable Tuner**, показанное на рис. 2.5. В этом окне слева расположен ряд кнопок:

- **Close** – Закрыть (закрывает окно блока настройки);
- **Save** – Сохранить (сохраняет набор значений переменных, соответствующие данному моменту настройки под именем, которое можно ввести в открывшемся окне. Сохранять наборы элементов можно когда угодно в процессе настройки и их количество не ограничивается);
- **Reset** – Сброс (возвращает переменным первоначальные значения);
- **Revert** – Возвратить (возвращает значения, сохранённые при настройке нажатием кнопки **Save**. При нажатии на эту кнопку открывается окошко со списком, в котором перечислены запомненные значения переменных в различные моменты настройки. Из этого списка нужно выбрать, к каким именно переменным нужно вернуться.);
- **Sweep** – Развернуть (Отменяет только что сделанное закрепление характеристики кнопкой **Freeze**.);
- **Freeze** – Закрепить (Закрепляет полученную характеристику в какой-то момент настройки, которая будет постоянно отображаться на графике при дальнейшей настройке. Закрепить можно сколько угодно промежуточных настроек.);
- **Clear** – Очистить. (Убирает с графика все закреплённые характеристики.);
- **Help** – Помощь (Открывает описание окна блока настройки).

Замечание. Если вы закрепляете характеристику кнопкой **Freeze**, полезно одновременно сохранить и соответствующий набор значений переменных с помощью кнопки **Save**. Это даст возможность в любое время вернуться к закреплённой характеристике, используя кнопку **Revert**.

Обратите внимание. Вернуться к закреплённой с помощью кнопки **Save** характеристике можно только при открытом окне блока настройки. После закрытия этого окна, закреплённые значения параметров пропадают.

В окне блока настройки имеются поля ввода **Nom**, **Max** и **Min**. В поле **Nom** отображается номинальное значение переменной, которое она имеет в данный момент настройки. В полях **Max** и **Min** отображаются максимальное и минимальное значения соответственно, в пределах которых можно изменять значение переменной при настройке. При открытии окна блока настройки эти поля заполняются автоматически по умолчанию, но их содержание можно изменить на более удобные для проведения настройки. В нашем случае удобно уменьшить диапазоны регулировки переменных, установленные по умолчанию, на более узкие диапазоны, чтобы регулировка была плавной. Для переменных **L1** и **L** введите в поле **Max** значение **11.5**, в поле **Min** – **9.5**. Для переменной **s1** введите в поле **Max** значение **0.1**, в поле **Min** – **0.05**. Для переменной **s2** введите в поле **Max** значение **0.5**, в поле **Min** – **0.1**.

Замечание. При установке границ регулировки и при настройке параметров следите, чтобы значения параметров не выходили за пределы применимости модели. Если значение какого-либо параметра при настройке выйдет за пределы применимости модели, работа программы будет остановлена с выдачей сообщения об ошибке. Например, модель зазора **MGAP2** справедлива при значениях $0.5 < W/H < 2.5$, $0.1 < S/H < 1$ и $1 < \varepsilon_r < 16$. Если в процессе настройки ширину зазора сделать 0.049 мм, то будет выдано сообщение об ошибке. Пределы применимости модели можно найти в описании этой модели в каталоге элементов.

Для выполнения настройки, установите курсор в блоке настройки на движок, соответствующий настраиваемой переменной, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская её, двигайте движок. Результаты настройки отображаются на графике. Для настройки фильтра на полосу пропускания от 9,92 ГГц до 10,08 ГГц установите движки так, чтобы значения переменных были равны **L1=10.66**, **L=10.72**, **s1=0.056**, **s2=0.325** (эти значения отображаются в поле **Nom**). Полученная характеристика показана на рис. 2.5.

Закройте окно блока настройки.

Сделав активным окно схемы, вы можете убедиться, что переменным и параметрам элементов на схеме присвоены значения, полученные после настройки.

Сохраните проект, выбрав **File > Save Project** в выпадающем меню (этот проект пригодится в следующих разделах).

3 Оптимизация

Оптимизация – это процесс, в котором Microwave Office 2002 автоматически корректирует назначенные для оптимизации параметры электрической цепи (например, значение схемного элемента, отрезка линии передачи и др.) для достижения заданных целей оптимизации (например, уменьшение шумов, уменьшение неравномерности усиления и др.). Параметры электрической цепи, назначенные для оптимизации, должны быть или изменяемыми параметрами элементов схемы, или независимыми переменными, которые определены в схеме. Параметры и переменные могут быть назначены для оптимизации в редакторе их свойств или в окне просмотра переменных.

Процесс оптимизации заключается в попытке найти минимум или максимум целевой функции, которая определяет разницу между расчётной и желательной характеристикой. Оптимизация – это итерационный процесс. Microwave Office 2002 вычисляет целевую функцию, затем изменяет значение параметров и вычисляет целевую функцию снова. Алгоритмы оптимизации стремятся изменить параметры и переменные так, чтобы характеристика приближалась к установленным целям (т.е., чтобы ошибка уменьшалась) после каждой итерации.

Важная особенность Microwave Office 2002 состоит в том, что шумовые, линейные и нелинейные характеристики могут оптимизироваться одновременно.

3.1 Целевая функция

Оптимизаторы Microwave Office корректируют значение переменных, назначенных для оптимизации, чтобы достигнуть целей оптимизации, которые определены как подгруппы в группе **Optimizer Goals** (Цели оптимизации) в окне просмотра проекта. Оптимизаторы делают это минимизируя целевую функцию, определённую следующим образом:

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^{Q_n} \frac{W_n}{Q_n} |G_n(f_q) - M_n(f_q)|^{L_n}$$

где

f_q – частота анализа;

$|G_n - M_n|$ – ошибка в параметре;

M_n – модуль S-параметра, коэффициент шума, уровень интермодуляционных шумов или другая величина;

N – количество целей, определённых для оптимизации;

q_n – количество частотных точек, попадающих в диапазон цели;

W_n – вес;

L_n – норма целевой функции.

Очевидно, если параметр M_j имеет больший вес W_j , то ошибка этого параметра вносит больший вклад в изменение целевой функции, и оптимизатор будет уменьшать ошибку в параметре M_j больше, чем в других параметрах с меньшим весом.

Показатель степени L в целевой функции определяет норму вектора целевой функции (например, минимизирование нормы второго порядка эквивалентно установке значения $L = 2$). Вектор ошибки является вектором скалярных значений, которые представляют ошибку параметра в наборе частотных точек. Полная функция ошибки является суммой значений функций ошибки для каждой цели, определённой в проекте.

Обычно выбирают $L = 2$, что соответствует целевой функции наименьших квадратов. Значение $L = 1$ соответствует обычной алгебраической сумме ошибок и не даёт приемлемого значения целевой функции вследствие взаимной компенсации положительных и отрицательных ошибок. Если $L > 2$, то больший вес автоматически придаётся большим ошибкам. При этом направление поиска в большей степени уводится в сторону, противоположную большей ошибки, что не всегда совпадает с направлением оптимума. Если $L = 0$, получим минимаксное

определение целевой функции. В этом случае при оптимизации эффективно минимизируется максимальное отклонение от цели. Однако одной из трудностей, с которыми сталкиваются при минимаксной формулировке, является появление разрывных производных.

Значение L может быть задано индивидуально для каждой цели. Это позволяет при оптимизации для одной цели использовать функцию наименьших квадратов ($L = 2$), а для другой – минимаксную ($L = 0$).

3.2 Рекомендации по использованию оптимизации

Ограничение количества частот.

В процессе оптимизации электрическая цепь анализируется в каждой частотной точке установленного для анализа диапазона. Уменьшая число частот, можно существенно сократить время оптимизации. В узкополосной электрической цепи часто достаточно использовать только граничные частоты рабочего диапазона. И даже в широкополосных цепях редко необходимо использовать много частотных точек.

Критерии окончания.

Оптимизация заканчивается, когда выполнено заданное количество итераций, или когда целевая функция уменьшается до нуля, или когда оптимизация прервана пользователем, или когда оптимизатор определяет, что дальнейшее улучшение не возможно. Не бойтесь прерывать оптимизацию. Когда вы её запустите снова, оптимизация начнётся с тех значений переменных, которые они имели после прерывания оптимизации.

Будьте терпеливы при проведении оптимизации. Она часто длится долгое время и может показаться, что ничего не происходит. Microwave Office гарантирует, что оптимизатор работает над проблемой.

Выбор частот.

Выбор частот влияет почти так же, как и выбор весов. Диапазон, имеющий много частотных точек, в весовом отношении нагружен более эффективно, чем диапазон, имеющий только несколько точек.

Противоречивые цели.

Даже наилучшие оптимизаторы являются нетривиальными устройствами и требуют «интеллектуального» подхода. Основной причиной для большинства неудач оптимизатора является попытка заставить оптимизатор делать то, что сделать невозможно или неразумно. Например, оптимизировать усилитель одновременно для коэффициента шума, согласования и коэффициента усиления.

Установка противоречивых целей задерживает процесс оптимизации или препятствует ему. Часто бывает не очевидно, что цели противоречивы. Например, следующая установка целей обычно даёт плохие результаты применительно к моделированию транзисторного усилителя:

$\text{Muamp DB}(|S[2,1]|) = 12$ – коэффициент усиления;

$\text{Muamp DB}(|S[2,2]|) = -30$ – коэффициент отражения по выходу;

$\text{Muamp DB(NF)} < 10$ – коэффициент шума.

Такая установка ограничений нацеливает оптимизатор на минимизацию коэффициента шума и согласования по выходу при достижении конкретного коэффициента усиления. Этот набор целей может казаться разумным, но фактически здесь устанавливается три ограничения на согласующую цепь, тогда как выполнить можно только два, т.к. доступны две степени свободы (полное сопротивление нагрузки и источника). Такие требования, конечно, часто реальны и необходимы, но они требуют компромиссов. Оптимизатор может быть полезен при решении таких компромиссов, но сам он с ними не справится.

Минимизация шума и минимизация интермодуляционных помех, в сущности, противоречивые цели. Фактически любая оптимизация, затрагивающая интермодуляционную характеристику, вероятно, входит в тонкий конфликт с любой другой характеристикой.

Локальные и глобальные минимумы.

Локальные оптимизаторы обычно находят только локальный минимум и не могут найти глобальный, если, конечно, он не совпадает с локальным минимумом. Следовательно, наиболее успешная оптимизация происходит, когда начальные значения параметров таковы, что локальный сильнейший минимум является и глобальным, и когда пользователь может экспериментировать с весовыми коэффициентами и частотными диапазонами, ограничивать число переменных, пробовать другие методы оптимизации, если предыдущий не дал удовлетворительных результатов. Например, следующий подход является целесообразным при моделировании малошумящего транзисторного усилителя:

- 1) Спроектируйте входную цепь и оптимизируйте её для коэффициента шума используемого транзистора, описанного своими S-параметрами и оперируя только шумом.
- 2) Вычислите выходной коэффициент отражения.
- 3) Спроектируйте выходную согласующую цепь и оптимизируйте её для определённой величины коэффициента усиления или для согласования с сопряжённым полным сопротивлением (но не оба). Оптимизируйте цепь усилителя в целом для коэффициента усиления или согласования на выходе и коэффициента шума.

Оптимизируя цепь по частям, мы с большей вероятностью достигнем успеха в проектировании.

Меры по уменьшению времени оптимизации.

Соблюдайте следующие меры для уменьшения времени оптимизации:

- Используйте по возможности небольшое количество частотных точек в процессе оптимизации;
- Минимизируйте количество переменных и узлов цепи;
- Если в схеме многократно используется структура из одних и тех же элементов, оформите её в виде отдельной схемы и введите в основную схему в качестве подсхемы;
- Упрощайте цели оптимизации насколько это возможно;
- Не бойтесь экспериментировать с оптимизаторами (т.е. методами оптимизации), целями и весами.
- Начинайте с таких значений параметров, которые заведомо близки к оптимальным значениям.
- Не устанавливайте противоречивые цели оптимизации.

3.3 Назначение параметров элементов для оптимизации и ограничение их значений

Любой параметр элемента и любую независимую переменную можно назначить для оптимизации. При необходимости значения параметров и переменных можно ограничить верхней и нижней границами, за которые не должны выходить их возможные значения. Оптимизатор не увеличивает величину переменной выше установленной верхней границы и не уменьшает ниже нижней. Назначить параметр элемента или переменную для оптимизации можно 2-мя способами.

1-й способ.

Если на рабочем поле окно схемы не активно, сделайте его активным, щёлкнув левой кнопкой мышки по видимой части этого окна, или дважды щёлкните по подгруппе схемы в окне просмотра проекта.

Чтобы включить параметр в процесс оптимизации и установить ограничения на значения параметра элемента, дважды щёлкните по элементу, чтобы открыть диалоговое окно **Element Options** (Опции элемента), показанное на рис. 3.1.

Для включения параметра в процесс оптимизации, щёлкните левой кнопкой мышки по небольшой кнопке в столбце **Opt** напротив параметра, который вы хотите оптимизировать. Нижняя граница значений элемента вводится в столбце **Lower**, а верхняя – в столбце **Upper** для этой переменной. Чтобы оптимизатор соблюдал установленные ограничения, щёлкните левой

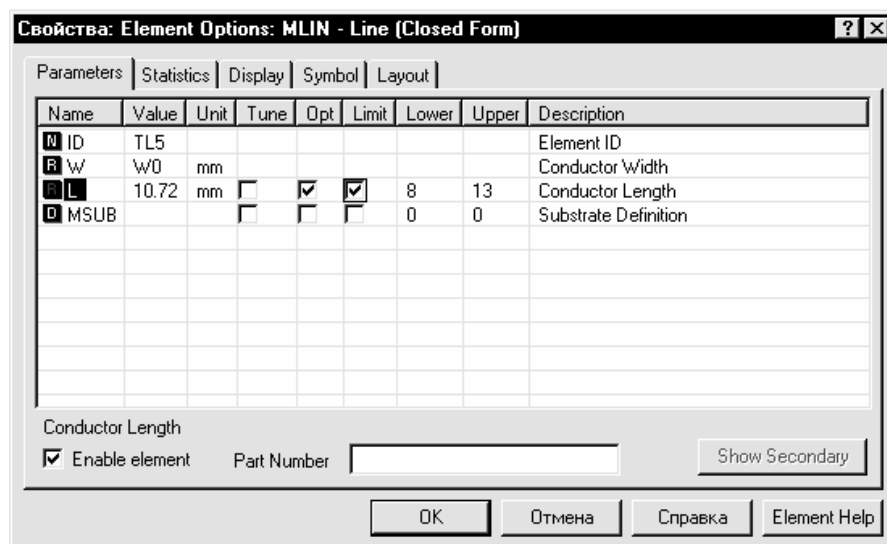


Рис. 3.1

кнопкой мышки по небольшой кнопке в столбце **Limit**. Нажмите **OK**. Теперь, если появится необходимость, чтобы снять ограничения со значений параметра, не обязательно обнулять столбцы **Lower** и **Upper**, достаточно снять отметку в столбце **Limit**, щёлкнув по нему снова.

Чтобы включить независимую переменную в процесс оптимизации и установить ограничения на её значения, щёлкните по выбранной переменной сначала левой кнопкой мышки и затем правой кнопкой. Выберите **Properties** (Свойства) во всплывающем меню, чтобы открыть диалоговое окно **Edit Equation**, показанное на рис. 3.2. Для включения переменной в процесс оптимизации, щёлкните по окошечку **Optimize** в области **Mode** (Режим). Если хотите ограничить значения переменной во время оптимизации, щёлкните по окошечку **Constrained** (Ограничить) в этой же области и затем введите верхнюю границу значения (**Upper bound**) и нижнюю (**Lower bound**). Заметим, что в этом окне можно изменить имя переменной (в поле **Variable Name**) и её значение (в поле **Variable Value**). Нажмите **OK**. Теперь,

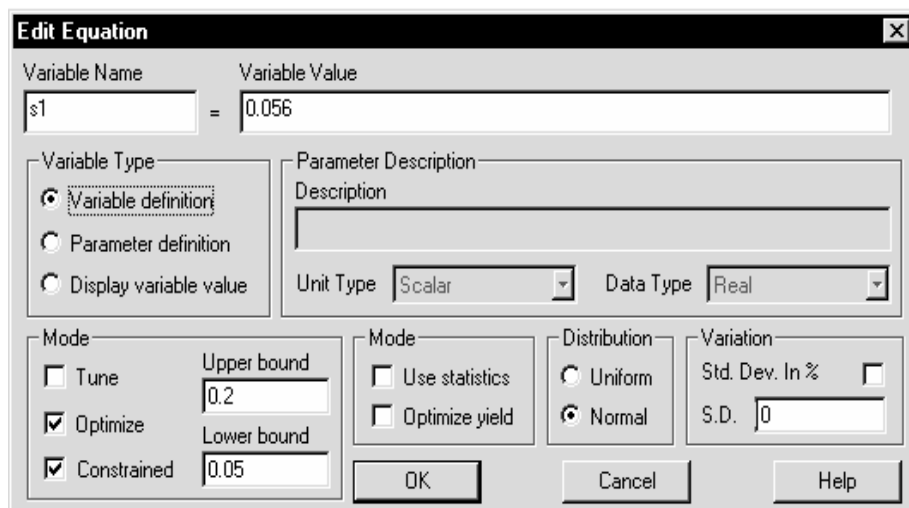


Рис. 3.2

если появится необходимость, чтобы снять ограничения со значений переменной, не обязательно обнулять поля **Upper bound** и **Lower bound**, достаточно снять отметку в **Constrained**, щёлкнув по нему снова.

2-й способ.

При этом способе на рабочем столе может быть активным любое окно, например окно графика.

Нажмите на панель **Var** в нижней части левого окна. Откроется окно просмотра переменных, рис. 3.3. В верхней части этого окна отображается группа переменных схемы (на рис. 3.3 это группа **Fil**), которая включает в себя значения параметров всех элементов схемы. В нижней части окна просмотра элементов перечислены все параметры элементов, имеющихся в схеме. Вид нижней части окна с параметрами элементов схемы, и описание некоторых элементов окна смотри в предыдущей главе, рис. 2.2. На рис.3.3 показан вид независимых переменных подгруппы переменных, в данном случае подгруппы **Fil Equarions**. Отличие только в том, что в первом столбце вместо имени элемента, к которому относится параметр, указано имя схемы, в которой определена переменная.

| Elem... | Name | Value |
|---------|------|-------|
| Fil | w0 | 0.46 |
| Fil | s1 | 0.056 |
| Fil | s2 | 0.325 |
| Fil | L1 | 10.66 |

Рис. 3.3

| Elem | Value | Lower | Upper |
|------|-------|-------|-------|
| | 0.46 | 0 | 0 |
| | 0.056 | 0.05 | 0.2 |
| | 0.325 | 0 | 0 |
| | 10.66 | 0 | 0 |

Рис.3.4

Чтобы назначить переменную для оптимизации, щёлкните по небольшой кнопке в столбце **O** напротив той переменной, которую вы хотите назначить для оптимизации.

Если диапазон значений переменной нужно ограничить, щёлкните по кнопке в столбце **S**. Затем, пользуясь полосой скроллинга внизу окна, сдвиньте таблицу так, чтобы были видны её последние столбцы **Lower** и **Upper**,

как показано на рис. 3.4. В эти столбцы введите соответственно нижнюю и верхнюю границы допустимых значений переменной. Чтобы снять ограничения со значений переменной, если возникнет такая необходимость, достаточно снять выделение с кнопки **S**, щёлкнув по ней мышкой, обнулять границы значений переменной не обязательно.

В эти столбцы введите соответственно нижнюю и верхнюю границы допустимых значений переменной. Чтобы снять ограничения со значений переменной, если возникнет такая необходимость, достаточно снять выделение с кнопки **S**, щёлкнув по ней мышкой, обнулять границы значений переменной не обязательно.

3.4 Установка целей оптимизации

Цели оптимизации могут быть добавлены для любой измеряемой величины и для любого уравнения выходной характеристики в проекте.

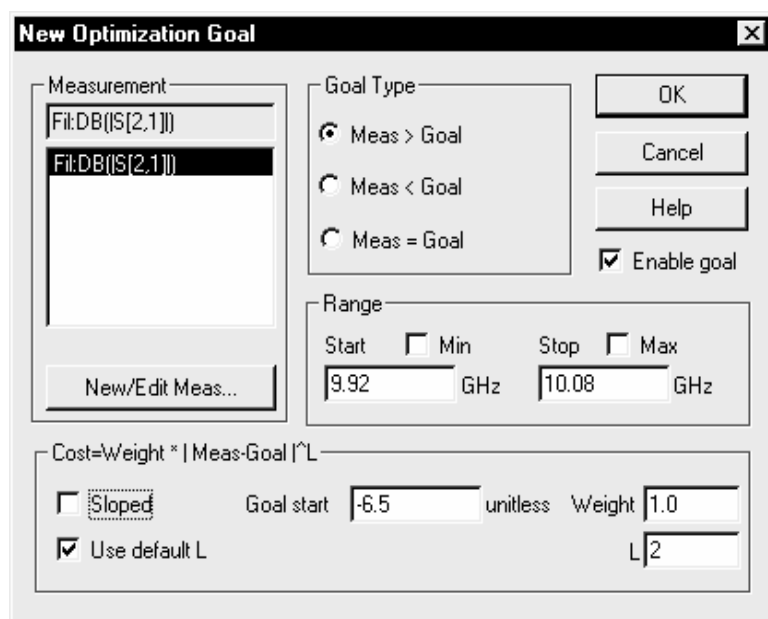


Рис. 3.5

Чтобы добавить цель оптимизации, выберите **Project > Add Opt Goal** в выпадающем меню или щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Optimizer Goals** в окне просмотра проекта и выберите **Add Opt Goal** во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно **New Optimization Goal** (Новая цель оптимизации), показанное на рис. 3.5. В окне списка **Measurement** (Измеряемая величина) отметьте измеряемую величину (т.е. характеристику, которую вы хотите оптимизировать). Если нужной измеряемой величины в этом списке не окажется (забыли

определить ранее), то её можно добавить (или отредактировать имеющуюся), нажав панель **New/Edit Meas**.

В области **Goal Type** (Тип цели) отметьте, к чему должен стремиться оптимизатор, сделать измеряемую величину больше цели (**Meas>Goal**), или сделать измеряемую величину меньше цели (**Meas<Goal**), или сделать их равными (**Meas=Goal**).

В области **Range** (Диапазон) определите диапазон частот, для которого установлена цель. Для этого снимите «галочки» в небольших полях **Start Min** и **Stop Max**, щёлкнув по ним мышкой. Затем в поля **Min GHz** и **Max GHz** введите соответственно нижнюю и верхнюю частоты нужного диапазона. Если, например, в поле **Start Min** оставить «галочку», то поле для ввода нижней частоты будет не активно, а оптимизатор нижней частотой будет считать нижнюю частоту диапазона, установленного для проекта.

В области **Cost=Weight*/Meas-Goal/L** (Эффективность = вес умножить на разность в степени L между измеряемой величиной и целью) в поле ввода **Goal start – unitless** (Начальное значение цели – уменьшаемая единица измерения) введите предельное значение измеряемой величины, которое вы считаете приемлемым для схемы.

В поле ввода **Weight** (Вес) установите желаемый вес для устанавливаемой цели.

В поле ввода **L** устанавливается показатель степени (норма целевой функции). Если в поле **Use default L** (Использовать L по умолчанию) стоит «галочка», то используется $L=2$. Чтобы изменить значение **L** на другое, снимите «галочку» в **Use default L** и затем введите желаемое значение в поле **L**.

Если установлен диапазон цели в полях **Start** и **Min**, как на рис. 3.5, то становится активным поле **Sloped** (Наклон). При установке галочки в поле **Sloped** щелчком мышки, откроется поле ввода **Goal Stop**, в котором можно установить значение цели для последней частоты диапазона, отличное от начальной частоты диапазона. Цель при этом будет наклонена в диапазоне частот.

Замечание. Разработчики корректоров с линейной характеристикой, обратите внимание на такую возможность.

Если измеряемая величина отображается на графике, то цель так же будет отображена на этом графике в том же цвете, что и измеряемая величина. Если на цель поместить курсор мышки, то её можно переместить или сдвинуть границы цели. В этой версии Microwave Office это доступно только в прямоугольном графике с линейным масштабом по осям X и Y. Если масштаб любой оси изменить на логарифмический, то цель не будет видна.

Для изменения уже установленной цели щёлкните правой кнопкой мышки по цели в окне просмотра проекта и выберите **Edit Goal Properties** (Редатирование свойств цели).

Для удаления цели щёлкните правой кнопкой мышки по цели в окне просмотра проекта и выберите **Delete Goal** (Удалить цель).

Microwave Office автоматически определяет, влияет ли значение переменной, которая назначена для оптимизации, на установленные цели. Если переменная не влияет на установленную цель, она исключается из процесса оптимизации. Если ни одна из целей не зависит от назначенных для оптимизации переменных, оптимизатор сообщает об ошибке, указывая, что оптимизировать нечего. Автоматический контроль не изменяет параметры настройки оптимизации для целей. Это обеспечивает удобный способ для управления оптимизацией. Например, если в проекте имеются две схемы, для которых назначены переменные для оптимизации и цели для разных измеряемых величин, нет необходимости выключать оптимизацию для переменных в схеме, которая в данный момент не оптимизируется. Достаточно просто отключить соответствующие цели. Для отключения цели щёлкните правой кнопкой по этой цели в окне просмотра проекта и выберите **Toggle Enable** (Переключатель активности) во всплывающем меню или выберите **Edit Goal Properties** в этом меню и отметьте **Enable goal** в открывшемся окне **Modify Optimization Goal**.

3.5 Выполнение оптимизации

Чтобы выполнить оптимизацию, выберите **Simulate > Optimize** в выпадающем меню. Откроется диалоговое окно **Optimize**, показанное на рис. 3.6.

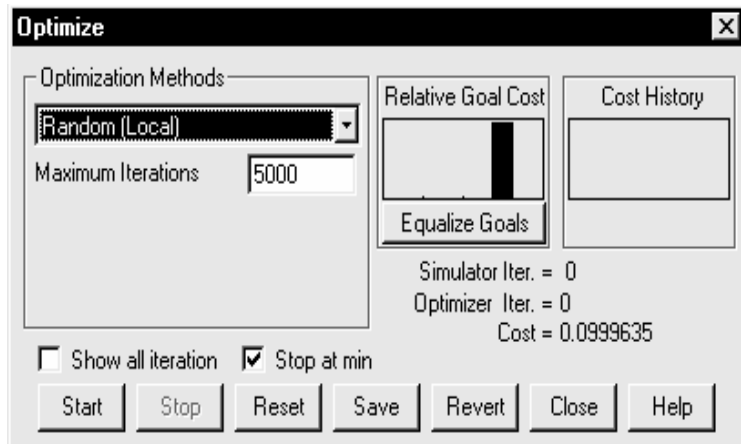


Рис. 3.6

В области **Optimization Methods** (Методы оптимизации) необходимо выбрать желаемый метод оптимизации. Для этого щёлкните мышкой по стрелочке справа от поля ввода методов и в выпадающем списке выберите нужный метод. В поле **Maximum Iteration** (Максимум итераций) введите максимальное количество итераций, которое вы считаете достаточным.

В области **Relative Goal Cost** (Относительная «стоимость» цели) отображается в виде гистограммы относительная значимость целей для оптимизации. На рис. 3.7 показана характеристика фильтра с тремя установленными целями: в верхней полосе заграждения, в нижней полосе заграждения и в полосе пропускания. Из характеристики видно что в нижней полосе заграждения отличие характеристики небольшое, в полосе пропускания характеристика существенно отличается от цели, и в верхней полосе заграждения характеристика удовлетворяет цели. Соответственно в области **Relative Goal Cost** столбец, соответствующий цели в полосе пропускания имеет наибольшую высоту, соответствующий нижней полосе

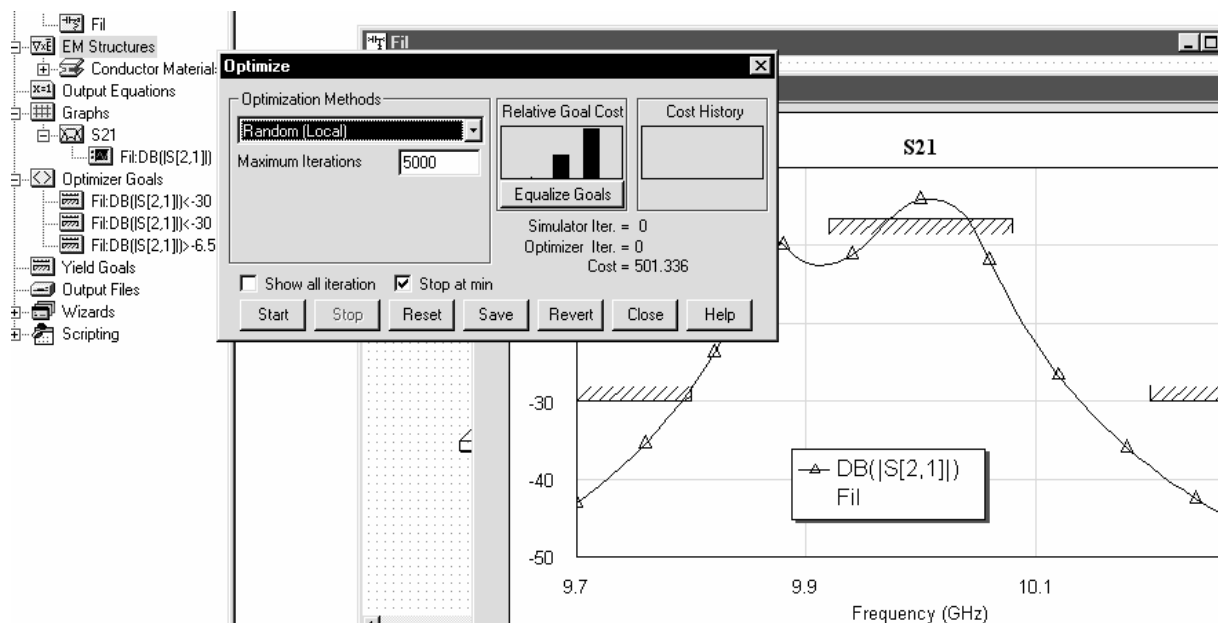


Рис. 3.7

заграждения – меньшую, а цель для верхней полосы заграждения вообще не отображается (см. рис. 3.7). При нажатии на панель **Equalize Goals** (Выравнивать цели) столбцы на гистограмме выравниваются и автоматически изменяются веса целей так, чтобы изменения параметров вносили одинаковый вклад в изменение целевой функции.

В области **Cost History** (Хронология значимости) отображается график изменения целевой функции в процессе оптимизации в зависимости от выполненного числа итераций.

Ниже указанных областей в процессе оптимизации выводятся выполненное количество итераций анализа (**Simulator Iter**) и оптимизации (**Optimizer Iter**), а так же значение целевой функции (**Cost**), которое при оптимизации должно стремиться к нулю.

Если поставить «галочку» в небольшом поле **Show all iteration** (Показывать все итерации), то на графике будут отображаться (мелькать) характеристики каждой итерации.

В нижней части диалогового окна расположены следующие кнопки:

- **Start** (Пуск) – Запускает оптимизацию.
- **Stop** (Останов) – Останавливает оптимизацию.
- **Reset** (Сброс) – Возвращает переменным первоначальные значения, которые они имели до оптимизации, если окно оптимизации ещё открыто. Если окно оптимизации закрыть, то переменным присваиваются значения, полученные при оптимизации и изменить их через вновь открытое окно уже нельзя.
- **Save** (Сохранить) – Сохраняет значения переменных, полученные при данной оптимизации. Сохранить набор значений переменных можно после окончания оптимизации или после её остановки кнопкой **Stop**. Набор значений сохраняется под именем, которое можно ввести в открывшемся окне. Затем можно продлить оптимизацию или провести заново, изменив какие-либо свойства (например, цели или метод оптимизации). Можно запомнить значения для нескольких вариантов и затем вернуться к любому из них с помощью кнопки **Revert**, пока открыто окно оптимизации. После закрытия окна вернуться к запомненным значениям уже нельзя.
- **Revert** (Возврат) – Возвращает значения, сохранённые при оптимизации с помощью кнопки **Save**.
- **Close** (Закреть) – Закрывает окно оптимизации.
- **Help** – Открывает описание окна оптимизации.

3.6 Методы оптимизации

В этой версии Microwave Office поддерживаются методы оптимизации, которые описаны ниже.

Random (Local) – Случайный (Локальный).

В этом методе значения переменных изменяются со случайным шагом от начальной точки в области поиска. Случайный оптимизатор – вероятно лучший оптимизатор для использования с большим числом переменных, т.к. с большим числом переменных работает почти так же эффективно, как и с малым, и требует минимального количества проведений анализа за одну итерацию. В некоторых случаях этот метод даёт очень хорошие результаты. И хотя этот метод не всегда позволяет непосредственно найти оптимум, он создаёт подходящие предпосылки для последующего применения других методов. Этот метод ищет ближайший локальный оптимум (видимо потому, что область поиска задаётся не слишком обширной).

Gradient Optimization – Градиентная оптимизация.

Здесь под градиентным методом имеется ввиду метод Девидона – Флетчера – Пауэла (часто его называют методом Флетчера – Пауэла). Точнее это квази-ньютоновский метод. Это один из наиболее мощных методов, но он требует проведения многократного анализа в каждой итерации. Этот оптимизатор хорошо подходит для простых цепей с простыми требованиями, для которых увеличение количества проведений анализа существенно на увеличивает время итерации, но оптимизация будет сходиться очень быстро. Градиентный метод так же хорош (хотя, возможно, не так хорош, как симплексный) в последовательности сложных контуров. Опыт показывает, что градиентные методы для пассивных цепей часто работают хуже симплексных.

Simplex Optimization – Симплексная оптимизация.

Симплексный поиск (используется метод Нелдера – Мида) – это сравнительно медленный, но очень устойчивый метод. Этот метод находит точный оптимум в отличие от градиентного, который имеет тенденцию «блуждать» вблизи оптимума. Поэтому симплексный метод хорошо использовать после градиентного метода. Симплексная оптимизация – это довольно длительный процесс, требующий множества функциональных оценок, по крайней мере, столько же, сколько и переменных, а часто и больше.

Симплексный оптимизатор создаёт симплекс в многомерном пространстве, который является замкнутой фигурой с $N+1$ вершиной, где N – количество переменных, выбранных для

оптимизации. В этом методе сначала выполняется процесс отражения, который заключается в поиске вершины нового симплекса, расположенной симметрично худшей точки относительно одного из рёбер симплекса. Эта точка называется «дополнением» наихудшей точки. Затем осуществляется переход к той вершине прежнего симплекса, в которой целевая функция имеет следующее по величине ошибки значение, и отыскивается точка, являющаяся её «дополнением». Такой алгоритм обеспечивает постепенное смещение центра симплекса в направлении экстремума целевой функции. В методе Нелдера – Мида, кроме поиска вершин новых симплексов, производится сжатие или растяжение его рёбер. Чтобы избежать ранней сходимости на слабых локальных минимумах, метод периодически перезапускается, используя N новых произвольных точек и наилучшую точку в предыдущем симплексе. Алгоритм метода обладает достаточной гибкостью, позволяющей учитывать локальные топологические свойства поверхности, описанной целевой функцией. Симплексы вытягиваются в направлении наклона плоскостей, их оси поворачиваются при встрече со впадиной на поверхности целевой функции, вблизи экстремума симплексы сжимаются.

Генетические алгоритмы.

В этих методах используются хромосомы, которые являются вектором непрерывных ограниченных переменных, которые определяют место поиска. Отдельное скалярное число в этом векторе будет геном. Используемые в Microwave Office 2002 генетические алгоритмы несколько отличаются от стандартных.

В типичных генетических алгоритмах новые точки создают из двух предыдущих точек пересечением и мутацией (изменением) гена. Этот способ был модернизирован, чтобы улучшить подход к проблеме непрерывной оптимизации. Модификация заключается в генерации чисел (ген ребёнка) из двух других чисел (гены родителей) в некоторой степени случайным образом. Сгенерированное число должно быть подобным любому из родительских чисел, но не идентичным. Общий алгоритм был заимствован из стандартных алгоритмов дискретной оптимизации, которые описаны в литературе. Для каждого из двух родительских чисел, выбранных произвольно (при выборе предпочтение отдаётся более пригодным родителям), генерируются два числа дочерних значений. Два метода порождения дочерних генов описаны ниже.

▪ Genetic [Gaussian Mutation] – Генетический [Гаусовы мутации].

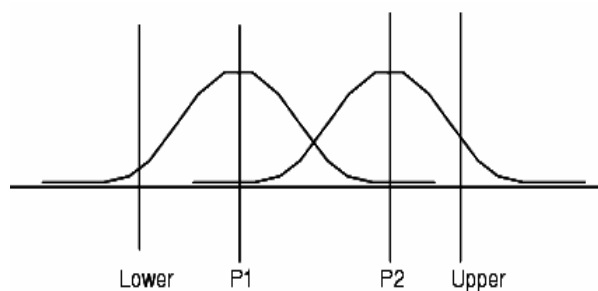


Рис. 3 8

определяется выражением:

$$S = 1 - \frac{1}{M * N} \sum_{M \dots N} |a_i - b_i|$$

где

N – размер промежутка поиска (длина хромосомы);

M – разность между верхним и нижним генами (Upper и Lower на рис. 3.8);

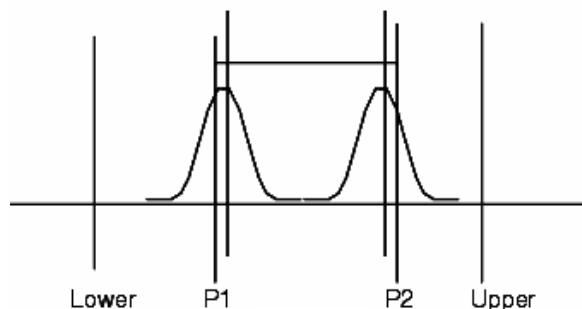
a и b – сравниваемые родители.

Коэффициент S изменяется от 1 ($a = b$) до 0 ($a = 0$, $b = M$). Из каждого родителя генерируется одно число, и назначение каждого из двух сгенерированных генов дочерним хромосомам делается наугад с равной вероятностью. Если бы максимальное изменение было равно нулю, дети должны унаследовать идентичные гены от обоих родителей.

Для каждого родительского гена генерируется число из нормального распределения, использующего родителя как среднюю величину для распределения. За мутацию принимается среднееквадратичное отклонение каждого распределения, определяемого разбросом, заданным пользователем и коэффициентом сходства. Коэффициент сходства вычисляется из сходства между родительскими хромосомами (не генами) и

▪ Genetic [Uniform Mutation] – Генетический [Однородные мутации].

Во втором методе ген генерируется с использованием случайного однородного распределения между двумя величинами родительского гена. Как только один ген ребёнка сгенерирован, второй ген генерируется как зеркальное отражение относительно центра распределения.



Случайное нормальное распределение с нулевым средним отклонением затем добавляется к величине каждого гена, чтобы обеспечить механизм мутации. Среднеквадратичное отклонение для этого распределения вычисляется с использованием того же метода, как и в первом генетическом методе, рассмотренном выше. Рис. 3.9 демонстрирует эту процедуру.

Simulated Annealing (Simplex) – Имитируемый «отжиг» (симплекс).

Имитируемый отжиг используется совместно с симплексным методом, описанным ранее. Имитируемый отжиг включен в симплексный метод, добавляя небольшое, зависящее от температуры, вероятностное отклонение к ошибке параметра в каждой точке симплекса. Затем подобное отклонение вычитается из любой новой точки, которая испытывается для замены текущей верхней точки в симплексе. Это всегда вызывает смещение вниз по холму и иногда вверх с вероятностью, базирующейся на текущей температуре. Тщательно управляя нормой (показателем степени) проблему можно медленно «охлаждать», чтобы решение сходилось к глобальному оптимуму вместо локального.

Используемый имитируемый «отжиг» определен как

$$T = T_0 \left(1 - \frac{k}{K}\right)^a$$

где

K – общее количество оценок;

k – количество выполненных оценок;

T_0 и a – параметры, которые могут корректироваться, чтобы настроить эффективность алгоритма.

Simulated Annealing (Local) – Имитируемый «отжиг» (локальный).

Имитируемый отжиг используется совместно с локальным случайным методом, описанным ранее. Имитируемый отжиг включен в случайный метод поиска, добавляя небольшое, зависящее от температуры, вероятностное отклонение к ошибке в оценке каждого параметра. Это всегда вызывает смещение вниз по холму и иногда вверх с вероятностью, базирующейся на текущей температуре. Тщательно управляя нормой (показателем степени) проблему можно медленно «охлаждать», чтобы решение сходилось к глобальному оптимуму вместо локального.

Random (Global) – Случайный (глобальный).

Этот оптимизатор произвольно выбирает опытные точки из полного промежутка решения в поиске оптимума. Этот метод должен использоваться только, если имеется небольшое количество переменных для оптимизации и целевая функция очень нерегулярна или дискретная. После того, как найдено решение с этим оптимизатором, рекомендуется использовать локальный метод, чтобы точнее определить оптимум. Если переменных для оптимизации много, возможно этот метод не найдет улучшения характеристики в разумных пределах времени.

Conjugate Gradient

Этот метод не описан в документации к Microwave Office.

Direction Set Method.

Этот метод не описан в документации к Microwave Office.

3.7 Указатель оптимизации

Указатель оптимизации объединяет мощност и устойчивость четырёх широко используемых методов поиска (генетические алгоритмы, симплекс скоростного спуска, последовательное квадратичное программирование и линейные методы) с уникальной возможностью к самообучению, которая достигается тренировкой Указателя для оптимизации определённого типа задач. Эта способность к самообучению позволяет Указателю автоматически определять лучшую процедуру поиска для данной проблемы. Вы определяете цель, к которой надо стремиться, и допустимое число итераций для оптимизации. Указатель выбирает лучшую комбинацию оптимизаторов и размер шага, чтобы найти лучшее решение. Тренировка может также увеличить ваши возможности получения оптимального результата при различных номинальных режимах (ограничения, начальные точки проекта и т.д.). Кроме того, во время тренировки почти всегда будет найден глобальный оптимум до завершения самого процесса тренировки. Указатель определяет не только оптимальное решение, но и как лучше найти это решение. Вам не обязательно знать особенности алгоритмов поиска, чтобы успешно применять их.

Методы, используемые в Указателях оптимизации, описаны ниже.

Генетические алгоритмы.

Генетические алгоритмы используют мутацию или рекомбинацию и выбор, чтобы минимизировать целевую функцию. Эти алгоритмы начинают поиск с большого количества точек, беспорядочно распределённых по пространству проекта (по крайней мере одну точку для каждой переменной, включённой в оптимизацию, если это возможно). В мутации каждая из точек производит ряд новых точек, которые обычно распределяются вокруг первоначальной точки. Лучшие из этих точек определяют выбор следующего поколения точек. В рекомбинации случайное число точек заменяют значения параметров. Снова лучшие точки выбираются для следующей итерации. Такой механизм рекомбинации позволяет точкам двигаться к точке с меньшим значением целевой функции.

Средний размер шага определяется среднеквадратичным отклонением. В алгоритме это среднеквадратичное отклонение добавляется к каждому параметру в каждой точке. Точки с лучшим среднеквадратичным отклонением имеют наибольший шанс обнаружить глобальный минимум. Первоначально метод сходится очень быстро, но при приближении к точному решению сходимость может замедляться и метод может не работать. Однако это бывает при комплексной топографии.

Методы симплекса скоростного спуска.

Метод симплекса скоростного спуска – это геометрически интуитивный алгоритм. Симплекс определяется как фигура в n – мерном пространстве с $n+1$ вершиной. Расположение каждой вершины полностью определяет симплекс. В двумерном пространстве симплекс – это треугольник. В трёхмерном – это тетраэдр. При работе алгоритма симплекс сдвигается вниз по поверхности к расположению минимума с определёнными шагами. Эти шаги могут приводить к отражению, растяжению и сжатию симплекса. Большинство шагов – это отражения, которые состоят в замене вершины симплекса, где целевая функция имеет самое большое значение (самая «плохая» точка), на симметричную ей точку, где значение целевой функции меньше. При отражении объём симплекса не изменяется. Если это возможно, при отражении производится расширение, которое увеличивает объём симплекса, тем самым увеличивается шаг и ускоряется сходимость. Сжатие уменьшает объём симплекса. Оно производится, если оптимум находится внутри симплекса, что позволяет сжать симплекс в точку оптимума. Или же сжатие позволяет пройти симплексу через узкое место в поверхности, наподобие песочных часов.

Этот метод имеет самую высокую вероятность обнаружения глобального минимума, если он начат с больших начальных шагов. Начальный симплекс в этом случае охватывает

большую часть пространства проекта и возможность попасть в локальный минимум меньше. Однако, для комплексных гиперразмерных топографий метод может не работать.

Последовательные квадратичные методы программирования.

Метод последовательного квадратичного программирования (SQR – sequential quadratic programming) – это обобщение метода Ньютона для оптимизации без ограничений. Однако, SQR может решать и проблемы нелинейной оптимизации для дифференцируемых целевых функций с ограничениями. Суть поиска состоит в решении задачи квадратичного программирования на каждой итерации. В этом методе целевая функция заменяется квадратичным приближением. Метод SQR используется для задач с гладкими целевыми функциями (или которые являются непрерывно дифференцируемыми в области проекта) и для простых задач с числом переменных до 100. Указатель использует программу SQR, разработанную доктором Клаусом Шитткауским.

Линейные методы.

Линейные методы (называемые так же линейным программированием или линейной оптимизацией) идеально подходят для задач, в которых целевая функция и ограничения являются линейной комбинацией переменных.

Хотя нелинейные оптимизаторы, описанные выше, решают линейные проблемы, но они работают намного медленнее. А линейные алгоритмы, к сожалению, не способны справиться с нелинейными проблемами. Время оптимизации может быть существенно сокращено, если вы сможете сформулировать вашу проблему, как линейную.

Указатель использует линейный симплексный алгоритм (не путать с алгоритмом симплекса скоростного спуска для нелинейных поверхностей целевой функции). Этот алгоритм использует метод исключения Гаусса – Жордана для решения системы линейных уравнений.

Гибридные методы.

Смесь («коктейль») или комбинации методов оптимизации часто дают лучшие результаты, чем перезапуск одного и того же метода. Устойчивой и быстро сходящейся комбинацией является комбинация с завершением симплексным методом. Так же хорошей смесью методов для гладкой поверхности целевой функции будет комбинация случайного метода (Монте-Карло) с градиентным методом. Градиентный метод начинает поиск из многочисленных, случайных точек в пространстве с сохранением точки с лучшим результатом.

«Оптимизатор» («optimizer») в Указателе в действительности является гибридным указателем, состоящим из комбинации генетических, симплекса скоростного спуска, градиентных и линейного симплексного алгоритмов. Выбор алгоритмов, числа итераций, перезапусков и размеров шагов делается автоматически, с помощью способности Указателя к самообучению.

3.8 Использование имеющихся Указателей оптимизации

В Microwave Office 2002 имеются два Указателя оптимизации: **Pointer – Robust Optimization** (Устойчивая оптимизация) и **Pointer – Gradient Optimization** (Градиентная оптимизация), но описание их в документации отсутствует. Эти Указатели обучены на ряде целей и во многих случаях дают хорошие результаты.

Используются эти Указатели точно так же, как и любой оптимизатор. Выберите **Simulate > Optimize** в выпадающем меню и в оторывшемся диалоговом окне **Optimize** в списке **Optimization Methods** выберите нужный Указатель.

Замечание. Указатель оптимизации требует, чтобы все переменные, включённые в оптимизацию, были ограничены. Если вы не ограничите значения переменных, это будет сделано автоматически, что может дать не желательные результаты. Поэтому перед использованием Указателя оптимизации убедитесь, что все значения переменных ограничены должным образом.

3.9 Создание тренированного Указателя оптимизации

Чтобы получить лучшие результаты от использования Указателя оптимизатора, нужно провести его тренировку (обучение). При проведении тренировки важно обратить внимание на то, что тренировка не должна проводиться для каждой конкретной электрической цепи, которую вы хотите оптимизировать. Например, если вы часто проектируете фильтры на связанных микрополосковых линиях с различным числом резонаторов и разными полосами пропускания, не обязательно снова тренировать оптимизатор для каждого фильтра. Этот натренированный оптимизатор может адаптироваться к изменениям в схеме фильтра. С другой стороны, оптимизатор, натренированный для микрополоскового фильтра, не годится для оптимизации нелинейного усилителя мощности.

Натренированный оптимизатор для возможности его использования в дальнейшем необходимо сохранить в файле. В различных отдельных файлах можно хранить оптимизаторы, натренированные для различных цепей.

Тренировка – это процесс, при котором используется возможность Указателя оптимизации к самообучению, при котором создаётся подпрограмма оптимизации, наиболее подходящая для вашей задачи. Сеанс обучения является одновременно и сеансом оптимизации, т.к. в конце сеанса обучения вы будете иметь также оптимальную характеристику для текущего набора параметров, ограничений и т.д., если вы дадите Указателю достаточно времени.

Цель тренировки состоит в том, чтобы подобрать для вашей задачи такой порядок проведения оптимизации, при котором количество вычислений функции будет минимальным. Тренировка занимает больше времени, чем это необходимо для выполнения оптимизации. Однако, если вам приходится часто оптимизировать однотипные задачи, то затраты времени на тренировку будут оправданы. Использование тренированного оптимизатора может сократить время оптимизации, по крайней мере, вдвое. Нет никакой необходимости наблюдать за процессом тренировки или вмешиваться в этот процесс. Поэтому тренировку можно выполнить ночью, в любое свободное время, в выходной, или в то время, когда вы заняты чем-то другим.

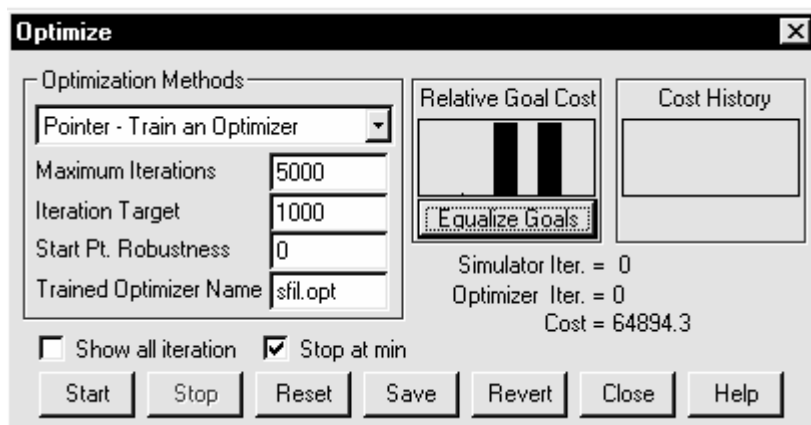


Рис. 3.10

Перед созданием тренированного оптимизатора необходимо выбрать переменные для оптимизации, установить их ограничения, а также установить цели оптимизации, т.е. необходимо выполнить всё необходимое для проведения нормальной оптимизации. Затем выберите **Simulate > Optimize** в выпадающем меню. В диалоговом окне **Optimize** (рис. 3.10) выберите **Pointer – Train an Optimizer** (Указатель – тренировать оптимизатор). Параметры настройки, которые необходимо установить для тренировки, поясняются ниже:

- **Maximum Iterations** (Максимум итераций): Это – максимальное число итераций, которое будет выполнять Указатель. Оптимизатор будет работать, пока не будет достигнута цель оптимизации. Если процесс не достигает цели, оптимизатор будет работать, пока не достигнет установленного максимального количества итераций.
- **Iteration Target** (Итерация цели): Указатель будет пытаться сходиться к решению (т.е. достигать цели) за указанное здесь количество итераций. Чтобы должным образом исследовать пространство проекта, необходимо, чтобы тренировка выполнялась достаточное количество времени, для сложных задач в течение нескольких часов. Обратите внимание, вы должны установить **Maximum Iterations** в несколько раз больше, чем **Iteration Target**.
- **Start Pt. Robustness** (Ошибкоустойчивость начальной точки): Ошибкоустойчивость начальной точки определяет, насколько хорошо тренируемый оптимизатор

тор может справляться с различными начальными наборами переменных проекта. Ошибкоустойчивость, равная нулю, означает, что алгоритм тренировки рассматривает только выполнение из единственной начальной точки (текущий набор переменных проекта). Ошибкоустойчивость, равная единице, означает, что алгоритм тренировки выполняется из случайных наборов начальных точек из всей области. Ошибкоустойчивость начальной точки должна иметь действительное значение между нулём и единицей. Это значение должно быть установлено так, чтобы минимизировать время, требуемое для тренировки оптимизатора.

- **Trained Optimizer Name** (Имя тренированного оптимизатора): В это поле ввода вводится имя файла, в котором будет сохранён тренированный оптимизатор (по умолчанию это `trained.opt`, но его лучше заменить другим, чтобы потом не путаться в разных оптимизаторах, хранящихся в разных папках с одинаковыми именами файлов). Файл оптимизатора с введённым именем будет сохранён в той же папке, в которой находится проект, который вы оптимизируете. Если вы затем захотите использовать полученный тренированный оптимизатор для оптимизации другого проекта, находящегося в другой папке, то необходимо предварительно скопировать файл тренированного оптимизатора в эту папку.
- Чтобы начать процесс тренировки, нажмите кнопку **Start**. Обратите внимание, если проект достигает максимального количества итераций, указанного в **Maximum Iterations**, перед остановкой, то оптимизатор не обучен должным образом. Наиболее часто это обусловлено тем, что предел итераций установлен слишком малым.

3.10 Использование обученного оптимизатора

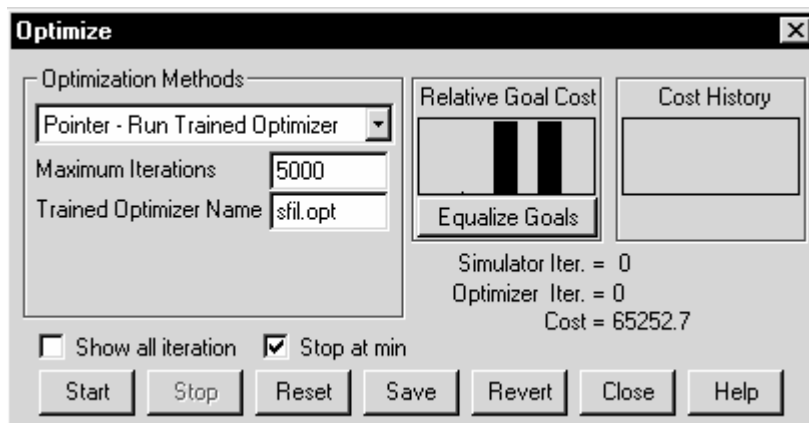


Рис. 3.11

что и оптимизируемый проект), введите максимальное число итераций в поле **Maximum Iterations** и затем нажмите кнопку **Start**.

Обученный оптимизатор используется так же, как и любой другой. Выберите **Simulate > Optimize** в выпадающем меню, чтобы открыть диалоговое окно **Optimize** (рис. 3.11), и выберите **Pointer – Run Trained Optimizer** (Указатель – Выполнить тренированный оптимизатор). В поле ввода **Trained Optimizer Name** введите имя требуемого тренированного оптимизатора (он должен находиться в той же папке,

3.11 Практические советы

- Начинайте оптимизацию с небольшим количеством переменных и ограничений. Затем наращивайте вашу проблему оптимизации, добавляя не более пяти переменных одновременно, всегда пытаясь понять причину, если оптимизация не получается. При десяти и более переменных это понять трудно.
- Если есть возможность, используйте такие целевые функции, которые можно использовать и в других проектах.
- Кроме целевой функции, для оптимизации обычно необходимо устанавливать ограничения на значения параметров (ширину проводников, величину зазоров и пр.). Критически относитесь к установке ограничений. Слишком много ограничений усложняет процесс оптимизации и можно не получить ожидаемого эффекта. Слишком мало ограничений упрощает процесс оптимизации, но резуль-

тат может не иметь практической ценности (например, могут получиться не реализуемые размеры).

- Старайтесь улучшить целевую функцию, чтобы она была гладкой без множества локальных минимумов. Это даёт возможность использовать градиентные методы и ускорить сходимость. На практике достичь этого обычно не просто или невозможно (обычно не просто и понять вид поверхности целевой функции в многомерном пространстве). Но если есть возможность, сделайте это.
- Не бойтесь экспериментировать с выбором оптимизаторов. С помощью кнопок **Save** и **Revert** вы всегда можете запомнить полученные результаты и вернуться к ним, если использование других методов не даст лучшего результата.

3.11 Дискретная оптимизация

Дискретную оптимизацию поддерживают только Указатели (**Pointer**) и случайные (**Random**) оптимизаторы.

Переменные дискретны, если их возможные значения заданы вектором. Например, для дискретной оптимизации ширины полосковой линии вы можете определить переменную в виде вектора `widths=stepped(2,5,0.1)`. Это означает, что ширина может иметь значения от 2-х до 5-ти с шагом 0.1. Затем вы можете присваивать значения из этого вектора для всех параметров `w` в элементах `MLIN`. Например, `w= widths[10]`, т.е. `w` присваивается значение 10-го элемента вектора, которое равно 2.9. Оптимизатор при подборе ширины проводника будет выбирать значения из вектора `widths`, изменяя индекс переменной. Пример дискретной оптимизации полосового фильтра с боковыми связями `Discrete Filter.emp` имеется в папке `...Examples\New Features\DiscreteValueOpt`. Левая часть этого фильтра показана на рис. 3.12 (правая часть симметрична левой).

Здесь в оптимизацию включены длины связей, ширина полосок и величина зазора. Для выполнения дискретной оптимизации в схеме определены следующие переменные-векторы:

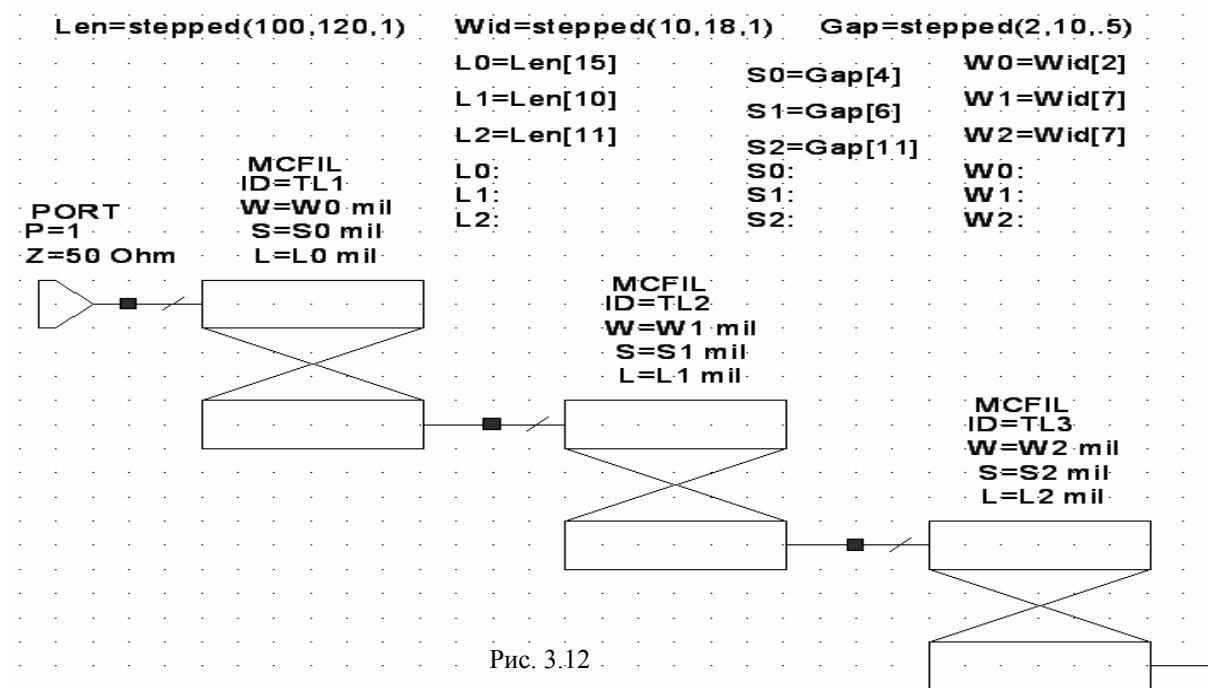


Рис. 3.12

Len=stepped(100,120,1) – длина может иметь значения от 100 до 120 с шагом 1;
Wid=stepped(10,18,1) – ширина полосок может иметь значения от 10 до 18 с шагом 1;
Gap= stepped(2,10,0.5) – зазор может иметь значения от 1 до 10 с шагом 0.5 (ноль у дроби перед запятой можно опускать).

Затем в схеме определены переменные **L0, L1, L2, S0, S1, S2, W0, W1, W2**, для присвоения значений параметрам симметричных элементов в схеме. Обратите внимание, что новые переменные должны быть введены в схему не выше переменных-векторов, иначе они не

будут видеть определённые в схеме векторы. Этим переменным присвоены конкретные значения из соответствующего вектора, например, $L0=Len[15]$, т.е. переменной $L0$ присваивается значение 15-го элемента из вектора Len , которое равно 114 (здесь все размеры в mil). Чтобы увидеть, какие конкретно значения имеют эти введённые переменные, нужно дополнительно определить такие же переменные с двоеточием, например, $L0:$ (см. рис. 3.12). После выполнения анализа или оптимизации значения этих переменных будут показаны (см. рис. 3.13). Теперь можно присвоить значения параметрам симметричных элементов в схеме, например первому и последнему отрезкам связанных линий присвоены значения $W=W0$, $S=S0$, $L=L0$ (см. схему рис. 3.12).

| | | |
|--------------|--------------|-------------|
| $L2=Len[11]$ | $S2=Gap[11]$ | $W2=Wid[7]$ |
| $L0: 114$ | $S0: 3.5$ | $W0: 11$ |
| $L1: 109$ | $S1: 4.5$ | $W1: 16$ |
| $L2: 110$ | $S2: 7$ | $W2: 16$ |

Рис. 3.13

Установка ограничений на значения оптимизируемых параметров и установка целей производится обычным образом, как и

при непрерывной оптимизации.

Пример 3.1.

В качестве примера рассмотрим оптимизацию фильтра из примера 2.1 предыдущей главы.

Выберите **File > Open Project** в выпадающем меню и откройте проект **CFil**.

Сделайте активным окно схемы, щёлкнув левой кнопкой мышки по видимой части этого окна, или дважды щёлкните по подгруппе **Fil** в окне просмотра проекта.

Назначьте переменные для оптимизации и введите ограничения на их значения. Для этого щёлкните левой кнопкой мышки по переменной $s1$ и затем щёлкните правой кнопкой по этой переменной. Во всплывающем меню выберите **Properties**. Откроется диалоговое окно **Edit Equation** (Рис. 3.14). В области **Mode** отметьте **Tune**, **Optimize** и **Constrained**. Введите нижнюю границу допустимого значения этой переменной **0.05** в поле **Lower bound** и верхнюю границу **0.2** в поле **Upper bound** и нажмите **OK**. Аналогично назначьте переменные $s2$, установив ограничения **0.1** и **0.5**, а также $L1$, установив ограничения **8** и **13**.

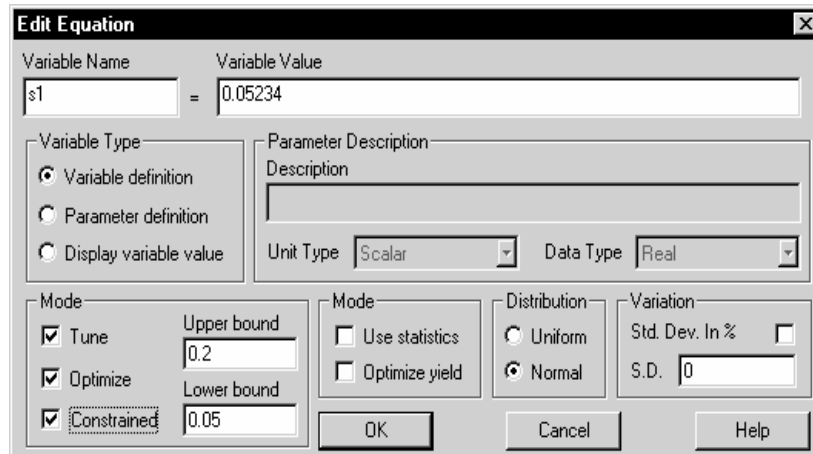


Рис. 3.14

Затем назначьте для оптимизации длину среднего резонатора. Дважды щёлкните по элементу среднего резонатора (**TL5**) и в открывшемся окне **Element Options** (Рис. 3.15) отметьте столбцы **Tune**, **Opt** и **Limit** напротив параметра **L**. Введите нижнюю допустимую границу длины резонатора **8** в столбце **Lower** и верхнюю границу **13** в столбце **Upper** и нажмите **OK**.

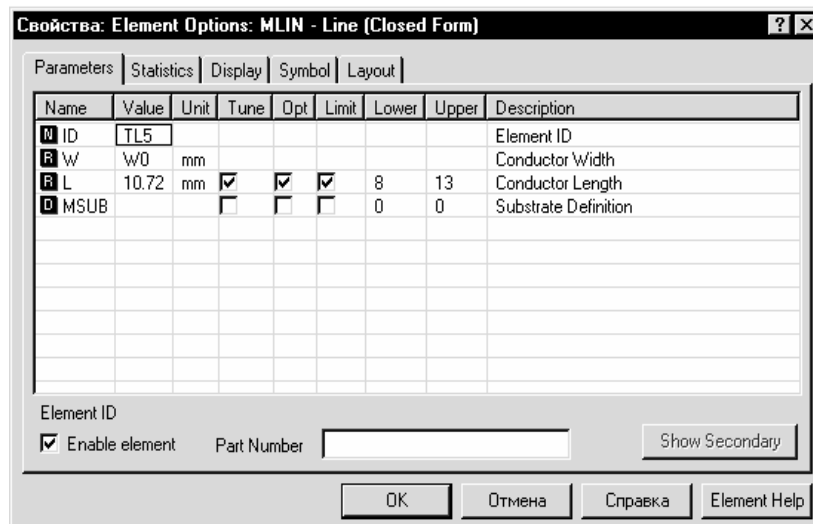


Рис. 3.15

Сделайте активным окно графика потерь **S21**, щёлкнув левой кнопкой мышки по видимой части этого окна, или дважды щёлкните по подгруппе **S21** в окне просмотра проекта. Выполните анализ, щёлкнув мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов.

Установите цель оптимизации для полосы пропускания. Щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Optimizer Goals** в окне просмотра проекта и выберите **Add Opt Goal** во всплывающем меню. В открывшемся окне **New Optimization Goal** (рис. 3.16) в списке **Measurement** выберите **Fit:DB(|S[2,1]|)**, отметьте **Meas > Goal**, в поле **Min** снимите галочку и введите нижнюю частоту **9.92**, в поле **Max** снимите галочку и введите верхнюю частоту **10.08**, отметьте **Use default L**, в поле **Goal start** введите **-6.5**, нажмите **OK**.

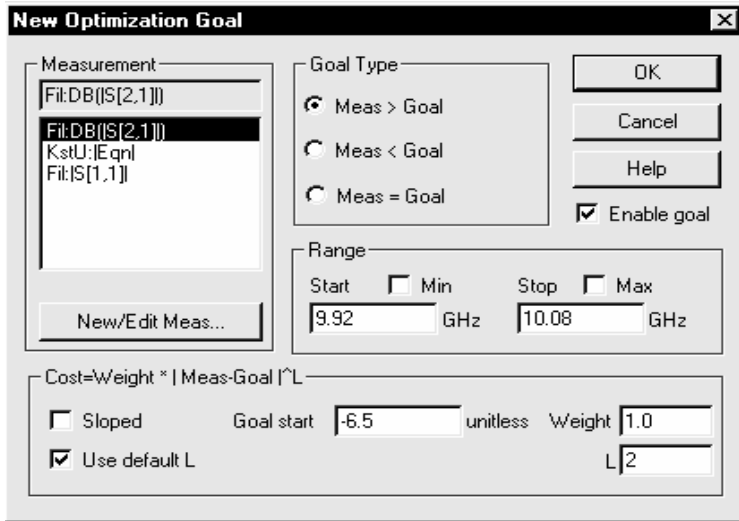


Рис. 3.16

Аналогично установите цели для нижней полосы заграждения, как показано на рис. 3.17, и для верхней полосы заграждения, как показано на рис. 3.18.

Щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов и, пользуясь блоком настройки, расстройте фильтр. Вариант расстроенного фильтра с установленными целями оптимизации показан на рис. 3.19. Закройте блок настройки.

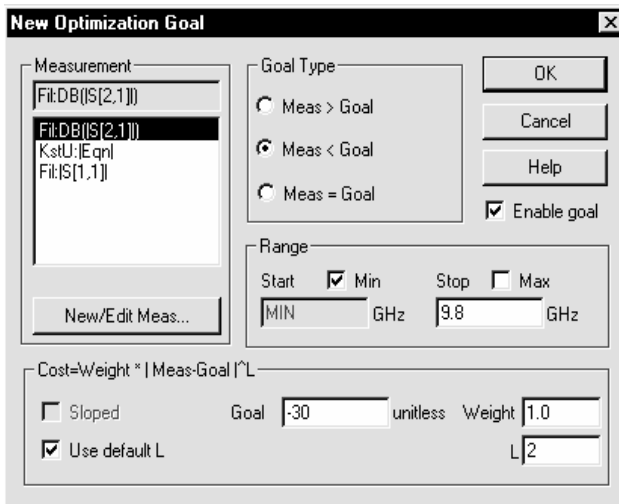


Рис. 3.17

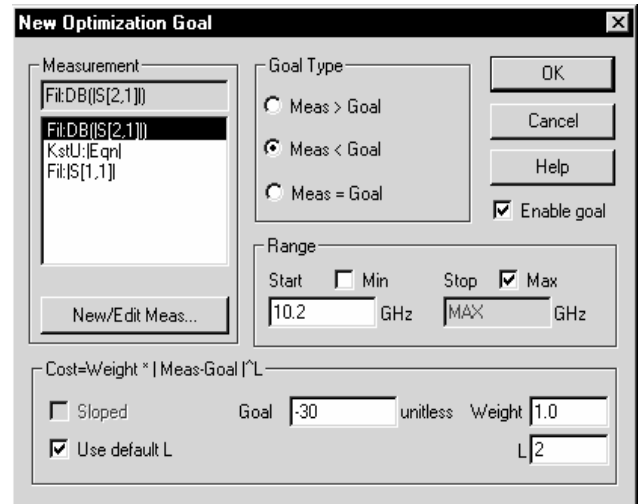


Рис. 3.18

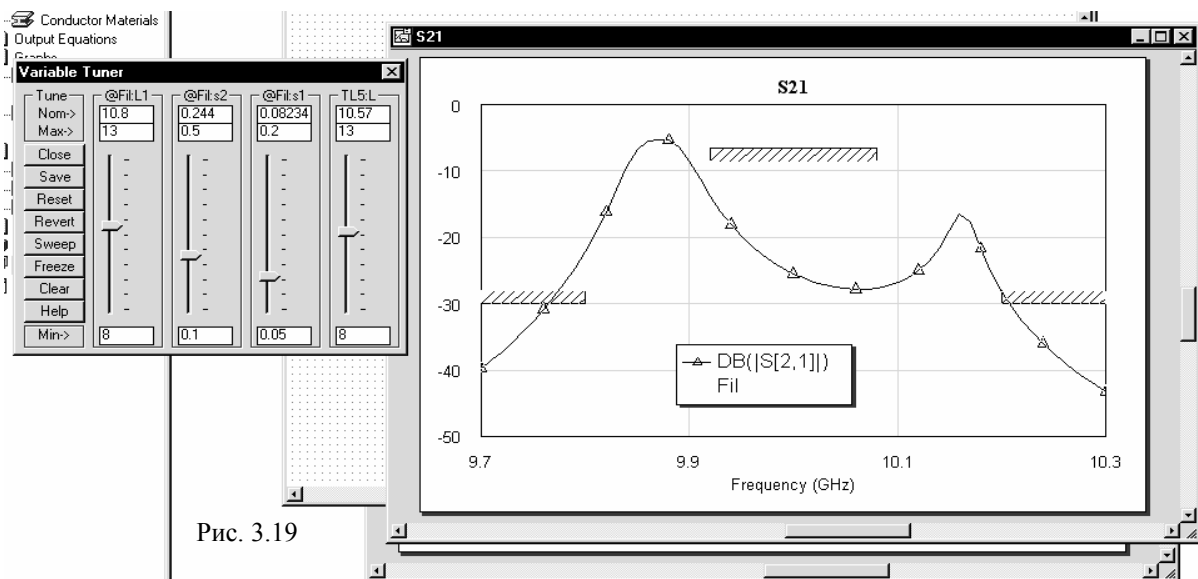


Рис. 3.19

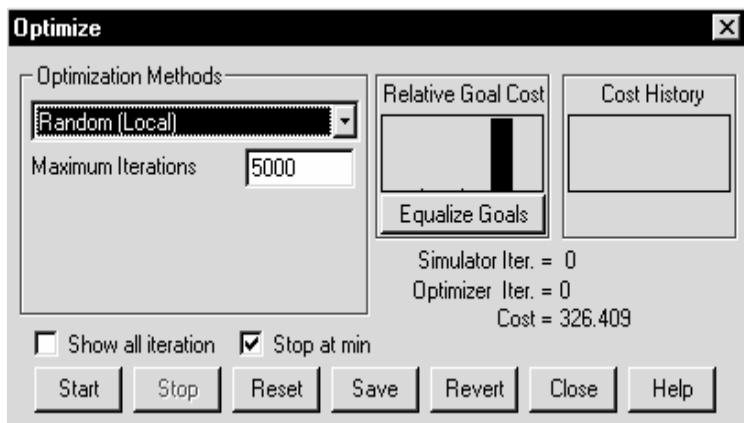


Рис. 3.20

Выберите **Simulate > Optimize** в выпадающем меню. В открывшемся окне **Optimize** (Рис.3.20) выберите метод оптимизации **Random (Local)**. Введите максимальное количество итераций, или оставьте по умолчанию. Установите «галочку» в **Stop at min** и нажмите кнопку **Start**.

Оптимизированная характеристика показана на рис. 3.21.

Создайте тренированный Указатель оптимизации. Нажмите

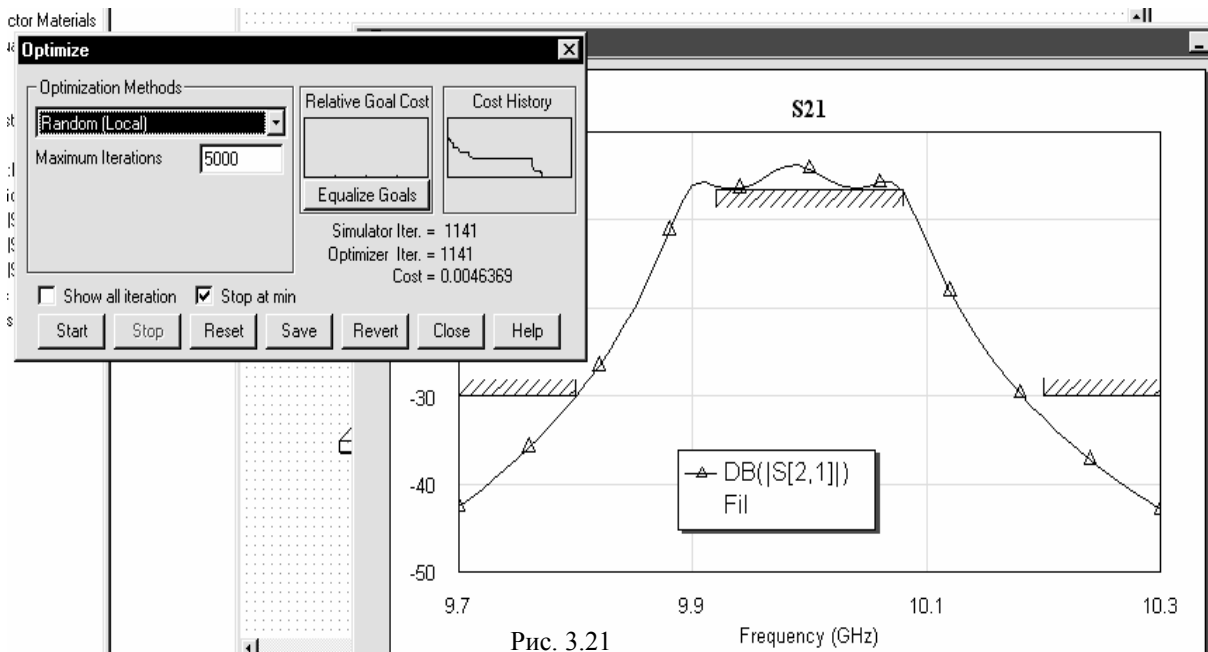


Рис. 3.21

кнопку **Reset** в окне **Optimize**, чтобы вернуть первоначальные значения параметров. В списке **Optimization Methods** выберите **Pointer – Train an Optimizer**, установите **5000** в поле **Maximum Iterations**, **1000** в поле **Iteration Target** и **0** в поле **Start Pt. Robutness**, как показано на рис. 3.22. Введите **cfil.opt** в поле **Trained Optimizer Name** и нажмите кнопку **Start**. Результаты процесса тренировки Указателя оптимизации показаны на рис. 3.23.

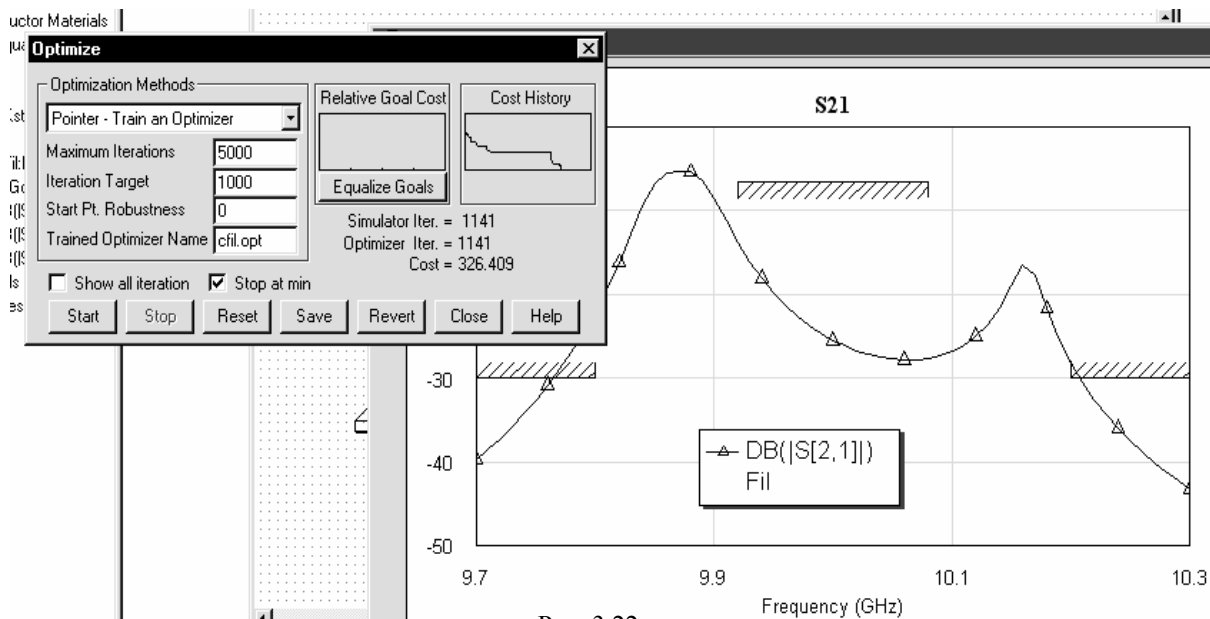


Рис. 3.22

Iteration Target, **1000** в поле **Iteration Target** и **0** в поле **Start Pt. Robutness**, как показано на рис. 3.22. Введите **cfil.opt** в поле **Trained Optimizer Name** и нажмите кнопку **Start**. Результаты процесса тренировки Указателя оптимизации показаны на рис. 3.23.

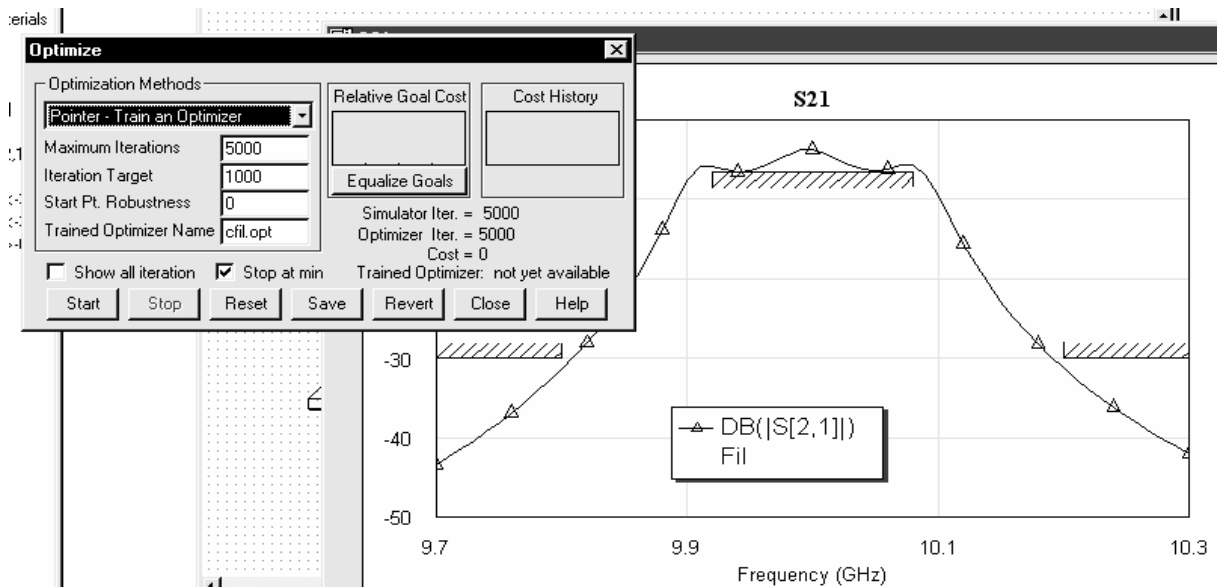


Рис 3 23

Проверьте работу тренированного указателя. Нажмите кнопку **Reset** в окне **Optimize**, чтобы снова вернуть первоначальные значения параметров. В списке **Optimization Methods** выберите **Pointer – Run Trained Optimizer**, в поле **Trained Optimizer Name** наберите имя файла с тренированным Указателем **sfil.opt**, как показано на рис. 3.24, и нажмите кнопку **Start**.

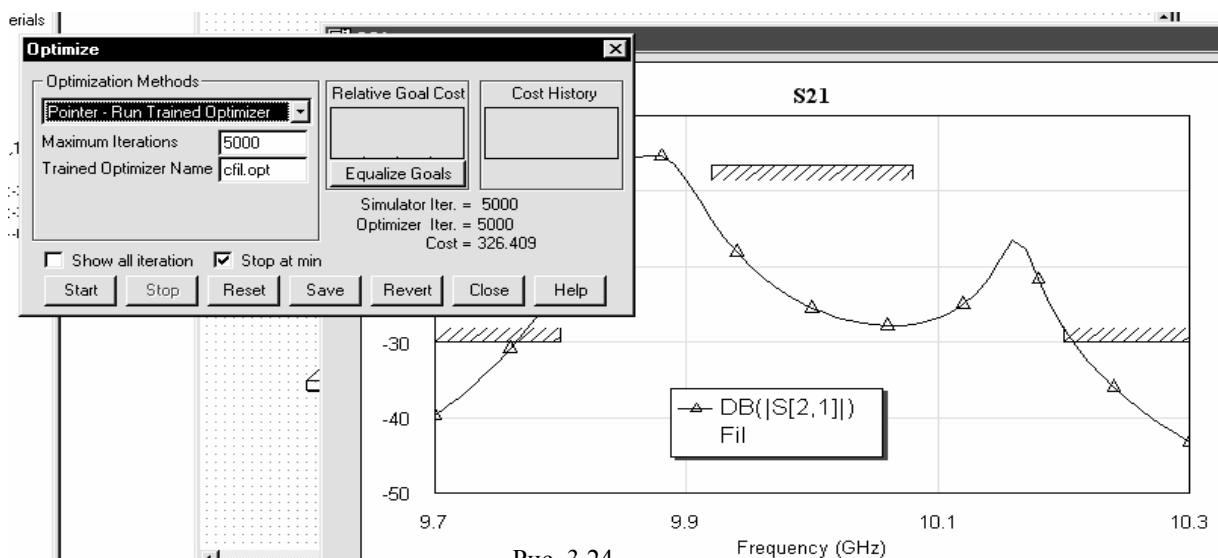


Рис 3 24

Результаты работы тренированного оптимизатора показаны на рис. 3.25.

Заметьте, что время работы этого тренированного оптимизатора существенно меньше

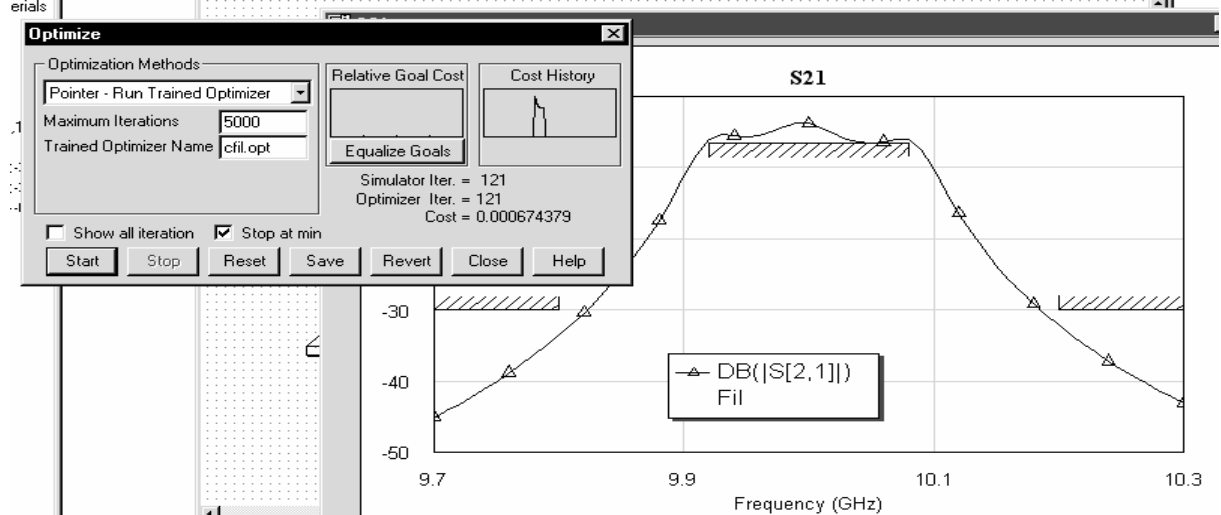


Рис. 3.25

работы случайного оптимизатора **Random** (можно сравнить и с другими оптимизаторами). Это

можно видеть и по количеству выполненных итераций в процессе оптимизации: 121 итерация в тренированном оптимизаторе (Рис. 3.25) и 1141 итерация в случайном оптимизаторе (Рис. 3.21). Этот тренированный Указатель оптимизации `sf11.opt` теперь можно использовать для других микрополосковых полосовых фильтров с емкостными связями.

Закройте окно **Optimize** и сохраните проект, выбрав **File > Save Project** в выпадающем меню.

Замечание. При установке ограничений на параметры следите, чтобы значения параметров не выходили за пределы применимости модели. Если значение какого-либо параметра при оптимизации выйдет за пределы применимости модели, работа программы будет остановлена с выдачей сообщения об ошибке. Например, модель зазора **MGAP2** справедлива при значениях $0.5 < W/H < 2.5$, $0.1 < S/H < 1$ и $1 < \epsilon_r < 16$. Если в процессе оптимизации оптимизатор выберет ширину зазора меньше 0.5 мм, то будет выдано сообщение об ошибке. Пределы применимости модели можно найти в описании этой модели в каталоге элементов.

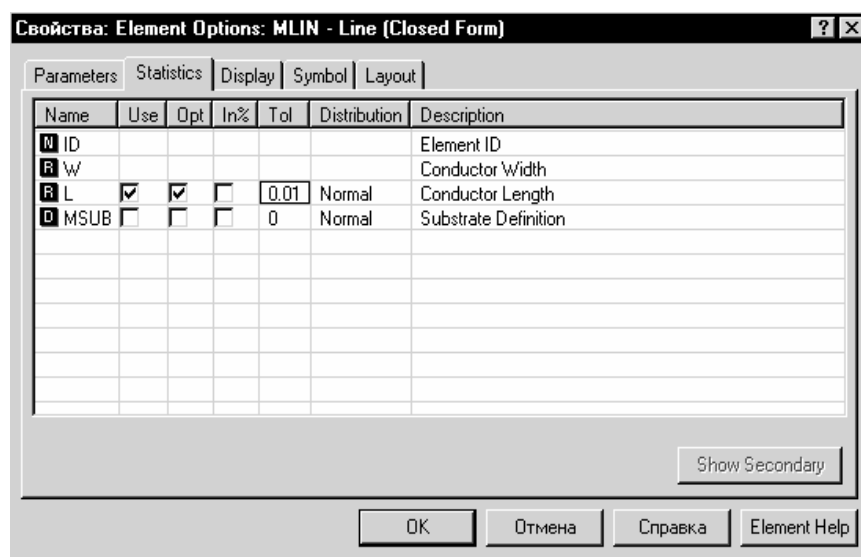
4 Статистический анализ

Статистический анализ может использоваться, чтобы оценить, как влияет разброс параметров элементов схемы на разброс характеристики. Microwave Office 2002 может также оптимизировать статистический разброс характеристики, изменяя номинальные значения параметров (т.е. выполнять технологическую оптимизацию).

Перед проведением статистического анализа необходимо задать возможный разброс значения параметров и установить цели статистического анализа, которые определяют, когда схема имеет приемлемые характеристики, а когда – недопустимые.

4.1 Ввод разброса значения параметров

Для ввода статистических свойств параметров, дважды щёлкните по элементу схемы,



чтобы открыть диалоговое окно **Element Options** (Опции элемента). Щёлкните по панели **Statistics** в верхней части этого окна. Страница **Statistics** диалогового окна **Element Options** показана на рис. 4.1.

В левом столбце таблицы **Name** (Имя) перечислены все параметры элемента (на рис. 4.1 это **W** и **L**). Два следующих столбца задают режимы использования допусков на параметры. Если включены режимы **Use** (использовать) и **Opt** (Оптимизация),

то параметру назначаются случайные значения при статистическом анализе и статистической оптимизации. Если эти режимы отключены, то при статистическом анализе и статистической оптимизации разброс параметра игнорируется и используется только номинальное значение. Включение и отключение режимов производится щелчком мышки по квадратику напротив нужного элемента в соответствующем столбце.

Если включён режим **Opt**, то обязательно должен быть включён и режим **Use**. Если значения параметра ограничены, то при оптимизации эти ограничения контролируются, чтобы значения параметра не вышли за границы установленных ограничений. Ограничения значений параметров устанавливаются в странице **Parameters** (Параметры) этого же окна.

В столбце **Tol** (Tolerance – Допуск) вводится допуск на параметр. Если установить «галочку» в столбце **In%**, щёлкнув по квадратику в этом столбце, то допуск считается заданным в процентах к номинальному значению. Если галочка в столбце **In%** не установлена, то допуск считается заданным в абсолютных единицах, определённых в проекте (обычно в мм). Столбец **Distribution** (Распределение) определяет распределение случайной величины. В этой версии Microwave Office поддерживается только равномерное (**Uniform**) и нормальное (**Normal**) распределение. Чтобы изменить предлагаемое по умолчанию распределение (обычно **Normal**), нужно щёлкнуть левой кнопкой мышки по соответствующей ячейке. Затем щёлкнуть по появившейся в правой части ячейки кнопке со стрелкой. Откроется список доступных распределений случайной величины, в котором нужно выбрать необходимое распределение. Если установлено равномерное распределение, то при статистическом анализе значение параметра будет изменяться на случайную величину, которая равномерно распределена симметрично относительно нуля на \pm заданное значение допуска. Если установлено нормальное распределение, то случайная величина определяется, как среднеквадратичное отклонение.

Рис. 4.1

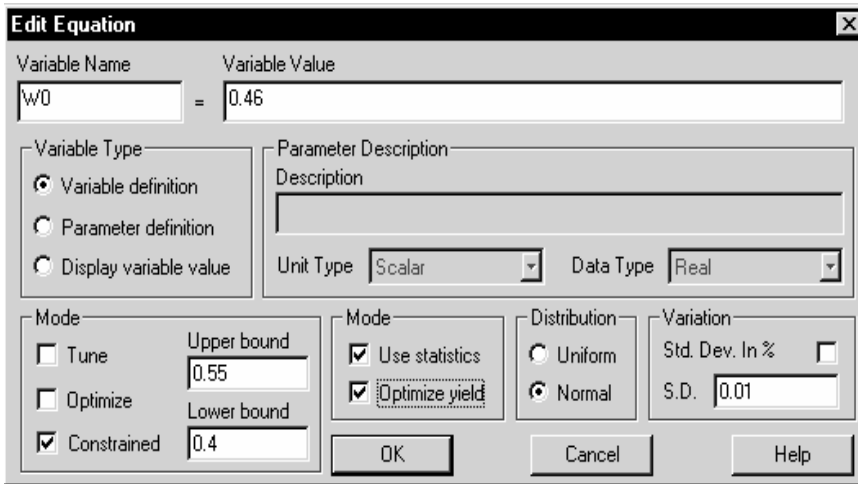


Рис. 4.2

описано выше, хотя сами поля в этом окне расположены иначе.

4.2 Установка целей статистического анализа

До проведения статистического анализа требуется установить цели, которые определяют границы, в которых электрическая схема имеет допустимые или недопустимые значения выходных характеристик. Цели можно установить, выбрав **Add Yield Goal** (Добавить цель статистического анализа) в выпадающем меню **Project**, или щёлкнув правой кнопкой мышки по группе **Yield Goal** в окне просмотра проекта. Цели для статистического анализа устанавливаются почти так же, как и цели для оптимизации. Единственное отличие в том, что здесь меньшее количество параметров, связанных с целью.

В проекте могут быть определено несколько целей. В процессе статистического анализа, если любая из целей не выполняется для выборки, то эта выборка считается неудачной (т.е. имеет недопустимую характеристику).

4.3 Выполнение статистического анализа

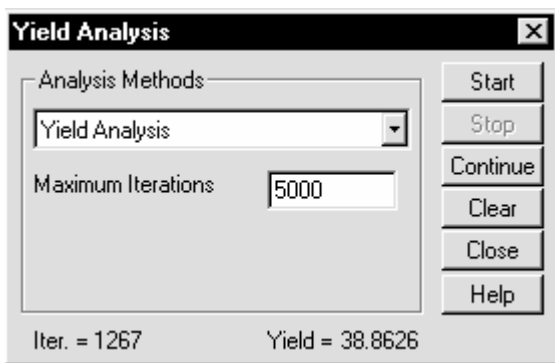


Рис. 4.3

При статистическом анализе выполняется анализ Монте-Карло для электрической схемы. Для каждой выборки устанавливаются случайные значения параметров из заданного распределения случайных величин. При моделировании полученная характеристика каждой выборки сравнивается с целями статистического анализа, чтобы определить, удачна выборка или нет, т.е. соответствует ли характеристика допустимым значениям.

Чтобы выполнить статистический анализ, нужно выбрать **Simulate > Yield Analysis** (Моделирование > Статистический анализ) в выпадающем меню. Откроется диалоговое окно **Yield Analysis**, показанное на рис. 4.3. В этом окне устанавливается максимальное число итераций (**Maximum Iterations**), которые могут быть выполнены в течение статистического анализа. Количество выполненных итераций (**Iter =**) и число удачных выборок в процентах (**Yield =**) отображаются в этом диалоговом окне в процессе статистического анализа.

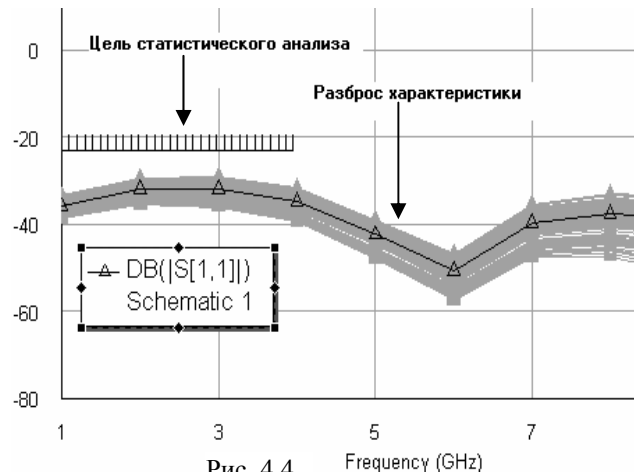


Рис. 4.4

Для ввода статистических свойств независимых переменных, определённых в схеме, нужно щёлкнуть левой кнопкой по переменной, чтобы выделить её. Затем по выделенной переменной щёлкнуть правой кнопкой мышки и во всплывающем меню выбрать **Properties** (Свойства). Откроется диалоговое окно **Edit Equation**, показанное на рис. 4.2. В этом окне устанавливаются статистические свойства в соответствующих полях, как

Разброс характеристики, обусловленный случайными значениями параметров элементов схемы для каждой выборки, отображается на графике. На этом же графике отображаются установленные цели статистического анализа. Возможный вид графика входного коэффициента отражения показан на рис. 4.4.

4.4 Отображение разброса характеристики

В Microwave Office 2002 имеется несколько опций, определяющих отображение разброса

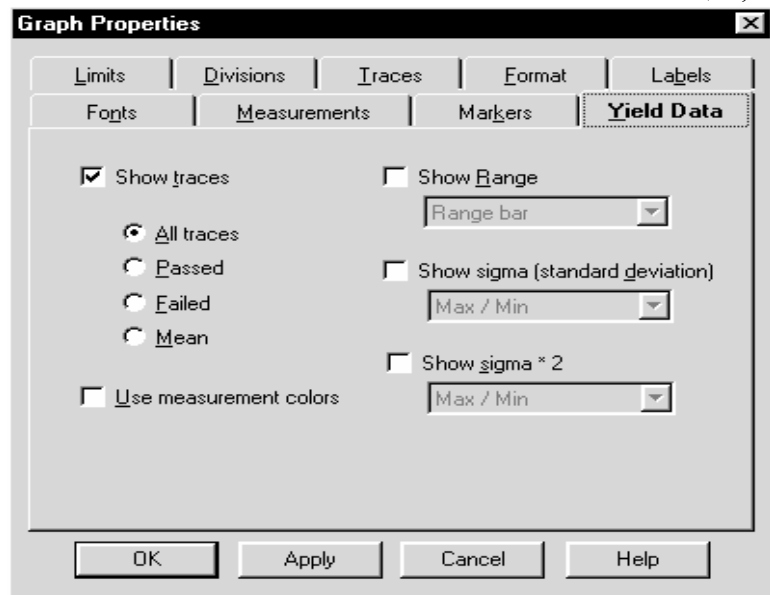


Рис. 4.5

са характеристики на графике при статистическом анализе. Для установки этих опций используется страница **Yield Data** (Данные статистического анализа) в диалоговом окне **Graph Properties** (Свойства графика), показанная на рис. 4.5. Чтобы открыть эту страницу, нужно щёлкнуть правой кнопкой мышки по графику на рабочем поле, или щёлкнуть левой кнопкой мышки по значку **Properties** на панели инструментов при активном окне графика на рабочем поле, или выбрать **Graph > Properties** в выпадающем меню при активном окне графика и затем нажать на панель **Yield Data** в верхней час-

ти открывшегося окна.

При включённой опции **Show traces** (Показывать следы) на графике, кроме номинального значения, будет отображаться разброс характеристики, при выключенной – не будет. Ниже этой опции имеется переключатель, который определяет, как отображать результаты каждой выборки. Возможные варианты этого переключателя:

- o **All traces** – все следы (отображаются результаты всех выборок);
- o **Passed** – проходимый (отображаются результаты только удачных выборок);
- o **Failed** – неудавшийся (отображаются результаты только неудачных выборок);
- o **Mean** – средний (отображается среднестатистическое значение характеристики).

При включённой опции **Use measurement colors** (Использовать цвет измеряемой величины) результаты каждой выборки отображаются тем же цветом, что и номинальное значение характеристики. Если эта опция отключена, то результаты каждой выборки отображаются серым цветом, что позволяет отличить разброс характеристики от номинального значения.

Кроме того, имеются следующие три опции:

- o **Show Range** – показывает весь диапазон разброса характеристики;
- o **Show sigma (standard deviation)** – показывает диапазон среднеквадратичных отклонений от среднего значения характеристики;
- o **Show sigma * 2** – показывает диапазон удвоенных среднеквадратичных отклонений от среднего значения характеристики.

Каждая из этих опций имеет подопции, которые определяют, как отображать на графике границы разброса характеристики:

- o **Max / Min** – показывает огибающие максимальных и минимальных значений характеристики без заполнения штриховкой области между ними;
- o **Envelope** – заполняет штриховкой область между огибающими максимальных и минимальных значений характеристики;

- о **Range Bar** – показывает заштрихованную область между огибающими максимальных и минимальных значений характеристики, но сами огибающие рисует не сплошными линиями, а короткими горизонтальными штрихами.

Указанные подопции можно выбрать из выпадающего списка, если щёлкнуть по квадратику со стрелкой справа в соответствующем поле ввода.

Следы разброса характеристики можно удалить, выбрав **Graph > Clear Frozen** (Очистить закрепление) в выпадающем меню.

4.5 Анализ результатов

Каждый параметр, имеющий разброс, занимает некоторый диапазон значений. Этот диапазон может быть разделён на ряд поддиапазонов. Если значение параметра при статистическом анализе попадает в один из поддиапазонов, то к количеству выборок, попавших в этот поддиапазон, добавляется ещё одна. Выборка, попадающая в каждый поддиапазон значения параметра, может быть удачной или неудачной. Если выборка удачна, она добавится к количеству удачных выборок, попавших в этот поддиапазон. Если выборка неудачна, она добавится к количеству неудачных выборок, попавших в этот поддиапазон. Процент удачных выборок в поддиапазоне определяется как отношение количества удачных выборок к количеству неудачных.

По результатам каждого поддиапазона для каждого статистического параметра можно построить график в виде гистограммы, как функции значения параметра, которая определяет чувствительность характеристики к изменению этого параметра. Каждая область гистограммы соответствует одному поддиапазону значений параметра. Число на вершине каждой области показывает общее количество выборок, которые попали в этот поддиапазон. Высота каждой области гистограммы определяет процент удачных выборок в этой области. Чтобы создать гистограмму чувствительности, создайте график в виде гистограммы и затем добавьте измеряемую величину **YSens** к этому графику (**Yield** – выходная характеристика, **Sensitivity** – чувствительность) и выберите один из параметров, включённых в статистический анализ (выберите тип **Yield Meas** в диалоговом окне).

Гистограмма может использоваться для оценки чувствительности характеристики к изменению параметра. Если распределение гистограммы плоское, то характеристика не чувствительна к изменению значения параметра. Узкое распределение указывает, что характеристика чувствительна к изменению параметра.

Гистограмма также указывает, можно ли уменьшить разброс характеристики, изменяя номинальное значение параметра. Если пик распределения гистограммы совпадает с номинальным значением параметра, то параметр считается «центрированным» и уменьшить разброс характеристик изменением номинального значения нельзя. Если пик распределения не совпадает с номинальным значением параметра, то это указывает на то, что разброс характеристики может быть уменьшен изменением номинального значения параметра.

4.6 Вызов статистической оптимизации

Статистическая оптимизация в Microwave Office 2002 корректирует номинальные значения параметров так, чтобы уменьшить разброс характеристики.

Чтобы начать статистическую оптимизацию, выберите **Simulate > Yield Analysis** в выпадающем меню. В открывшемся окне **Yield Analysis** щёлкните по кнопке со стрелкой в поле ввода и в открывшемся списке выберите **Yield Optimization**. Полученное при этом диалоговое окно показано на рис. 4.6.

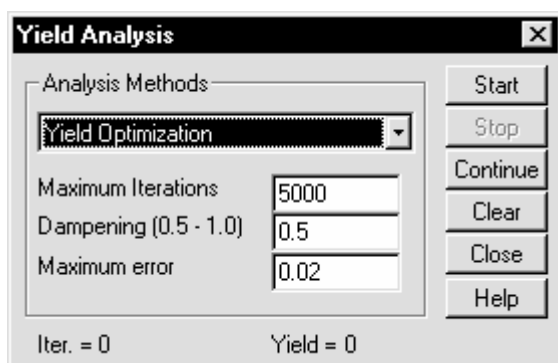


Рис. 4.6

Статистическая оптимизация требует проведения анализа Монте-Карло для каждой итерации. Количество испытаний для каждого анализа Монте-Карло зависит от желательной степени доверительности оценки разброса характеристики и от величины разброса. Доверительный уровень (**Maximum error** – максимальная

ошибка в окне **Yield Analysis**), используемый в процессе оптимизации, вводится пользователем. Количество испытаний, которое необходимо для данного доверительного уровня, определяется автоматически.

Каждая итерация статистического анализа заканчивается, когда выполняется достаточное количество испытаний для заданного доверительного уровня.

В диалоговом окне также должно задаваться максимальное число испытаний в итерации. Это максимальное число ограничивает верхний предел количества испытаний для оценки разброса характеристики. Если после максимального числа испытаний доверительный уровень не достигнут, то используется значение разброса характеристики, полученное при максимальном числе испытаний.

При статистической оптимизации можно также изменить коэффициент, влияющий на величину коррекции параметра (**Dampening**), задаваемый по умолчанию. Если этот коэффициент близок к единице, то при оптимизации делается большая коррекция. Если же он мал, значение параметра в процессе оптимизации изменяется на малую величину. Обычно значение этого коэффициента, задаваемое по умолчанию, достаточно. Если процесс оптимизации имеет тенденцию «зацикливаться», можно попробовать меньшее значение. Большое значение может ускорить поиск оптимума.

Пример 4.1

В качестве примера рассмотрим оптимизацию фильтра из примера 2.1.

Выберите **File > Open Project** в выпадающем меню и откройте проект **CFil**.

Сделайте активным окно схемы, щёлкнув левой кнопкой мышки по видимой части этого окна, или дважды щёлкните по подгруппе **Fil** в окне просмотра проекта.

Установите следующие значения переменных **s1=0.06**, **s2=0.31**, **L1=10.65**, дважды щёлкая левой кнопкой мышки по этим переменным. Установите длину среднего резонатора **L=10.71**, дважды щёлкнув левой кнопкой мышки по этому параметру.

Назначьте переменные для статистического анализа и введите допуски на значения переменных. Щёлкните левой кнопкой мышки по переменной **W0**, затем щёлкните правой кнопкой по этой переменной и выберите **Properties** во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно **Edit Equation** (см. рис. 4.2). Отметьте **Use statistics** (Использовать статистику) и **Normal**. В поле **S.D.** (Seated Deviate – Установка отклонения) введите допуск на ширину проводника **0.01** (поле **Std. Dev. Ln%** должно быть не отмеченным, чтобы допуск считался заданным в единицах длины, т.е. в мм). Нажмите **OK**.

Щёлкните левой кнопкой мышки по переменной **s1**, затем щёлкните правой кнопкой по этой переменной и выберите **Properties** во всплывающем меню. В открывшемся окне (рис. 4.7) удалите отметку в полях **Tune** и **Optimize**. Отметьте **Use statistics** и **Uniform**. Дело в том, что при равномерном распределении границы разброса параметра чётко ограничены (от -0.01 до

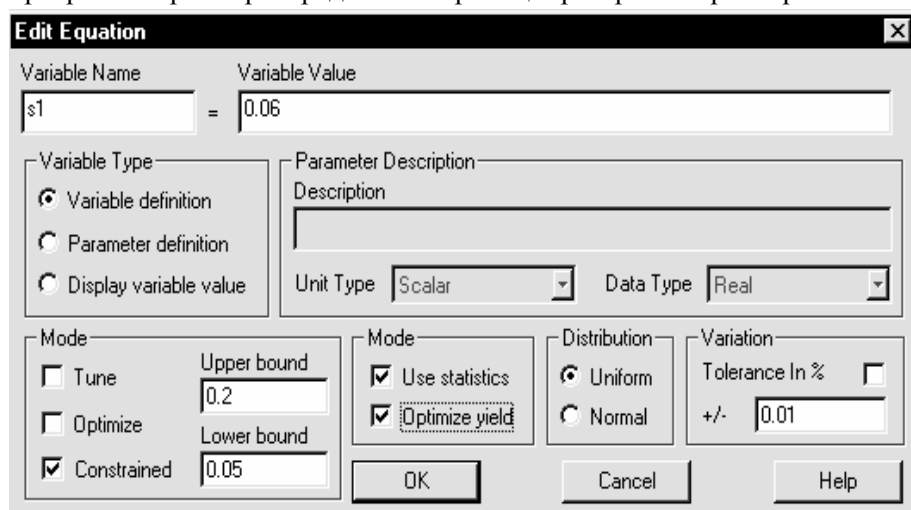


Рис. 4.7

$+0.01$), а при нормальном распределении такого ограничения нет и в некоторых выборках ширина зазора может оказаться меньше 0.05, что выходит за пределы применимости модели. В таком случае процесс будет остановлен с выдачей сообщения об ошибке. В поле **S.D.** введите допуск на ширину зазора **0.01**. Нажмите **OK**.

Проделайте то же самое для переменных **s2** и **L1**, введя допуск **0.01**.

Введите допуск на длину среднего резонатора. Дважды щёлкните по среднему резонатору (элемент **ID=TL5** на схеме). Откроется диалоговое окно **Element Options** (рис. 4.1). На странице **Parameters** этого окна снимите отметку в столбцах **Tune** и **Opt**. Откройте страницу **Statistics** (см. рис. 4.1), отметьте столбец **Use** напротив параметра **L**, в поле **Tol** введите допуск **0.01**. Нажмите **OK**.

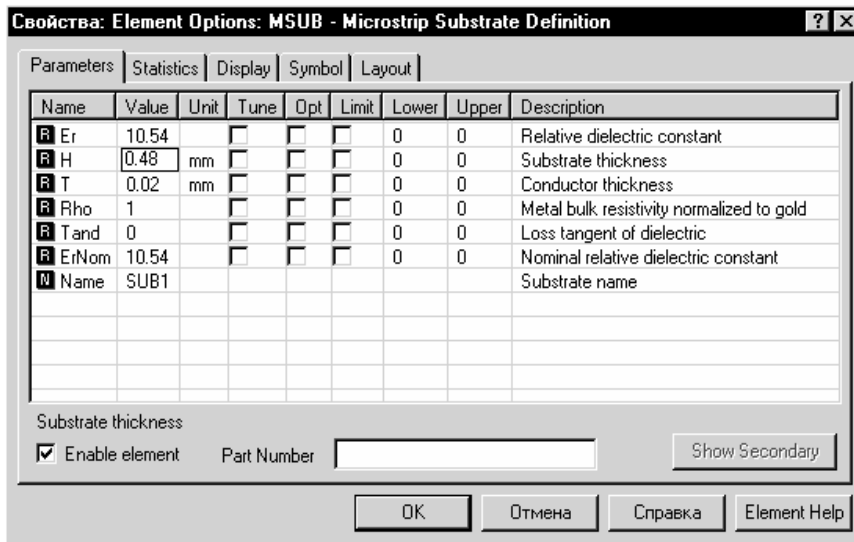


Рис. 4.8

Введите допуск на параметры подложки. Дважды щёлкните по элементу подложки на схеме (элемент **MSUB**). Откроется диалоговое окно **Element Options**. На странице **Parameters** этого окна в столбце **Value** напротив параметра **H** введите толщину подложки **0.48** (Рис. 4.8).

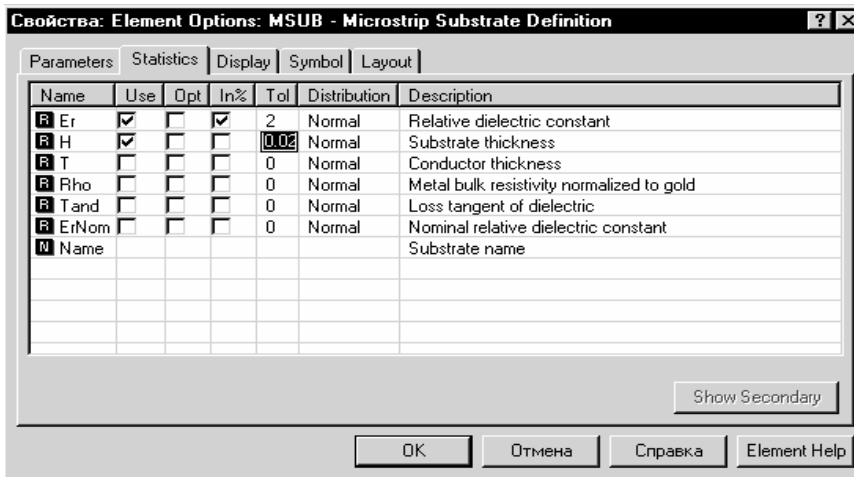


Рис. 4.9

Замечание. По ТУ на подложки допуск на толщину только минусовой -0.04 , а в Microwave Office можно установить только симметричный допуск. Чтобы остаться в поле возможных размеров подложки, толщину можно сделать 0.48 с симметричным допуском 0.02 .

Нажмите панель **Statistics** в верхней части диалогового окна. На этой странице отметьте столбец **Use** напротив параметра **H** и введите допуск **0.02** на толщину подложки в столбце **Tol** (см. Рис. 4.9). На этой же странице напротив параметра **Er** отметьте столбец **Use** и столбец **In%**, чтобы ввести допуск на диэлектрическую проницаемость в процентах. Введите **2** в столбце **Tol** для **Er**. Нажмите **OK**.

Сделайте активным окно графика ослабления **S21**, щёлкнув левой кнопкой мышки по видимой части этого окна, или дважды щёлкните по подгруппе **S21** в окне просмотра проекта.

Дважды щёлкните левой кнопкой мышки по группе **Project Options** в окне просмотра проекта, установите диапазон анализа от 9 до 11 ГГц с шагом 0.02 и выполните анализ, щёлкнув левой кнопкой мышки по значку **Analyze** на панели инструментов.

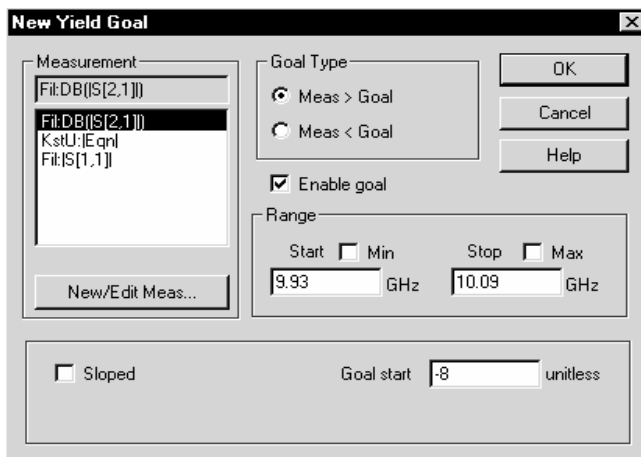


Рис. 4.10

Удалите цели оптимизации, щёлкнув по каждой цели правой кнопкой мышки и выбрав **Delete Goal** во всплывающем меню.

Установите цель статистического анализа в полосе пропускания. Для этого щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Yield Goals** в окне просмотра проекта и выберите **Add Yield Goal** во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно **New Yield Goal** (Рис. 4.10). В поле списка

Measurement отметьте **Fil:DB(|S(2,1)|)**, отметьте **Meas > Goal**. Снимите «галочки» в полях

Start Min и **Stop Max** и введите соответственно нижнюю частоту полосы пропускания **9.93** и верхнюю **10.09**. В поле **Goal start** введите **-8**. Нажмите **OK**.

Установите цель статистического анализа для нижней полосы заграждения. Снова откройте окно **New Yield Goal**. В списке **Measurement** выберите **Fil:DB(|S[2,1]|)**. Отметьте **Meas < Goal**. Снимите «галочку» в поле **Stop Max** и введите верхнюю частоту нижней полосы заграждения **9.82**. В поле **Goal start** введите **-30** (см. Рис. 4.11). Нажмите **OK**.

Установите цель статистического анализа для верхней полосы заграждения. Снова откройте окно **New Yield Goal**. В списке **Measurement** выберите **Fil:DB(|S[2,1]|)**. Отметьте **Meas < Goal**. Снимите «галочку» в поле **Start Min** и введите нижнюю частоту верхней полосы заграждения **10.2**. В поле **Goal start** введите **-30** (см. Рис.4.12). Нажмите **OK**.

Характеристика фильтра с установленными целями статистического анализа показана

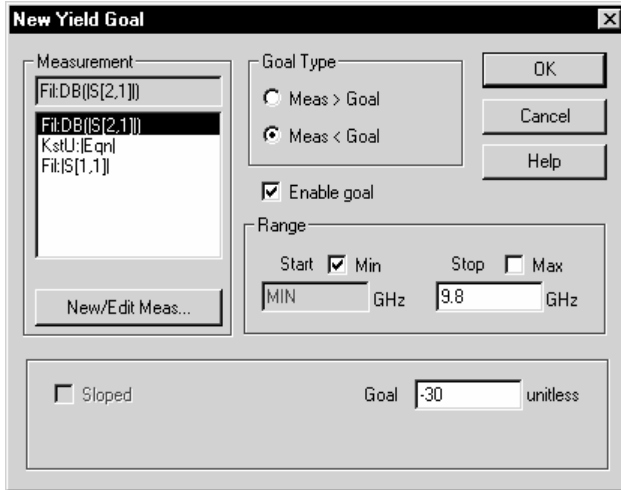


Рис. 4.11

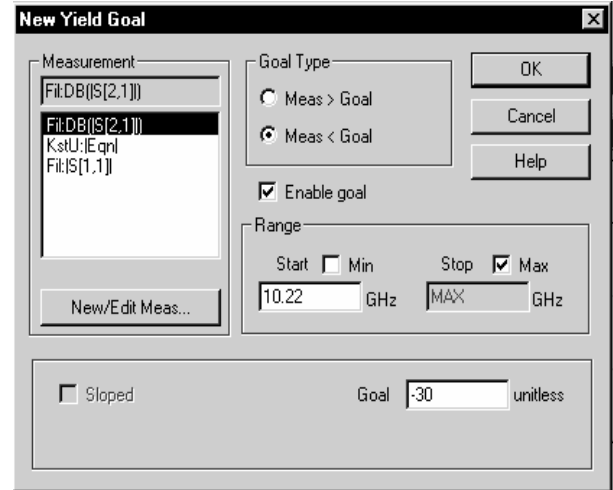


Рис.4.12

на рис. 4.13. Обратите внимание, что штриховка целей на графике показывает области недопустимых значений характеристики.

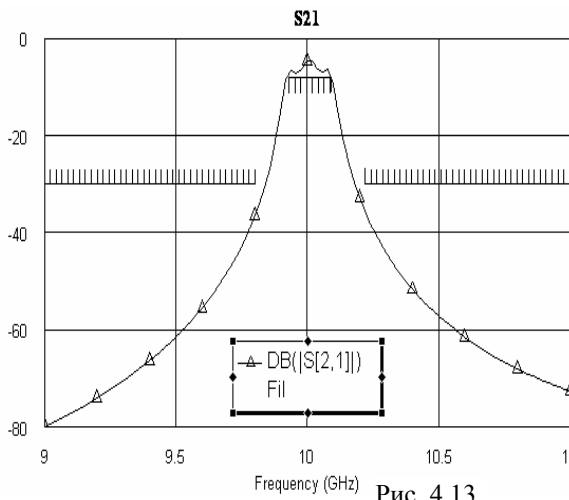


Рис. 4.13

В полосе пропускания штриховка направлена в сторону большего ослабления, а в полосах заграждения – в сторону меньшего.

Выберите **Simulate > Yield Analysis** в выпадающем меню. Откроется диалоговое окно **Yield Analysis** (Рис. 4.14). В выпадающем списке **Analysis Methods** выберите **Yield Analysis**. В поле **Maximum Iterations** наберите **1000**. Нажмите **Start**. В нижней части этого диалогового окна указывается общее количество выполненных выборок (**Iter =**) и количество выборок, удовлетворяющих установленным целям, в процентах (**Yield =**). Область разброса характеристики отображается на графике рис. 4. 14.

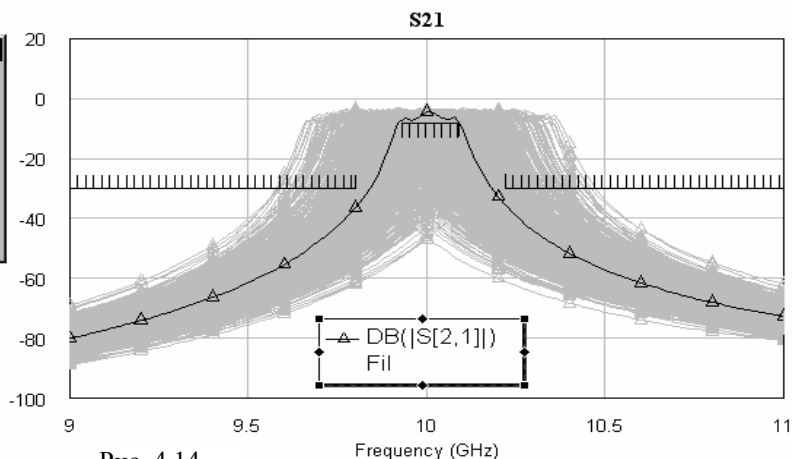
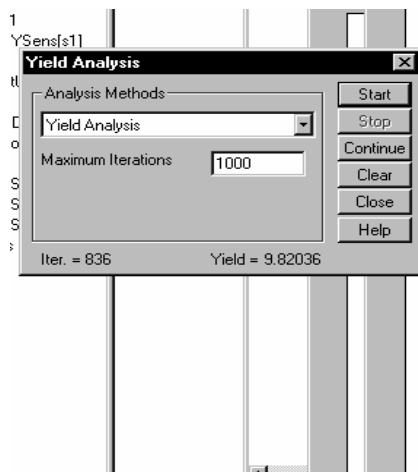


Рис. 4.14

Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и во всплывающем меню выберите **Properties**. Откроется диалоговое окно **Graph Properties**. Нажмите панель **Yield Data** в верхней

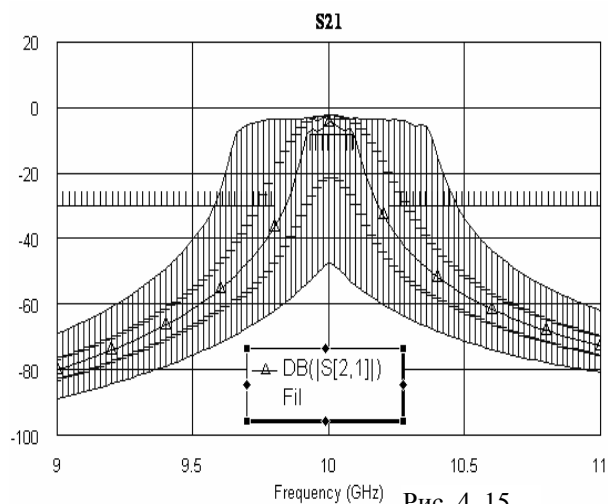


Рис. 4.15

части окна. Уберите «галочку» в **Show traces** (Показать следы). Отметьте **Show Range** (Показать диапазон) и в выпадающем списке этого поля ввода выберите **Max / Min**. Нажмите **Apply**, окно не закрывайте. На графике будут показаны огибающие максимальных и минимальных значений характеристики. Отметьте **Show sigma** (Показать среднеквадратичное отклонение), щёлкните по кнопке справа этого поля и выберите **Range Bar** (Область разброса) в выпадающем списке. Нажмите **Apply** (Применить). На графике будут отображены короткими горизонтальными штрихами огибающие диапазона среднеквадратичных отклонений от среднего значения характеристики, а диапазон разброса характеристики будет заштрихован (Рис. 4.15). Нажмите **OK**.

Создайте график - гистограмму. Щёлкните левой кнопкой по значку **Add Graph** на панели инструментов. В открывшемся окне **Create Graph** отметьте **Histogram** и нажмите **OK**.

Щёлкните левой кнопкой по значку **Add Measurement** на панели инструментов. В открывшемся диалоговом окне **Add Measurement** (Рис. 4.16) в списке **Meas. Type** выберите **Yield**. В списке **Measurement** выберите **YSens**. В поле ввода **Variables In** введите имя схемы **Fil**.

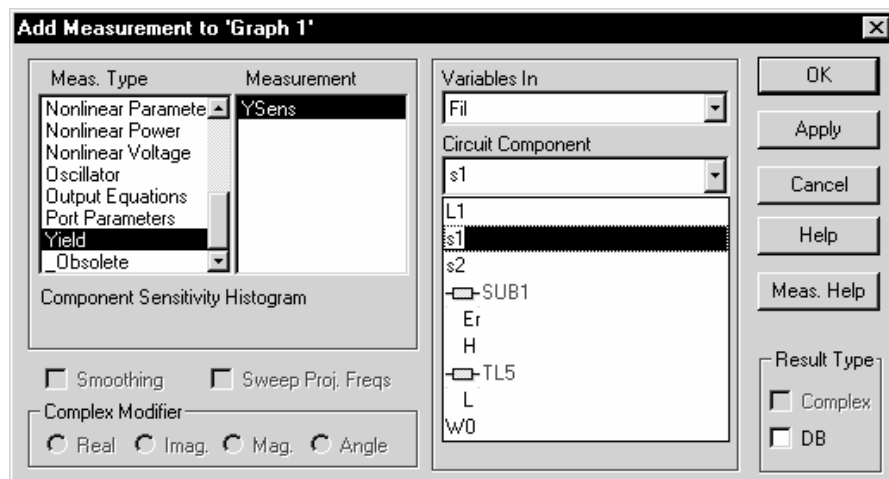


Рис. 4.16

Щёлкните левой кнопкой мышки по кнопке справа в поле **Circuit Component** и в выпавшем списке выберите **s1**. Нажмите **Apply** и затем **OK**. Гистограмма чувствительности характеристики к изменению ширины зазора s1 показана на рис. 4.17. Огибающая этой гистограммы имеет довольно плоский вид, что говорит о слабой чувствительности

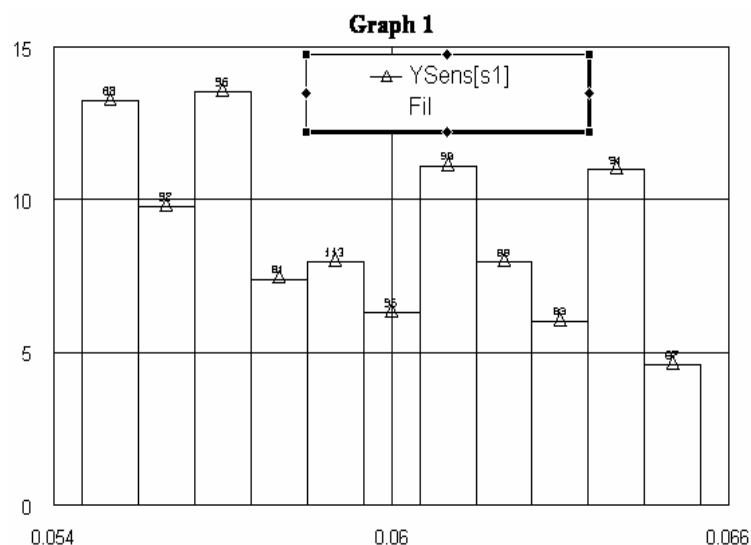


Рис. 4.17

характеристики к изменению s1 в пределах допуска. Но пик распределения не совпадает с номинальным значением s1 = 0.6 и можно надеяться на возможность некоторого уменьшения разброса характеристики с помощью статистической оптимизации.

Чтобы оценить чувствительность характеристики к другим параметрам схемы, щёлкните правой кнопкой мышки по подгруппе **Fil:YSens[s1]** в группе графика – гистограммы (в данном случае **Graph 1**) в окне просмотра проекта. Во всплывающем меню выберите **Modify Measurement**. Откроется диалоговое окно **Modify Measurement** (Рис. 4.18). В выпадающем списке поля **Circuit**

Откроется диалоговое окно **Modify Measurement** (Рис. 4.18). В выпадающем списке поля **Circuit**

Component выберите **Er** и нажмите **OK**. Гистограмма чувствительности схемы к изменению

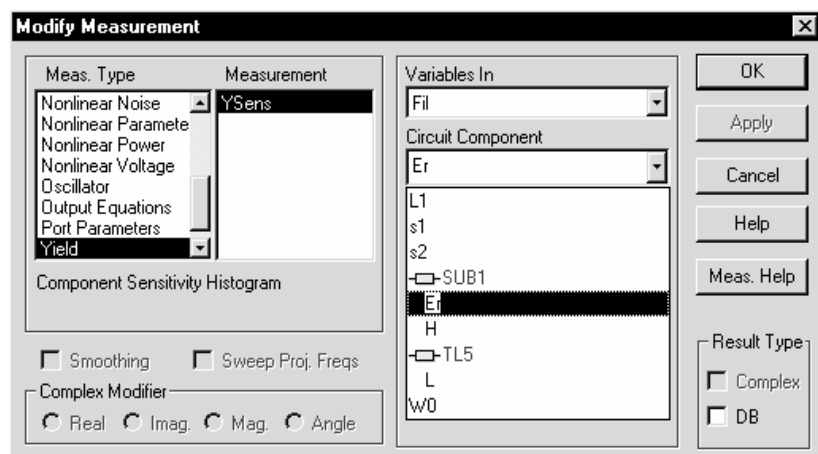


Рис. 4.18

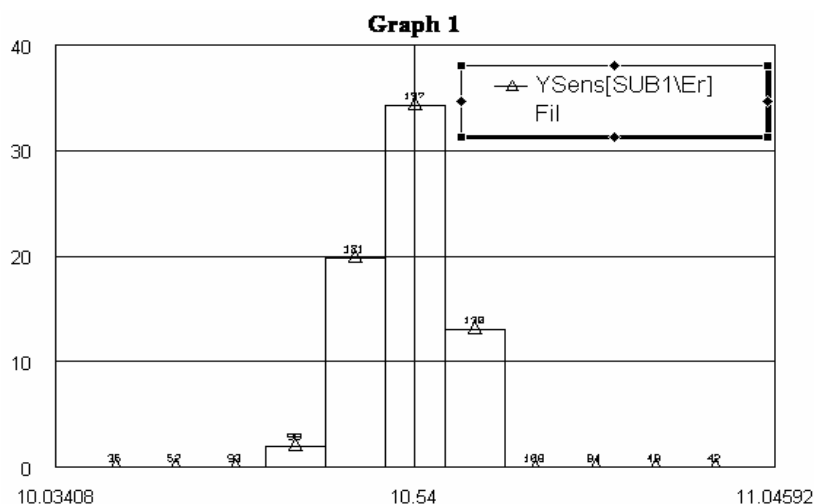


Рис. 4.19

Снимите «галочки» в полях **Show Range** и **Show sigma**, щёлкая по ним левой кнопкой мышки. Отметьте **Show traces** и **All traces**. Нажмите **Apply** и затем **OK**.

Назначьте переменные и параметры для статистической оптимизации (если вы не сделали это одновременно с назначением переменных и параметров для статистического анализа). Сделайте активным окно схемы, щёлкнув левой кнопкой мышки по видимой части этого окна или дважды щёлкнув по подгруппе **Fil** в окне просмотра проекта.

Щёлкните левой кнопкой мышки и затем правой кнопкой по переменной **W0**. Выберите **Properties** во всплывающем меню. В открывшемся окне **Edit Equation** отметьте **Optimize yield** и **Constrained**. В поля **Lower bound** и **Upper bound** введите соответственно нижний предел допустимого значения ширины проводника **0.4** и верхний предел **0.55** (см. рис. 4.2). Нажмите **OK**. Аналогично назначьте для статистической оптимизации переменную **s1**, установив ограничения **0.05** и **0.2** (см рис. 4.7); переменную **s2**, установив ограничения **0.1** и **0.5**; переменную **L1**, установив ограничения **8** и **13**.

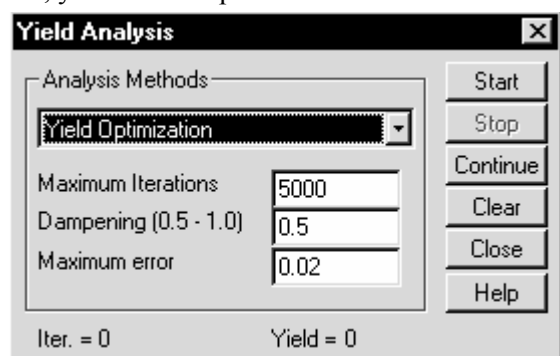


Рис. 4.20

диэлектрической проницаемости подложки показана на рис. 4.19. Из гистограммы видно, что характеристика чувствительна к изменению этого параметра, но пик её распределения совпадает с номинальным значением $E_r = 10.54$ и уменьшить разброс характеристики за счёт изменения E_r нельзя (т.е. при изменении E_r характеристика сместится по частоте, но её разброс останется таким же).

Аналогично можно оценить чувствительность характеристики к изменению всех остальных параметров схемы.

Сделайте активным окно графика ослабления **S21**, дважды щёлкнув левой кнопкой мышки по подгруппе этого графика в окне просмотра проекта. Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и во всплывающем меню выберите **Properties**. В открывшемся диалоговом окне откройте страницу **Yield Data**, нажав на панель **Yield Data** в верхней части окна.

Дважды щёлкните левой кнопкой мышки по среднему резонатору (элемент **ID=TL5** на схеме). В открывшемся окне **Element Options** на странице **Parameters** отметьте столбец **Limit** напротив параметра **L**, а в столбцах **Lower** и **Upper** введите соответственно нижний предел допустимого значения длины резонатора **8** и верхний предел **13**. На странице **Statistics** отметьте столбец **Opt** напротив параметра **L**. Нажмите **OK**.

Параметры подложки назначать для оптимизации не имеет смысла, если, конечно, вы не хотите специально подбирать подложки.

Для выполнения статистической оптимизации выберите **Simulate > Yield Analysis** в выпадающем меню. В открывшемся окне **Yield Analysis** щёлкните левой кнопкой мышки по кнопке справа в поле **Analysis Method** и в выпадающем списке выберите **Yield Optimization**. В поле **Maximum Iterations** введите нужное максимальное число итераций, в поле **Dampening** введите нужный коэффициент коррекции параметров, в поле **Maximum error** введите нужный доверительный уровень, или оставьте эти значения, предлагаемые по умолчанию (см. рис. 4.20). Нажмите **Start**. Результаты статистической оптимизации показаны на рис. 4.21. Разброс

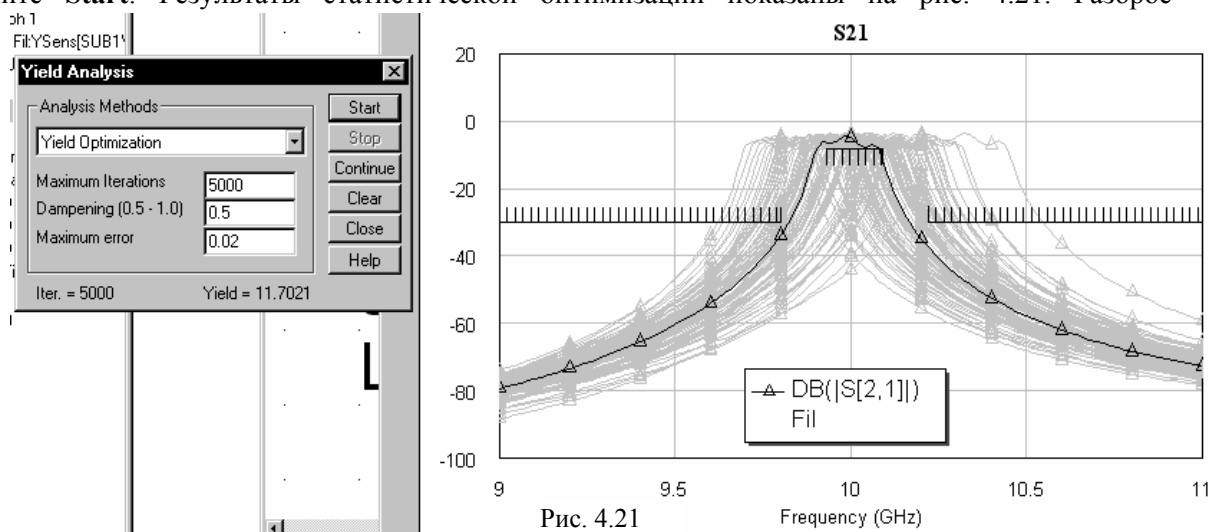


Рис. 4.21

характеристики уменьшился (количество «удачных» выборок стало 11.7% вместо 9.8%, которые были до статистической оптимизации, см. рис. 4.14), но очень незначительно, что можно было предвидеть из анализа чувствительности схемы к изменениям параметров элементов. Скорректированные оптимизацией номинальные значения параметров элементов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

| Параметр | До оптимизации | После оптимизации |
|----------|----------------|-------------------|
| W0 | 0.46 | 0.47 |
| s1 | 0.06 | 0.06 |
| s2 | 0.31 | 0.31 |
| L1 | 10.65 | 10.66 |
| L | 10.71 | 10.708 |

Замечание. Обратите внимание, статистическая оптимизация не улучшает номинальную характеристику. Она только пытается уменьшить разброс характеристики, возможно за счёт некоторого допустимого ухудшения номинальной характеристики.

Оглавление

| | | |
|------|--|----|
| 1 | Переменные и уравнения..... | 1 |
| 1.1 | Определение переменных и уравнений..... | 1 |
| 1.2 | Выходные уравнения..... | 2 |
| 1.3 | Синтаксис уравнений..... | 4 |
| | Пример 1.1..... | 8 |
| 2 | Настройка..... | 11 |
| | Пример 2.1..... | 12 |
| 3 | Оптимизация..... | 16 |
| 3.1 | Целевая функция..... | 16 |
| 3.2 | Рекомендации по использованию оптимизации..... | 17 |
| 3.3 | Назначение параметров элементов для оптимизации и ограничение их значений..... | 18 |
| 3.4 | Установка целей оптимизации..... | 20 |
| 3.5 | Выполнение оптимизации..... | 22 |
| 3.6 | Методы оптимизации..... | 23 |
| 3.7 | Указатель оптимизации..... | 26 |
| 3.8 | Использование имеющихся Указателей оптимизации..... | 27 |
| 3.9 | Создание тренированного Указателя оптимизации..... | 28 |
| 3.10 | Использование обученного оптимизатора..... | 29 |
| 3.11 | Практические советы..... | 29 |
| 3.11 | Дискретная оптимизация..... | 30 |
| | Пример 3.1..... | 31 |
| 4 | Статистический анализ..... | 36 |
| 4.1 | Ввод разброса значения параметров..... | 36 |
| 4.2 | Установка целей статистического анализа..... | 37 |
| 4.3 | Выполнение статистического анализа..... | 37 |
| 4.4 | Отображение разброса характеристики..... | 38 |
| 4.5 | Анализ результатов..... | 39 |
| 4.6 | Вызов статистической оптимизации..... | 39 |
| | Пример 4.1..... | 40 |