

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
МИКРОПОЛОСКОВЫХ  
ФИЛЬТРОВ СВЧ  
С ПОМОЩЬЮ  
NUBERTZ FILTER**

2008 г.



# Оглавление

Введение .....	2
1. Интерфейс программы Nuhertz Filter .....	3
2. Фильтры нижних частот .....	12
3. Фильтры верхних частот.....	24
4. Полосно-пропускающие фильтры .....	33
4.1. Фильтр на замкнутых шлейфах с полосой пропускания 4-8 ГГц.....	33
4.2. Фильтр с боковыми электромагнитными связями с полосой пропускания 9-9.5 ГГц.....	40
4.3. Фильтр с боковыми электромагнитными связями с полосой пропускания 11-14 ГГц.....	46
4.4. Встречноштыревой фильтр с полосой пропускания 3-3.6 ГГц.....	51
4.5. Шпилечный фильтр с полосой пропускания 2-2.3 ГГц.....	57
5. Полосно-заграждающие фильтры.....	67



## Введение

Программа Nuhertz Filter предназначена для синтеза и анализа фильтров в широком диапазоне от радиочастот до СВЧ. В этой программе можно синтезировать фильтры нижних частот, фильтры верхних частот, полосно-пропускающие фильтры, полосно-заграждающие фильтры и диплексеры. Синтезируемые фильтры могут иметь различные функции передачи: Гаусса, Бесселя, Баттерворда, Чебышева I и II рода и др. Фильтры могут быть реализованы на сосредоточенных элементах и на отрезках линий передачи. Поддерживаются линии RGLC, микрополосковые и симметричные линии.



Рис. 1

Программа Nuhertz Filter полностью интегрирована в среду проектирования Design Environment компании AWR. Если Nuhertz Filter инсталлирована, она появляется как подгруппа Nuhertz Filter Wizard (рис. 1) в группе мастеров Wizards в левом окне просмотра проекта Microwave Office. Для синтезированного фильтра программа Nuhertz Filter автоматически создаёт в Microwave Office соответствующую схему и набор графиков для дальнейшего уточнения параметров элементов фильтра. Перейти

из программы Nuhertz Filter в Microwave Office можно на любом этапе синтеза и анализа фильтра. Это можно сделать сразу же после ввода исходных данных для синтеза. При этом синтезированная схема фильтра немедленно передаётся в Microwave Office для дальнейшего моделирования. Или можно выполнить анализ в Nuhertz Filter, просмотреть полученные схему и характеристики, причём можно быстро просмотреть несколько вариантов схемы фильтра, выбрать наиболее подходящий и затем полученные результаты передать в Microwave Office для окончательной доработки схемы и топологии фильтра.

Подход к синтезу фильтров СВЧ на отрезках линий передачи может быть различным. Например, можно сначала синтезировать фильтр на сосредоточенных элементах и затем заменить ёмкости и индуктивности эквивалентными отрезками линий (разомкнутыми или короткозамкнутыми шлейфами). Такой метод синтеза иногда даёт хорошие результаты, однако часто получаются нереализуемые элементы топологии. Или можно синтезировать фильтр непосредственно на отрезках линий.

Чтобы запустить программу Nuhertz Filter, нужно раскрыть группу Wizards и дважды щёлкнуть левой кнопкой мышки по Nuhertz Filter Wizard.

В данном пособии рассматривается синтез микрополосковых фильтров. Но аналогично можно синтезировать фильтры и на других, доступных в программе, линиях.

В приводимых примерах использовались Nuhertz Filter версии 4.0 и Microwave Office версии 7.5.1.

*Е.Е. Дмитриев*

# 1. Интерфейс программы Nuhertz Filter

После запуска программы открывается окно **Filter Synthesis** (рис.1.1). В верхней части этого окна находится строка меню. Ниже расположена строка кнопок, открывающих соответствующие вкладки этого окна,

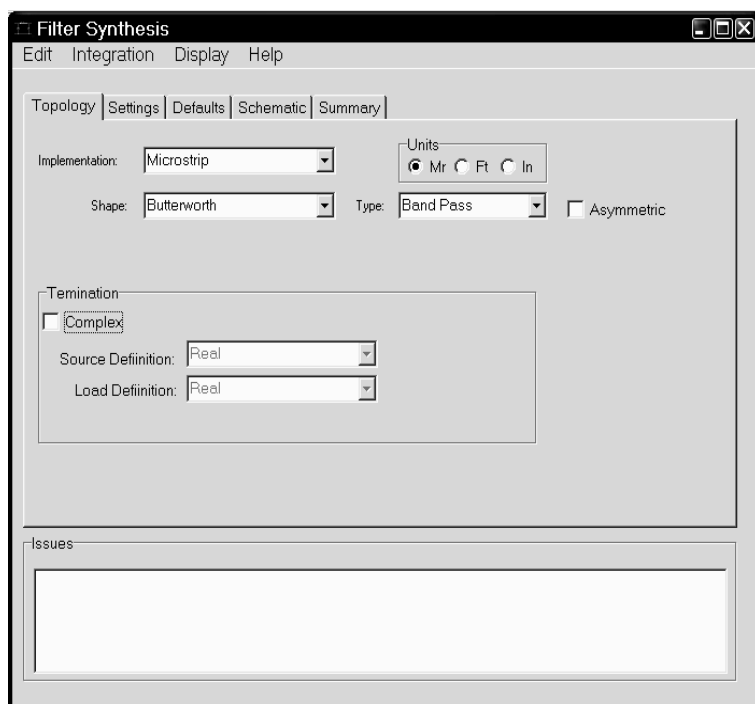


Рис. 1.1

1. В поле **Implementation** (Реализация) указывается, на чём будет реализован фильтр. Если выбрана одна из линий передачи, справа от этого поля появляется строка переключателей, в которой указывается используемая система единиц измерения длины.
2. В поле **Shape** (Вид) вводится вид характеристики, а в поле **Type** вводится тип фильтра.
3. В области **Termination** (Согласование) можно указать тип источника и нагрузки. По умолчанию это резистивные сопротивления в Оммах.

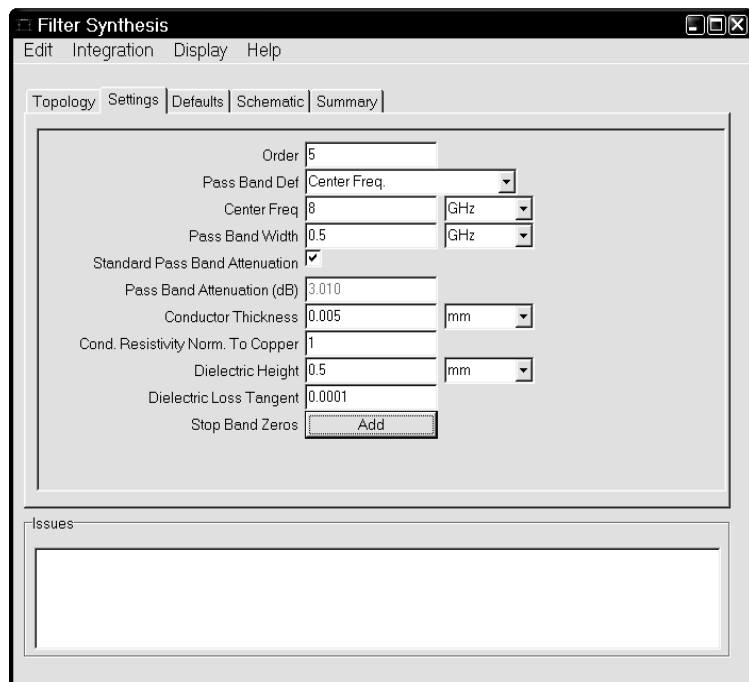


Рис. 1.2

в Microwave Office. Во втором случае вводятся нижняя и верхняя частоты полосы пропускания.

на которых вводятся исходные данные для синтеза фильтра. Вид каждой вкладки зависит от выбранного типа фильтра и выбранных установок для синтеза. Выполнение некоторых основных операций рассмотрим на примере синтеза фильтра с боковыми электромагнитными связями.

На вкладке **Topology** (рис. 1.1) вводятся:

1. В поле **Implementation** (Реализация) указывается, на чём будет реализован фильтр. Если выбрана одна из линий передачи, справа от этого поля появляется строка переключателей, в которой указывается используемая система единиц измерения длины.

На вкладке **Setting** (Установки, рис. 1.2) вводятся:

1. Порядок фильтра (**Order**).
2. В поле **Pass Band Def** определяется способ ввода полосы пропускания. Для полосовых фильтров можно указать центральную частоту (**Center Freq**) или граничные частоты (**Corner Freqs**). В зависимости от этого выбора несколько изменяется содержание окна. Если выбрано **Center Freq**, в следующих полях вводятся центральная частота (**Center Freq**) и ширина (**Pass Band With**) полосы пропускания. Справа от этих полей указываются единицы измерения для частоты. По умолчанию они такие же, как и

3. Если отмечено **Standard Pass Band Attenuation**, полоса пропускания отсчитывается по уровню 3 дБ. Если эту отметку убрать, то в поле **Pass Band Attenuation (dB)** можно ввести уровень, по которому отсчитывать полосу пропускания.
4. В поле **Conductor Thickness** вводится толщина проводника, а в поле **Dielectric Height** вводится толщина диэлектрика. Справа от этих полей указывается единица измерения для этих величин.
5. В поле **Cond. Resistivity Norm. To Copper** вводится сопротивление проводника, нормированное относительно меди.
6. В поле **Dielectric Loss Tangent** вводится тангенс угла диэлектрических потерь.

На вкладке **Defaults** (По умолчанию, рис. 1.3) вводятся дополнительные установки, которые будут действовать по умолчанию:

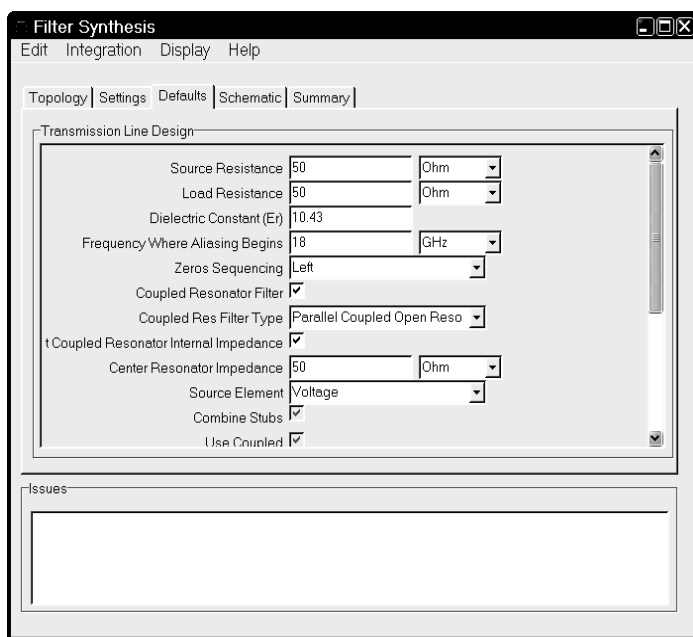


Рис. 1.3

фильтра), то в поле **Coupled Res Filter Type** можно выбрать тип связи, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля. Т.е. здесь можно выбрать различные типы фильтров на связанных резонаторах (на разомкнутых или короткозамкнутых отрезках связанных линий, встречноштыревые или шпилечные и с различной связью с входными и выходными линиями).

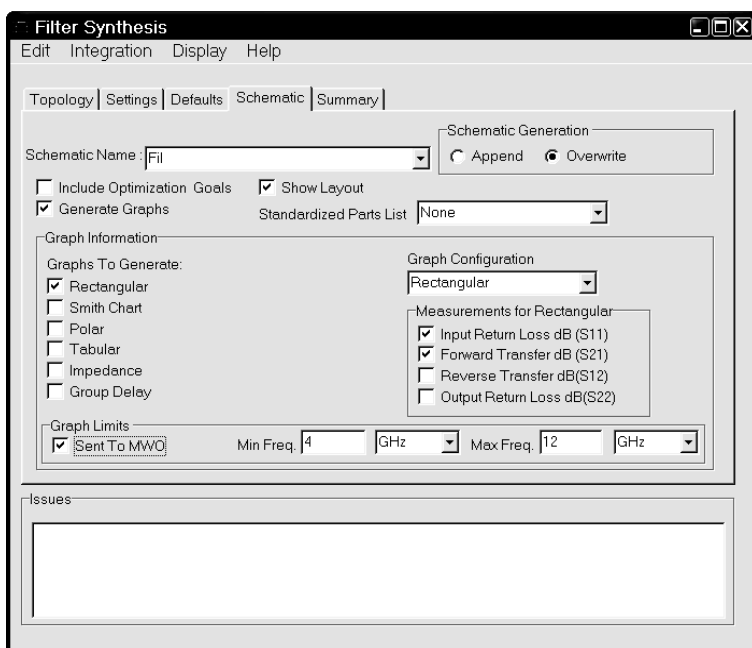


Рис. 1.4

1. В поля **Source Resistance** и **Load Resistance** вводятся сопротивления источника и нагрузки соответственно.
2. В поле **Dielectric Constant (Er)** вводится значение диэлектрической проницаемости.
3. В поле **Frequency Where Aliasing Begins** вводится частота, где начинается неоднозначность. Эту частоту рекомендуется устанавливать по возможности дальше от центральной частоты.
4. В поле **Zeros Sequencing** (Упорядочение нуля) определяется, где должна быть нулевая частота, слева или справа.
5. Если отмечено **Coupled Resonator Filter** (Связанный резонатор фильтра), то в поле **Coupled Res Filter Type** можно выбрать тип связи, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля. Т.е. здесь можно выбрать различные типы фильтров на связанных резонаторах (на разомкнутых или короткозамкнутых отрезках связанных линий, встречноштыревые или шпилечные и с различной связью с входными и выходными линиями).
6. По умолчанию сопротивление центрального резонатора устанавливается равным 75 Ом. Если отметить **Coupled Resonator Internal Impedance**, то в поле **Center Resonator Impedance** можно ввести другое значение этого сопротивления.

На вкладке **Schematic** (рис. 1.4) вводятся установки, которые определяют, как реализуемая схема будет передана в Microwave Office:

1. В поле **Schematic Name** вводится имя схемы.
2. Если в области **Schematic Generation** (Генерация схемы) отметить **Append** (Добавить), то если в проекте Microwave Office уже есть схема с таким

же именем, например Fil2, то будет добавлена новая схема с именем Fil21. Если отметить **Overwrite** (Переписать), то, имеющаяся в Microwave Office схема будет заменена новой схемой с прежним именем.

3. Если отмечено **Include Optimization Goals**, то в Microwave Office будут переданы цели оптимизации.
4. Если отмечено **Show Layout**, то в Microwave Office будет создана и показана топология фильтра.
5. Если отмечено **Generate Graphs** (Создать графики), то в окне появится дополнительная область **Graph Information**, в которой можно указать, какие графики должны быть созданы. Выбрав тип графика в поле **Graph Configuration**, можно указать измеряемые величины, которые должны отображаться на выбранном типе графика.

На вкладке **Summary** (Резюме) отображается информация о моделируемом фильтре.

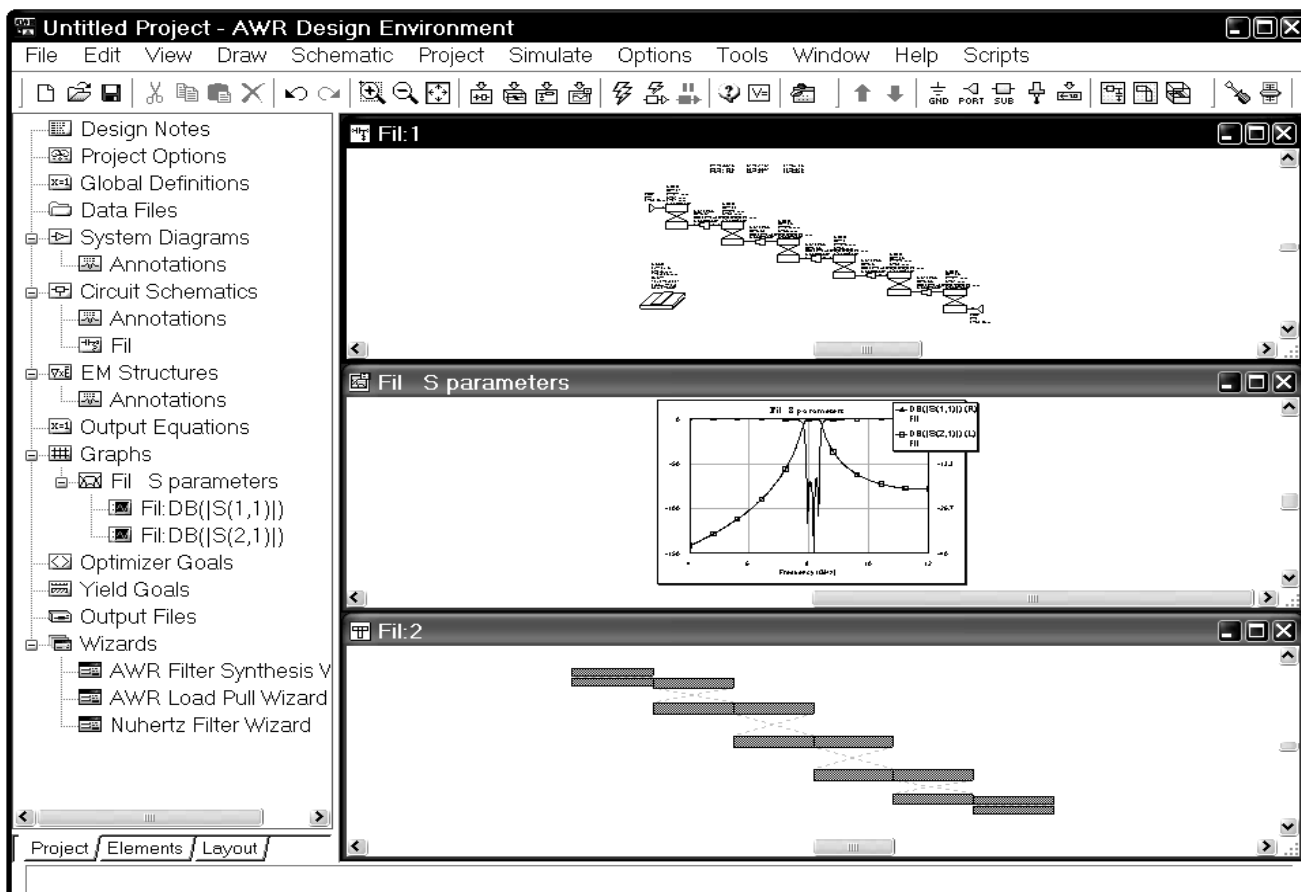


Рис. 1.5

Если теперь выбрать в меню **Integration>Send To MWO**, то схема с графиками и топологией будет передана в Microwave Office для дальнейшего моделирования. В нижней части каждой вкладки имеется поле **Issues** (Результат), в котором отображается результат передачи схемы в Microwave Office или ошибки при передаче схемы, если передача по каким-то причинам не выполнена. На вкладке **Summary** отображаются все введенные установки для фильтра. На рис. 1.5 показано, как будут выглядеть в Microwave Office переданные из Nuhertz Filter схема, графики и топология, если установки в Nuhertz Filter сделаны, как показано на рисунках 1.1 – 1.4. Обратите внимание, что схема передана с добавленными переменными, назначенными для настройки, но для оптимизации схема не подготовлена, т.к. передача оптимизации не устанавливалась. Частоты для анализа переданы только для схемы фильтра. Их можно просмотреть, если щёлкнуть правой кнопкой мышки по имени схемы **Fil** в левом окне просмотра проекта и выбрать **Options**. Дважды щёлкнув левой кнопкой мышки по **Project Options**, можно убедиться, что в проект никаких частот не добавлено. Глобальные единицы в Microwave Office должны быть установлены такие же, как и в Nuhertz Filter.

Также обратите внимание, что Nuhertz Filter установила для скачков сопротивлений X-модели **MSTEPX\$** и значение **ErNom** для элемента **MSUB** (подложки) равной 10.2. Это



ближайшее значение  $E_r$ Nom, для которого в Microwave Office имеется заполненная X-модель.

Если планируется не передавать схему в Microwave Office на этом этапе, а продолжить моделирование в Nuhertz Filter, в меню нужно выбрать **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется основная панель управления Nuhertz Filter (рис. 1.6). На этой панели установлены все исходные данные для синтеза фильтра, которые были определены ранее в окне **Filter Synthesis**. Здесь можно изменить все введённые данные. Более того, если предполагалось продолжить синтез и анализ в Nuhertz Filter, в окне **Filter Synthesis** можно было и не вводить никаких данных, а сразу выбрать в меню **Integration>Nuhertz Interface** и все необходимые данные ввести в основной панели управления.

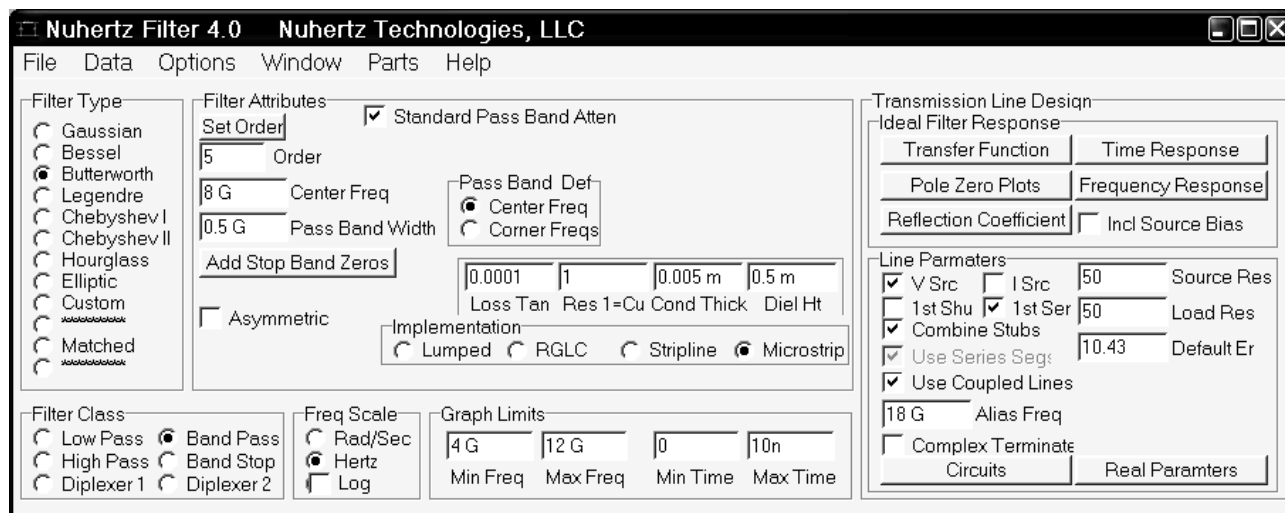


Рис. 1.6

Вверху основной панели управления расположена строка меню. Выбор в меню **File>Save As** позволяет сохранить новый проект в файле, выбор **File>Save** сохраняет существующий проект. Выбор **File>Open** открывает проект, ранее сохранённый в файле. Файлы Nuhertz Filter сохраняются с расширением **ftf**.

Если выбрать в меню **Data**, область **Filter Attributes** заменяется областью **User Time Analysis Data** (рис. 1.7). В этом окне можно загрузить пользовательские данные из файла, щёлкнув мышкой по **Read Data**. Повторный выбор в меню **Data** или щелчок мышкой по кнопке **Close** возвращает прежний вид панели управления.

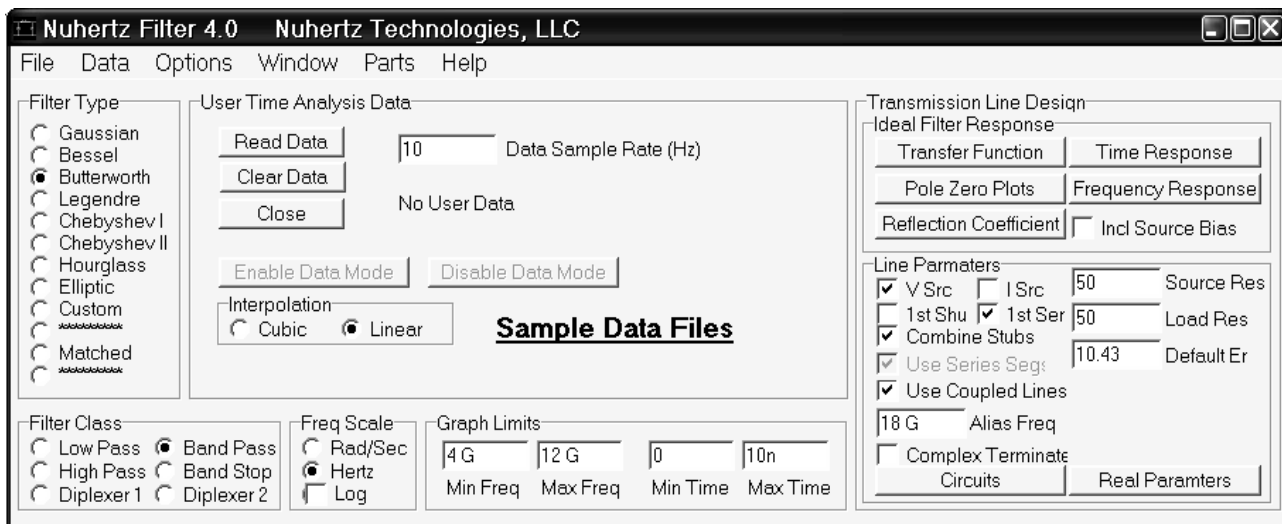


Рис. 1.7

Если в области **Line Parameters** щёлкнуть мышкой по кнопке **Real Parameters** в правом нижнем углу панели управления, область **Line Parameters** заменяется областью **Real Parameters**, в которой можно ввести значения для последовательных и параллельных емкостных и индуктивных сопротивлений. Щелчок по кнопке **Main Parameters** возвращает прежнюю область **Line Parameters**.

Чтобы просмотреть созданную схему фильтра, щёлкните мышкой по кнопке **Circuits** в правой нижней части панели управления. Откроется окно схемы (рис. 1.8), в котором отображается схема и значения параметров всех элементов схемы. Если отметить **Fit** (Подогнать) в правом верхнем углу, отображение схемы будет “подгоняться” под размер окна.

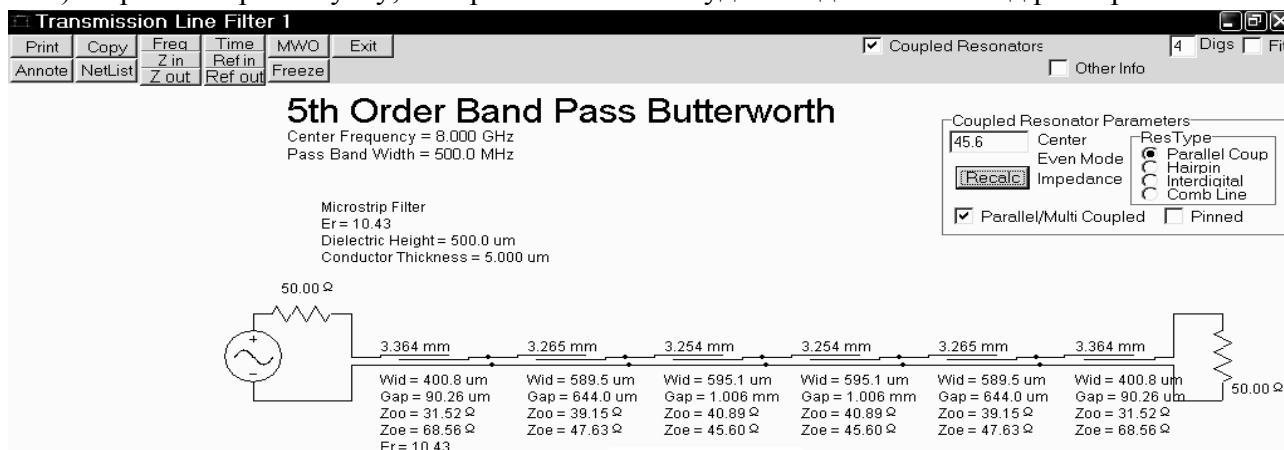


Рис. 1.8

В левом углу схемы находятся кнопки меню. Щёлкнув по кнопке меню, можно выполнить команду, указанную на кнопке:

1. **Print** – Печать схемы.
2. **Copy** – Копировать схему в буфер обмена.
3. **Annotate** – Комментировать, можно ввести две строки пояснений к схеме.
4. **NetList** – Описание цепи. Создаёт NetList для схемы, которое можно сохранить в файле с расширением sct.
5. **Freq** – Открывает окно графиков коэффициента передачи, фазы и группового времени задержки (рис. 1.9). В правой верхней части окна графиков имеется ряд переключателей, отмечая которые или снимая отметку, можно добавлять или убирать соответствующие графики. В левой верхней части этого окна имеется ряд кнопок меню. Если щёлкнуть мышкой по

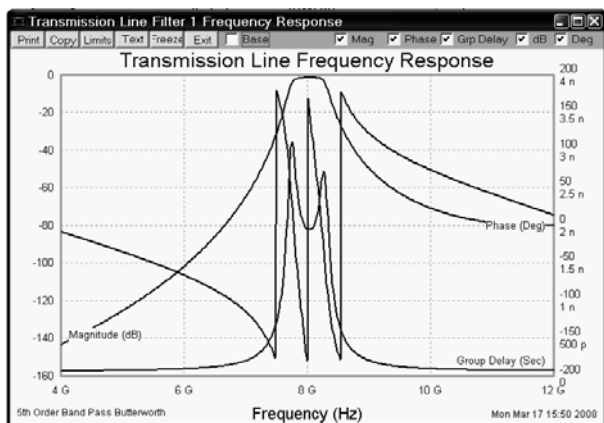


Рис. 1.9

**Limits**, можно изменять параметры графика. Нажатие левой кнопки мышки в окне графика создаёт на графике маркер, который можно перемещать по графику, двигая мышкой с нажатой левой кнопкой. Щелчок правой кнопкой мышки создаёт на графике постоянный маркер. Щелчок правой кнопкой мышки по постоянному маркеру удаляет этот маркер. Щелчок мышкой по **Text** отображает результаты анализа в табличной форме, повторный щелчок убирает таблицу. Щелчок мышкой по **Freeze** закрепляет графики.

6. **Zin** – Открывает окно графика входного сопротивления (модуль и фазу).
7. **Zout** – Открывает окно графика выходного сопротивления (модуль и фазу).
8. **Time** – Открывает окно графика временного затухания сигнала.
9. **Ref in** – Открывает окно графика коэффициента отражения по входу фильтра (модуль и фазу).
10. **Ref out** – Открывает окно графика коэффициента отражения по выходу фильтра (модуль и фазу).
11. **MWO** – Передать схему в Microwave Office. Если щёлкнуть мышкой по этой кнопке, открывается окно (рис. 1.10), в котором можно определить опции передачи схемы (т.е. нужно ли выполнить анализ сразу после передачи (**Simulate After Export**), какого типа графики передать, что отображать на графиках и др.). Если в правом верхнем углу окна

отметить **Do Not Export Frequency Limits**, то частоты в Microwave Office передаваться не будут, и будут использоваться частоты, определённые в проекте Microwave Office.

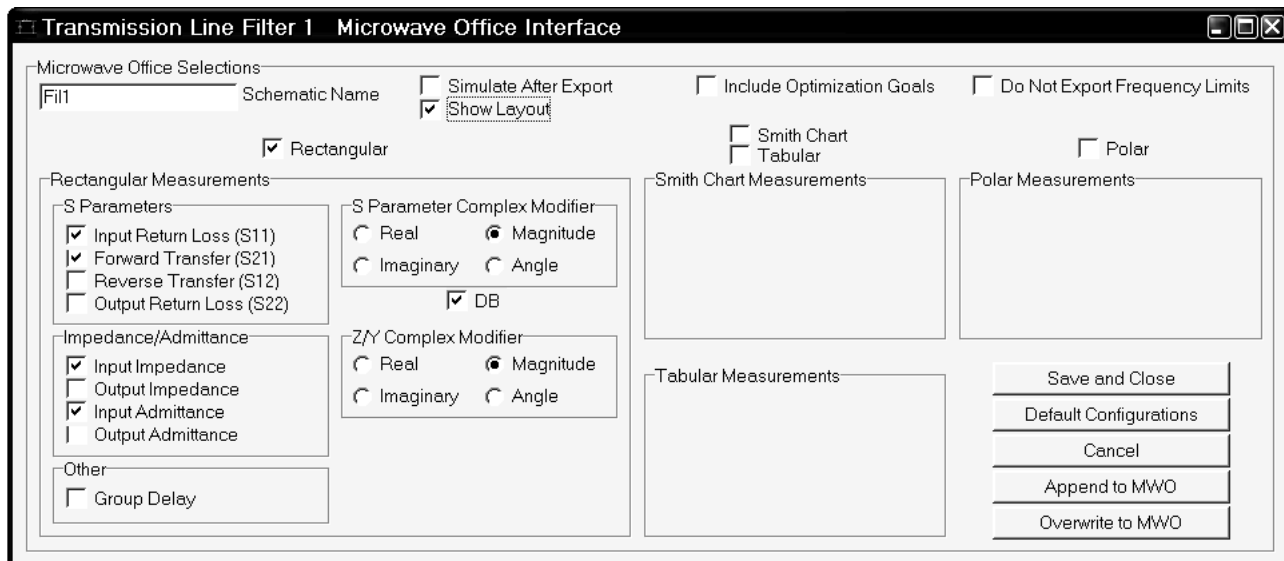


Рис. 1.10

В правом верхнем углу схемы если отметить **Other Info** (Другая информация), то параметры элементов в схеме будут отображены в емкостях и индуктивностях. Переключатель **Coupled Resonators** (Связанные резонаторы) на схеме отмечен, что соответствует сделанным ранее установкам для синтеза фильтра. Если эту отметку убрать, схема будет изменена (рис.1.11). На этой схеме ширины проводников и зазоры помечены **Invalid**. Это означает, что топология не реализуема. Второй и предпоследний резонаторы выполнены на короткозамкнутых отрезках, в отличие от остальных резонаторов. Тем не менее, в Nuhertz Filter такая схема будет проанализирована и создан график. Эту схему можно передать в Microwave Office и там она будет отображена, но её анализ выполняться не будет.

Microstrip Filter  
 Er = 10.43  
 Dielectric Height = 500.0 um  
 Conductor Thickness = 5.000 um

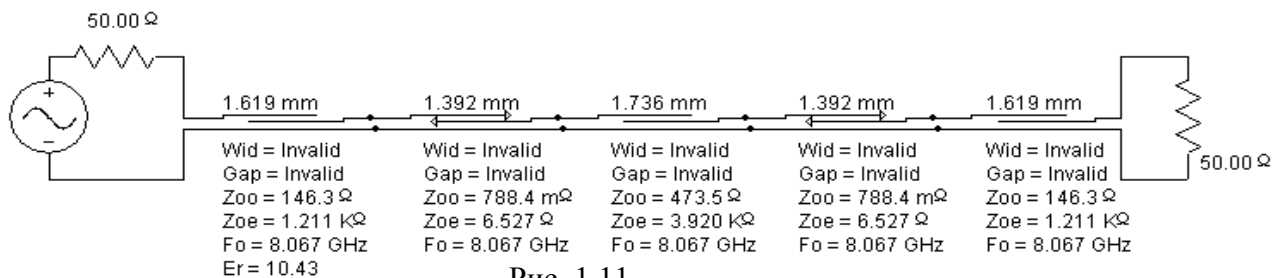


Рис. 1.11

Кроме того, в правом верхнем углу схемы имеется область **Coupled Resonator Parameters** (Параметры связанных резонаторов). В этой области расположен ряд переключателей, позволяющих посмотреть другие варианты реализации фильтра на связанных резонаторах. Для некоторых вариантов новая схема создаётся сразу. Например, если отметить **Comb Line** (Гребенчатая линия), то будет создана схема гребенчатого фильтра (рис. 1.12).

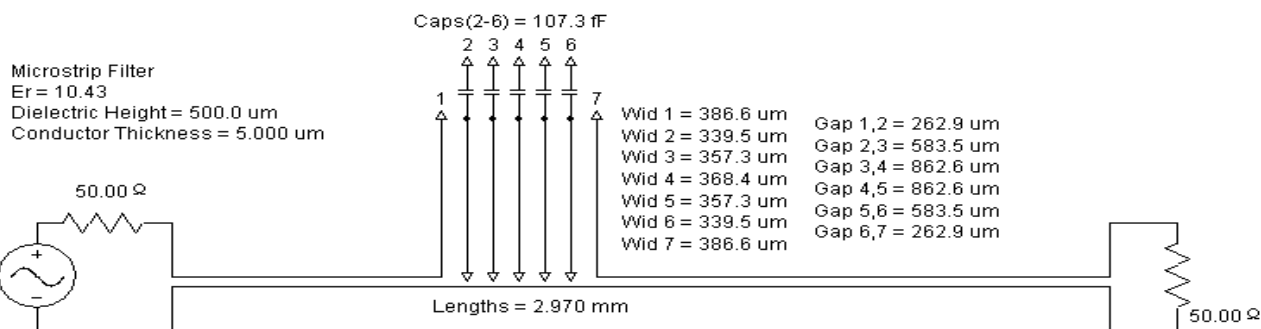


Рис. 1.12

Переданная в Microwave Office схема будет выглядеть, как показано на рис. 1.13.

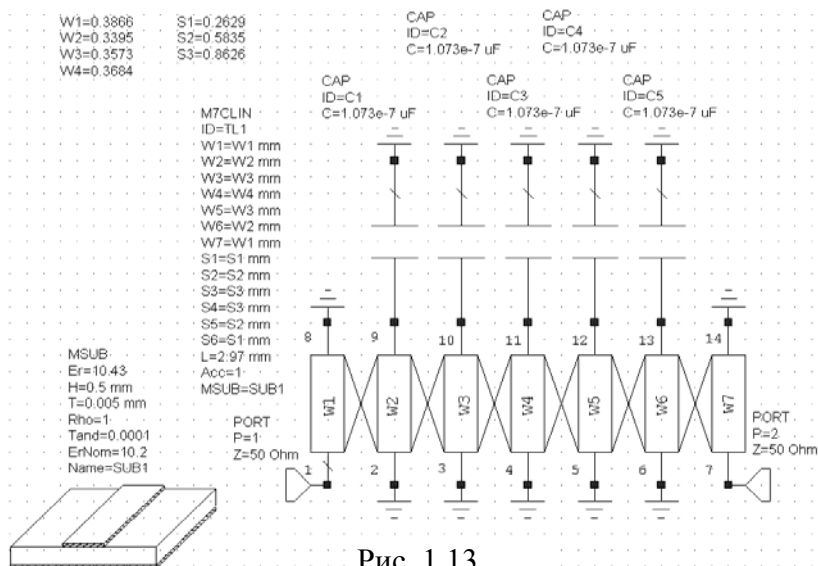


Рис. 1.13

Если отметить **Hairpin** (Шпилька), то в начале появится сообщение об ошибке с подсказкой, что нужно сделать (рис. 1.14). Здесь сообщается, что нельзя рассчитать фильтр, нужно выбрать опцию **Tapped** (Кондуктивная связь) или **Pinned** (Шпильчатая связь). Если **Unable to Calculate Filter** Try selecting the "Tapped" or "Pinned" options.

Рис. 1.14

отметить **Pinned**. Будет создана схема, показанная на рис. 1.15.

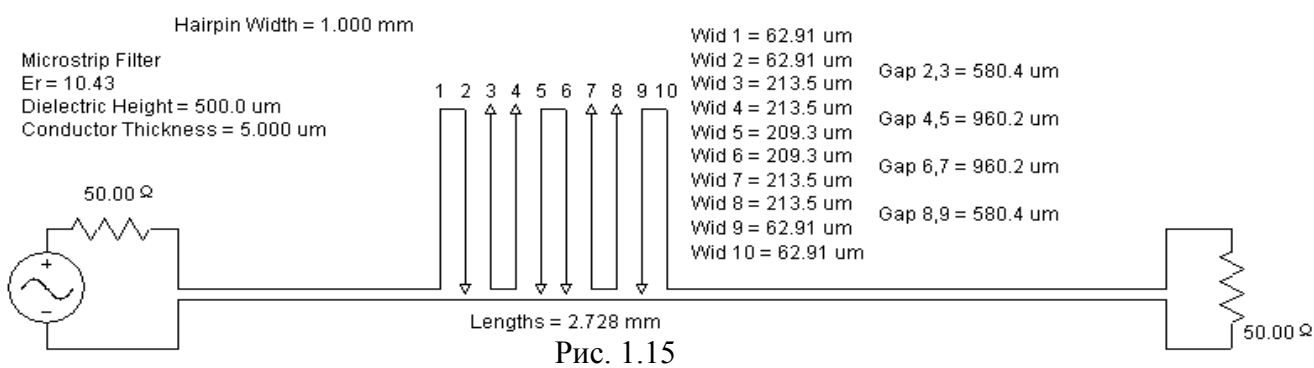


Рис. 1.15

Переданная в Microwave Office схема будет выглядеть, как показана на рис 1.16, а топология на рис. 1.17.

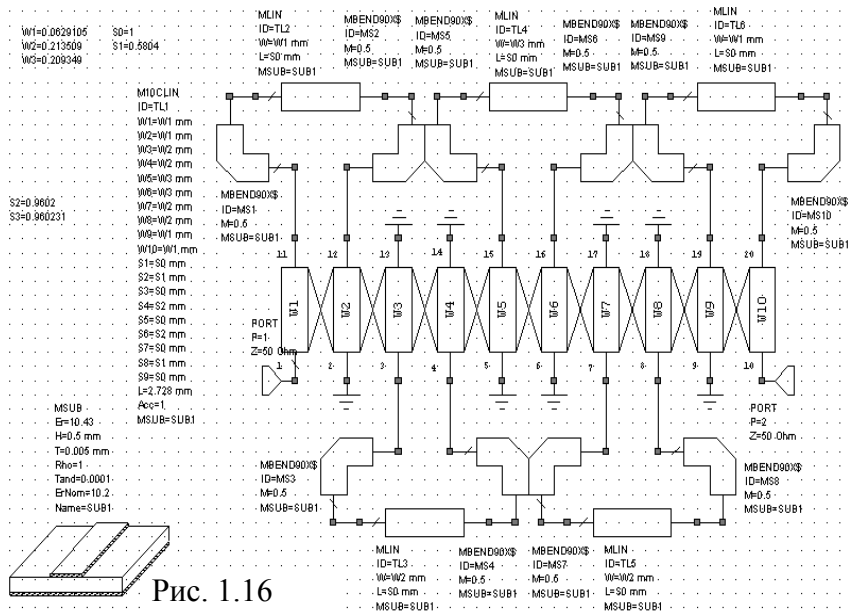


Рис. 1.16

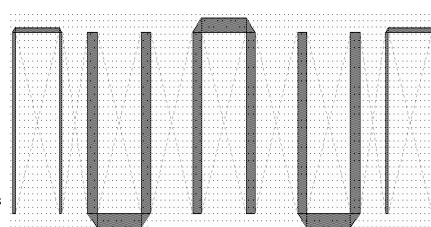


Рис. 1.17

Таким образом, область **Coupled Resonator Parameters** предоставляет удобную возможность просмотреть несколько вариантов построения фильтра и выбрать из них оптимальный вариант, не выходя их режима просмотра

схемы. Напомним, что одновременно вы можете просматривать и графики для каждого варианта.

В правом верхнем углу основной панели управления Nuhertz Filter (рис. 1.6) имеется область **Ideal Filter Response** (Характеристика идеального фильтра). Щёлкая левой кнопкой мышки по кнопкам в этой области, можно просмотреть функцию передачи фильтра и некоторые графики, не открывая окно схемы.

Параметры любого элемента схемы могут быть изменены. Для этого установите курсор на элемент схемы (цвет этого элемента должен измениться на красный) и щёлкните ле-

вой кнопкой мышки. Откроется окно редактирования элемента, вид которого зависит от типа

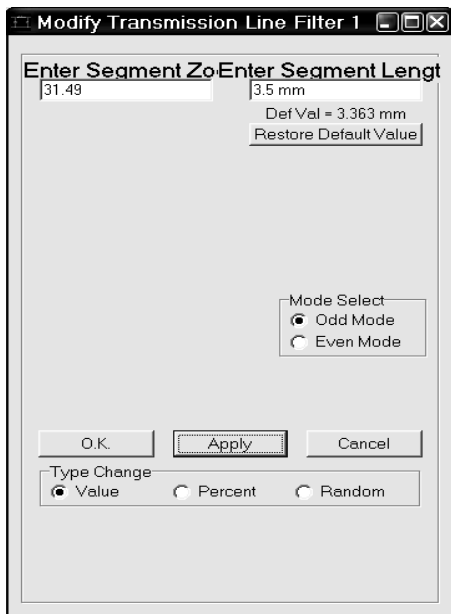


Рис. 1.18

выбранного элемента. В нашем случае связанных отрезков линий это окно будет иметь вид, показанный на рис. 1.18. В поле **Enter Segment Length** можно изменить длину связанных отрезков. В поле **Enter Segment Zo** можно изменить волновое сопротивление чётной моды и/или нечётной в зависимости от выбора в области **Mode Select**. В области **Type Change** (Тип изменения) отмечается тип изменения, которое вы хотите сделать.

Если отметить **Value** (Значение), то изменение значения параметра производится в соответствующих единицах измерения. В этом случае для изменения параметра просто введите новое значение в соответствующее поле ввода и нажмите **Apply**. Изменение немедленно отображается на схеме, а в окне рис. 1.18 появляется строка **Def Val**, в которой отображается установленное ранее значение по умолчанию, и кнопка **Restore Default Value**, щёлкнув по которой, можно вернуть прежнее значение.

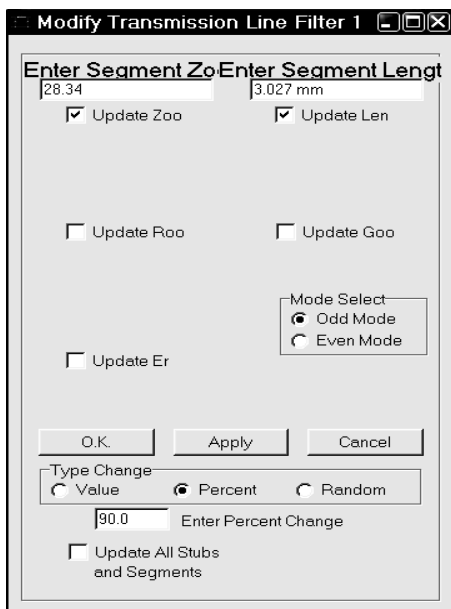


Рис. 1.19

Если отметить **Percent** (Процент), окно отображается, как показано на рис. 1.19. Здесь нужно указать, для каких параметров нужно изменить значения, отметив соответствующий квадратик **Update** (Обновить). В поле **Enter Percent Change** введите, сколько процентов от прежнего значения нужно оставить. Нажмите **Apply**.

Если отметить **Random** (Случайный), окно отображается, как показано на рис. 1.20. В этом случае значение параметра изменяется по случайному закону. В поле **Enter % Maximum Tolerance** введите максимальный допуск в процентах, из которого будет взята случайная выборка. В области **Distribution** отметьте закон распределения **Uniform** (Равномерный) или **Gaussian** (Гауссовый). Нажмите **Apply**.

Чтобы внесённые изменения вступили в силу, нажмите **ОК**. Изменённые значения параметров отображаются синим цветом. При желании вы можете изменить цвета, выбрав **Options>Colors** в меню основной панели Nuhertz Filter рис. 1.6.

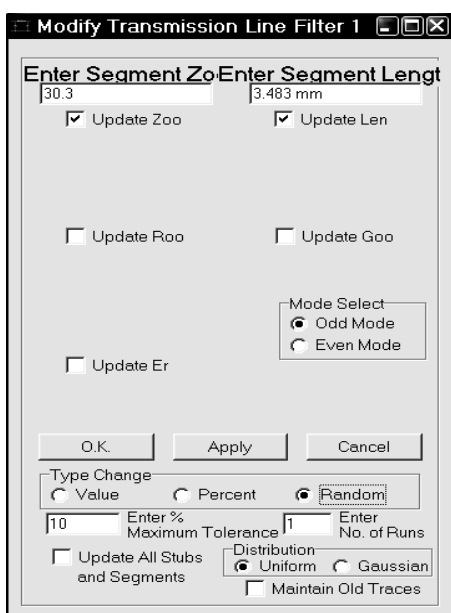


Рис. 1.20

Если в окне рис. 20 отмечено **Random**, можно выполнить статистический анализ Монте Карло. Для выполнения этого анализа в поле **Enter No of Runs** введите количество выполнений (т.е. число итераций для статистического анализа). Если отметить **Maintain Old Traces** (Поддерживать старые трассы), то на графике будут отображаться кривые для всех итераций (рис. 1.21). Если отмечено **Update All Stubs and Segments** (Обновить все шлейфы и сегменты), в окне откроется дополнительная область **Parts Base** (Базовые формы). В этой области можно указать, какие начальные значения брать для статистического анализа, начальные значения, ранее установленные по умолчанию, или значения, изменённые пользователем в одном из описанных ранее окон. После ввода этих данных, нажмите **Apply**. Вариант статистического анализа показан на рис. 1.21.

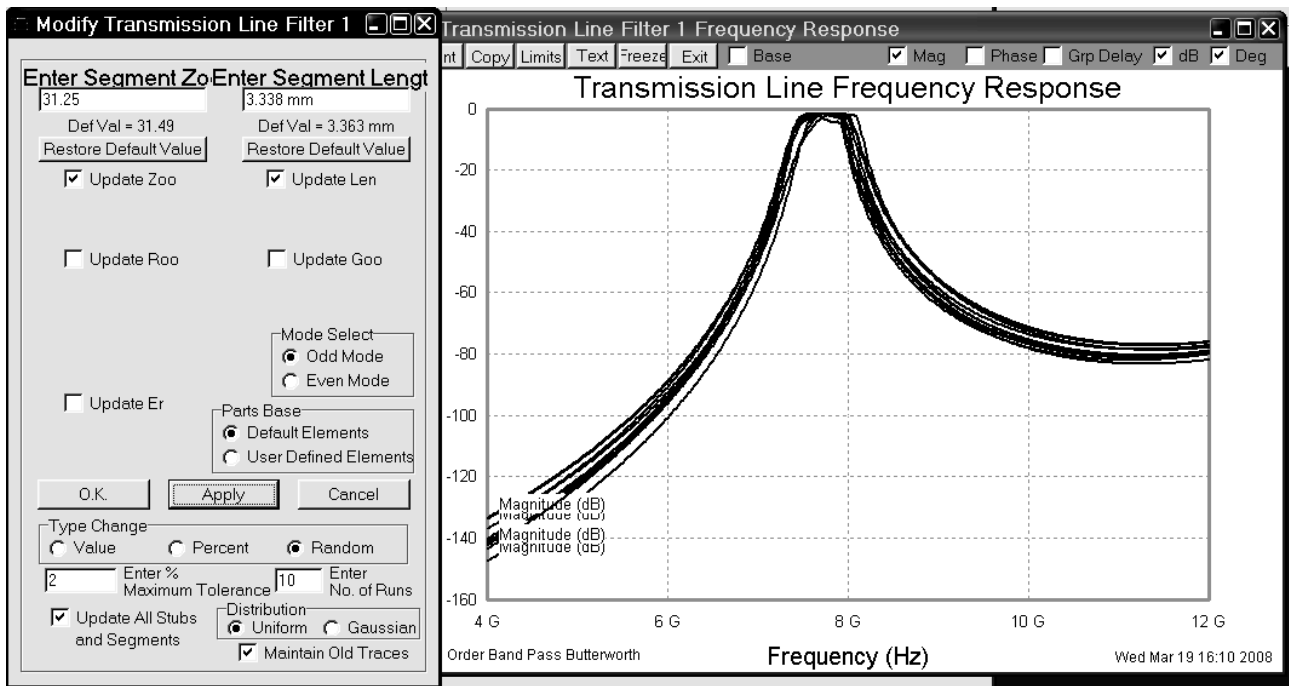


Рис. 1.21

При экспортировании схемы в Microwave Office в схему вводятся X-модели для тех элементов схемы, для которых они имеются в Microwave Office. В Microwave Office имеется ряд X-моделей, уже заполненных для некоторых значений диэлектрических проницаемостей часто применяемых материалов диэлектриков. В Nuhertz Filter встроена таблица этих значений и при экспортировании схемы Nuhertz Filter автоматически присваивает элементу значение  $\epsilon_r$  Nom, взятое из этой таблицы, ближайшее к заданному значению диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$ . Поэтому выполнять заполнение X-моделей не требуется. На точности вычисления это обычно сказывается незначительно.

## 2. Фильтры нижних частот

Требуется спроектировать фильтр с полосой пропускания до 8 ГГц.

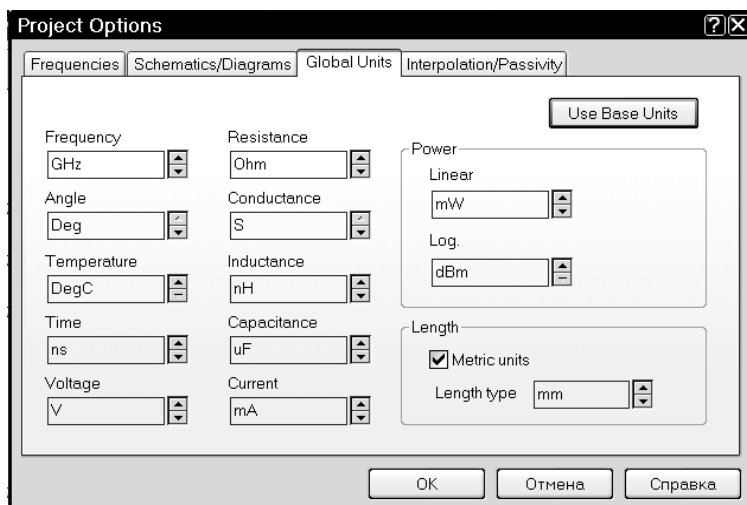


Рис. 2.1

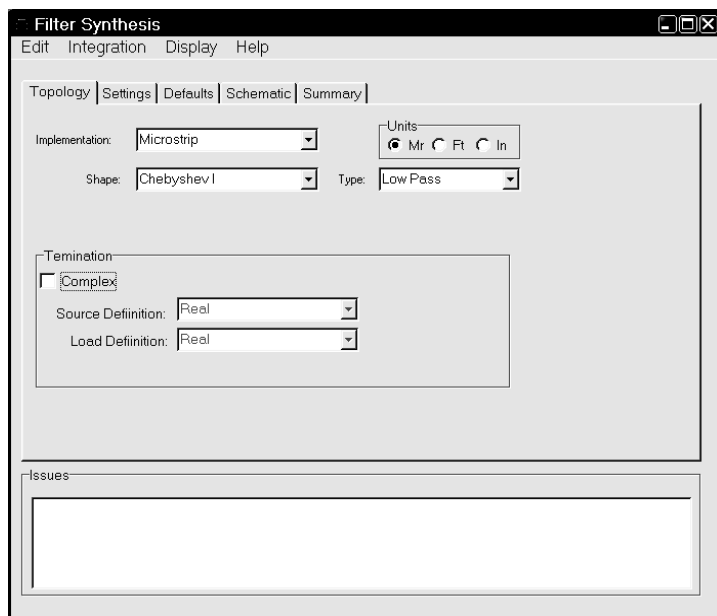


Рис. 2.2

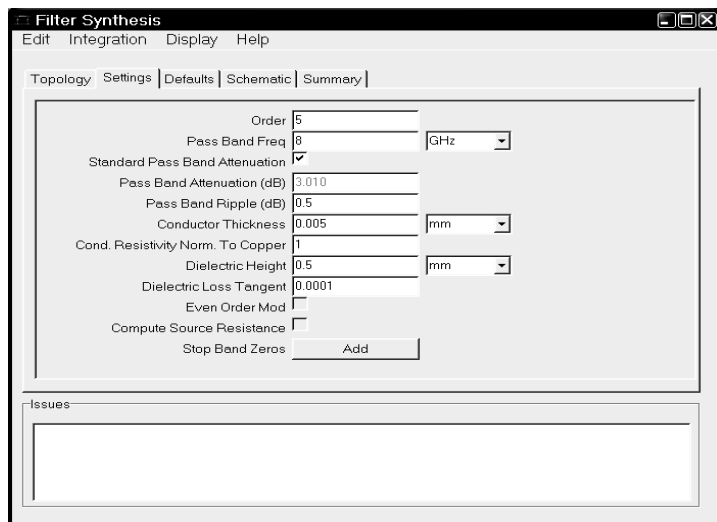


Рис. 2.3

Для реализации выберем фильтр на отрезках микрополосковой линии разной ширины на подложке из поликора толщиной 0.5 мм. Предварительный синтез фильтра выполним в программе Nuhertz Filter с последующим уточнением схемы и топологии в Microwave Office.

Загрузите Microwave Office и выберите в меню **Options>Project Options**. В открывшемся окне опций проекта на вкладке **Global Units** введите единицы измерения частоты **GHz** и отметьте **Metric units** (рис. 2.1). Нажмите **OK**.

В левом окне просмотра проекта на вкладке **Project** раскройте группу **Wizards** и дважды щёлкните по **Nuhertz Filter Wizard**. Откроется окно **Filter Synthesis** программы Nuhertz Filter.

На вкладке **Topology** (рис. 2.2):

1. В поле **Implementation** (Реализация) введите **Microstrip**.
2. В поле **Shape** (Вид) введите **Chebyshev I**.
3. В поле **Type** введите **Low Pass**.

На вкладке **Settings** (рис. 2.3):

1. В поле **Order** (Порядок) введите **5**.
2. В поле **Pass Band Freq** (Частота полосы пропускания) введите **8 GHz**.
3. Отметьте **Standard Pass Band Attenuation**.
4. В поле **Pass Band Ripple (dB)** введите величину пульсаций в полосе пропускания **0.5**.
5. В поле **Conductor Thickness** (Толщина проводника) введите **0.005 mm**.
6. В поле **Dielectric Height** (Толщина диэлектрика) введите **0.5**.
7. В поле **Dielectric Loss Tangent** введите тангенс диэлектрических потерь **0.0001**.

На вкладке **Defaults** (рис. 2.4):

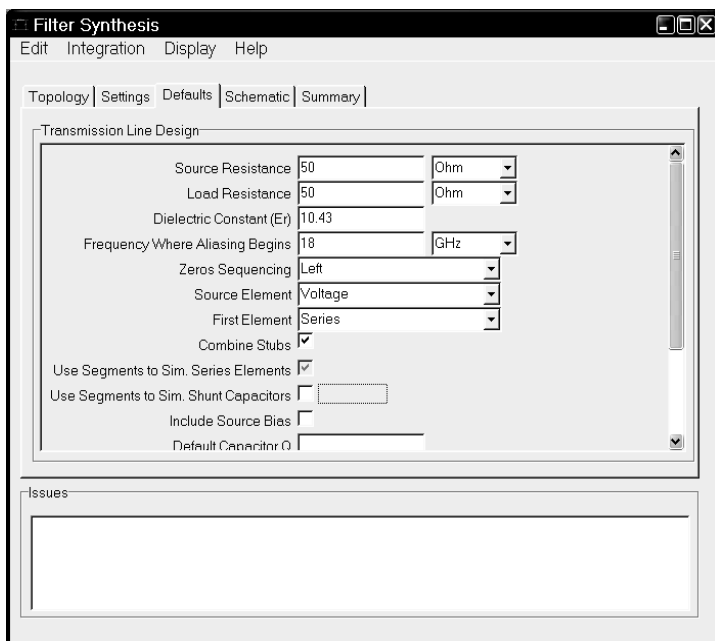


Рис. 2.4

1. В полях **Source Resistance** (Сопротивление источника) и **Load Resistance** (Сопротивление нагрузки) введите **50 Ohm**.
2. В поле **Dielectric Constant (Er)** введите диэлектрическую проницаемость **10.43**.
3. В поле **Frequency Where Aliasing Begins** введите **18 GHz**.
4. В поле **Zeros Sequencing** (Упорядочение нуля) введите **Left** (слева).
5. В поле **Source Element** введите **Voltage**.
6. В поле **First Element** введите **Series** (Последовательный), т.е. наш фильтр должен начинаться с высокоомной тонкой линии, являющейся эквивалентной индуктивностью.

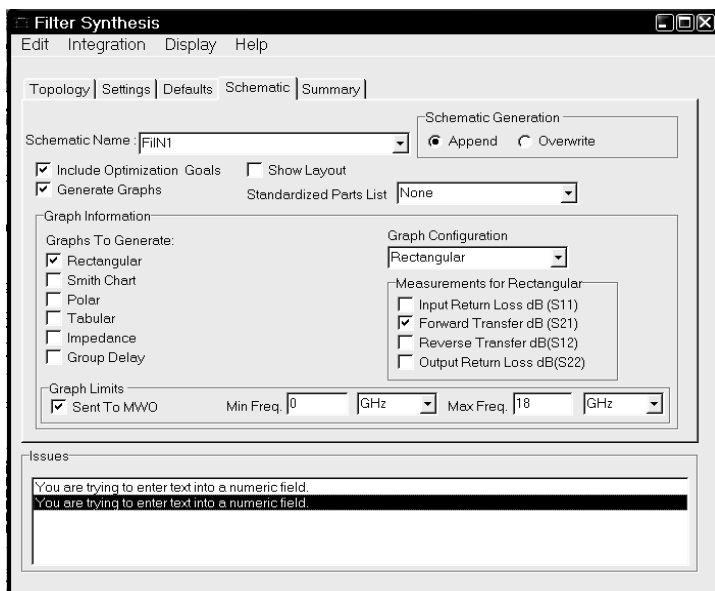


Рис. 2.5

**Freq** введите **0 GHz**, в поле **Max Freq** введите **18 GHz**.

- На вкладке **Schematic** (рис. 2.5):
1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **FilN1**.
  2. Отметьте **Include Optimization Goals** (Включить цели оптимизации).
  3. Отметьте **Generate Graphs** (Создать графики).
  4. В области **Graphs To Generate** отметьте **Rectangular** (Прямоугольный).
  5. В области **Measurement for Rectangular** отметьте **Forward Transfer dB(S21)**.
  6. В области **Graph Limits** отметьте **Sent To MWO**, в поле **Min**

**Замечание.** В области сообщений **Issues** в случае ошибочного ввода появляется предупреждение об ошибке. Показанное на рис. 2.5 сообщение (Вы пытаетесь ввести текст в числовое поле) появляется, если клавиатура не переключена на английскую раскладку (вместо точки с цифровой клавиатуры вводится запятая).

После ввода всех данных выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется основное окно панели управления Nuhertz Filter (рис. 2.6). В строке меню этого окна выберите **File>Save As** и сохраните синтезируемый фильтр в файле **FilN**.



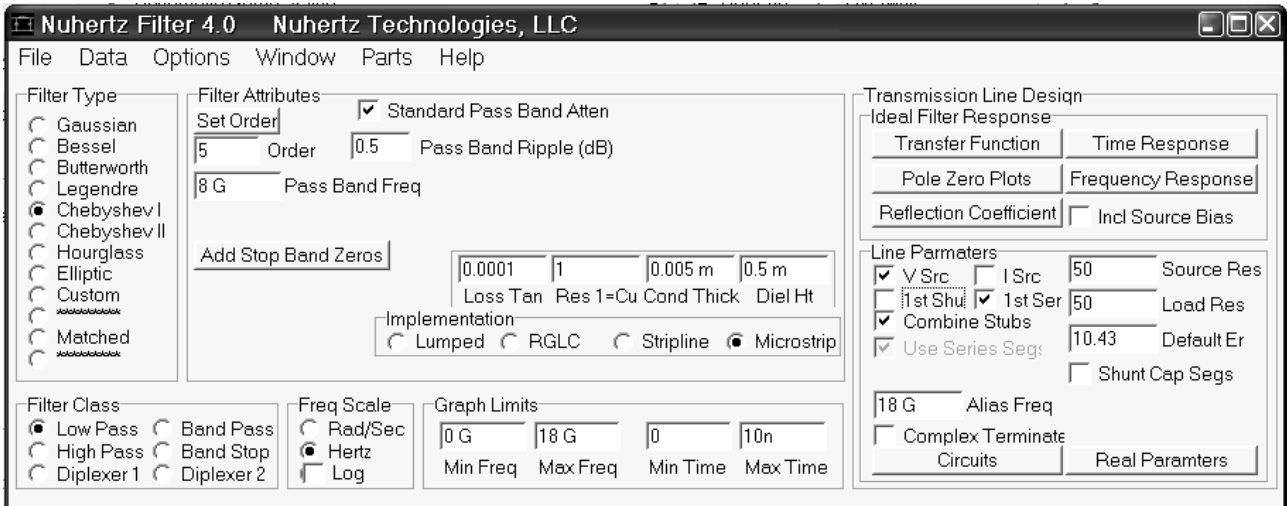


Рис. 2.6

В правой нижней части окна щёлкните мышкой по кнопке **Circuits**. Откроется окно с

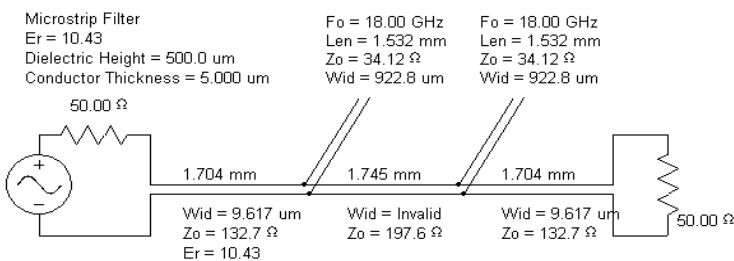


Рис. 2.7

синтезированной схемой фильтра (рис. 2.7). На этой схеме ширина проводника между шлейфами помечена **Invalid**, что говорит о том, что структура фильтра не реализуема (слишком мала ширина этого проводника).

Закройте окно схемы. На панели управления рис. 2.6 в области **Line Parameters** в правом нижнем углу окна снимите “галочку” в **1 st Ser** и отметьте **1 st Shu**, чтобы схема начиналась не с последовательного элемента, а с параллельного шунта. Щёлкните мышкой по кнопке **Circuits**. Полученная схема показана на рис. 2.8. В этой схеме уже нет предупреждения о нереализуемых элементах.

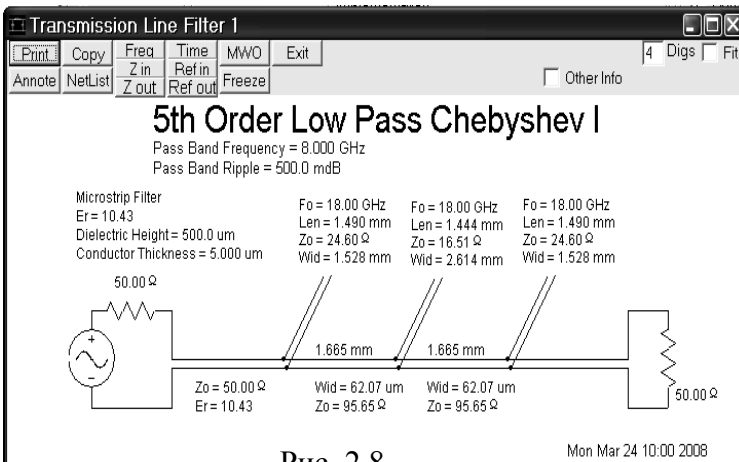


Рис. 2.8

**Замечание.** В окне рис. 2.6 можно одновременно отметить и **1 st Ser**, и **1 st Shu**. В этом случае будут открыты одновременно два окна со схемами для сравнения.

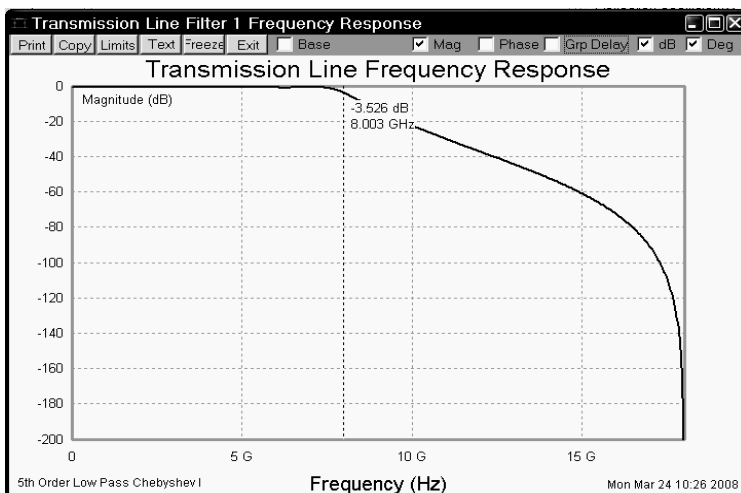


Рис. 2.9

Щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в левой верхней части окна схемы рис. 2.8. Установив курсор в открывшемся окне графика (рис. 2.9), нажмите левую кнопку мышки. Перемещая мышку, установите появившейся маркер на частоту 8 GHz и щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы закрепить маркер. Рассчитанная в Nuhertz Filter характеристика удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Для уточнения характеристики, передайте схему в Microwave Office. Для этого щёлкните левой кнопкой мышки по окну схемы рис. 2.8 и затем щёлкните мышкой по кнопке MWO в левом верхнем углу схемы. Откроется окно рис. 2.10.

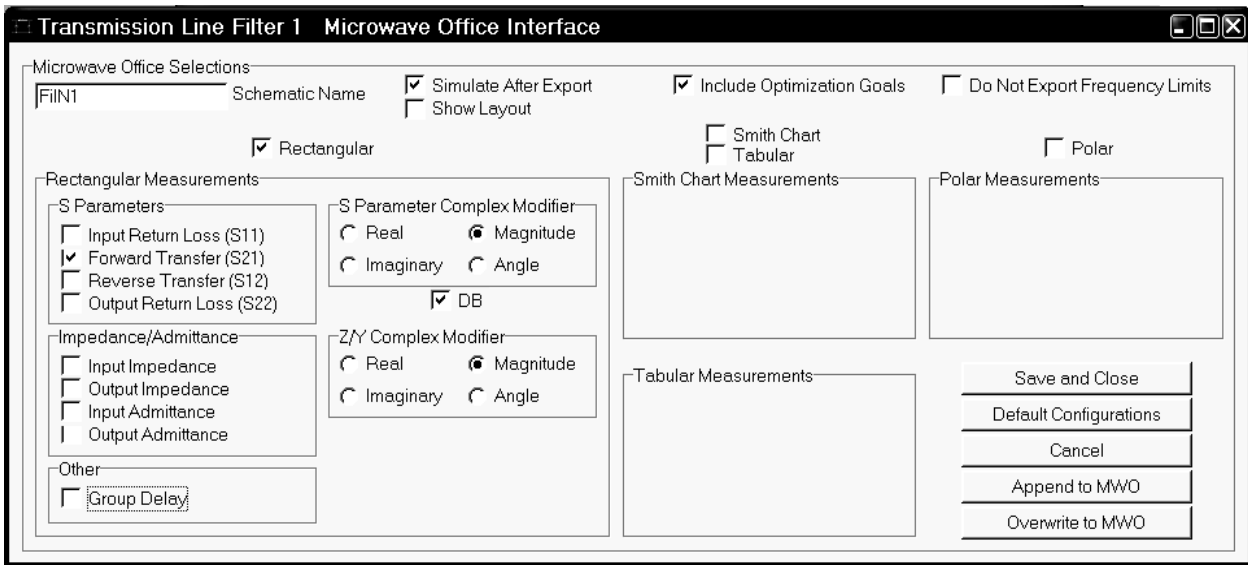


Рис. 2.10

В этом окне:

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **FilN1**.
2. Отметьте **Simulate After Export** (Выполнить анализ после экспорта) и **Include Optimization Goals** (Включить цели оптимизации).
3. Отметьте тип графика **Rectangular** и снимите отметки у остальных типов графика **Smith Chart**, **Tabular** и **Polar**.
4. В области **Rectangular Measurements** (Измеряемые величины прямоугольного графика) отметьте **Forward S21** и снимите отметки у всех остальных измеряемых величин, отметьте **dB** и щёлкните мышкой по **Append to MWO**.
5. Щёлкните левой кнопкой мышки по окну Microwave Office, чтобы сделать его активным. Схема, переданная в Microwave Office показана на рис. 2.11, а график, рассчитанный в Microwave Office – на рис. 2.12.

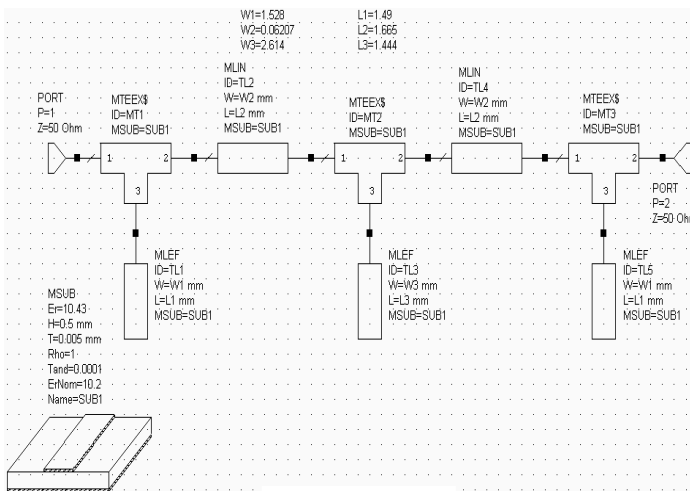


Рис. 2.11

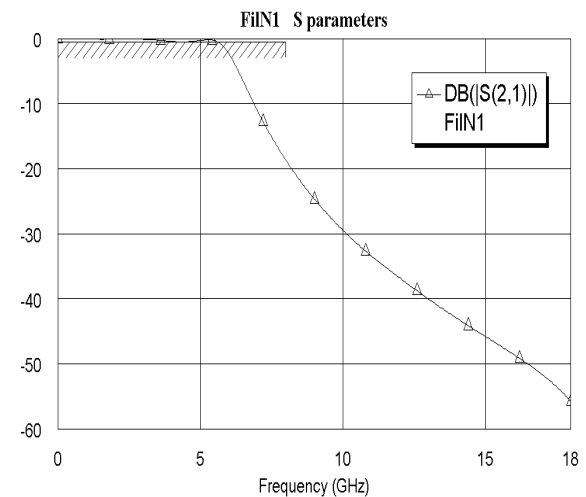


Рис. 2.12

В созданной схеме используются X-модели, в элементе MSUB (подложка) параметр ErNom получил значение 10.2. Это ближайшее значение диэлектрической проницаемости, для которого в Microwave Office имеется заполненная X-модель.

В схему добавлены переменные, которые уже назначены для настройки, и определены цели для оптимизации.

Характеристика, рассчитанная в Microwave Office, не удовлетворяет поставленным требованиям. Попробуем выполнить оптимизацию.

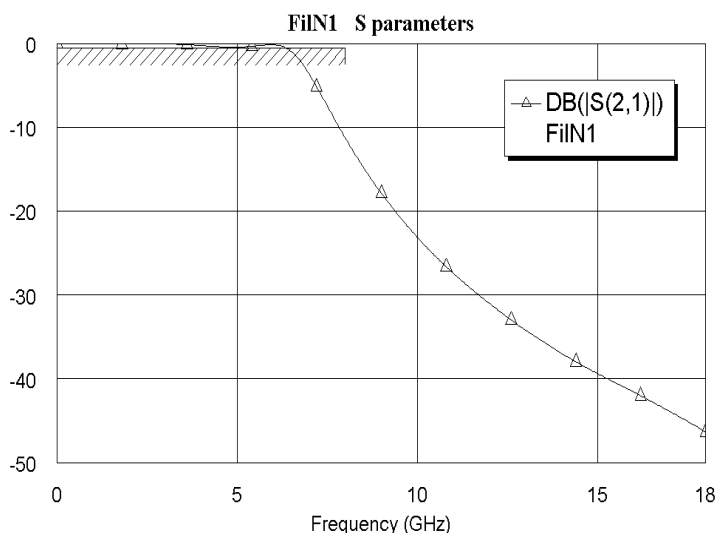


Рис. 2.13

мы в основном окне проекта или дважды щёлкните по имени схемы **FilN1** в левом окне просмотра проекта, чтобы сделать это окно активным. Переменная **W2** на схеме имеет ширину меньше 0.1 мм. Установите курсор на эту переменную и дважды щёлкните мышкой. В открывшемся поле редактирования введите **0.1**, ограничив ширину проводника этим значением. Нажмите клавишу **Enter** или щёлкните мышкой вне этого поля.

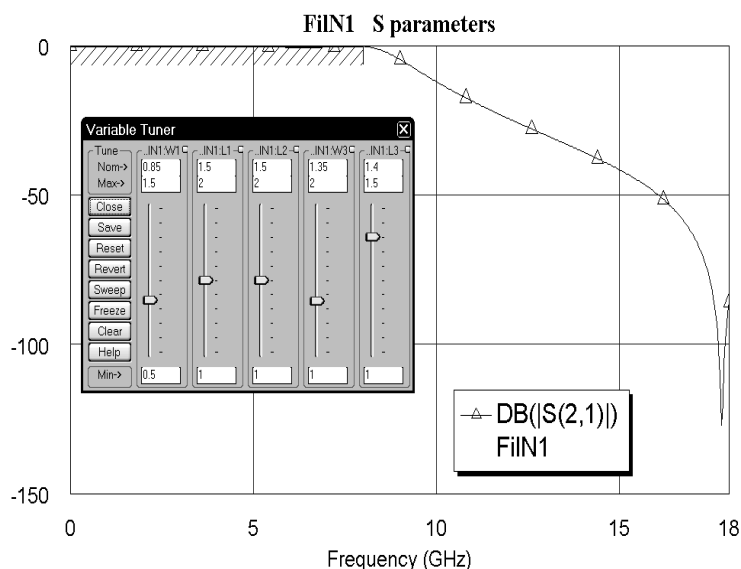


Рис. 2.14

- Двигая движки на блоке настройки, добейтесь удовлетворительной характеристики, причём полученные значения переменных округлите до пяти сотых, считая, что размер сетки в топологии предварительно выберем 0.5 мм. Полученная в результате настройки характеристика показана на рис. 2.14. Закройте блок настройки.
- Сделайте активным окно схемы, отмените настройку для всех переменных, щёлкнув по значку **Tune Tool** на панели инструментов. Удалите цель оптимизации, щёлкнув по её имени в левом окне проекта и выбрав **Delete Goal**.

Теперь вернёмся в интерфейс программы Nuhertz Filter. Для этого щёлкните по имени этой программы на панели задач Windows. Если при работе с проектом был перерыв и программа Nuhertz Filter не загружена, раскройте группу **Wizards** в левом окне просмотра проекта Microwave Office и дважды щёлкните по **Nuhertz Filter Wizard**. В открывшемся окне выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. В открывшемся окне основной панели управления Nuhertz Filter выберите в меню **File>Open** и откройте сохранённый файл синтезируемого фильтра.

- Сделайте активным окно графика.
- Выберите в меню **Simulate>Optimize**. В методах оптимизации выберите **Pointer – Robust Optimization**, в поле **Maximum Iterations** введите **500** и нажмите **Start**.  
Характеристика после оптимизации показана на рис. 2.13. Как видно, оптимизация не удалась. Можно попробовать другие методы оптимизации. Мы воспользуемся настройкой фильтра.

- Щёлкните мышкой по окну схемы в основном окне проекта или дважды щёлкните по имени схемы **FilN1** в левом окне просмотра проекта, чтобы сделать это окно активным. Переменная **W2** на схеме имеет ширину меньше 0.1 мм. Установите курсор на эту переменную и дважды щёлкните мышкой. В открывшемся поле редактирования введите **0.1**, ограничив ширину проводника этим значением. Нажмите клавишу **Enter** или щёлкните мышкой вне этого поля.
- Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Tune Tool** на панели инструментов, установите курсор на переменную **W2** и щёлкните мышкой, чтобы исключить её из настройки, и затем щёлкните мышкой на свободном месте окна схемы.
- Сделайте активным окно графика, на панели инструментов щёлкните мышкой по значку **Analyze**, затем щёлкните по значку **Tune**. Откроется блок настройки схемы (рис. 2.14).

Щёлкните по окну панели управления Nuhertz Filter (рис. 2.6), чтобы сделать его активным.

Microstrip Filter  
Er = 10.43  
Dielectric Height = 500.0 um  
Conductor Thickness = 5.000 um

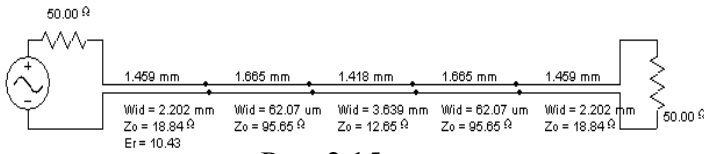


Рис. 2.15

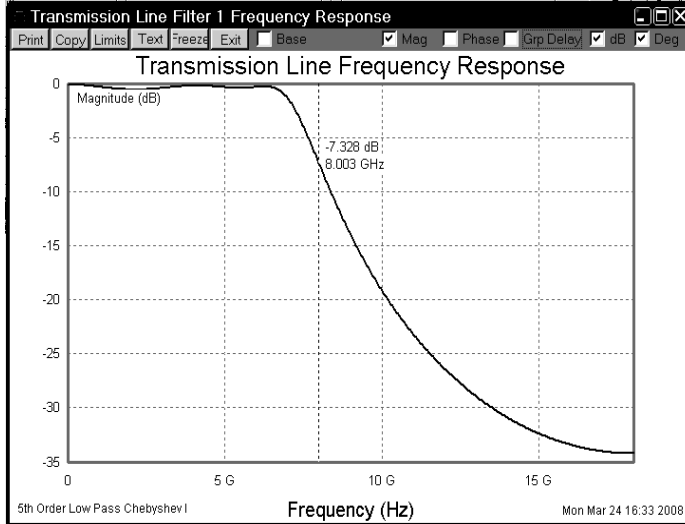


Рис. 2.16

В левом верхнем углу окна схемы щёлкните мышкой по кнопке **Freq**, откроется график синтезированного фильтра рис. 2.16. Полученная характеристика не удовлетворяет поставленным требованиям. Схему можно подстроить в Nuhertz Filter, но в Microwave Office это сделать удобнее.

Щёлкните мышкой по окну панели управления Nuhertz Filter (рис. 2.6), чтобы сделать его активным. В этом окне отметьте **1 st Shu** и отметьте **Shunt Cap Segs**. Нажмите **Circuits**. Откроется окно с новым вариантом схемы рис. 2.15.

В левом верхнем углу окна схемы щёлкните мышкой по кнопке **Freq**, откроется график синтезированного фильтра рис. 2.16. Полученная характеристика не удовлетворяет поставленным требованиям. Схему можно подстроить в Nuhertz Filter, но в Microwave Office это сделать удобнее.

**Замечание.** Схемы и графики для предыдущего варианта структуры фильтра и для этого можно просмотреть в Nuhertz Filter и уже здесь выбрать подходящий вариант. Мы второй вариант рассмотрим в Microwave Office.

Щёлкните мышкой по окну схемы и затем щёлкните по кнопке **MWO** в левом верхнем углу окна схемы. В открывшемся окне в поле **Schematic Name** введите имя схемы **FilN2**. Все остальные установки сде-

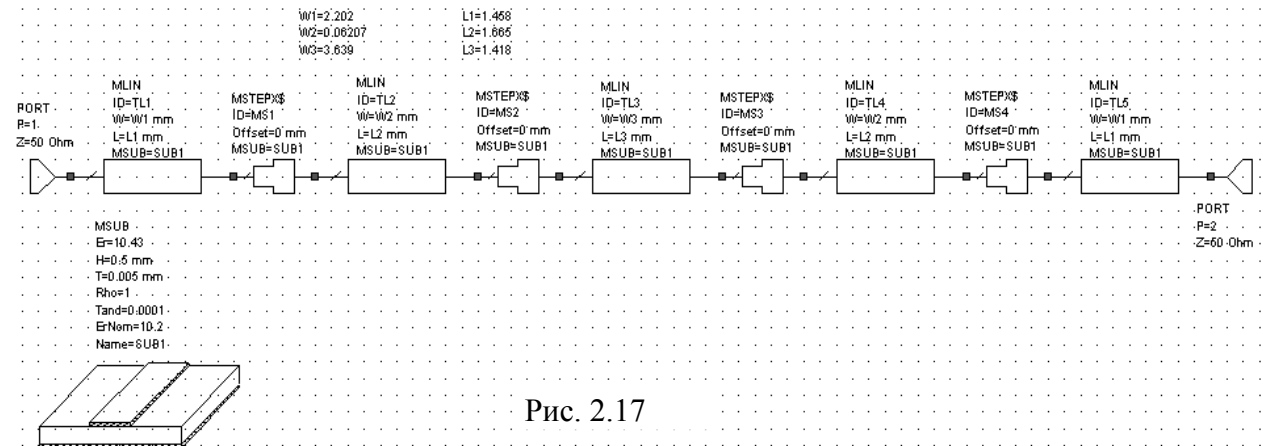


Рис. 2.17

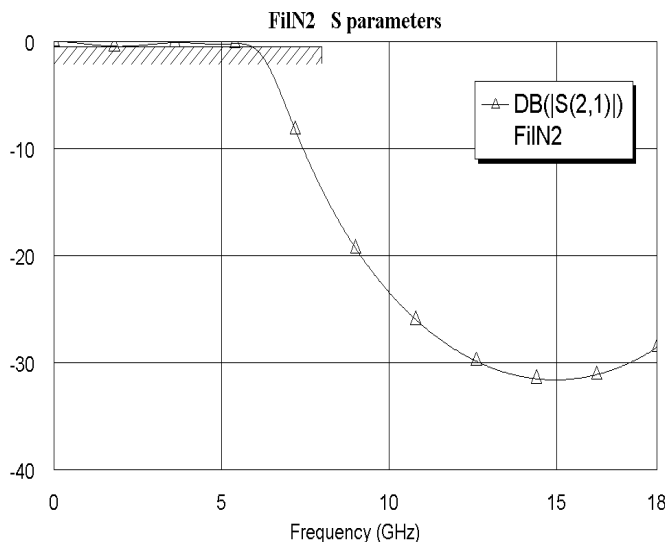


Рис. 2.18

айте такими же, как и в предыдущем окне (рис. 2.10). Щёлкните мышкой по кнопке **Append to MWO**. Переданная в Microwave Office схема выглядит, как показано на рис. 2.17, а график – на рис. 2.18. Теперь в проекте имеется две схемы и два графика, отдельно для каждой схемы. Одновременно в проект переданы переменные, подготовленные для настройки, и цель оптимизации для второй схемы. Можно попробовать выполнить оптимизацию. Мы будем использовать инструмент настройки схемы.

1. Сделайте активным окно схемы **FilN2**. Дважды щёлкните по переменной **W2** и измените её значение на **0.1**. Щёлкните мышкой по значку

**Tune Tool** на панели инструментов, установите курсор на переменную **W2** и щёлкните мышкой, чтобы исключить эту переменную из настройки.

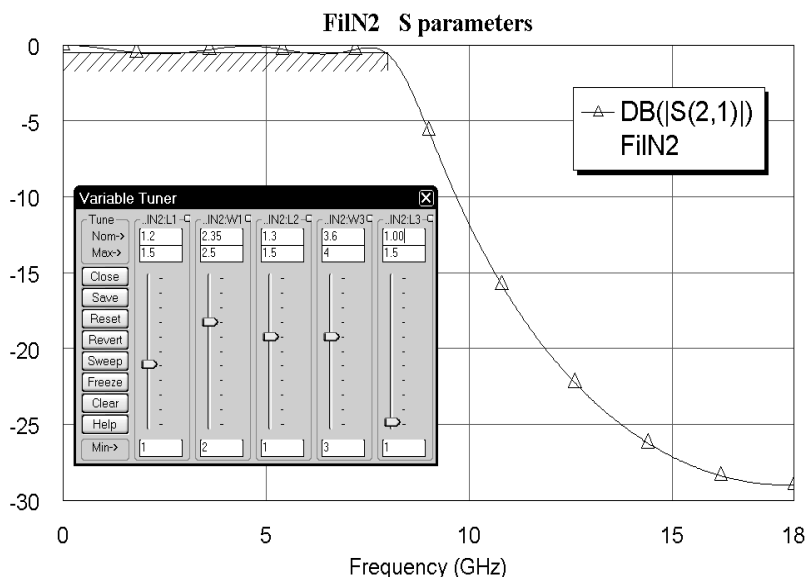


Рис. 2.19

Для удобства сравнения объединим эти графики и введём частоты проекта.

- Щёлкните правой кнопкой мышки по имени график **FilN1** в группе **Graphs** в левом окне проекта, выберите **Rename Graph** и переименуйте график в **LdB**.
- Щёлкните правой кнопкой мышки по имени измеряемой величины **FilN1:DB(|S(2,1)|)** под графиком **LdB** в левом окне проекта и выберите **Properties**. В открывшемся окне в поле **Data Source Name** введите

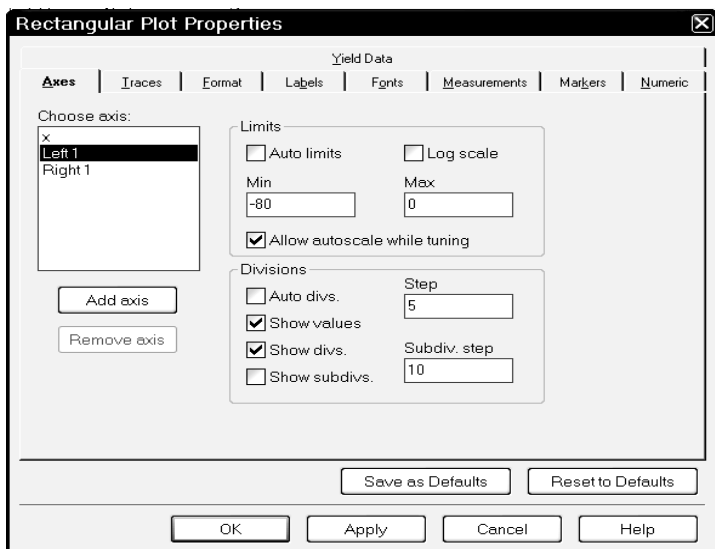


Рис. 2.20

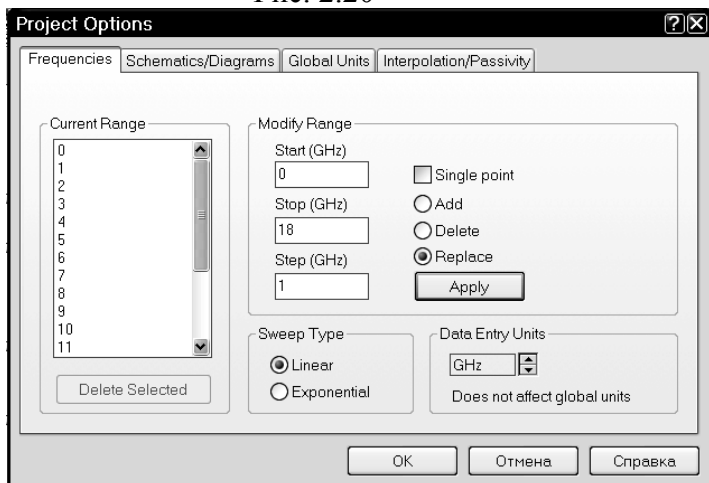


Рис. 2.21

- Сделайте активным окно графика **FilN2** и щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов.
- Щёлкните мышкой по значку **Tune** на панели инструментов, чтобы открыть блок настройки.
- Двигая движки на блоке настройки, добейтесь приемлемой характеристики при значениях переменных, кратных пяти сотым.

Полученная характеристика показана на рис. 2.19.

В результате в проекте мы имеем две схемы и два отдельных

графики.

- Щёлкните правой кнопкой мышки по имени графика **FilN2** в группе **Graphs** в левом окне проекта и выберите **Delete Graph**, чтобы удалит этот график.
- Дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне проекта. В открывшемся окне свойств проекта отметьте **Replace** (Заменить), в поле **Start(GHz)** введите **0**, в поле **Stop(GHz)** введите **18**, в поле **Step(GHz)** введите **1**, нажмите **Apply** и **OK** (рис. 2.21).
- Щёлкните правой кнопкой по имени схемы **FilN1** в левом окне проекта и выберите **Options**. В

открывшемся окне опций отметьте **Use project defaults** и нажмите **OK**. Аналогично назначьте частоты проекта для схемы **FilN2**.

7. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов.

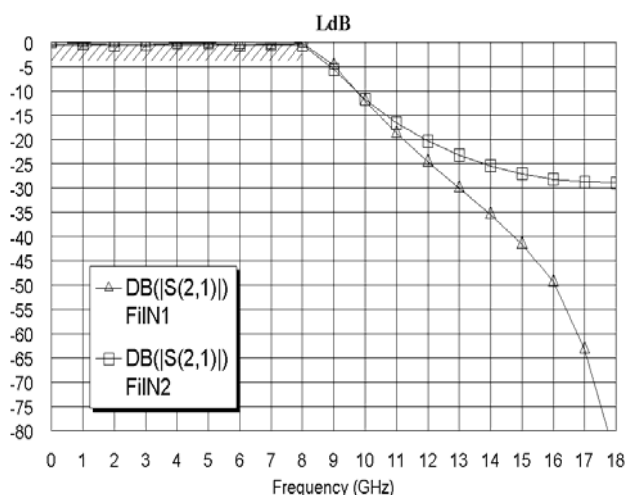


Рис. 2.22

Полученный график показан на рис. 2.22. Из сравнения характеристик видно, что схема FilN1 имеет более крутой скат и её можно выбрать для реализации. Напомним, что этот вывод можно было сделать и в Nuhertz Filter. Мы для уточнения топологии и сравнения результатов электромагнитного моделирования возьмём обе схемы.

Вначале выполним электромагнитное моделирование для схемы FilN1.

Сделайте активным окно схемы FilN1, дважды щёлкнув мышкой по её имени в левом окне просмотра проекта. Добавим на входе и выходе схемы 50-омные отрезки линии.

1. Нажмите клавишу **Ctrl**, установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и переместите порт на свободное место в окне схемы, прервав его связь со схемой.
2. Откройте окно просмотра элементов в левом окне проекта, щёлкнув мышкой по кнопке **Elements**.
3. Раскройте группу **Microstrip** и отметьте подгруппу **Lines**. В списке элементов в левой нижней части окна найдите элемент **MLIN**, переместите его в окно схемы и подключите к плечу 1 первого элемента **MTEEX\$**. Дважды щёлкните левой кнопкой мышки по элементу **MLIN**. В открывшемся окне свойств элемента введите **W=0.45 mm** и **L=3 mm**, нажмите **OK**.
4. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов (элемент **MLIN** должен быть выделен). Подключите скопированный элемент к плечу 2 последнего элемента **MTEEX\$**.
5. Установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и подключите порт ко входу схемы. Аналогично подключите порт к выходу схемы. Полученная схема показана на рис. 2.23.
6. Откройте окно просмотра проекта, щёлкнув мышкой по кнопке **Project** в левой нижней части окна, и сделайте активным окно графика.

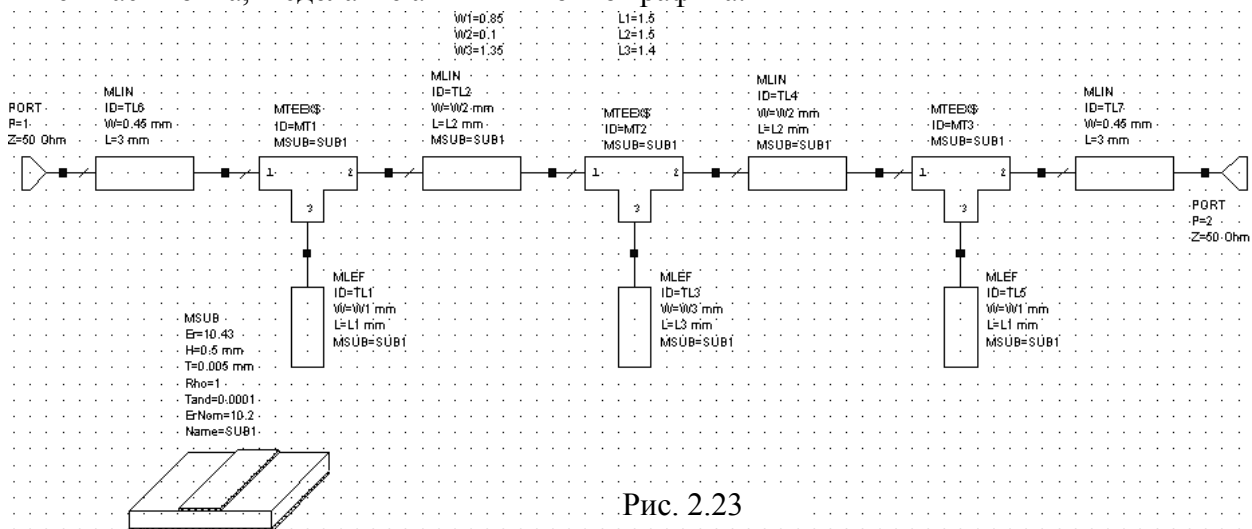


Рис. 2.23

7. Щёлкните левой кнопкой по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика после добавления отрезков линии на входе и выходе не изменилась.

Теперь создадим топологию схемы.

1. Сделайте активным окно схемы **FilN1**, дважды щёлкнув левой кнопкой мышки по имени этой схемы в группе **Circuit Schematics** в левом окне проекта.

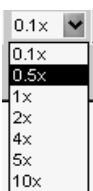


Рис. 2.24

2. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов.

3. По умолчанию размер сетки топологии равен 0.1 мм. Уменьшим этот размер до 0.05. Для этого щёлкните левой кнопкой мышки по полю ввода **Grid Spacing** (Интервал сетки) на панели инструментов и введите в это поле 0.5x, щёлкнув по кнопке в правом конце поля (рис. 2.24).

4. Созданная топология может иметь неправильный вид, как показано на рис.

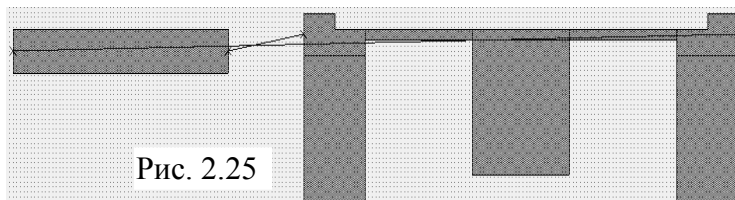


Рис. 2.25

(в таком случае правильные соединения топологических элементов показываются красными линиями).

5. Чтобы упорядочить топологию, выделите все элементы топологии. Для этого установите курсор мышки левее и выше топологии, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор правее и ниже топологии так, чтобы вся топология была в образовавшемся прямоугольнике, отпустите кнопку мышки. Или выберите в меню **Edit>Select All**.

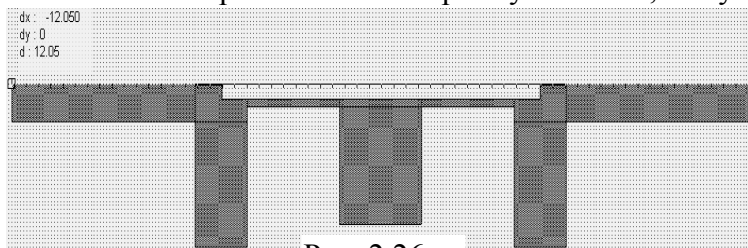


Рис. 2.26

6. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Snap Together** (Привязать вместе) на панели инструментов или выберите в меню **Edit>Snap Together**.

Созданная топология показана на рис. 2.26.

Щёлкните левой кнопкой по значку **Measure** (Измерение) на панели инструментов. Поместите курсор с отображением линейки на правый верхний угол топологии, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор на левый верхний угол топологии (рис. 2.26). Измеренная длина топологии равна 12.05 мм. Измеренная аналогично ширина топологии равна 1.95 мм. Эти данные нужны для создания электромагнитной структуры. Сначала определим корпус.

1. Щёлкните мышкой по значку **New EM Structure** или выберите в меню **Project>Add EM Structure> New EM Structure**. В отрывшемся окне введите имя структуры **FN1**, отметьте симулятор **AWR EMSight Simulator** и нажмите **Create** (Создать). На рабочем поле откроется окно электромагнитной структуры и в левом окне проекта в группе **EM Structures** появится имя созданной структуры, как подгруппа.

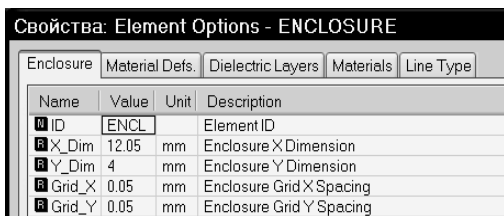


Рис. 2.27

2. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Substrate Information** на панели инструментов или дважды щёлкните по **Enclosure** под именем структуры в левом окне проекта. Откроется окно свойств электромагнитной структуры.

3. На вкладке **Enclosure** (рис. 2.27) введите значения **X\_Dim=12.05 mm** (это длина корпуса, которая должна точно совпадать с длиной топологии), **Y\_Dim=4 mm** (ширина корпуса), **Grid\_X=0.05 mm** и **Grid\_Y=0.05 mm** (размер ячеек сетки по осям X и Y).

4. На вкладке **Material Defs** (Определения материала) в разделе **Dielectric Definitions** (Определения диэлектрика) введите **Er=10.23** и **TanD=0.0001**. В остальных разделах оставьте значения по умолчанию.

5. На вкладке **Dielectric Layer** для слоя **1** введите **6**, для слоя **2** введите **0.5**.

6. На вкладке **Materials** отметьте **1/2oz Cu**.

7. Нажмите **OK**.

Теперь вставим топологию в корпус.

1. Сделайте активным окно топологии схемы, щёлкнув по нему мышкой. Если этого окна не видно (закрыто другими окнами), упорядочите расположение окон, например, выбрав в меню **Window>Tile Horizontal**.
2. Выделите всю топологию схемы и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
3. Сделайте активным окно электромагнитной структуры, щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и вставьте топологию в корпус так, чтобы края входного и выходного проводников точно совпадали с краями корпуса (рис. 2.28).

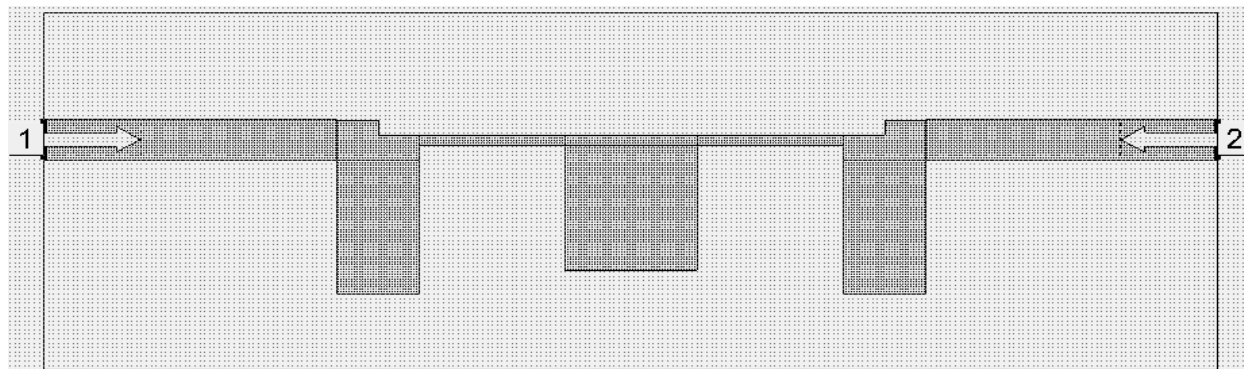



Рис. 2.28

4. Щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу топологии при выделенной всей топологии и выберите **Shape Properties**. В открывшемся окне в поле **Material** введите **1/2oz Cu**, щёлкнув левой кнопкой мышки по кнопке в правом конце этого поля, нажмите **OK**.
5. Щёлкните левой кнопкой мышки по входному проводнику, чтобы выделить его. Щёлкните мышкой по значку **Edge Port**  на панели инструментов или выберите в меню **Draw>Add Edge Port**, поместите курсор на левый край входного проводника так, чтобы на этом краю появился небольшой прямоугольник, и щёлкните мышкой, чтобы закрепить порт. Щёлкните по порту левой кнопкой мышки, чтобы выделить его, поместите курсор на правый край прямоугольника порта так, чтобы курсор отображался в виде двойной стрелки. Нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки мышки, сместите референсную плоскость порта на 1 мм вправо, отпустите кнопку.

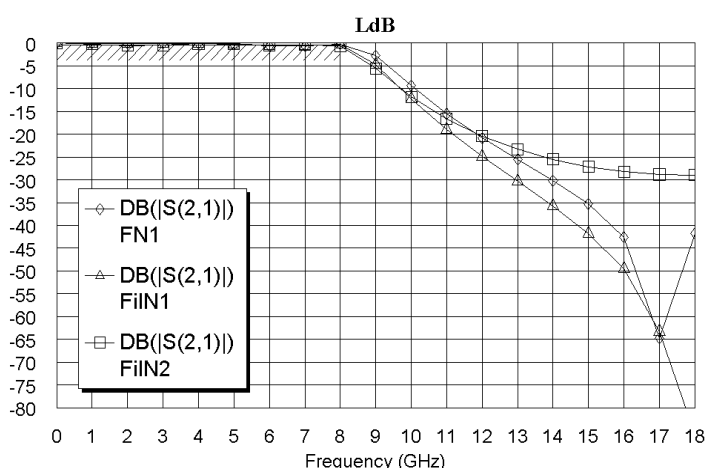


Рис. 2.29

6. Аналогично установите порт на выходе структуры. Созданная топология показана на рис. 2.28.

Сделайте окно графика активным и щёлкните по значку **Analyze**. График показан на рис. 2.29. Характеристика, полученная в электромагнитном моделировании, довольно хорошо совпадает с характеристикой, полученной в линейном моделировании.

Теперь выполним электромагнитное моделирование для второй схемы.

Сделайте активным окно схемы FilN2.



Добавьте 50-омные отрезки линий на входе и выходе схемы, как описано выше для первой схемы. Схема будет выглядеть, как показано на рис. 2.30.

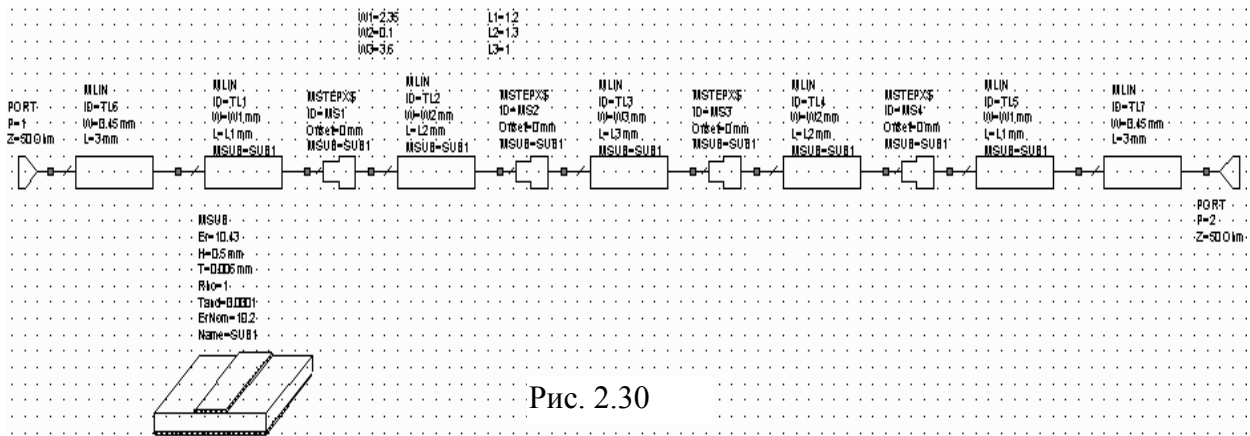


Рис. 2.30

Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов. В открывшемся окне топологии выделите всю топологию и щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов. Введите **0.5x** в поле **Grid Spacing** на панели инструментов. Созданная топология схемы показана на рис. 2.31. Длина топологии 12 мм, ширина – 3.6 мм.

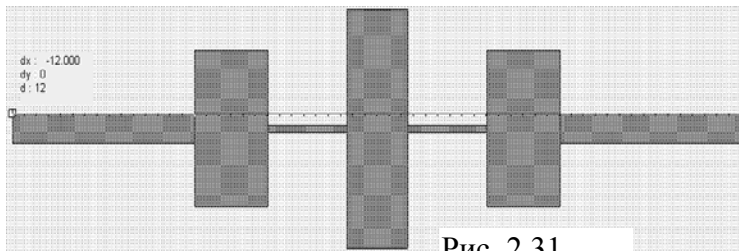


Рис. 2.31

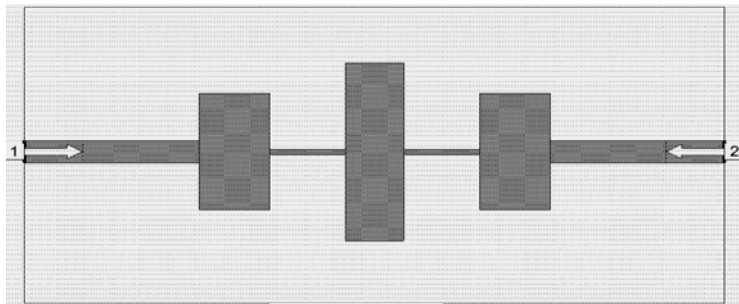


Рис. 2.32

Создайте электромагнитную структуру с именем FN2. Длину корпуса введите 12 мм, ширину – 6 мм. Остальные параметры введите такие же, как и для структуры FN1. Для проводников назначьте материал **1/2oz Cu**. Топология должна выглядеть, как показано на рис. 2.32. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 2.33. Характеристика электромагнитной структуры FN2 сдвинута вниз по частоте по сравнению с характеристикой схемы FN1. Чтобы характеристику сдвинуть вверх по частоте, нужно уменьшить ширину емкостных проводников.

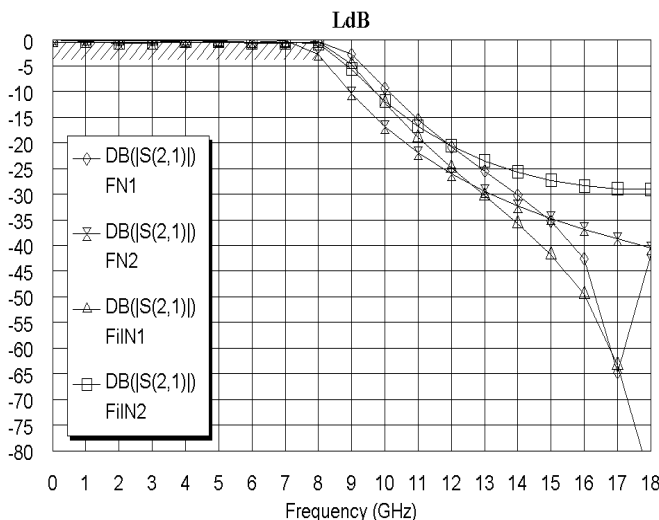


Рис. 2.33

Дважды щёлкните по первому емкостному

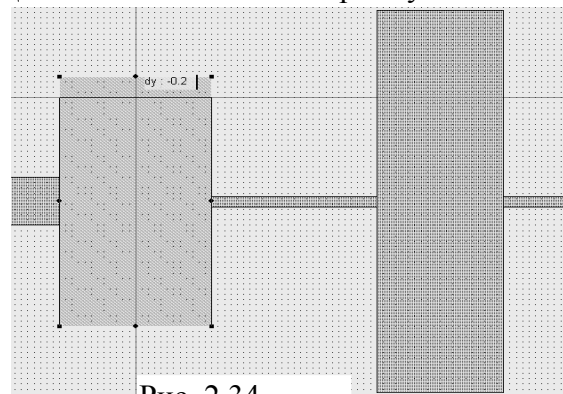


Рис. 2.34

проводнику, установите курсор на ромбик посередине верхней стороны проводника, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эту сторону на 0.2 мм вниз (рис. 2.34). Аналогично сдвиньте нижнюю сторону этого проводника на 0.2 мм вверх. Таким же образом уменьшите ширину второго и третьего емкостных

проводников.

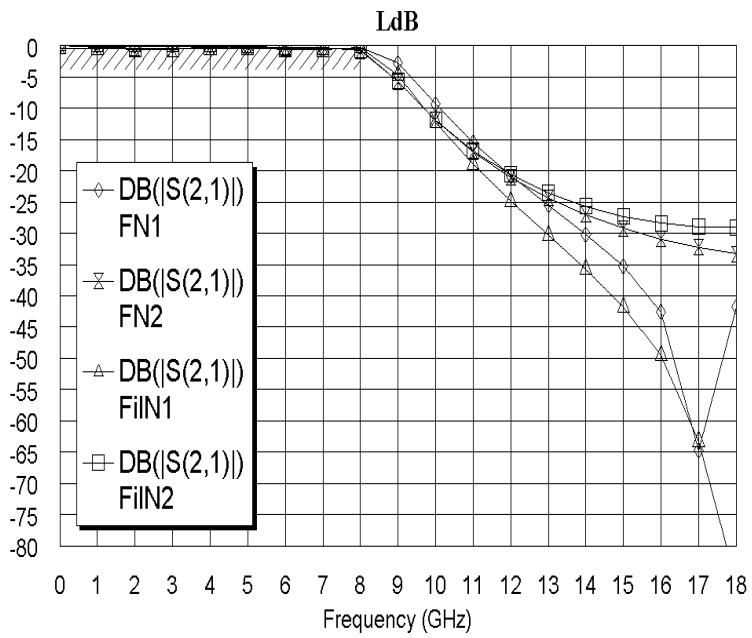


Рис. 2.35

проводников. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 2.35.

### 3. Фильтры верхних частот

Требуется спроектировать фильтр с полосой пропускания от 8 ГГц.

Загрузите Microwave Office. Выберите в меню **Options>Project Options**. На вкладке **Global Units** открывшегося окна опций проекта введите единицы измерения для частот **GHz**, для ёмкости **pF**, отметьте **Metric units** и для единиц измерения длины введите **mm**. Нажмите **OK**.

В левом окне просмотра проекта раскройте группу **Wizards** и дважды щёлкните мышкой по **Nuhertz Filter Wizard**.

В открывшемся окне **Filter Synthesis** на вкладке **Topology**:

1. В поле **Implementation** введите **Microstrip**.
2. В поле **Shape** введите **Chebyshev I**.
3. В поле **Type** введите **High Pass**.

На вкладке **Settings**:

1. В поле **Order** введите **7**.
2. В поле **Pass Band Freq** введите **8 GHz**.
3. Отметьте **Standard Pass Band Attenuation**.
4. В поле **Pass Band Ripple (dB)** введите величину пульсаций в полосе пропускания **0.5**.
5. В поле **Conductor Thickness** (Толщина проводника) введите **0.005 mm**.
6. В поле **Dielectric Loss Tangent** введите тангенс диэлектрических потерь **0.0001**.

На вкладке **Defaults**:

1. В полях **Source Resistance** и **Load Resistance** введите **50 Ohm**.
2. В поле **Dielectric Constant (Er)** введите диэлектрическую проницаемость **10.43**.
3. В поле **Frequency Where Aliasing Begins** введите **20 GHz**.
4. Значение остальных полей можно оставить по умолчанию.

На вкладке **Schematic**:

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil\_High**.
2. Отметьте **Include Optimization Goals**.
3. Отметьте **Generate Graphs**.
4. В области **Graphs To Generate** отметьте **Rectangular**.
5. В области **Measurement for Rectangular** отметьте **Forward Transfer dB(S21)**.
6. В области **Graph Limits** отметьте **Sent To MWO**, в поле **Min Freq** введите **0 GHz**, в поле **Max Freq** введите **18 GHz**.

После ввода всех данных выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется основное окно панели управления Nuhertz Filter (рис. 3.1). В строке меню этого окна выберите **File>Save As** и сохраните синтезируемый фильтр в файле **Fil-High**.

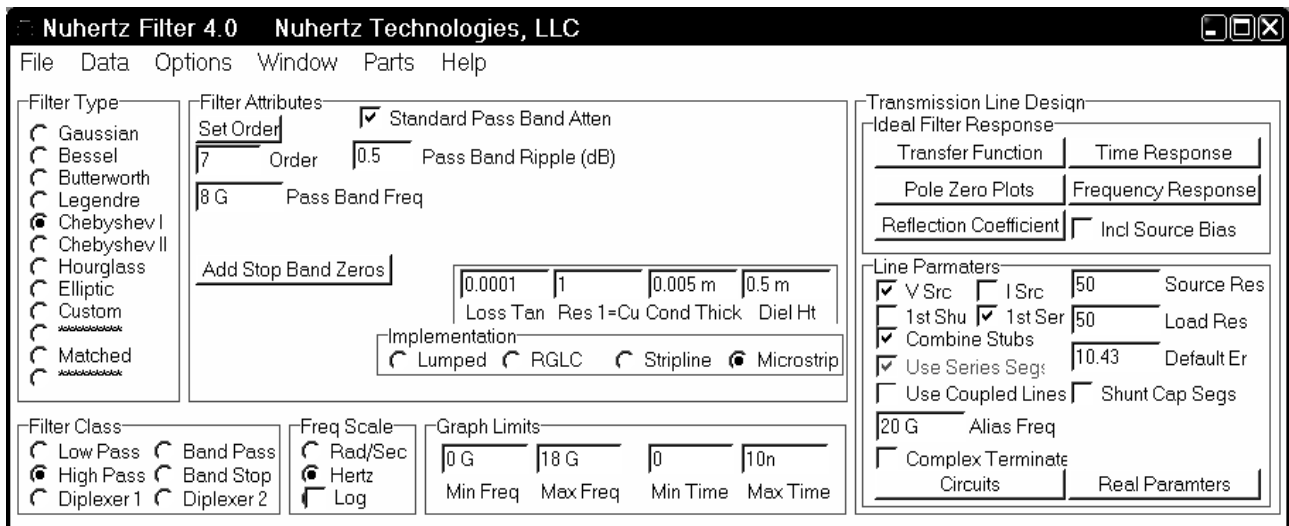


Рис. 3.1

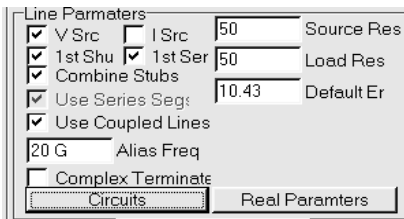


Рис. 3.2

Изменяя установки в области **Line Parameters** в правой нижней части этого окна, можно получить различные варианты структуры фильтра, многие из которых будут нереализуемые. Например, сделайте в этой области установки, как показано на рис. 3.2, и щёлкните мышкой по кнопке **Circuits**. Будет открыто два окна с синтезированными схемами (рис. 3.3 и 3.4) на отрезках связанных линий с подключенными короткозамкнутыми шлейфами.

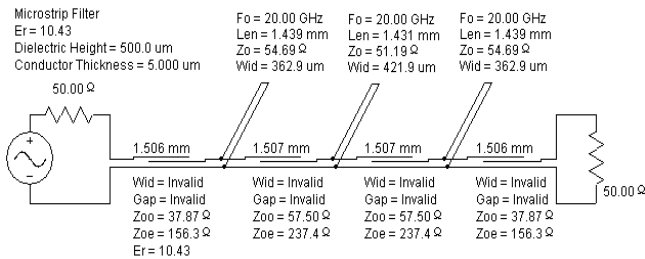


Рис. 3.3

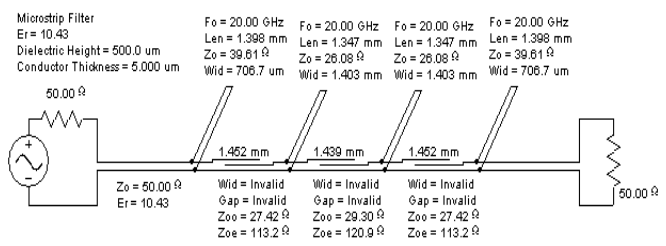


Рис. 3.4

На обеих схемах параметры связанных отрезков линий помечены **Invalid**, что говорит о нереализуемости этих схем. В Nuhertz Filter можно выполнить анализ этих схем, щёлкнув мышкой по кнопке **Freq** в левом верхнем углу схемы. Схемы можно передать в Microwave Office, щёлкнув мышкой по кнопке **MWO** в левом верхнем углу схемы. Там они будут отображены с реальными значениями ширины проводников и зазоров в отрезках связанных линий, и будет ясно, почему схемы нельзя реализовать (ширины проводников и зазоров – отрицательные). Анализ таких схем в Microwave Office проводиться не будет.

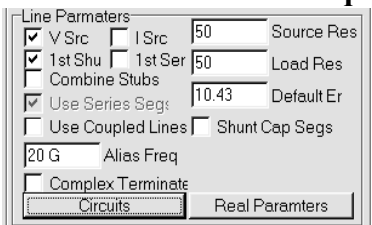


Рис. 3.5

Сделайте установки в области **Line Parameters**, как показано на рис. 3.5 и щёлкните мышкой по кнопке **Circuits**. Синтезированная схема на короткозамкнутых шлейфах с емкостной связью показана на рис. 3.6.

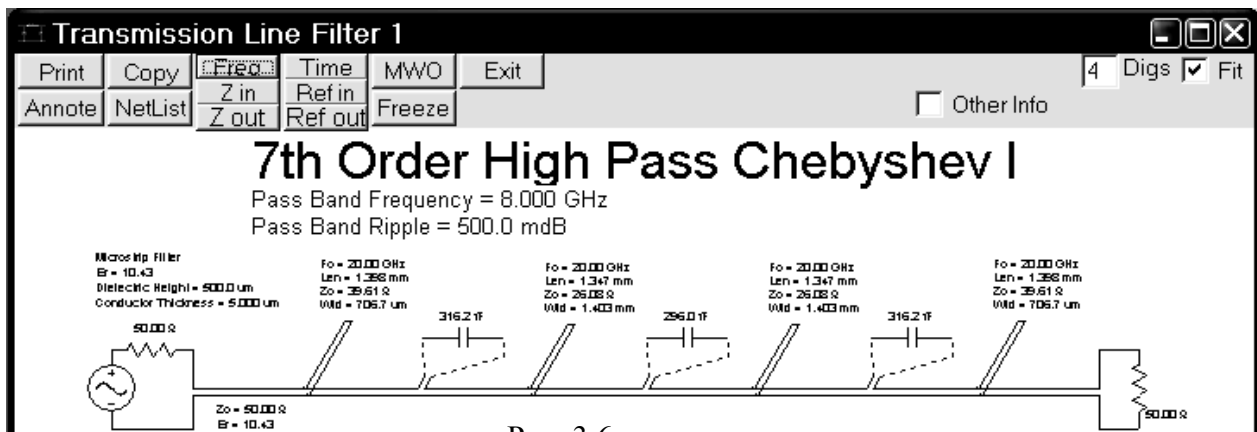


Рис. 3.6

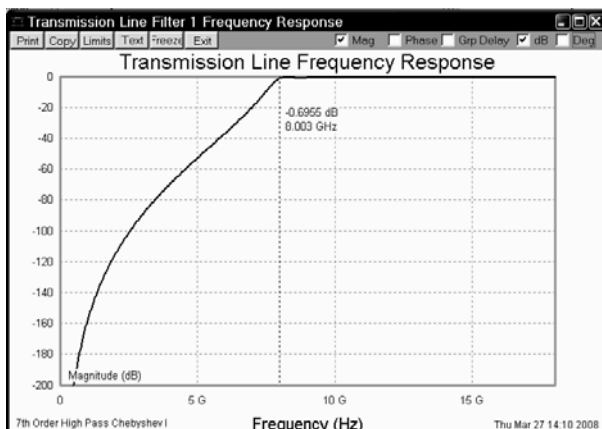


Рис. 3.7

Щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в левом верхнем углу схемы. Рассчитанный график показан на рис. 3.7. Поместите курсор на график, нажмите левую кнопку мышки и, передвигая мышку, установите маркер на частоту 8 ГГц. Щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать маркер. Снимая или устанавливая “галочки” в соответствующих переключателях в правой верхней части окна графика, можно удалять или добавлять желательные характеристики на графике.

Чтобы передать схему в Microwave Office, щёлкните мышкой по кнопке **MWO** в ле-

вом верхнем углу окна схемы рис. 3.6. Переданная в Microwave Office схема выглядит, как показано на рис. 3.8, а график, рассчитанный в Microwave Office, показан на рис. 3.9.

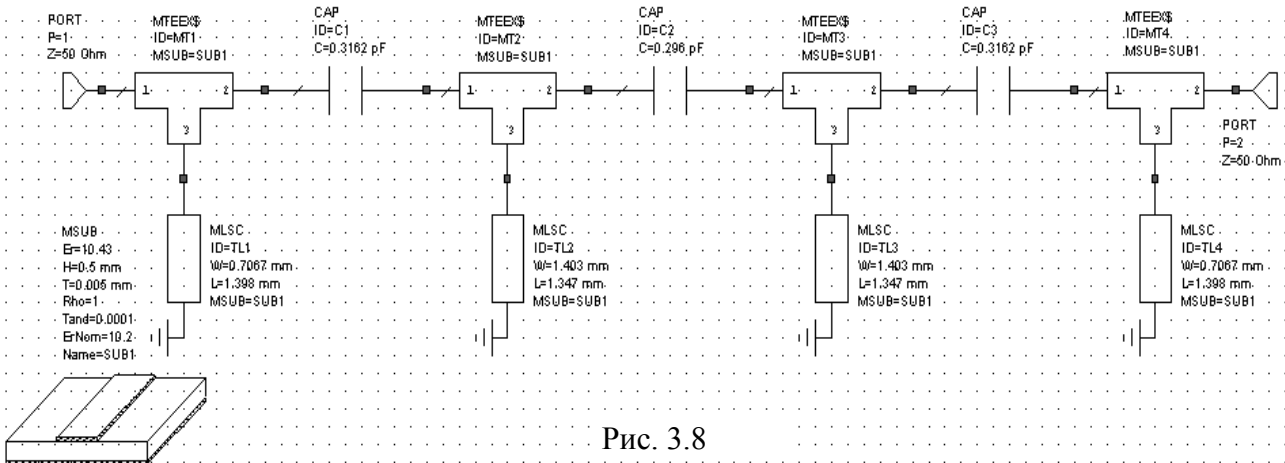


Рис. 3.8

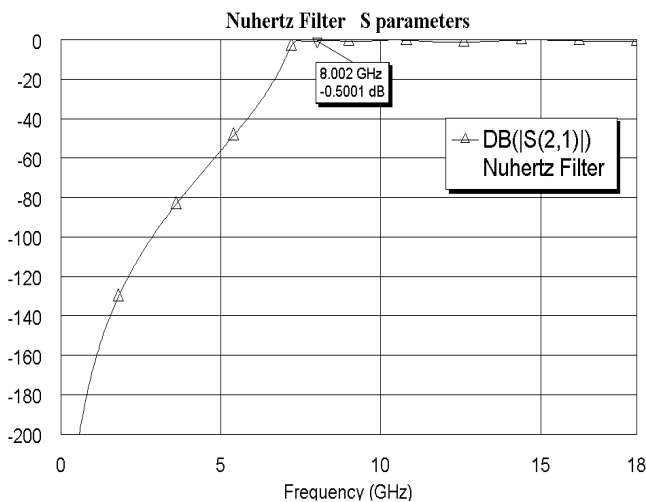


Рис. 3.9

Чтобы установить маркер в Microwave Office, выберите в меню **Graph>Marker>Add Marker**.

Характеристика несколько сдвинута вниз по частоте. Исправить это можно, выполнив оптимизацию или настройку.

Такая структура с емкостной связью имеет меньшую длину, по сравнению со схемой на шлейфах со связью через отрезки линий. Она может использоваться, если плата фильтра должна иметь меньшие габариты.

Заметим, что для передачи подобной схемы в Microwave Office нет смысла отмечать Show Layout, т.к. в Microwave Office нет элемента топологии, соответствующего конденсатору и автоматически правильная топология схемы не будет создаваться. Такой топологический элемент необходимо будет создать непосредственно в Microwave Office.

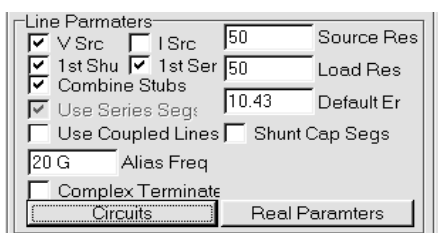


Рис. 3.10

Откройте Nuhertz Filter, щёлкнув мышкой по имени этой программы на панели задач Windows. Закройте окна схемы и графика.

Сделайте установки в области **Line Parameters**, как показано на рис. 3.10 и щёлкните мышкой по кнопке **Circuits**. Откроются два окна со схемами, которые начинаются с последовательного элемента (рис. 3.11) и параллельного элемента (рис. 3.12).

Щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в левом верхнем углу первой схемы, показанной на рис. 3.11. Затем щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в левом верхнем углу второй схемы, показанной на рис. 3.12.

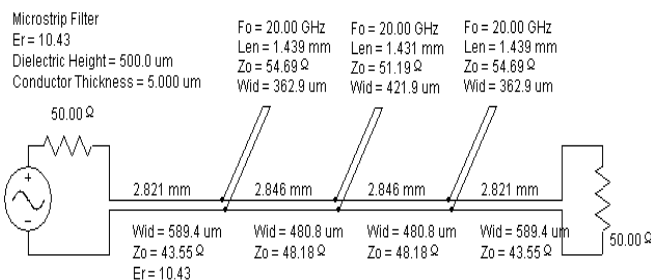


Рис. 3.11

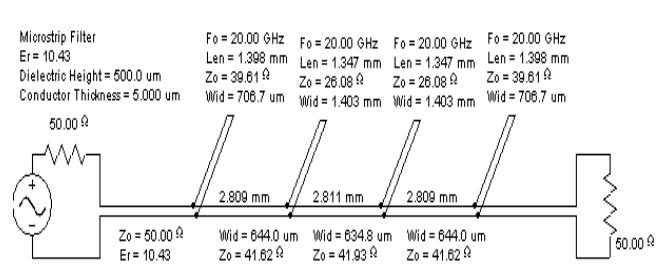


Рис. 3.12

Графики характеристик, рассчитанные в Nuhertz Filter, показаны на рис. 3.13 и 3.14. Из этих графиков видно, что характеристика для схемы с первым параллельным элементом рис. 3.12, имеет более крутой скат. Эту схему и оставим для дальнейшего моделирования. Закройте окна другой схемы и её графика.

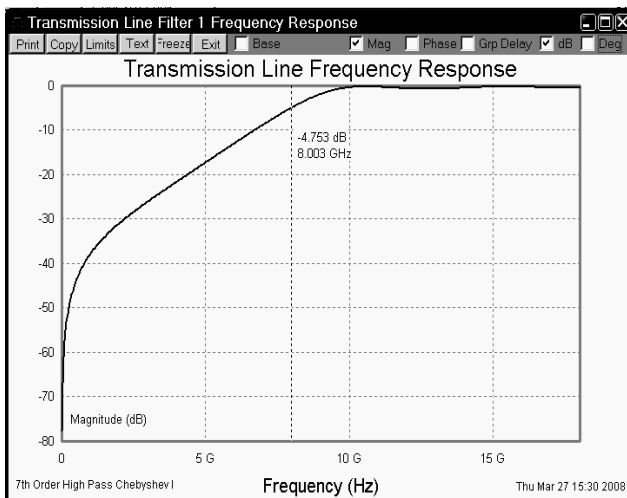


Рис. 3.13

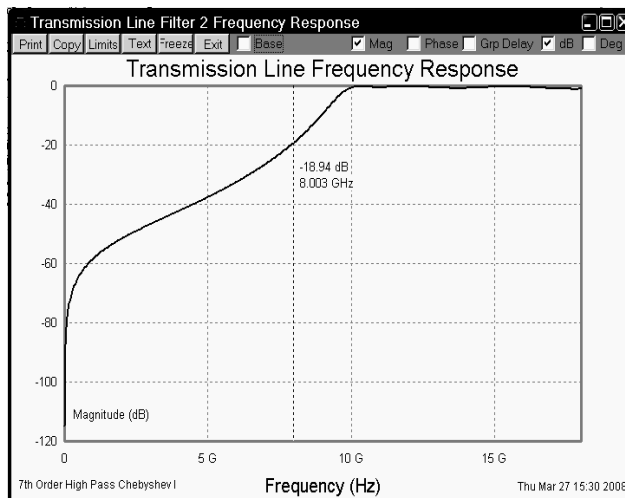


Рис. 3.14

Заметим, что рассчитанные характеристики обеих схем сдвинуты вверх, но их настройку удобнее выполнить в Microwave Office.

Щёлкните мышкой по кнопке **MWO** в левом верхнем углу схемы, откроется окно рис. 3.15.

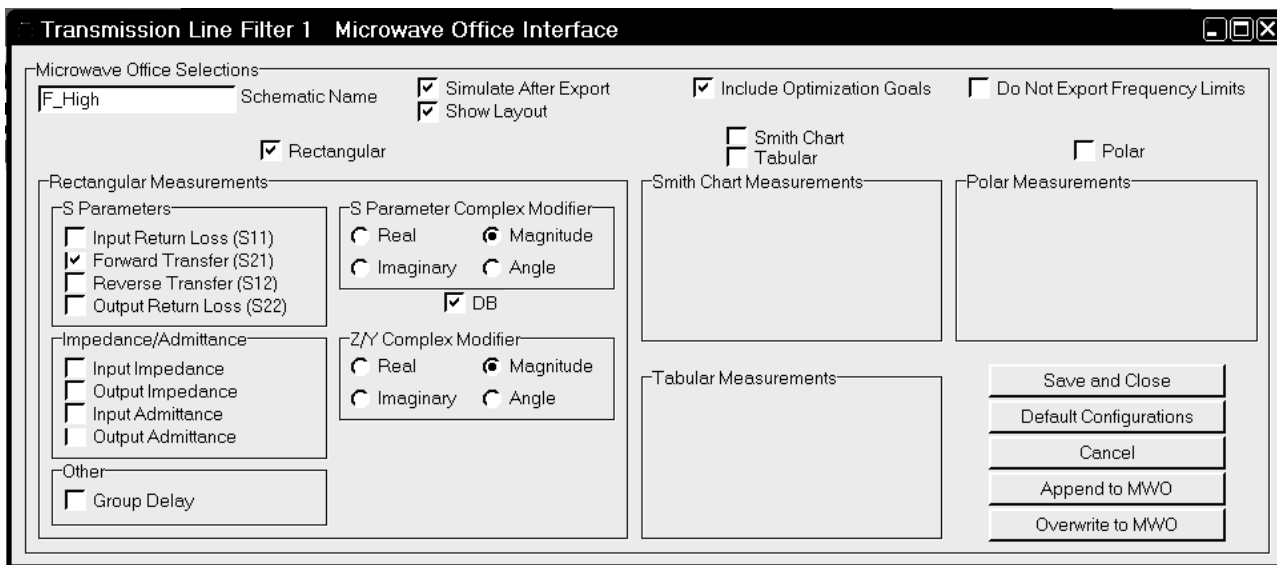


Рис. 3.15

В этом окне:

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **F\_High**. Отметьте **Simulate After Export**, **Include Optimization Goals** и **Show Layout**. Хотя это и не обязательно, все эти операции можно сделать и непосредственно в Microwave Office.
2. Отметьте тип графика **Rectangular** и снимите отметки для всех остальных графиков.
3. В области **Rectangular Measurement** отметьте **Forward Transfer (S21)** и снимите все остальные отметки.
4. В областях **Impedance/Admittance** и **Other** снимите все отметки.
5. Щёлкните мышкой по кнопке **Append to MWO**.

Щёлкните мышкой по окну Microwave Office или по имени этой программы на панели задач Windows, чтобы перейти в интерфейс Microwave Office.

Переданная в Microwave Office схема выглядит, как показано на рис. 3.16, а рассчитанный в Microwave Office график – на рис. 3.17.

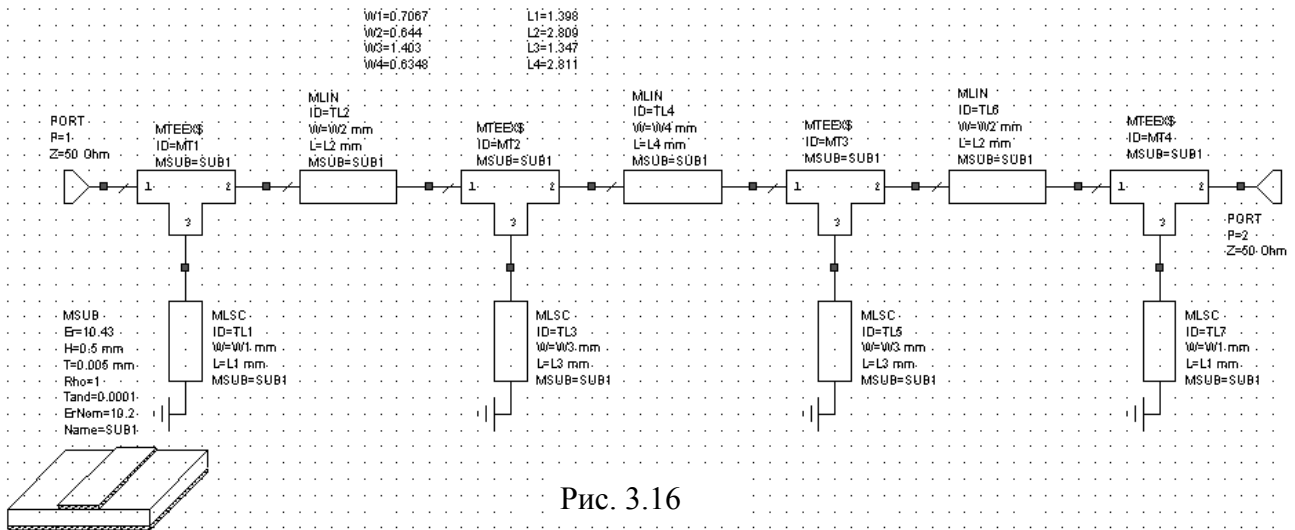


Рис. 3.16

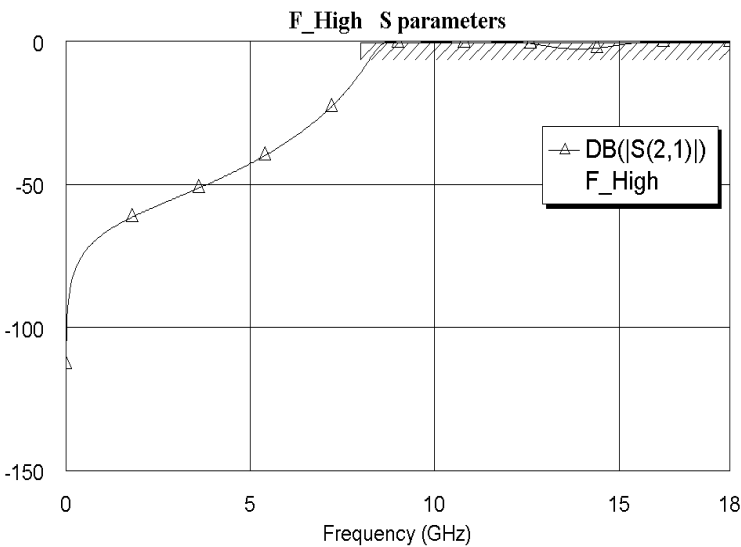


Рис. 3.17

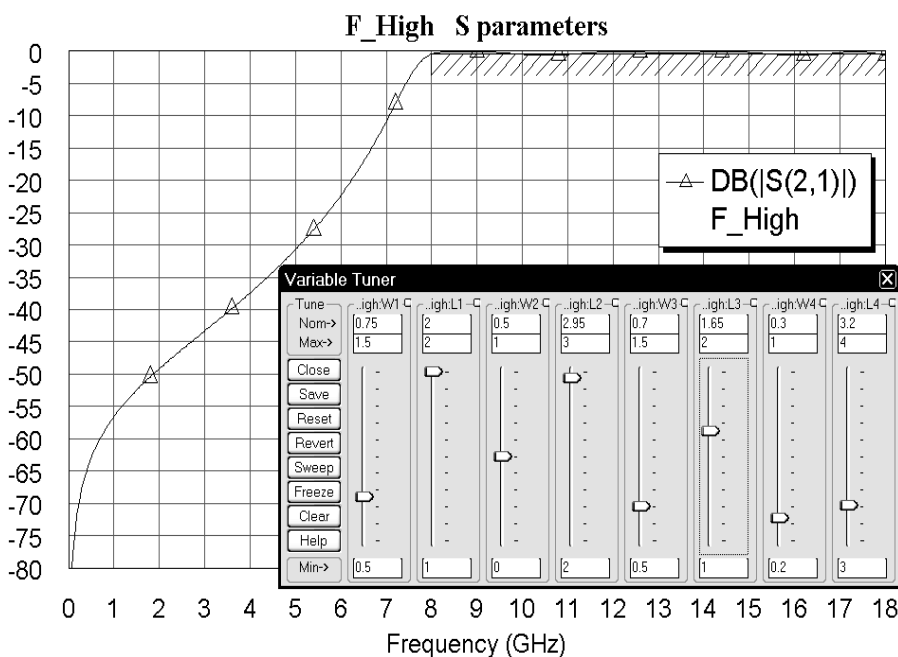


Рис. 3.18

Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и выберите **Properties**. В открывшемся окне на вкладке **Axis** для оси x снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **1**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**, в поле **Min** введите **-80**, в поле **Max** введите **0** и в поле **Step** введите **5**, нажмите **Apply** и **OK**.

Характеристика фильтра сдвинута вверх по частоте. Воспользуемся блоком настройки. Причём длину и ширину проводников будем округлять до пяти сотых, предполагая, что размер сетки в электромагнитной структуре будет равен 0.05 мм.

Сделайте активным окно графика и щёлкните мышкой по значку **Tune** на панели инструментов. Двигая движки на блоке настройки, добейтесь желаемой характеристики (рис. 3.18).

Сделайте активным окно схемы и добавьте 50-омные проводники на входе и выходе фильтра. Для этого:

1. Нажмите клавишу **Ctrl**, установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и переместите порт на свободное место в окне схемы, прервав соединение порта со схемой.
2. Повторите п.1 для выходного порта.

3. Откройте окно просмотра элементов, щёлкнув по кнопке **Elements** в левой нижней части окна проекта.
4. Раскройте группу **Microstrip** и щёлкните мышкой по подгруппе **Lines**. Перетащите элемент **MLIN** в окно схемы и подключите его ко входу схемы.
5. Дважды щёлкните по элементу **MLIN** и в открывшемся окне свойств элемента введите **W=0.45 mm** и **L=3 mm**, нажмите **OK**.
6. Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов (элемент **MLIN** должен быть выделен). Подключите скопированный элемент к выходу схемы.
7. Установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и подключите порт ко входу схемы. Аналогично подключите порт к выходу схемы.

Должна получиться схема рис. 3.19.

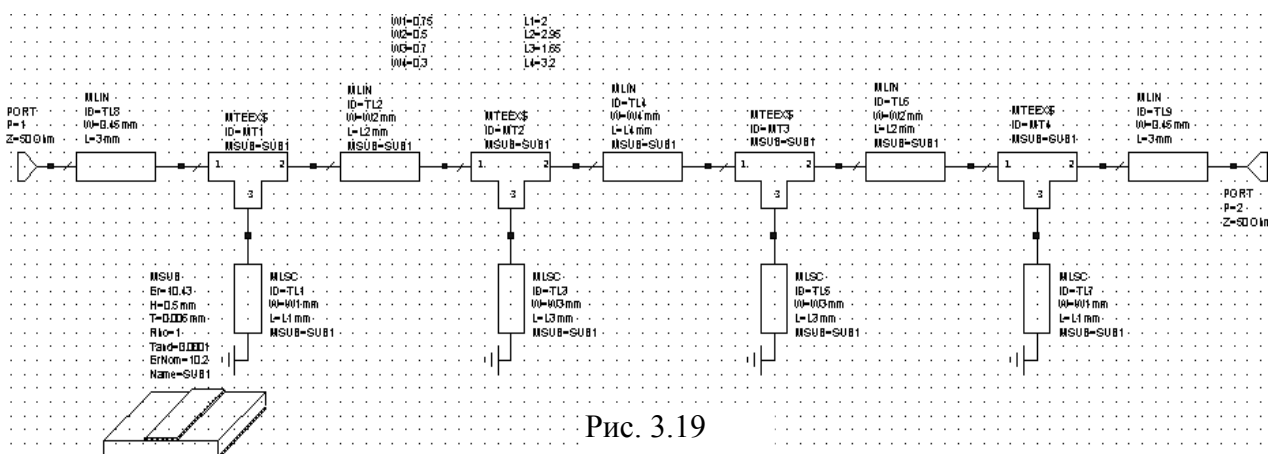


Рис. 3.19

Создайте топологию схемы. Для этого:

1. Откройте окно просмотра проекта, щёлкнув мышкой по кнопке **Project** в левой нижней части окна.
2. Щёлкните мышкой по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов.
3. В окне ввода **Grid Spacing** на панели инструментов введите **0.5x**, чтобы сделать размер ячеек сетки 0.05 мм.

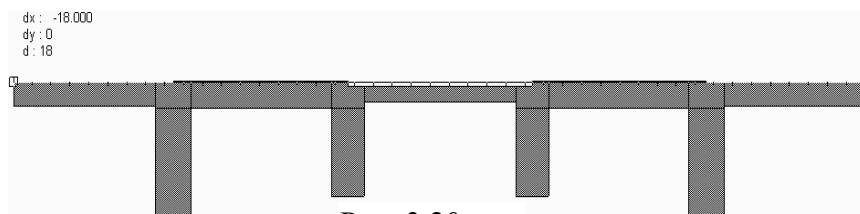


Рис. 3.20

Созданная топология схемы показана на рис. 3.20.

Щёлкните мышкой по значку **Measure** на панели инструментов, установите курсор на правый верхний край выходного проводника, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор на левый верхний край входного проводника (рис. 3.20). Измеренная длина топологии равна 18 мм. Измеренная аналогично ширина топологии равна 2.5 мм.

Создайте электромагнитную структуру:

1. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов, введите имя электромагнитной структуры **Fil\_High**, отметьте **AWR EMSight Simulator** и нажмите **Create**.
2. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов, откроется окно **Element Options**.
3. На вкладке **Enclosure** введите **X\_Dim=18 mm**, **Y\_Dim=5 mm**, **Grid\_X=0.05** и **Grid\_Y=0.05**.
4. На вкладке **Material defs** введите **Er=10.43** и **TanD=0.0001**.
5. На вкладке **Dielectric Layers** введите для слоя 1 толщину **6 mm**, для слоя 2 толщину **0.5 mm**.

4. Выделите все элементы топологии и щёлкните мышкой по значку **Snap Together** на панели инструментов, чтобы упорядочить топологию.



6. На вкладке **Materials** отметьте **1/2oz Cu**.
7. Нажмите **OK**.
8. Сделайте активным окно топологии схемы, выделите всю топологию и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.

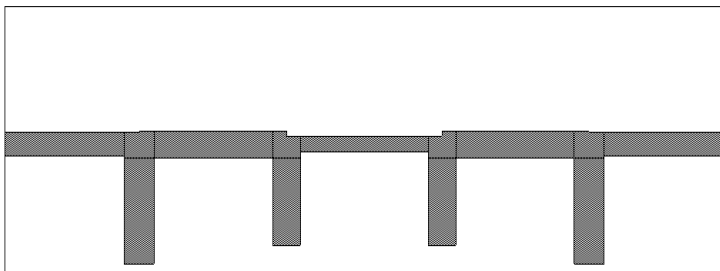


Рис. 3.21

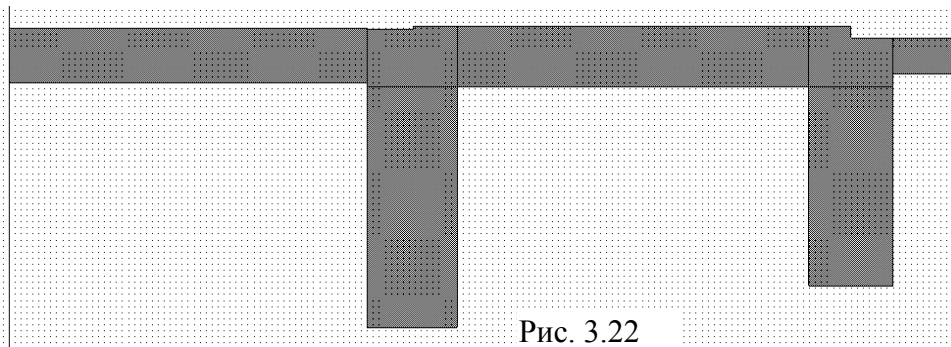


Рис. 3.22

топологии, чтобы была видна сетка, как показано на рис. 3.22. Расположение некоторых элементов топологии не совпадает с сеткой. Эти несовпадения не велики и можно надеяться, что погрешность моделирования будет незначительной. Но, для удобства дальнейшей работы с топологией, её лучше отредактировать. Это можно сделать разными способами, используя возможности редактора топологии. Мы это сделаем следующим образом, сократив количество топологических элементов.

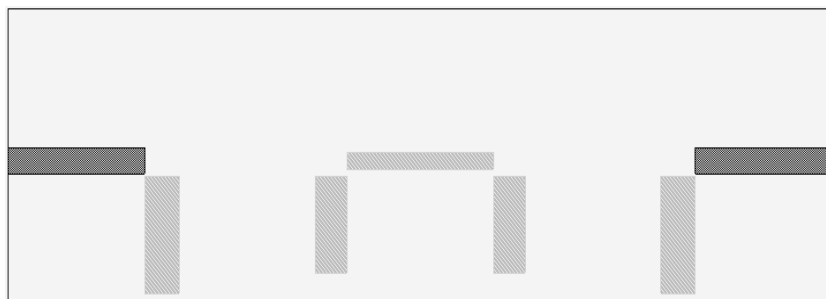


Рис. 3.23

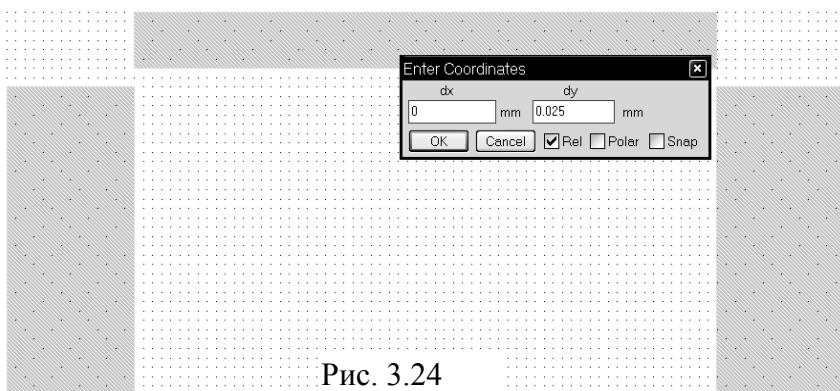


Рис. 3.24

выглядеть, как показано на рис. 3.23.

3. Щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов и увеличьте средние элементы топологии. Установите курсор на один из выделенных элементов, нажмите левую кнопку мышки и нажмите клавишу **Tab**. Появится окно для координатного ввода (рис. 3.24). В поле **dy** введите **0.025** и нажмите **OK**.

9. Сделайте активным окно электромагнитной структуры и щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов.
10. Вставьте скопированную топологию в корпус так, чтобы края входного и выходного проводников точно совпадали с левым и правым раем корпуса соответственно.

Электромагнитная структура должна иметь вид, показанный на рис. 3.21. Щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов и увеличьте несколько первых элементов

топологии.

1. Нажав клавишу **Shift**, щёлкните по трём элементам, соединяющим первый и второй шлейфы, и по трём элементам, соединяющим предпоследний и последний шлейфы. Нажмите клавишу **Delete**, чтобы удалить эти элементы.
2. Нажав клавишу **Shift**, щёлкните по оставшимся элементам топологии, которые расположены между входным и выходным проводниками. Оставшаяся топология с выделенными проводниками будет

4. Отобразите увеличенные первый и второй шлейфы (можно воспользоваться горизонтальной полосой скроллинга в нижней части окна). Щёлкните по значку **Polygon** на панели инструментов. Установите курсор на правый верхний угол входного проводника, щёлкните левой кнопкой мышки и затем перемещайте курсор следующим образом, щёлкая мышкой после каждого перемещения: вправо на 0.35, вверх на 0.05, вправо на 3.7, вниз на 0.1, вправо на 0.35, вниз на 0.4, влево

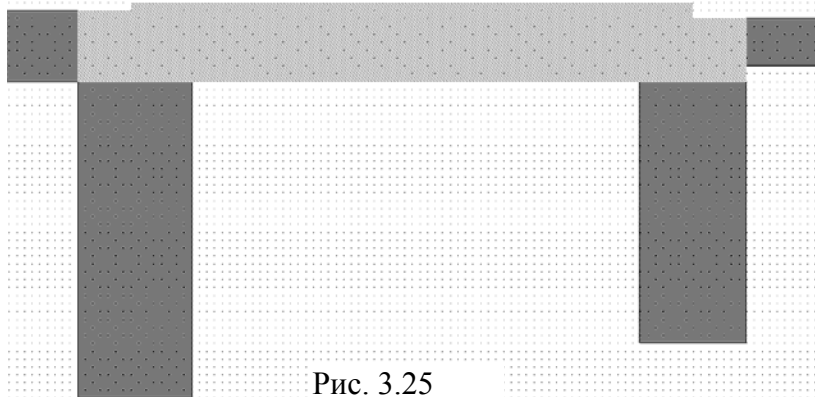


Рис. 3.25

на 4.4 и здесь дважды щёлкните мышкой. Отредактированный фрагмент топологии должен выглядеть, как показано на рис. 3.25.

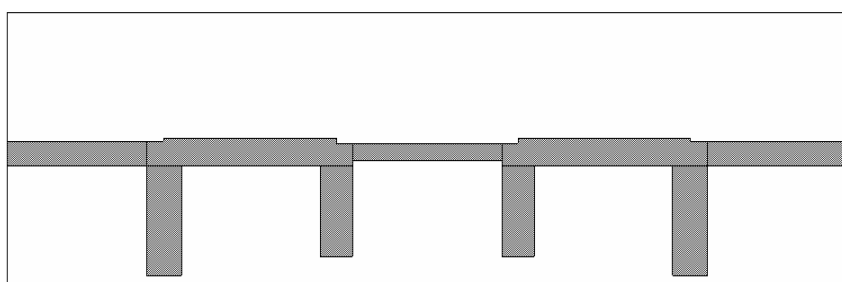


Рис. 3.26

между предпоследним и последним шлейфами.

Отредактированная топология показана на рис. 3.26. Выделите все элементы топологии, щёлкните правой кнопкой мышки по любому выделенному элементу и выберите **Shape Properties**. В открывшемся окне свойств выберите материал **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.

Щёлкните мышкой по входному проводнику, чтобы выделить его. Затем щёлкните мышкой по значку **Edge Port** на панели инструментов, поместите курсор на левый край входного проводника так, чтобы появился небольшой прямоугольник, и щёлкните левой кнопкой мышки. Выделите порт щелчком мышки, установите курсор на правую сторону прямоугольника так, чтобы курсор отображался в виде двойной стрелки, нажмите левую кнопку мышки и переместите референсную плоскость порта на 1 мм вправо. Аналогично установите порт на выходе схемы.

Теперь создайте заземление шлейфов. Например, шлейфы можно заземлить через металлизированные отверстия на краях шлейфов, введя в топологию межслойные перемычки (*Via*). Мы создадим заземление следующим образом.

1. Выделите всю топологию. Установите курсор на любой элемент топологии и, нажав левую кнопку мышки, сдвиньте топологию по вертикали так, чтобы расстояние от края первого шлейфа до нижнего края корпуса было равно 0.3.мм.
2. Щёлкните мышкой по значку **Polygon** на панели инструментов.
3. Установите курсор на левый нижний край первого шлейфа и щёлкните левой кнопкой мышки. Перемещайте курсор, щёлкая мышкой после каждого перемещения, вниз на 0.3, вправо на 12, вверх на 0.3, влево на 2.2, вверх на 0.35, влево на 7.6, вниз на 0.35, влево на 2.2 и здесь дважды щёлкните левой кнопкой мышки.
4. Щёлкните правой кнопкой мышки по выделенному заземляющему проводнику и выберите **Shape Properties**. В открывшемся окне свойств выберите материал **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.

Топология должна выглядеть, как показано на рис. 3.27.

Установите курсор на правый верхний угол входного проводника, щёлкните левой кнопкой мышки и затем перемещайте курсор следующим образом, щёлкая мышкой после каждого перемещения: вправо на 0.35, вверх на 0.05, вправо на 3.7, вниз на 0.1, вправо на 0.35, вниз на 0.4, влево

5. Оставив созданный элемент выделенным, выберите в меню **Edit>Mirror**, переместите курсор в окно схемы и, двигая мышкой, создайте зеркальную копию этого элемента. Вставьте полученный элемент

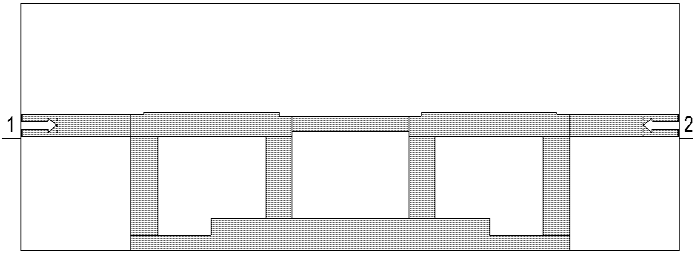


Рис. 3.27

Для выполнения анализа определим частоты, общие для проекта и изменим опции схемы, для использования частот проекта. Затем изменим свойства измеряемой величины на графике так, чтобы отображались характеристики и схемы, и графика.

1. Дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне проекта. На вкладке **Frequencies** открывшегося окна в поле **Start (GHz)** введите **0**, в поле **Stop (GHz)** введите **18**, в поле **Step (GHz)** введите **1**, отметьте **Replace**, нажмите **Apply** и **OK**.
2. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **F\_High** в левом окне проекта и выберите **Options**. В открывшемся окне на вкладке **Frequencies** отметьте **Use project default** и нажмите **OK**.
3. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени электромагнитной структуры **Fil\_High** в левом окне проекта и выберите **Options**. В открывшемся окне на вкладке **Frequencies**

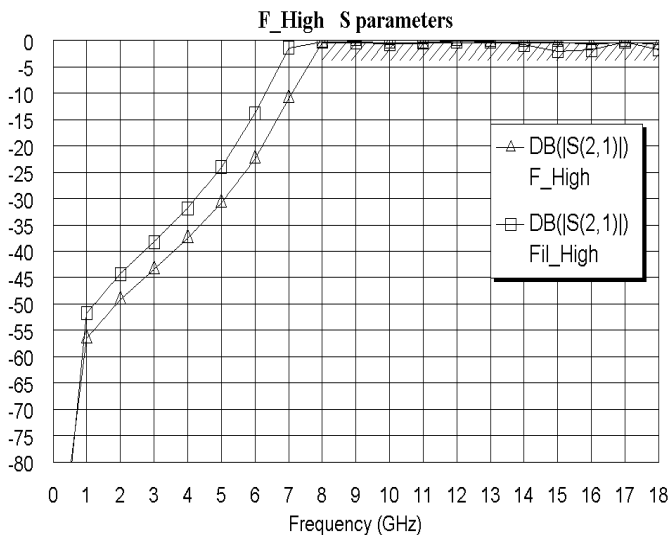


Рис. 3.28

- отметьте **Use project default** и нажмите **OK**.
4. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени измеряемой величины **F\_High:DB(|S(2,1)|)** в группе графиков в левом окне просмотра проекта и выберите **Properties**. В открывшемся окне в поле **Data Source Name** введите **All Sources** и нажмите **OK**.
5. Откройте окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.28.

Характеристика электромагнитной структуры отличается от характеристики схемы. Этого следовало ожидать, поскольку

схема не совсем точно отражает особенности топологии фильтра.

Сделайте активным окно электромагнитной структуры и отредактируйте топологию. Характеристику нужно сдвинуть вверх по частоте, т.е. нужно укоротить длину шлейфов. Для

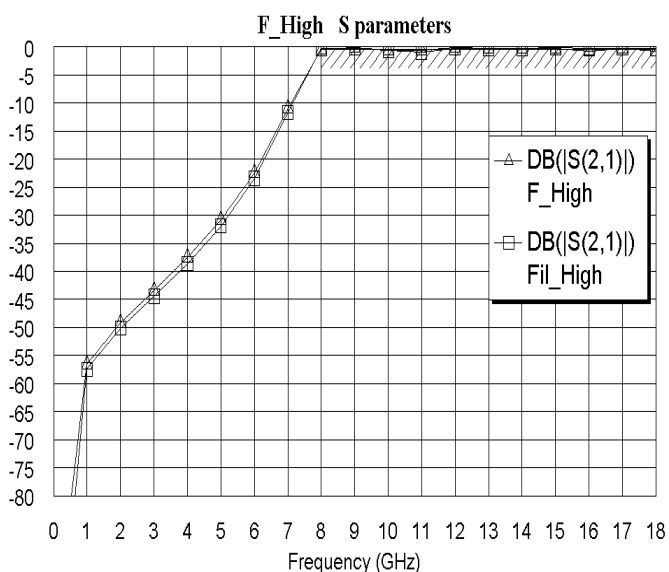


Рис. 3.29

этого дважды щёлкните мышкой по первому шлейфу. Установите курсор на ромбик посередине нижней стороны шлейфа и сдвиньте эту сторону вверх на 0.4 мм. Аналогично укоротите все остальные шлейфы. Нажмите клавишу **Shift** и выделите все элементы топологии фильтра, кроме заземляющего проводника. Установите курсор на любой выделенный элемент топологии и сдвиньте выделенную топологию вниз на 0.4 мм до соединения шлейфов с заземляющим проводником. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.29. Характеристика электромагнитной структуры хорошо совпадает с характеристикой схемы.

## 4. Полосно-пропускающие фильтры

Для всех примеров проектирования фильтров в этом разделе для частот используются единицы измерения ГГц и метрическая система для единиц измерения длины. Поэтому любой пример должен начинаться с загрузки Microwave Office и выбора в меню **Options>Project Options**. На вкладке **Global Units** открывшегося окна опций проекта нужно ввести единицы измерения для частот **GHz**, отметить **Metric units**, для единиц измерения длины ввести **mm** и нажать **OK**. Затем раскройте группу **Wizards** в левом окне просмотра проекта и дважды щёлкните по **Nuhertz Filter Wizard**, чтобы открыть окно **Filter Synthesis**.

### 4.1. Фильтр на замкнутых шлейфах с полосой пропускания 4-8 ГГц

Требуется спроектировать фильтр с полосой пропускания от 4 до 8 ГГц.

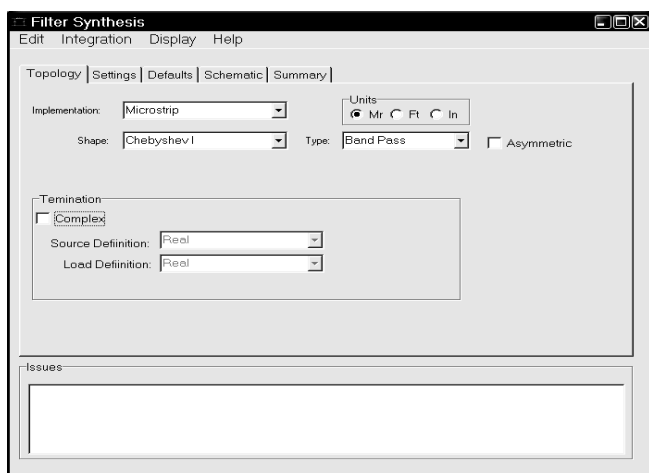


Рис. 4.1

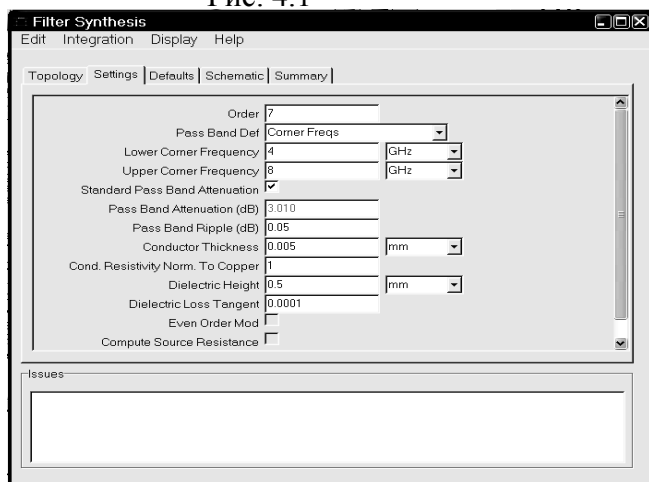


Рис. 4.2

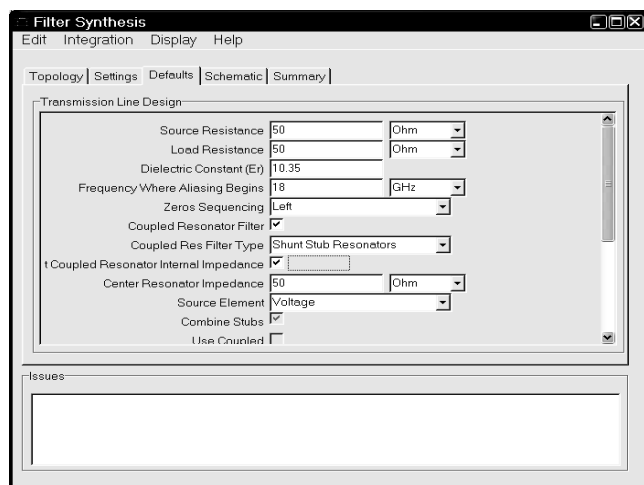


Рис. 4.3

На вкладке **Topology** (рис. 4.1):

1. В поле **Implementation** (Реализация) введите **Microstrip**.
2. В поле **Shape** (Вид) введите **Chebyshev I**.
3. В поле **Type** введите **Band Pass**.

На вкладке **Settings** (рис. 4.2):

1. В поле **Order** (Порядок) введите 7.
2. В поле **Pass Band Def** (Определение полосы пропускания) введите **Corner Freqs**.
3. В поле **Lower Corner Frequency** введите **4 GHz**.
4. В поле **Upper Corner Frequency** введите **8 GHz**.
5. Отметьте **Standard Pass Band Attenuation**.
6. В поле **Pass Band Ripple (dB)** введите величину пульсаций в полосе пропускания **0.05**.
7. В поле **Conductor Thickness** (Толщина проводника) введите **0.005 mm**.
8. В поле **Dielectric Height** (Толщина диэлектрика) введите **0.5**.
9. В поле **Dielectric Loss Tangent** введите тангенс диэлектрических потерь **0.0001**.

На вкладке **Defaults** (рис. 4.3):

1. В полях **Source Resistance** (Сопротивление источника) и **Load Resistance** (Сопротивление нагрузки) введите **50 Ohm**.
2. В поле **Dielectric Constant (Er)** введите диэлектрическую проницаемость **10.35**.
3. В поле **Frequency Where Aliasing Begins** введите **18 GHz**.
4. Отметьте **Coupled Resonator Internal Impedance** и в поле **Center Resonator Impedance** введите **50 Ohm**.
5. Значения остальных полей оставьте по умолчанию.

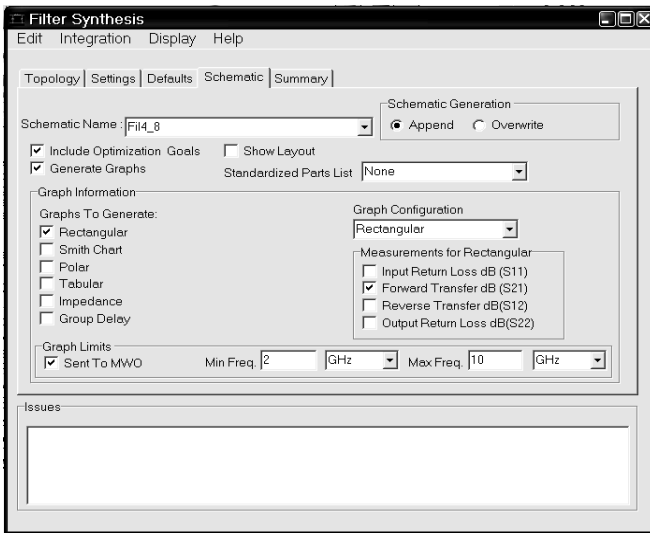


Рис. 4.4

После ввода всех данных выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется основное окно панели управления **Nuhertz Filter** (рис. 4.5). В строке меню этого окна выберите **File>Save As** и сохраните синтезируемый фильтр в файле **Fil4-8**.

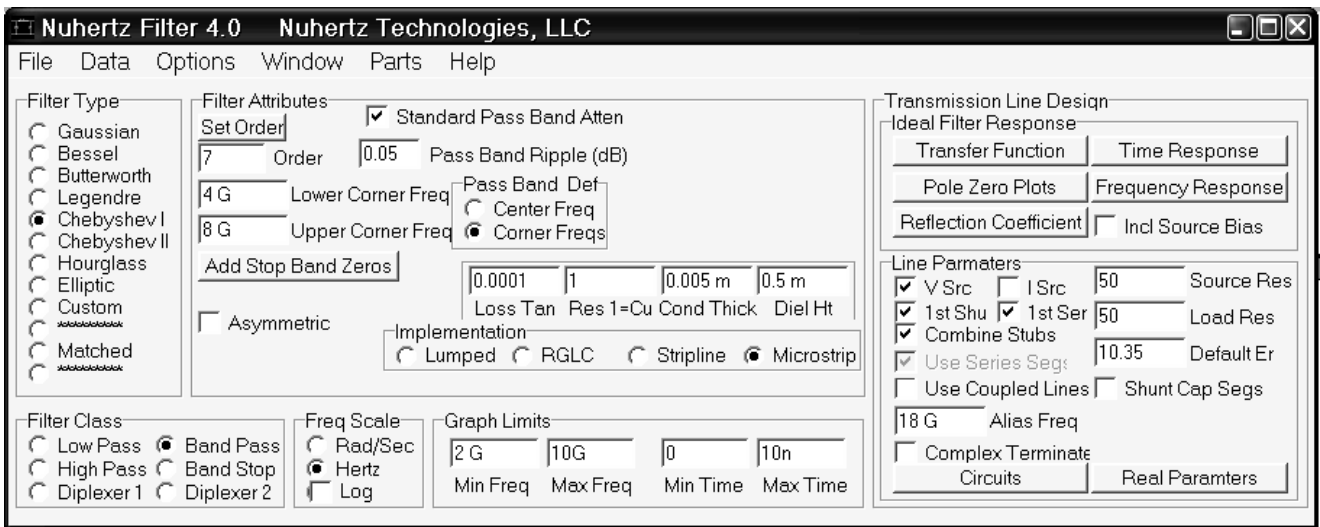


Рис. 4.5

Отметьте **1 st Shu** и **1 st Ser** в области **Line Parameters** в нижнем правом углу окна,

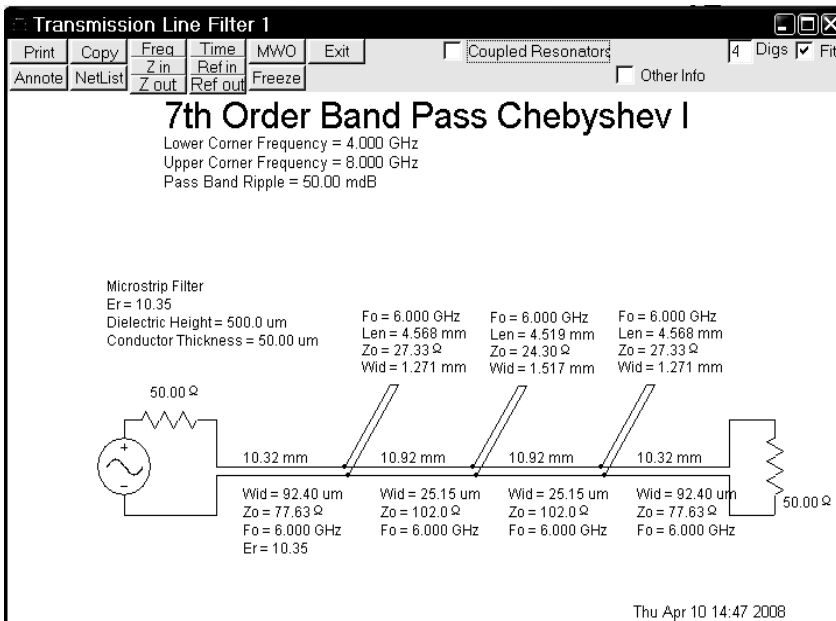


Рис. 4.6

На вкладке **Schematic** (рис. 4.4):

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil4\_8**.
2. Отметьте **Include Optimization Goals** (Включить цели оптимизации).
3. Отметьте **Generate Graphs** (Создать графики).
4. В области **Graphs To Generate** отметьте **Rectangular** (Прямоугольный).
5. В области **Measurement for Rectangular** отметьте **Forward Transfer dB(S21)**.
6. В области **Graph Limits** отметьте **Sent To MWO**, в поле **Min Freq** введите **2 GHz**, в поле **Max Freq** введите **10 GHz**.

После ввода всех данных выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется основное окно панели управления **Nuhertz Filter** (рис. 4.5). В строке меню этого окна выберите **File>Save As** и сохраните синтезируемый фильтр в файле **Fil4-8**.

чтобы просмотреть два варианта схемы: начинающейся с параллельного короткозамкнутого шлейфа и с последовательного отрезка. Все установки должны соответствовать рис. 4.5.

Щёлкните мышкой по кнопке **Circuits**. Откроются два окна со схемами.

На рис. 4.6 показана схема фильтра, начинающаяся с последовательного отрезка высокоомной линии. В этой схеме последовательные отрезки являются полуволновыми резонаторами, а параллельные короткозамкнутые

шлейфы – четвертьволновыми резонаторами. Связь между резонаторами – непосредственная.

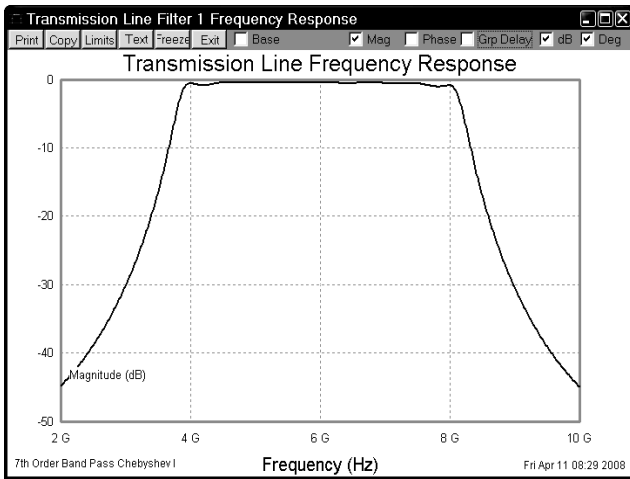


Рис. 4.7

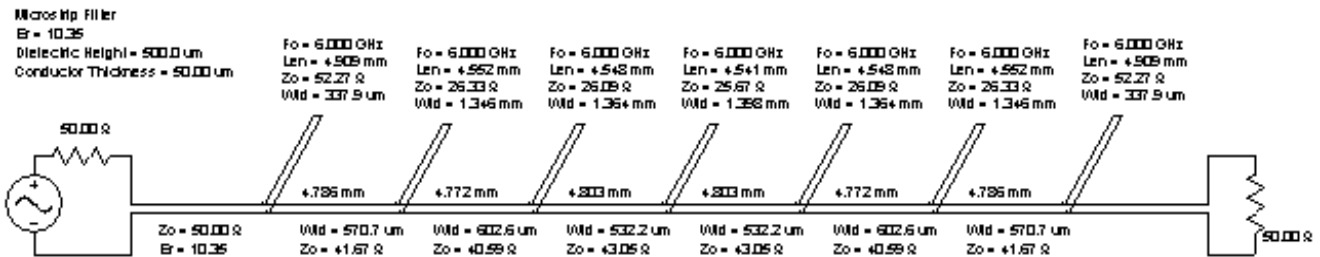


Рис. 4.8

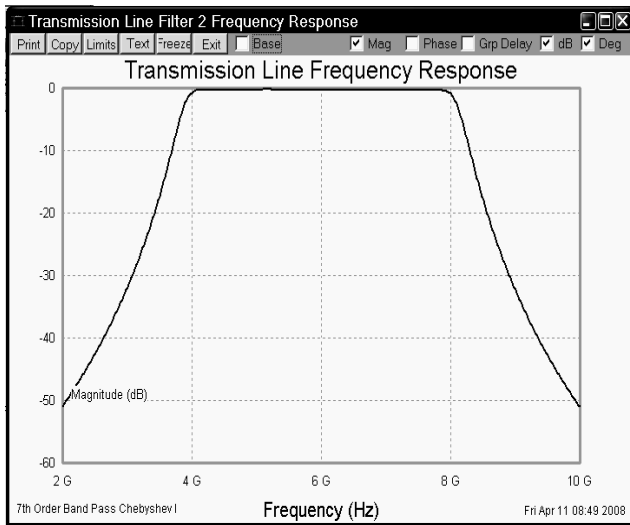


Рис. 4.9

Щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в левом верхнем углу схемы. Рассчитанная характеристика фильтра показана на рис. 4.7.

Схема фильтра, начинающаяся с параллельного шлейфа, показана на рис. 4.8. В этой схеме параллельные короткозамкнутые шлейфы являются четвертьволновыми резонаторами, связь между которыми осуществляется через четвертьволновые отрезки связи. Щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в левом верхнем углу схемы. Характеристика этого фильтра показана на рис. 4.9.

Характеристики обоих вариантов схем отли-

чаются мало. Но в первой схеме рис.4.6 последовательные отрезки имеют большое волновое сопротивление и, соответственно, малую ширину (0.025 мм) и большую длину. Общая длина этого фильтра больше, чем у второго варианта. Поэтому остановимся на схеме фильтра, которая начинается с параллельного короткозамкнутого шлейфа рис. 4.8.

Закройте окно схемы рис. 4.6.

Сделайте активным окно схемы рис. 4.8. В левом верхнем углу этой схемы щелкните мышкой по кнопке **MWO**. Откроется окно для установки опций экспорта в Microwave Office рис. 4.10.

В поле ввода **Schematic Name** введите

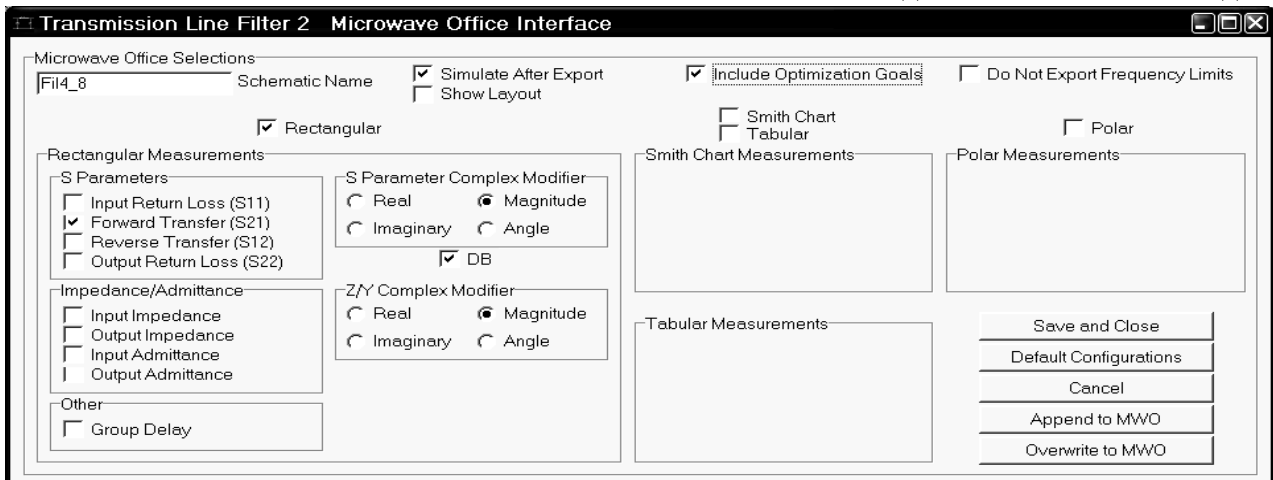


Рис. 4.10

имя схемы **Fil4\_8**. Отметьте **Simulate After Export, Include Optimization Goals, Forward Transfer (S21), Rectangular, DB** и **Magnitude**. Снимите все остальные “галочки”. Установки должны быть, как показано на рис. 4.10. Щёлкните мышкой по кнопке **Append to MWO** в правом нижнем углу окна.

Щёлкните по окну **Microwave Office** или по имени этой программы на панели задач **Windows**, чтобы сделать её активной. Переданная схема и график, рассчитанный в **Microwave Office**, будут выглядеть, как показано на рис. 4.11.

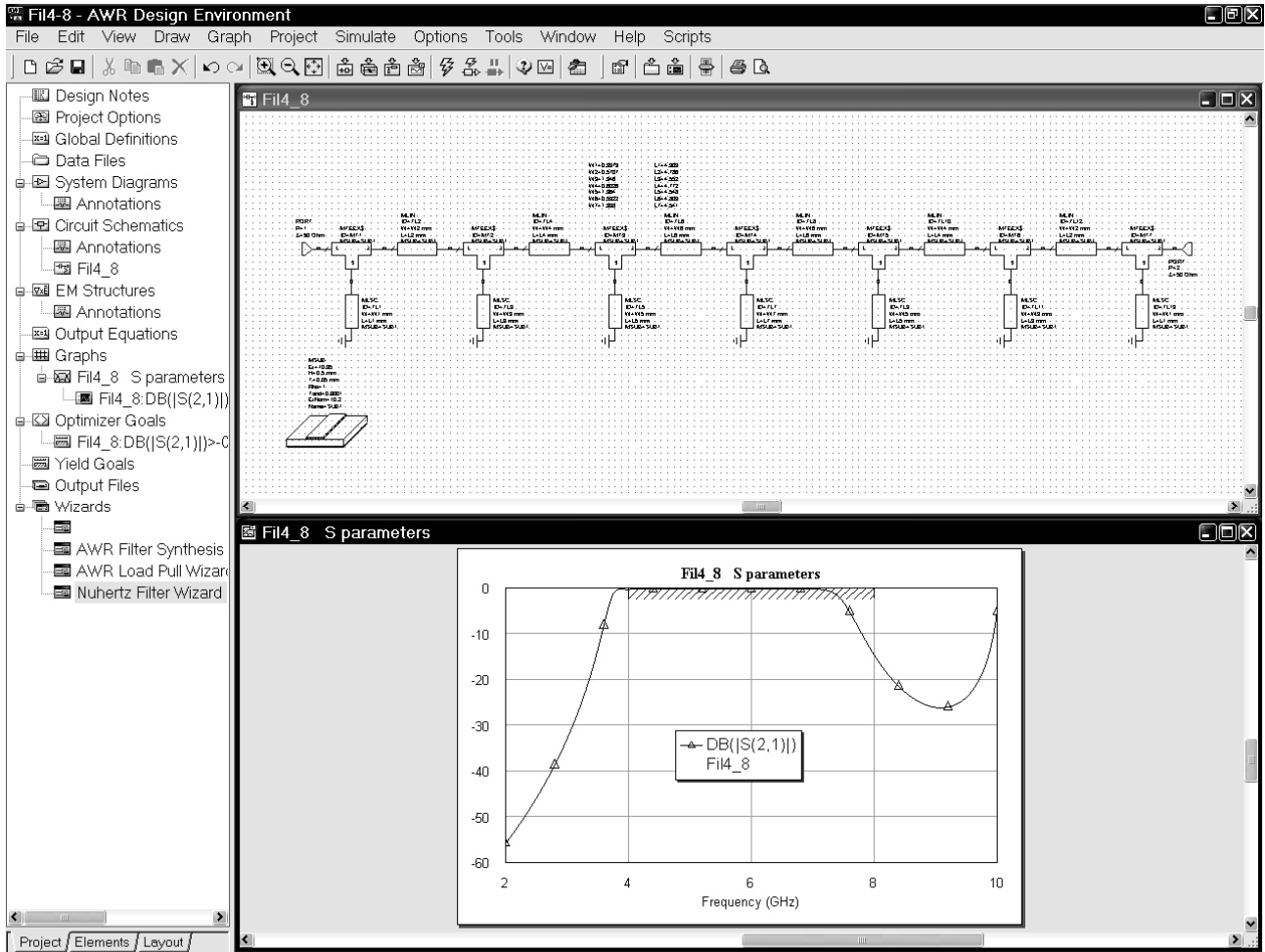


Рис. 4.11

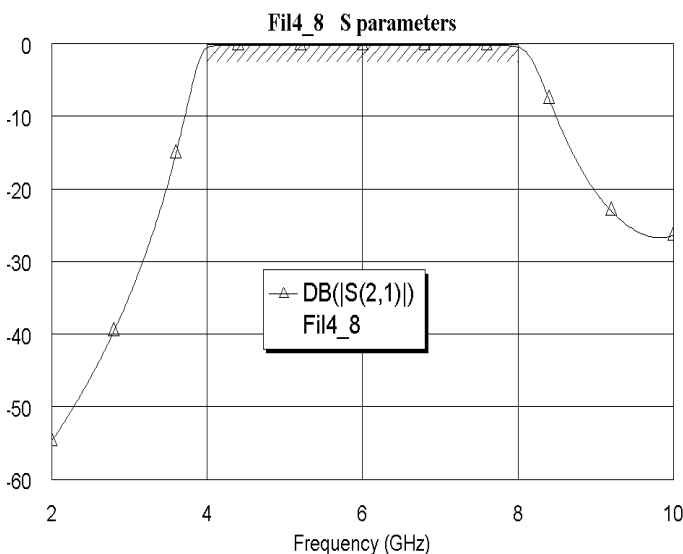


Рис. 4.12

Характеристика, рассчитанная в **Microwave Office**, сдвинута вниз по частоте и уже требуемой. Чтобы исправить это, воспользуемся оптимизацией.

Щёлкните мышкой по окну графика, чтобы сделать его активным. Затем выберите в меню **Simulate>Optimize**. В открывшемся окне выберите метод оптимизации **Pointer – Robust Optimization**, установите **Maximum Iterations** равным **500** и нажмите **Start**. Полученная характеристика показана на рис. 4.12.

Сделайте активным окно схемы, щёлкнув мышкой по этому окну или дважды щёлкнув мышкой по имени схемы в левом окне просмотра проекта. Округлите значения переменных до одной десятой. Для этого дважды щёлкните мышкой по переменной **W1** и измените её значение на **0.3**. Аналогично отредактируйте все переменные, установив их значения, как показано на рис. 4.13.

Округлите значения переменных до одной десятой. Для этого дважды щёлкните мышкой по переменной **W1** и измените её значение на **0.3**. Аналогично отредактируйте все переменные, установив их значения, как показано на рис. 4.13.

W1=0.3    L1=4.9  
 W2=0.6    L2=4.4  
 W3=1.2    L3=4.3  
 W4=0.6    L4=4.4  
 W5=1.2    L5=4.1  
 W6=0.6    L6=4.5  
 W7=1.3    L7=4.1

Добавьте в проект частоты для моделирования. Дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне просмотра проекта. В открывшемся окне опций проекта на вкладке **Frequencies** отметьте **Replace**, в поле **Start (GHz)** введите **2**, в поле **Stop (GHz)** введите **10**, в поле **Step (GHz)** введите **0.5**, нажмите **Apply** и **OK**.

Рис. 4.13

Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы в правом окне просмотра проекта и выберите **Options**. В открывшемся окне опций схемы на вкладке **Frequencies** отметьте **Use project default** и нажмите **OK**.

Чтобы на графике наблюдать характеристики и схемы, и электромагнитной структуры, отредактируйте свойства графика.

1. Сделайте активным окно графика, дважды щёлкнув по его имени в левом окне проекта. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени измеряемой величины **Fil4\_8:DB(S(2,1))** в левом окне проекта и выберите **Properties**. В открывшемся окне в поле **Data Source Name** введите **All Sources** и нажмите **OK**.

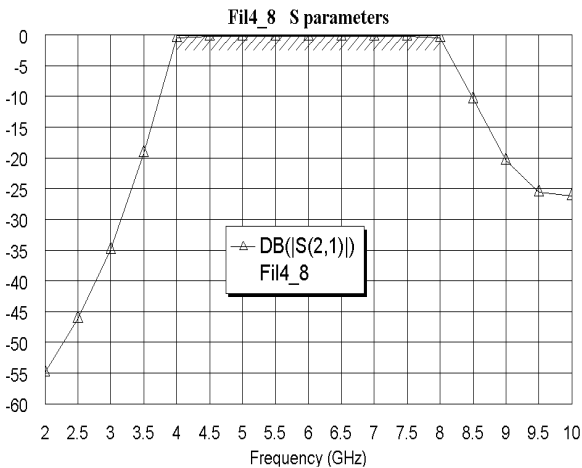


Рис. 4.14

2. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов.
3. Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и выберите **Properties**.
4. В открывшемся окне свойств графика на вкладке **Axes** для оси x снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.5**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **Auto limits** и **Auto divs**. В поле **Min** введите **60**, в поле **Step** введите **5**. Нажмите **Apply** и **OK**.

Полученный график показан на рис. 4.14.

Добавьте отрезки 50-омных линий на входе и

выходе фильтра.

1. Щёлкните мышкой по кнопке **Elements** в нижней части левого окна проекта, чтобы открыть окно просмотра элементов.
2. Раскройте группу **Microstrip** и щёлкните мышкой по подгруппе **Lines**.
3. Установите курсор на входной порт, нажмите клавишу **Ctrl** и левую кнопку мышки. Переместите порт на свободное место в окне схемы, разорвав связь порта со схемой. То же самое сделайте с выходным портом.
4. Перетащите элемент **MLIN** в окно схемы и подключите его ко входу схемы.
5. Дважды щёлкните мышкой по элементу **MLIN** и в окне свойств элемента введите **W=0.45**, **L=3** и нажмите **OK**.
6. Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** (элемент **MLIN** должен быть выделен) на панели инструментов.
7. Подключите скопированный элемент к выходу схемы.
8. Установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и подключите порт ко входу схемы. Аналогично подключите порт к выходу схемы. Схема будет выглядеть, как показано на рис. 4.15.

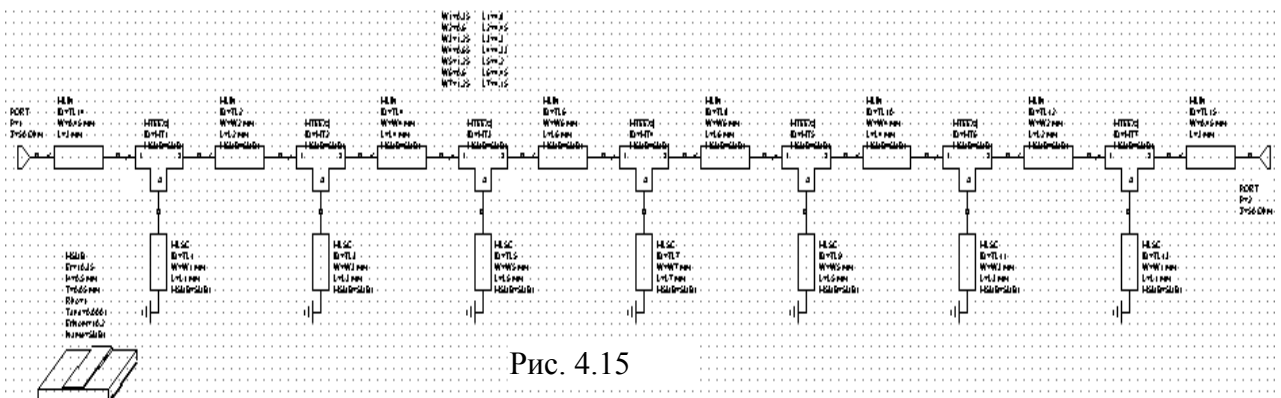




Рис. 4.15



Теперь создадим электромагнитную структуру.

1. Сделайте активным окно схемы.
2. Щёлкните по значку **New Schematic Layout View**  на панели инструментов.
3. Установите курсор левее и выше созданной топологии, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор правее и ниже топологии так, чтобы вся топология попала в образовавшийся прямоугольник. Или выберите в меню **Edit>Select All**. Вся топология должна быть выделена.
4. Выберите в меню **Edit>Snap Together** или щёлкните по значку **Snap Together**  на панели инструментов, чтобы упорядочить топологию.

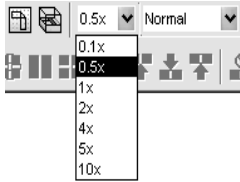


Рис. 4.16

5. В поле ввода **Grid Spacing** на панели инструментов (рис. 4.16) введите множитель **0.5x**, чтобы размер клеток сетки сделать равным 0.05 мм.

6. Щёлкните мышкой по значку **View Area** на панели инструментов и увеличьте отображение входного проводника вместе с первым Т-сочленением так, чтобы была видна сетка (рис. 4.17). Топология входного проводника не совпадает с сеткой и по вертикали, и по горизонтали. Поскольку в электромагнитной структуре порт должен точно совпадать с

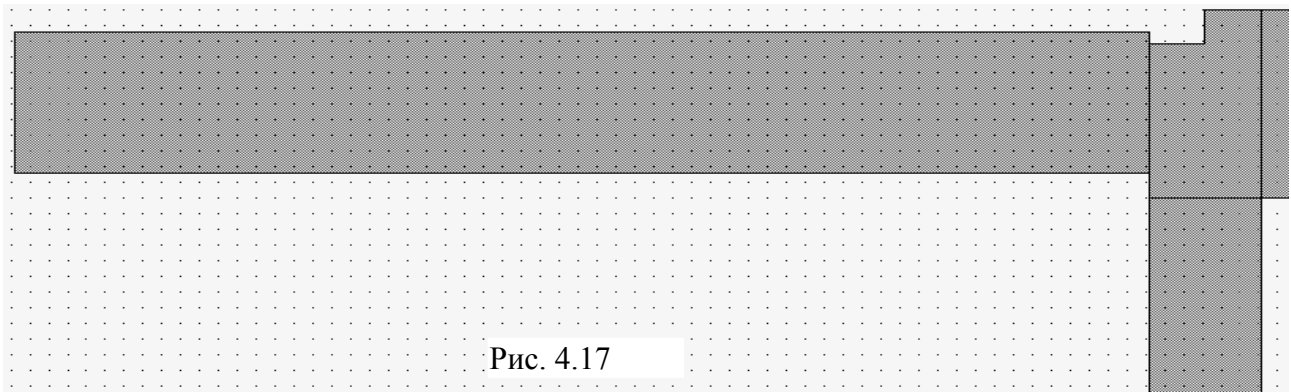


Рис. 4.17

сеткой, на такой проводник порт не установится, и анализ проводиться не будет. Поэтому отредактируем положение входного проводника.

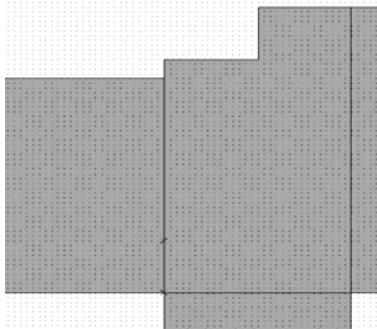


Рис. 4.18

7. В поле ввода **Grid Spacing** на панели инструментов введите множитель **0.1x**, чтобы размер клеток сетки сделать равным 0.01 мм.

8. Установите курсор на входной проводник, нажмите левую кнопку мышки и переместите этот проводник вниз так, чтобы его нижняя сторона была на одном уровне с нижней стороной Т-разветвителя (рис. 4.18). Аналогично отредактируйте выходной проводник.

9. Выберите в меню **Edit>Select All**, чтобы выделить всю топологию.

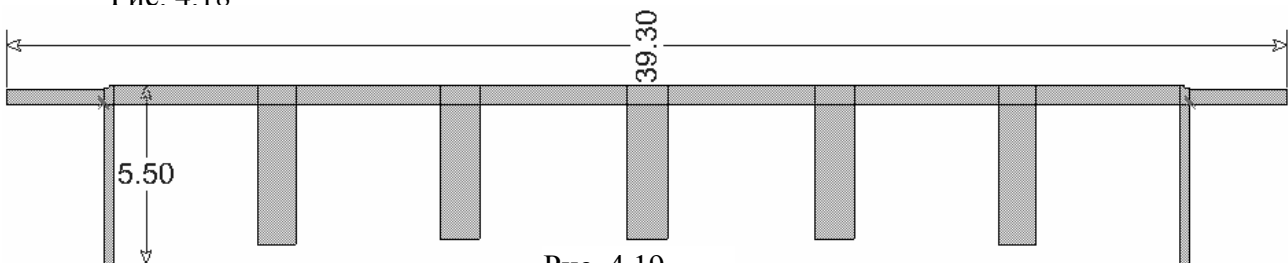


Рис. 4.19

10. Установив курсор на любой проводник и, нажав левую кнопку мышки, сдвиньте всю топологию влево на 0.1 мм.
11. В поле ввода **Grid Spacing** на панели инструментов введите множитель **0.5x**, чтобы размер клеток сетки сделать равным 0.05 мм. Убедитесь, что проводники совпадают с сеткой. Полученная топология с размерами, необходимыми для создания электромагнитной структуры, показана на рис. 4.19.

Теперь можно приступить к созданию электромагнитной структуры.

1. Щёлкните мышкой по кнопке **Project** в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра проекта.
2. Щёлкните мышкой по значку **New EM Structure** на панели инструментов или выберите в меню **Project>Add EM Structure>New EM Structure**.
3. В открывшемся окне введите имя структуры **F4\_8**, отметьте **AWR EMSight Simulator** и нажмите **Create**.
4. Щёлкните мышкой по значку **Substrate Information** на панели инструментов или дважды щёлкните по **Enclosure** под именем электромагнитной структуры в левом окне просмотра проекта.
5. В открывшемся окне свойств на вкладке **Enclosure** введите **X\_Dim=39.3**, **Y\_Dim=7**, **Grid\_X=0.05** и **Grid\_Y=0.05**.
6. На вкладке **Material Defs** введите **Er=10.35**, **TanD=0.0001**.
7. На вкладке **Dielectric Layers** введите для слоя **1** толщину **4**, для слоя **2** толщину **0.5**.
8. Нажмите **OK**.
9. Сделайте активным окно топологии схемы и выделите всю топологию.
10. Щёлкните мышкой по значку **Copy** на панели инструментов.
11. Сделайте активным окно электромагнитной структуры и щёлкните мышкой по значку **Paste** на панели инструментов. Вставьте скопированную топологию так, чтобы её левый и правый края точно совпадали с краями корпуса (рис. 4.20).

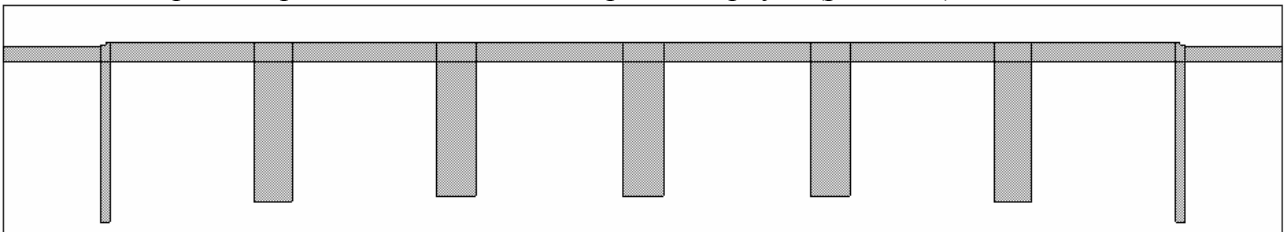


Рис. 4.20

12. Выберите в меню **Edit>Select All**, чтобы выделить всю топологию. Установите курсор на любой элемент топологии, нажмите левую кнопку мышки и переместите топологию по вертикали так, чтобы расстояние от нижнего края первого шлейфа до края корпуса было равно 0.3 мм (рис. 4.21).

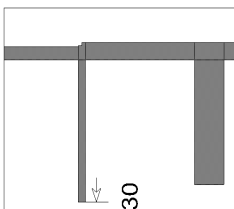


Рис. 4.21

13. Создайте заземляющий проводник. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Polygon** на панели инструментов. Установите курсор на левый нижний угол первого шлейфа, щёлкните левой кнопкой мышки и перемещайте курсор, щёлкая мышкой после каждого перемещения, следующим образом: вправо на 2.5, вверх на 0.6, вправо на 5.6, вверх на 0.2, вправо на 17.1, вниз на 0.2, вправо на 5.6, вниз на 0.6, вправо на 2.5, вниз на 0.3, влево на 33.3 и здесь дважды щёлкните левой кнопкой мышки.

14. Выделите входной проводник. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Edge Port** на панели инструментов, установите курсор на левый край входного проводника так, чтобы появился небольшой прямоугольник, и щёлкните левой кнопкой мышки. Щёлкните мышкой по установленному порту, чтобы выделить его, установите курсор на правый край порта так, чтобы курсор отображался в виде двойной стрелки. Нажмите левую кнопку мышки и переместите референсную плоскость порта вправо на 1 мм. Аналогично установите порт на выходе фильтра.

Должна получиться топология, показанная на рис. 4.22.

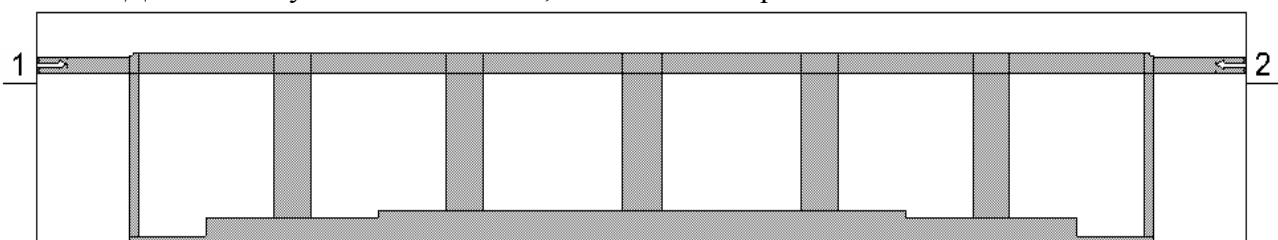


Рис. 4.22

Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 4.23. Характеристика электромагнитной структуры сдвинута вниз по частоте.

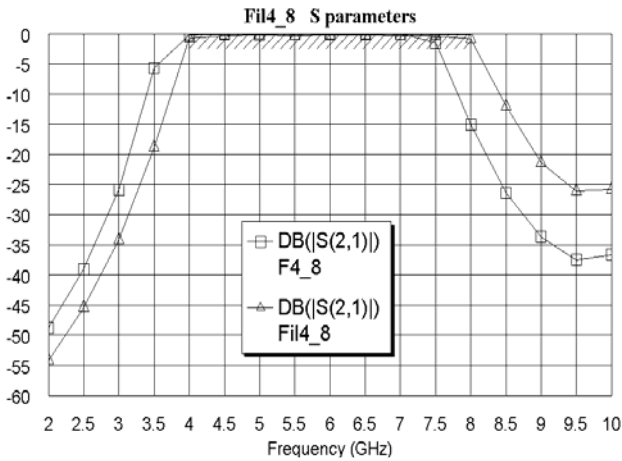


Рис. 4.23

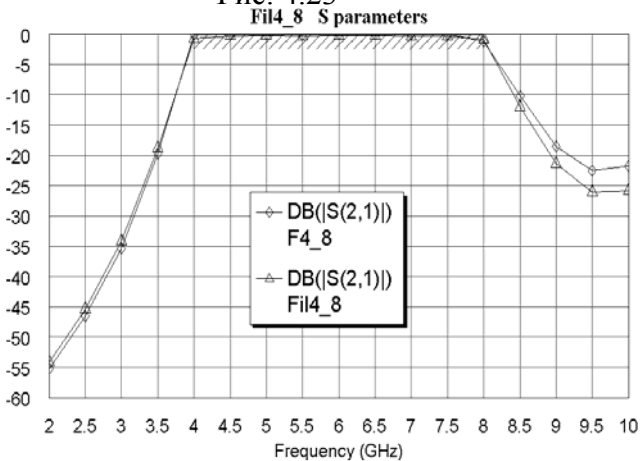


Рис. 4.24

Сделайте активным окно электромагнитной структуры. Дважды щёлкните по первому шлейфу, установите курсор на ромбик посередине нижней стороны шлейфа, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эту сторону на 0.6 мм вверх. Аналогично укоротите все шлейфы фильтра. Нажмите клавишу **Shift** и поочерёдно щёлкните по всем элементам фильтра, кроме заземляющего проводника. Установите курсор на любой выделенный элемент и, нажав левую кнопку мышки, сдвиньте элементы фильтра на 0.6 мм вниз до соединения с заземляющим проводником. Сделайте активным окно графика и щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 4.24. Характеристика электромагнитной структуры хорошо совпадает с характеристикой схемы.

Отредактированная электромагнитная структура фильтра показана на рис. 4.25.

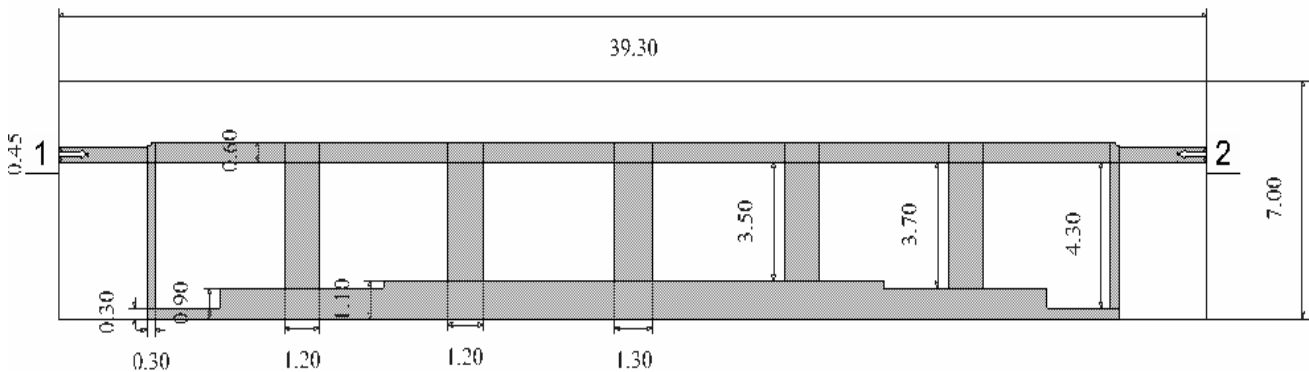


Рис. 4.25

## 4.2. Фильтр с боковыми электромагнитными связями с полосой пропускания 9-9.5 ГГц

Загрузите Microwave Office, установите глобальные единицы измерения для частоты **GHz** и отметьте метрическую систему единиц **Metric units**. Загрузите **Nuhertz Filter Wizard**, чтобы открыть окно **Filter Synthesis**.

На вкладке **Topology**:

1. В поле **Implementation** (Реализация) введите **Microstrip**.
2. В поле **Shape** (Вид) введите **Chebyshev I**.
3. В поле **Type** введите **Band Pass**.

На вкладке **Settings**:

1. В поле **Order** (Порядок) введите **5**.
2. В поле **Pass Band Def** (Определение полосы пропускания) введите **Corner Freqs**.
3. В поле **Lower Corner Frequency** введите **9 GHz**.

4. В поле **Upper Corner Frequency** введите **9.5 GHz**.
5. Отметьте **Standard Pass Band Attenuation**.
6. В поле **Pass Band Ripple (dB)** введите величину пульсаций в полосе пропускания **0.05**.
7. В поле **Conductor Thickness** (Толщина проводника) введите **0.005 mm**.
8. В поле **Dielectric Height** (Толщина диэлектрика) введите **0.5**.
9. В поле **Dielectric Loss Tangent** введите тангенс диэлектрических потерь **0.0001**.

На вкладке Defaults:

1. В полях **Source Resistance** (Сопротивление источника) и **Load Resistance** (Сопротивление нагрузки) введите **50 Ohm**.
2. В поле **Dielectric Constant (Er)** введите диэлектрическую проницаемость **10.35**.
3. В поле **Frequency Where Aliasing Begins** введите **18 GHz**.
4. Отметьте **Coupled Resonator Filter** и в поле **Coupled Res Filter Type** введите **Parallel Coupled Open Resonators**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля.
5. Отметьте **Coupled Resonator Internal Impedance** и в поле **Center Resonator Impedance** введите **50 Ohm**.
6. Значения остальных полей оставьте по умолчанию.

На вкладке Schematic:

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil9\_95**.
2. В области **Schematic Generation** отметьте **Append**.
3. Отметьте **Include Optimization Goals** (Включить цели оптимизации).
4. Отметьте **Generate Graphs** (Создать графики).
5. В области **Graphs To Generate** отметьте **Rectangular** (Прямоугольный) и снимите отметки для всех остальных типов графиков.
6. В области **Measurement for Rectangular** отметьте **Forward Transfer dB(S21)**.
7. В области **Graph Limits** отметьте **Sent To MWO**, в поле **Min Freq** введите **8.5 GHz**, в поле **Max Freq** введите **10 GHz**.

После ввода всех данных выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется

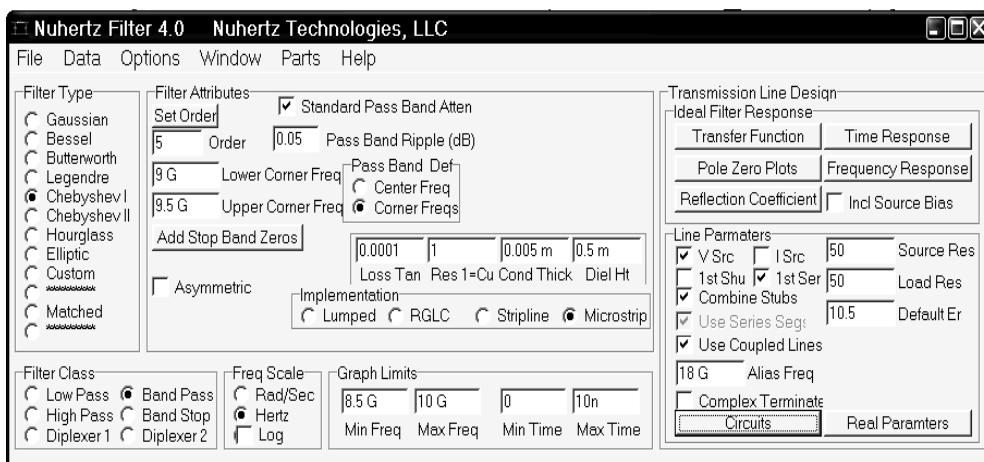


Рис. 4.26

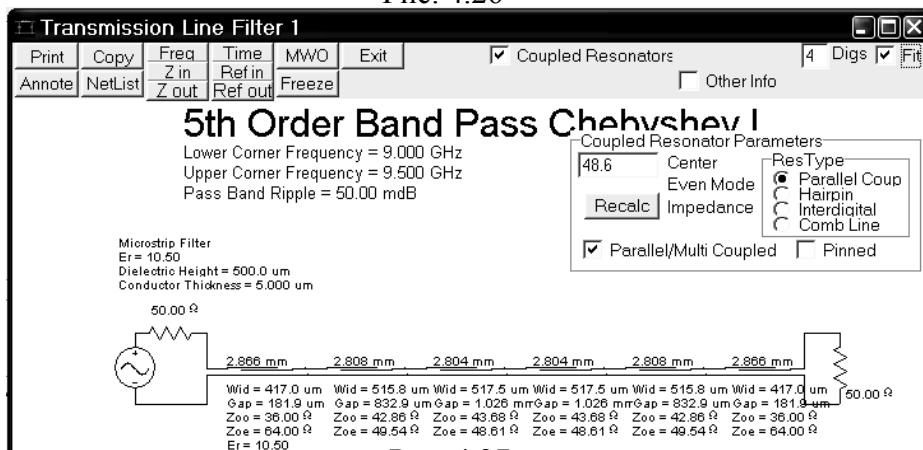


Рис. 4.27

основное окно панели управления **Nuhertz Filter** (рис. 4.26), в котором определены все ранее сделанные установки. В строке меню этого окна выберите **File>Save As** и сохраните синтезируемый фильтр в файле **Fil9-95**.

Щёлкните мышкой по кнопке **Circuits** в нижнем правом углу открывшегося окна панели управления. Синтезированная схема фильтра показана на рис. 4.27.

Щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в верхнем левом углу окна схемы. Рассчитанная Nuhertz Filter характеристика пока-

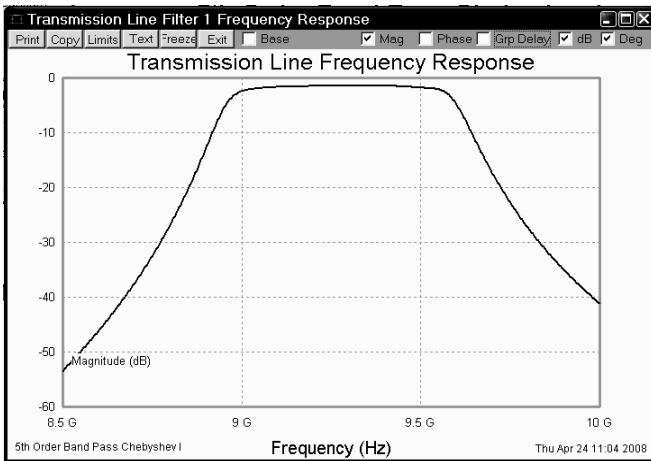


Рис. 4.28

зана на рис. 4.28.

Чтобы передать синтезированную схему фильтра в Microwave Office, щёлкните мышкой по кнопке **MWO** в левом верхнем углу окна схемы рис. 4.27. Откроется окно установки опций для передачи схемы в Microwave Office рис. 4.29.

В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil9\_95**.

Отметьте **Simulate After Export**, чтобы сразу после передачи был выполнен анализ схемы, и **Include Optimization Goals**, чтобы добавить цели оптимизации.

Отметьте тип графика **Rectangular**

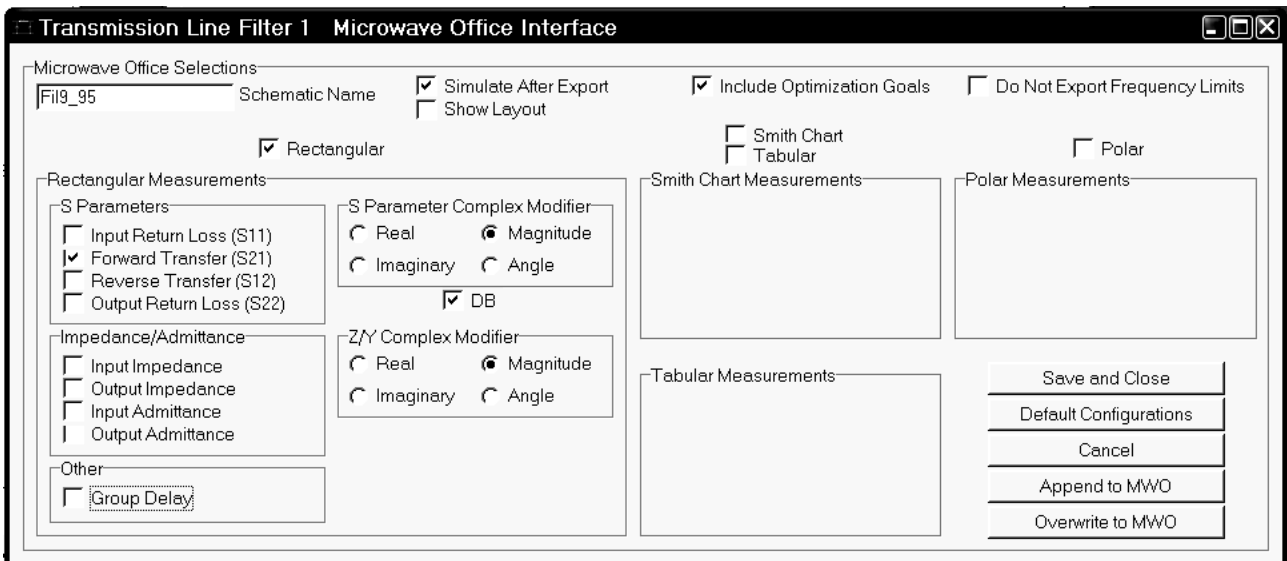


Рис. 4.29

(Прямоугольный) и уберите отметки во всех остальных типах графиков.

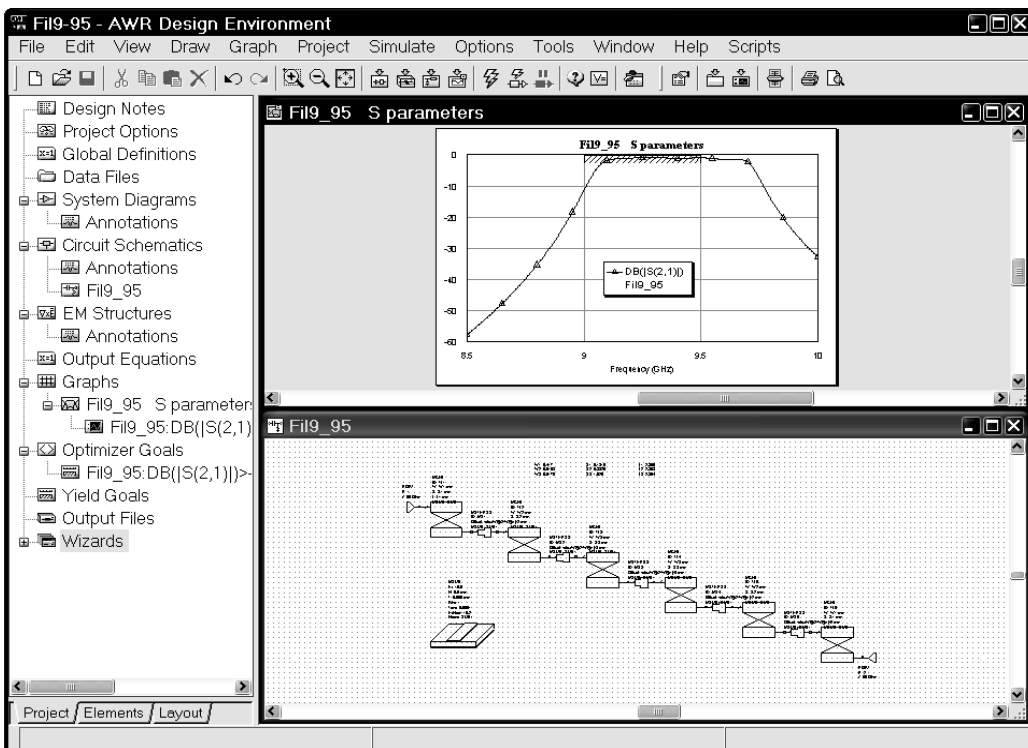


Рис. 4.30

Отметьте **Forward Transfer (S21)** и снимите отметки у всех остальных единиц измерения.

Щёлкните мышкой по кнопке **Append to MWO** в правом нижнем углу окна. На рис. 4.30 показаны переданная схема и рассчитанная в Microwave Office характеристика.

Опреде-

лим частоты проекта. Дважды щёлкните мышкой по

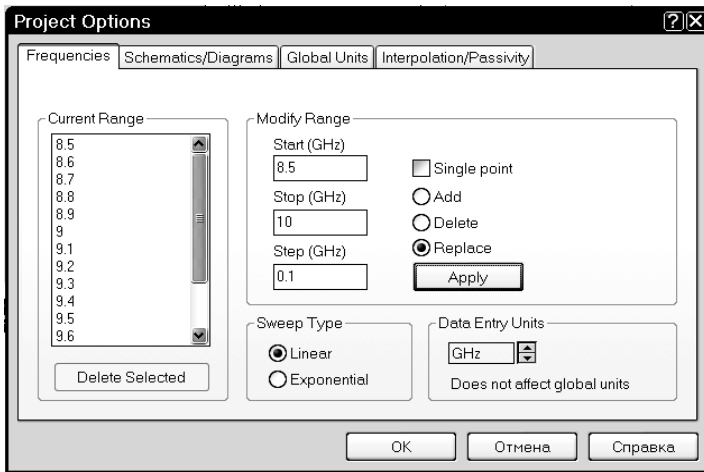


Рис. 4.31

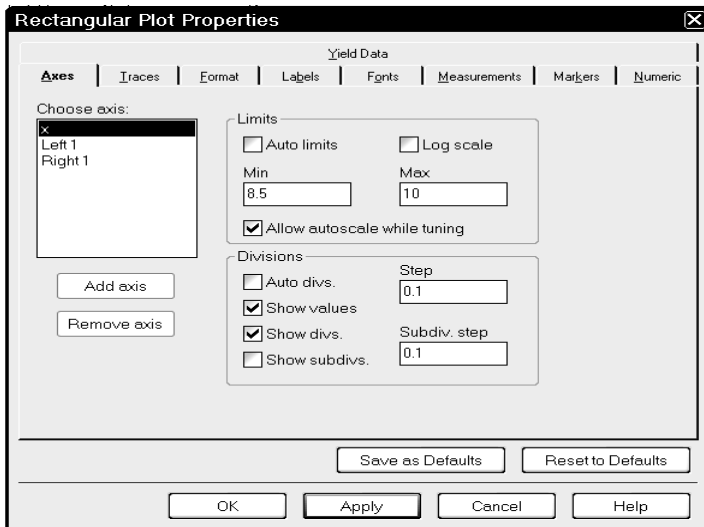


Рис. 4.32

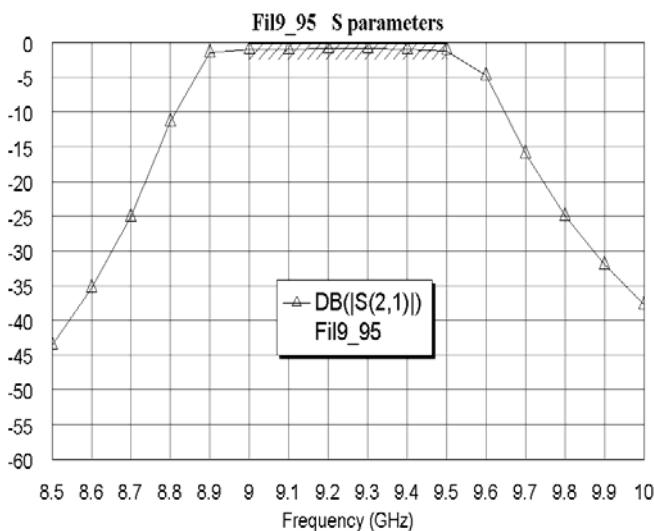


Рис. 4.33

W1=0.4 S1=0.15 L1=2.85  
W2=0.55 S2=0.75 L2=2.85  
W3=0.55 S3=0.95 L3=2.85

Рис. 4.35

Сделайте активным окно схемы и округлите значения переменных до пяти сотых, как показано на рис. 4.35, дважды щёлкая левой кнопкой мышки по переменным.

Сделайте активным окно графика и щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов, чтобы убедиться, что характеристика почти не изменилась.

**Project Options** в левом окне проекта. В открывшемся окне опций рис. 4.31 на вкладке **Frequencies** в поле **Start (GHz)** введите **8.5**, в поле **Stop (GHz)** введите **10**, в поле **Step (GHz)** введите **0.1**, отметьте **Replace**, нажмите **Apply** и **OK**.

Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **Fil9\_95** в левом окне проекта и выберите **Options**. На вкладке **Frequencies** открывшегося окна отметьте **Use project defaults** и нажмите **OK**.

Щёлкните правой кнопкой мышки по имени измеряемой величины **Fil9\_95:DB(|S(2,1)|)** в графике в левом окне проекта и выберите **Properties**. В поле **Data Source Name** введите **All Sources**, чтобы на одном графике можно было отобразить характеристики и схемы, и электромагнитной структуры, нажмите **OK**. Щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов.

Сделайте активным окно графика. Щёлкните по графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. На вкладке **Axes** окна свойств графика (рис. 4.32) для оси **x** снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.1**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**. В поле **Min** введите **-60**, в поле **Max** введите **0**, в поле **Step** введите **5**, нажмите **Apply** и **OK**.

Теперь выполните оптимизацию. Выберите в меню **Simulate>Optimize**. В поле **Optimization Methods** введите метод оптимизации **Pointer – Robust Optimization**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля, в поле **Maximum Iteration** введите **500**, нажмите **Start**. Полученный график показан на рис. 4.33. Значения переменных получили значения, которые показаны на рис. 4.34.

W1=0.4317 S1=0.1639 L1=2.871  
W2=0.5658 S2=0.7496 L2=2.845  
W3=0.566 S3=0.9251 L3=2.847

Рис. 4.34

Добавим 50-омные отрезки на входе и выходе фильтра. Сделайте активным окно схе-

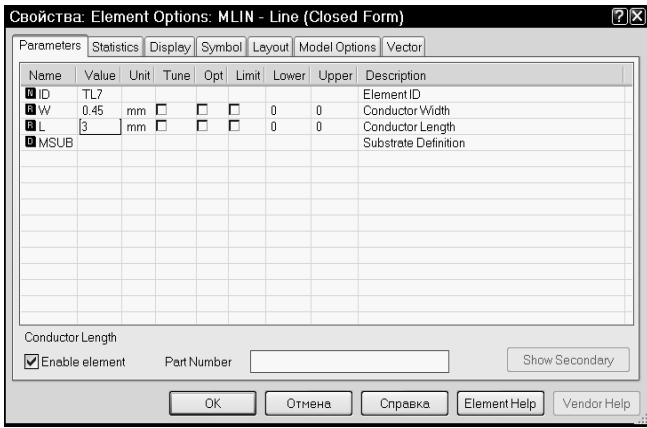


Рис. 4.36

и  $L=3$  (рис.4.36). Щёлкните мышкой по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов (элемент **MLIN** должен быть выделен) и подключите скопированный элемент к выходу схемы. Установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и подключите порт ко входу схемы. Аналогично подключите выходной порт к выходу схемы. Схема должна иметь вид, показанный на рис. 4.37.

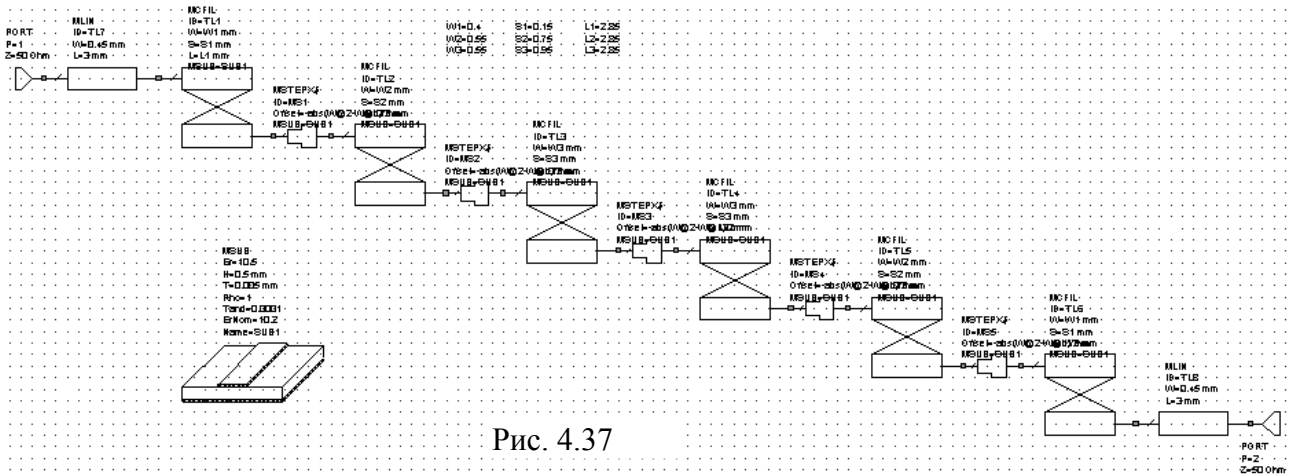


Рис. 4.37

Откройте окно просмотра проекта **Project** в левом окне, сделайте активным окно графика и щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов, чтобы убедиться, что характеристика схемы практически не изменилась.

Сделайте активным окно схемы и щёлкните мышкой по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов, чтобы создать топологию схемы. Выберите в меню **Edit>Select All**, чтобы выделить всю топологию. Щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов, чтобы упорядочить созданную топологию. В поле **Grid Spacing** введите **0.5**, чтобы размер сетки сделать 0.05 мм. Созданная топология показана на рис. 4.38.

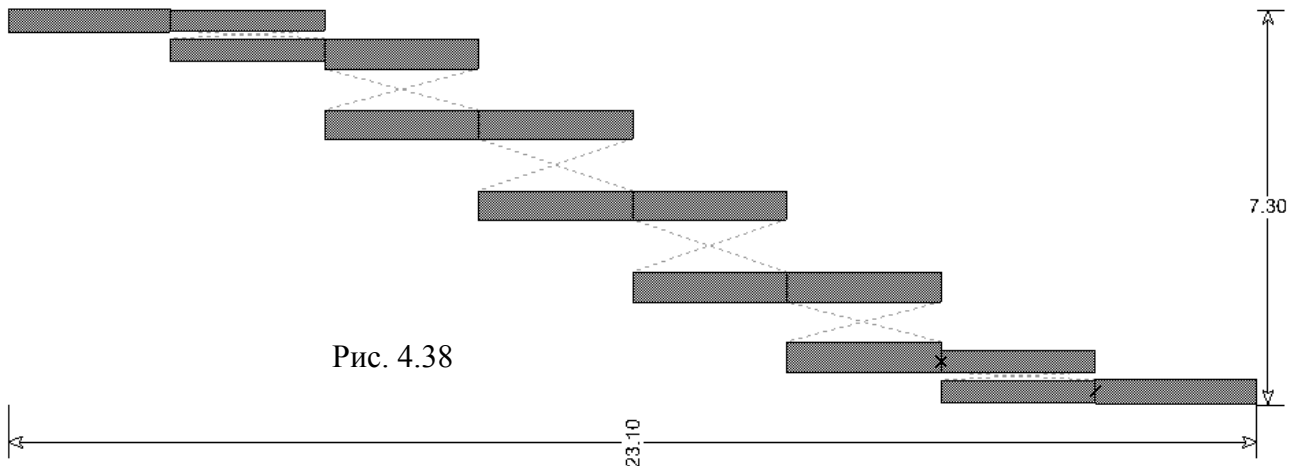


Рис. 4.38

Щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов и увеличьте отображение

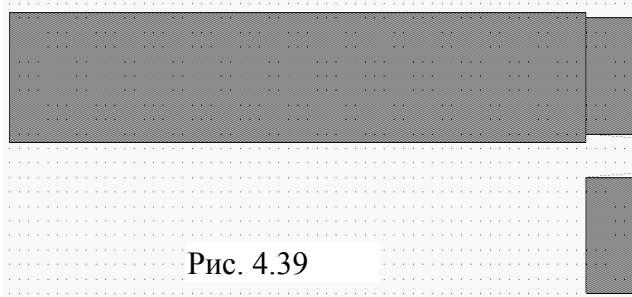


Рис. 4.39

входного проводника так, чтобы была видна сетка (рис. 4.39). Видно, что в данном случае входной проводник не совпадает с сеткой по вертикали. Установите курсор на входной проводник, нажмите левую кнопку мышки и затем клавишу **Tab**. В открывшемся окне **Enter Coordinates** в поле **dy** введите **0.025** и нажмите **OK**. Входной проводник сдвинется вверх на 0.025 мм и совпадёт с сеткой. Ана-

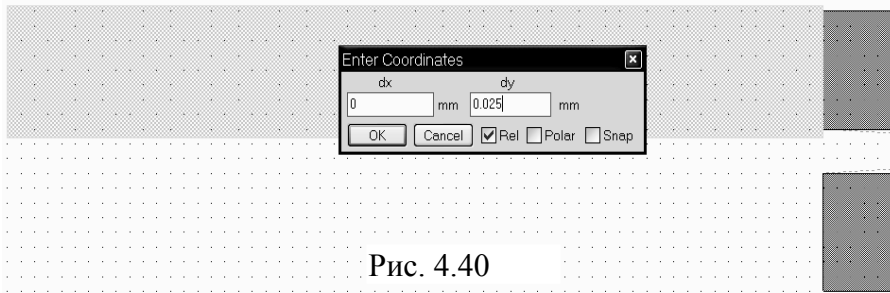


Рис. 4.40

логично сдвиньте выходной проводник вниз, введя в окне **Enter Coordinates** в поле **dy** значение **-0.025**.

Теперь создадим электромагнитную структуру.

1. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов, создайте структуру с именем **F9\_95** и отметьте **AWR EMSight Simulator**.
2. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне свойств структуры на вкладке **Enclosure** введите **X\_Dim=23.1 mm**, **Y\_Dim=9 mm**, **Grid\_X=0.05 mm** и **Grid\_Y=0.05 mm**.
3. На вкладке **Material defs** введите **Er=10.5** и **TanD=0.0001**.
4. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6 мм** и для слоя **2** – толщину **0.5 мм**.
5. На вкладке **Materials** отметьте **1/2oz Cu**. Нажмите **OK**.
6. Сделайте активным окно топологии схемы и выделите всю топологию. Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
7. Сделайте активным окно электромагнитной структуры и щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов. Вставьте скопированную топологию в корпус так, чтобы левый и правый края входного и выходного проводников точно совпадали с левым и правым краями корпуса соответственно.
8. Выделите всю топологию, щёлкните по любому элементу топологии правой кнопкой мышки и выберите **Shape Properties**. В открывшемся окне в поле **Material** введите **1/2oz Cu**.
9. Щёлкните мышкой по входному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра. Щёлкните мышкой по порту и сдвиньте референсную плоскость на 1 мм вправо.
10. Аналогично установите порт на выходе фильтра, сдвинув его референсную плоскость на 1 мм влево. Созданная электромагнитная структура должна выглядеть, как показано на рис. 4.41.

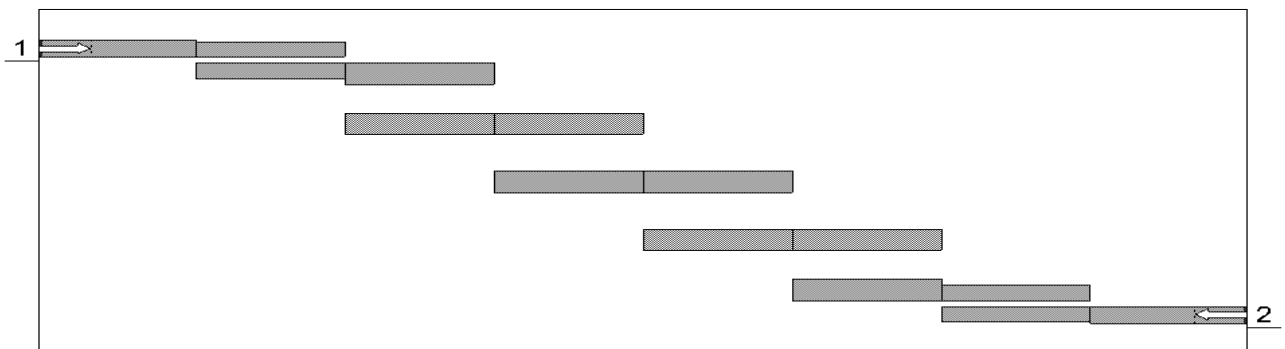


Рис. 4.41



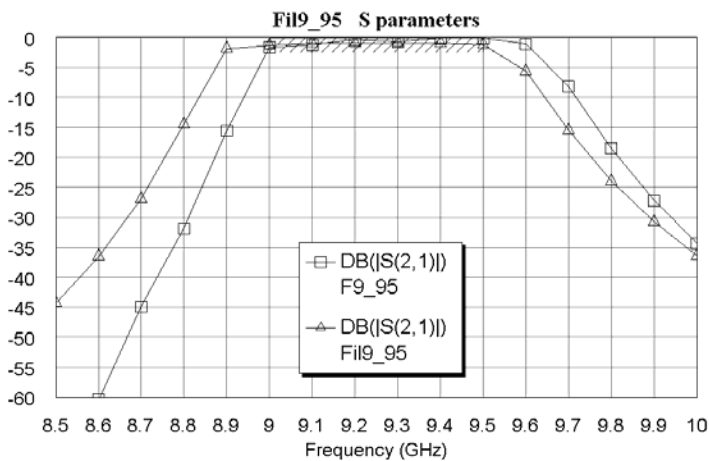


Рис. 4.42

Сделайте активным окно графика и щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученная характеристика показана на рис. 4.42. Она несколько сдвинута вверх по частоте. При необходимости можно отредактировать электромагнитную структуру, увеличив длину резонаторов. Можно также несколько сузить полосу пропускания, увеличив величину зазоров. Или оставить без изменения для обеспечения запаса по частоте для настройки и по ширине полосы пропускания с учётом технологических разбросов.

### 4.3. Фильтр с боковыми электромагнитными связями с полосой пропускания 11-14 ГГц

Загрузите Microwave Office, установите глобальные единицы измерения для частоты **GHz** и отметьте метрическую систему единиц **Metric units**. Загрузите **Nuhertz Filter Wizard**, чтобы открыть окно **Filter Synthesis**.

На вкладке **Topology**:

1. В поле **Implementation** (Реализация) введите **Microstrip**.
2. В поле **Shape** (Вид) введите **Chebyshev I**.
3. В поле **Type** введите **Band Pass**.

На вкладке **Settings**:

1. В поле **Order** (Порядок) введите **5**.
2. В поле **Pass Band Def** (Определение полосы пропускания) введите **Corner Freqs**.
3. В поле **Lower Corner Frequency** введите **11 GHz**.
4. В поле **Upper Corner Frequency** введите **14 GHz**.
5. Отметьте **Standard Pass Band Attenuation**.
6. В поле **Pass Band Ripple (dB)** введите величину пульсаций в полосе пропускания **0.05**.
7. В поле **Conductor Thickness** (Толщина проводника) введите **0.005 mm**.
8. В поле **Dielectric Height** (Толщина диэлектрика) введите **0.5**.
9. В поле **Dielectric Loss Tangent** введите тангенс диэлектрических потерь **0.0001**.

На вкладке **Defaults**:

1. В полях **Source Resistance** (Сопротивление источника) и **Load Resistance** (Сопротивление нагрузки) введите **50 Ohm**.
2. В поле **Dielectric Constant (Er)** введите диэлектрическую проницаемость **10.63**.
3. В поле **Frequency Where Aliasing Begins** введите **18 GHz**.
4. Отметьте **Coupled Resonator Filter** и в поле **Coupled Res Filter Type** введите **Parallel Coupled Open Resonators**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля.
5. Отметьте **Coupled Resonator Internal Impedance** и в поле **Center Resonator Impedance** введите **50 Ohm**.
6. Значения остальных полей оставьте по умолчанию.

На вкладке **Schematic**:

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil11**.
2. В области **Schematic Generation** отметьте **Append**.
3. Отметьте **Include Optimization Goals** (Включить цели оптимизации).
4. Отметьте **Generate Graphs** (Создать графики).
5. В области **Graphs To Generate** отметьте **Rectangular** (Прямоугольный) и снимите отметки для всех остальных типов графиков.
6. В области **Measurement for Rectangular** отметьте **Forward Transfer dB(S21)**.

7. В области **Graph Limits** отметьте **Sent To MWO**, в поле **Min Freq** введите **10 GHz**, в поле **Max Freq** введите **15 GHz**.

После ввода всех данных выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется основное окно панели управления **Nuhertz Filter** (рис. 4.43), в котором определены все ранее сделанные установки. В строке меню этого окна выберите **File>Save As** и сохраните синтезируемый фильтр в файле **Fill1**.

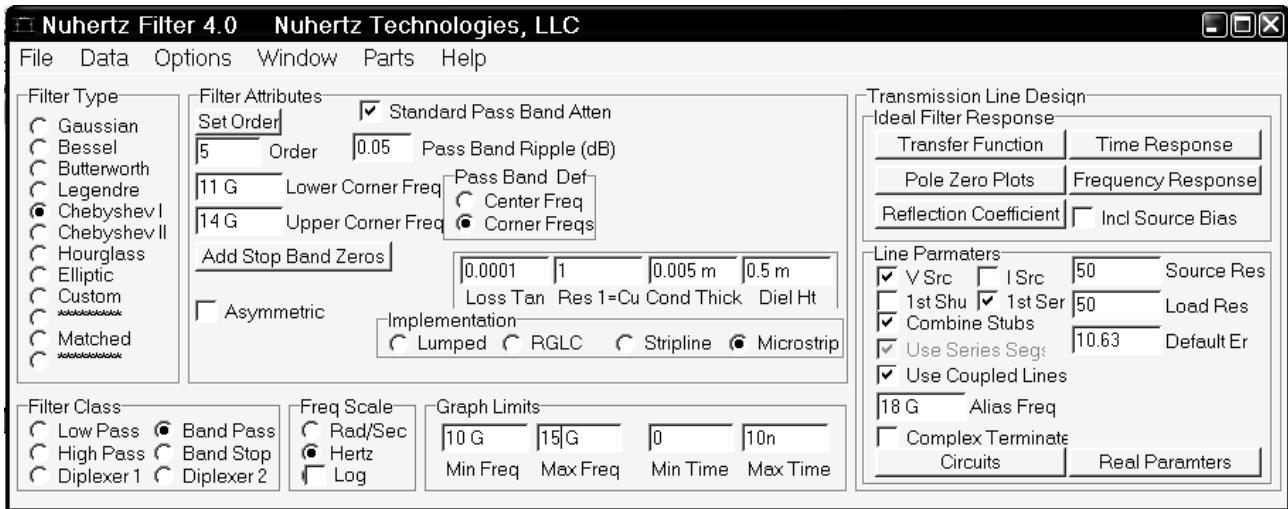


Рис. 4.43

Щёлкните мышкой по кнопке **Circuits** в нижнем правом углу открывшегося окна панели управления.

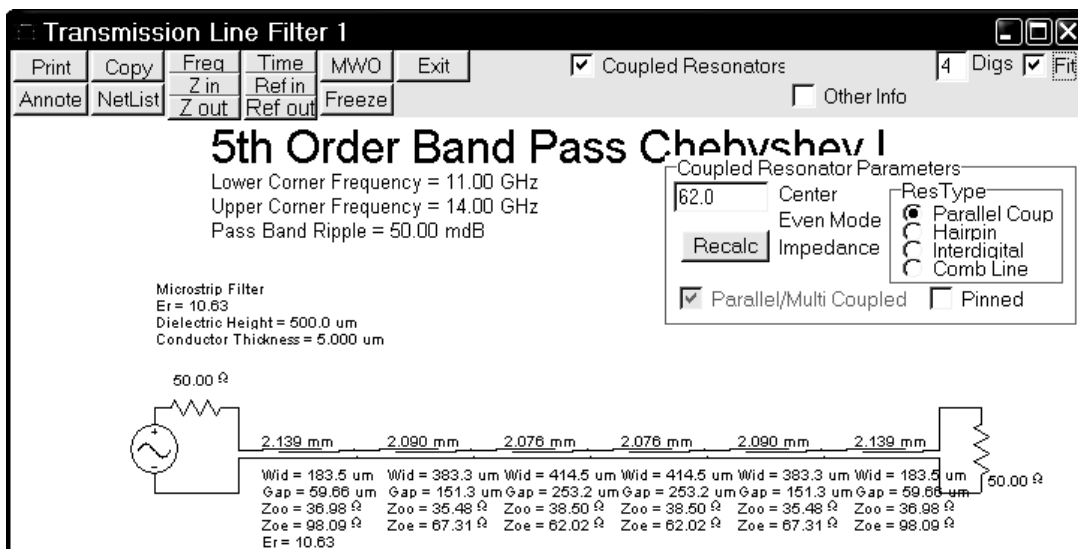


Рис. 4.44

Синтезированная схема фильтра показана на рис. 4.44. Ширина зазора в крайних связанных отрезках линий получилась равной 0.05966 мм.

Чтобы избежать такого зазора, отметьте в окне синтезированной схемы **Pinned**.

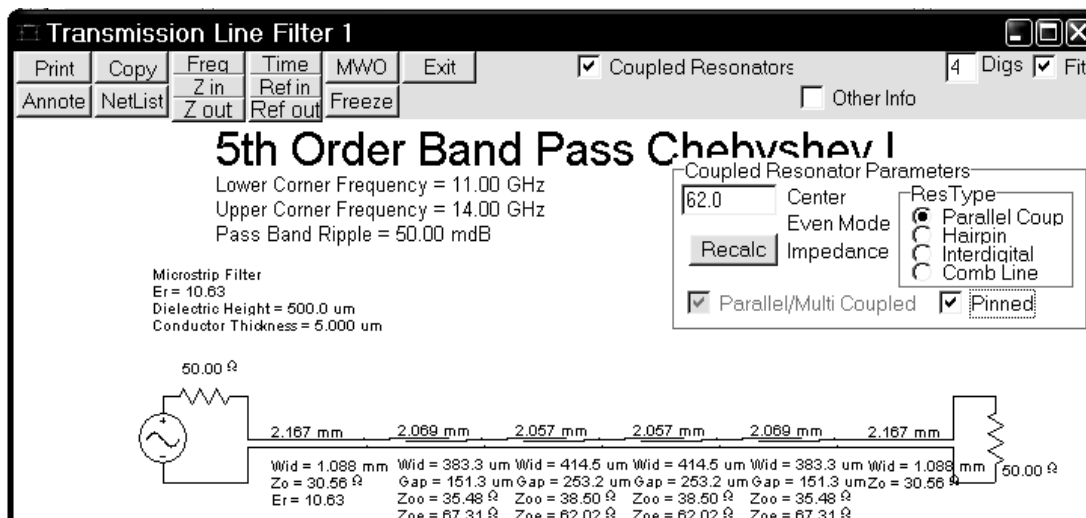


Рис. 4.45

Схема будет преобразована к виду, показанному на рис. 4.45.

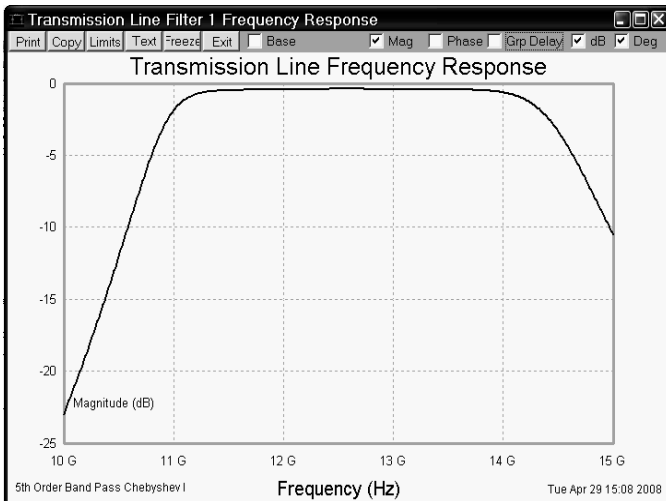


Рис. 4.46

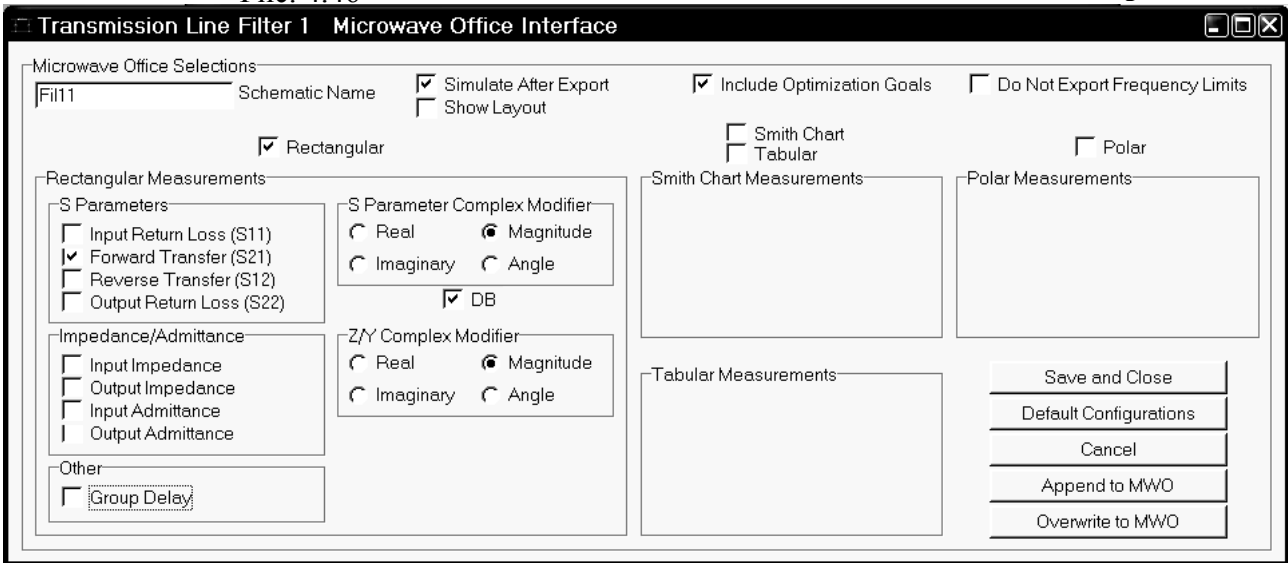


Рис. 4.47

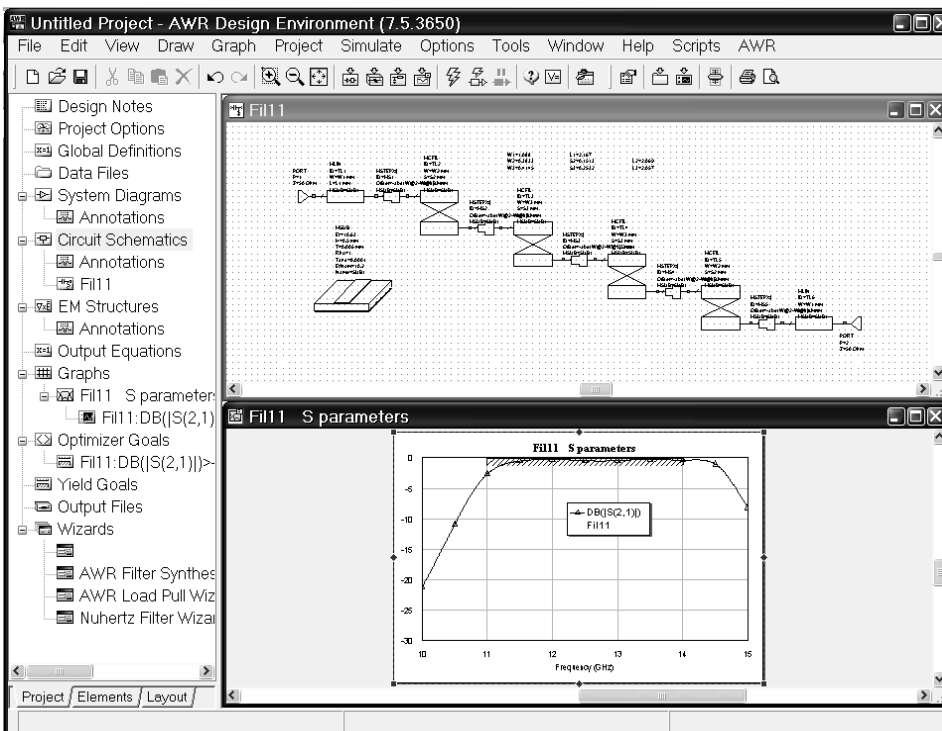


Рис. 4.48

Щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в верхнем правом углу окна схемы. Рассчитанная Nuhertz Filter характеристика показана на рис. 4.46.

Чтобы передать синтезированную схему фильтра в Microwave Office, щёлкните мышкой по кнопке **MWO** в левом верхнем углу окна схемы рис. 4.45. Откроется окно установки опций для передачи схемы в Microwave Office рис. 4.47.

В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil11**.

Отметьте **Simulate After Export**, чтобы сразу после передачи был выполнен анализ схемы, и **Include Optimization**

**Goals**, чтобы добавить цели оптимизации.

Отметьте тип графика **Rectangular** и уберите отметки во всех остальных типах графиков.

Отметьте **Forward Transfer (S21)** и снимите отметки у всех остальных единиц измерения.

Щёлкните мышкой по кнопке **Append to MWO** в правом нижнем углу окна. На рис. 4.48 показаны переданная схема и рассчитанная в Microwave Office

характеристика.

Определим частоты проекта. Дважды щёлкните мышкой по **Project Options** в левом окне проекта. В открывшемся окне опций на вкладке **Frequencies** в поле **Start (GHz)** введите **10**, в поле **Stop (GHz)** введите **15**, в поле **Step (GHz)** введите **0.2**, отметьте **Replace**, нажмите **Apply** и **OK**.

Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **Fil11** в левом окне проекта и выберите **Options**. На вкладке **Frequencies** открывшегося окна отметьте **Use project defaults** и нажмите **OK**.

Щёлкните правой кнопкой мышки по имени измеряемой величины **Fil11:DB(|S(2,1)|)** в графике в левом окне проекта и выберите **Properties**. В поле **Data Source Name** введите **All Sources**, чтобы на одном графике можно было отобразить характеристики и схемы, и электромагнитной структуры, нажмите **OK**. Щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов.

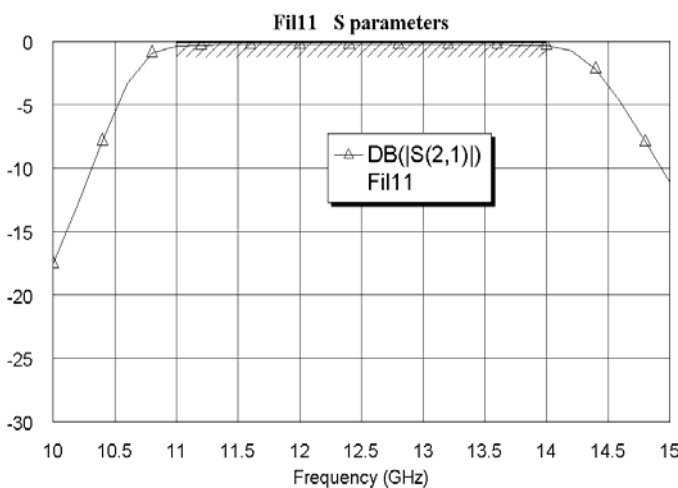


Рис. 4.49

W1=1.078	S2=0.1663	L1=1.95
W2=0.3808	S3=0.2278	L2=2.119
W3=0.4193		L3=2.106

Рис. 4.50

W1=1.05	S2=0.15	L1=1.95
W2=0.4	S3=0.2	L2=2.1
W3=0.4		L3=2.1

Рис. 4.51

убедиться, что характеристика почти не изменилась.

Добавим 50-омные отрезки на входе и выходе фильтра. Сделайте активным окно схемы. Установите курсор на входной порт, нажмите клавишу **Ctrl** и левую кнопку мышки. Переместите входной порт на свободное место в окне схемы, прервав связь порта со схемой. Аналогично сместите выходной порт. Откройте окно просмотра элементов в левом окне проекта и раскройте группу **Microstrip**. Щёлкните мышкой по подгруппе **Lines**, перетащите элемент **MLIN** в окно схемы и соедините его со входом схемы. Дважды щёлкните по добавленному элементу **MLIN**. В открывшемся окне свойств элемента введите значения **W=0.45** и

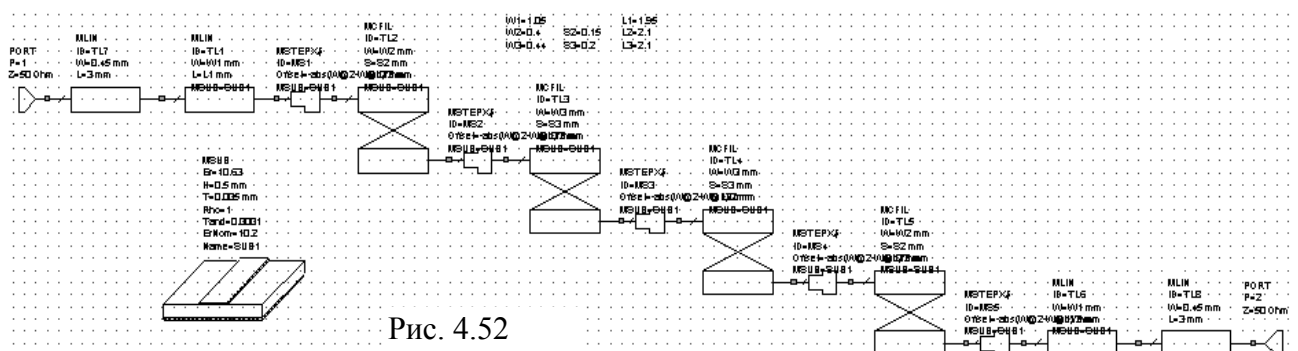


Рис. 4.52

Сделайте активным окно графика. Щёлкните по графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. На вкладке **Axes** окна свойств графика для оси x снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.5**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**. В поле **Min** введите **-30**, в поле **Max** введите **0**, в поле **Step** введите **5**, нажмите **Apply** и **OK**.

Теперь выполните оптимизацию. Выберите в меню **Simulate>Optimize**. В поле **Optimization Methods** введите метод оптимизации **Pointer – Robust Optimization**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля, в поле **Maximum Iteration** введите **500**, нажмите **Start**. Полученный график показан на рис. 4.49. Значения переменных получили значения, которые показаны на рис. 4.50.

Сделайте активным окно схемы и округлите значения переменных до пяти сотых, как показано на рис. 4.51, дважды щёлкая левой мышкой по переменным.

Сделайте активным окно графика и щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов, чтобы

**L=3.** Щёлкните мышкой по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов (элемент **MLIN** должен быть выделен) и подключите скопированный элемент к выходу схемы. Установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и подключите порт ко входу схемы. Аналогично подключите выходной порт к выходу схемы. Схема должна иметь вид, показанный на рис. 4.52.

Откройте окно просмотра проекта **Project** в левом окне, сделайте активным окно графика и щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов, чтобы убедиться, что характеристика схемы практически не изменилась.

Сделайте активным окно схемы и щёлкните мышкой по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов, чтобы создать топологию схемы. Выберите в меню **Edit>Select All**, чтобы выделить всю топологию. Щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов, чтобы упорядочить созданную топологию. В поле **Grid Spacing** введите

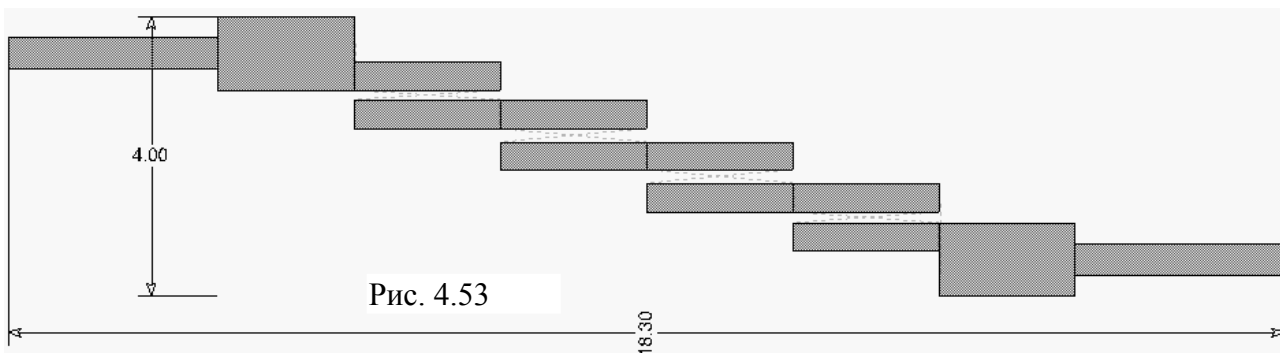


Рис. 4.53

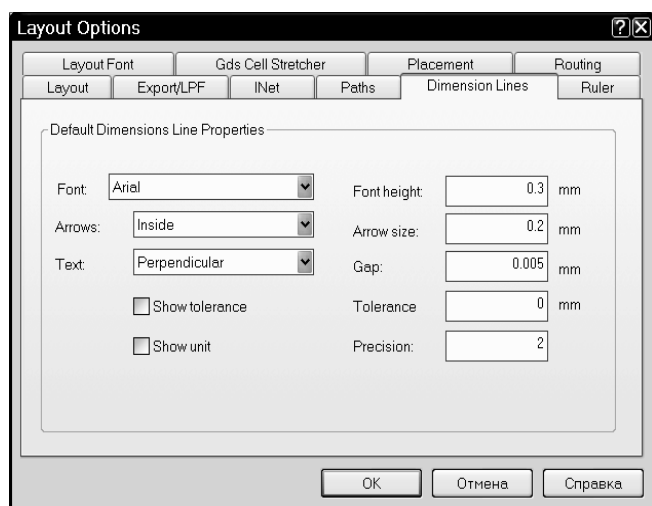


Рис. 4.54

**0.5**, чтобы размер сетки сделать 0.05 мм. Созданная топология показана на рис. 4.53.

Выберите в меню **Options>Layout Options**. В открывшемся окне опций топологии рис. 4.54 на вкладке **Dimension Lines** в поле **Font height** введите **0.3**, в поле **Arrow size** введите **0.2** и в поле **Precision** введите **2**, нажмите **OK**.

Щёлкая по значку **Dimension Line** на панели инструментов, измерьте размеры созданной топологии, как показано на рис. 4.53. Используя **View Area**, убедитесь, что расположение элементов топологии совпадает с сеткой. В противном случае отредактируйте расположение топологии.

Теперь создадим электромагнитную структуру.

1. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов, создайте структуру с именем **F11** и отметьте **AWR EMSight Simulator**.
2. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне свойств структуры на вкладке **Enclosure** введите **X\_Dim=18.3 mm**, **Y\_Dim=6 mm**, **Grid\_X=0.05 mm** и **Grid\_Y=0.05 mm**.
3. На вкладке **Material defs** введите **Er=10.63** и **TanD=0.0001**.
4. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6 мм** и для слоя **2** – толщину **0.5 мм**.
5. На вкладке **Materials** отметьте **1/2oz Cu**. Нажмите **OK**.
6. Сделайте активным окно топологии схемы и выделите всю топологию. Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
7. Сделайте активным окно электромагнитной структуры и щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов. Вставьте скопированную топологию в корпус так, чтобы левый и правый края входного и выходного проводников точно совпадали с левым и правым краями корпуса соответственно.

8. Выделите всю топологию, щёлкните по любому элементу топологии правой кнопкой мышки и выберите **Shape Properties**. В открывшемся окне в поле **Material** введите **1/2oz Cu**.
9. Щёлкните мышкой по входному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра. Щёлкните мышкой по порту и сдвиньте его референсную плоскость на 1 мм вправо.
10. Аналогично установите порт на выходе фильтра, сдвинув его референсную плоскость на 1 мм влево. Созданная электромагнитная структура должна выглядеть, как показано на рис. 4.55.

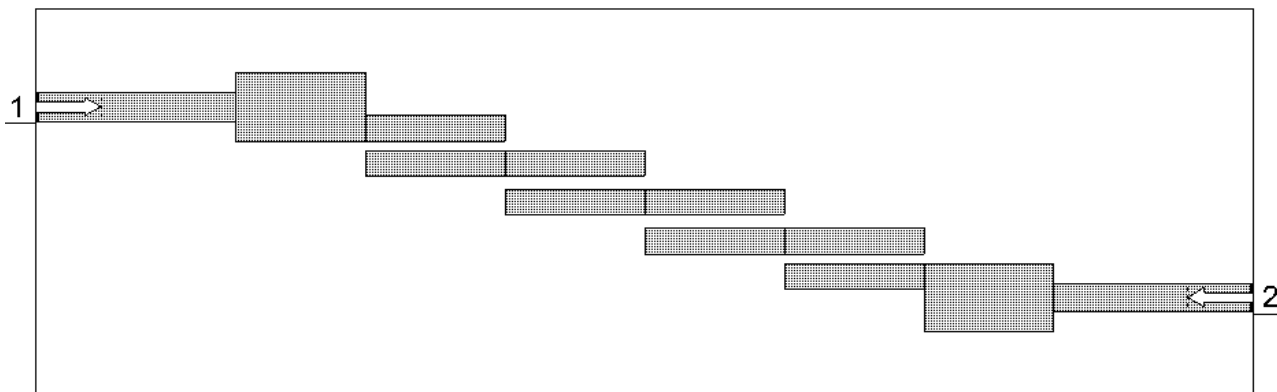


Рис. 4.55

Сделайте активным окно графика и щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученная характеристика показана на рис. 4.56. Сделайте активным окно электромагнитной структуры и отредактируйте топологию, увеличив длину всех отрезков линий на 0.05 мм. Снова выполните анализ. Характеристика отредактированной структуры показана на рис. 4.57.

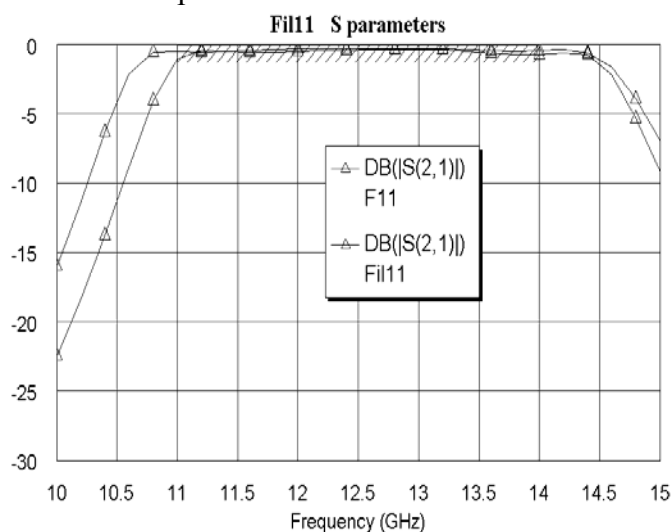


Рис. 4.56

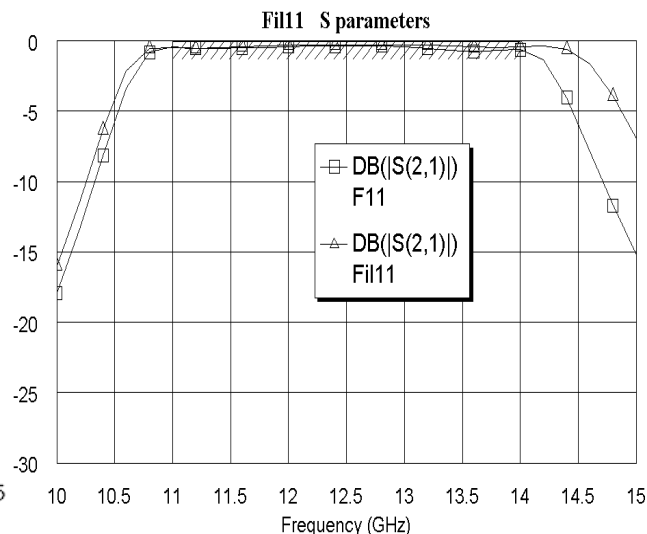


Рис. 4.57

#### 4.4. Встречноштыревой фильтр с полосой пропускания 3-3.6 ГГц

Загрузите Microwave Office, установите глобальные единицы измерения для частоты **GHz** и отметьте метрическую систему единиц **Metric units**. Загрузите **Nuhertz Filter Wizard**, чтобы открыть окно **Filter Synthesis**.

На вкладке **Topology**:

1. В поле **Implementation** (Реализация) введите **Microstrip**.
2. В поле **Shape** (Вид) введите **Chebyshev I**.
3. В поле **Type** введите **Band Pass**.

На вкладке **Settings**:

1. В поле **Order** (Порядок) введите **5**.
2. В поле **Pass Band Def** (Определение полосы пропускания) введите **Corner Freqs**.

3. В поле **Lower Corner Frequency** введите **3 GHz**.
4. В поле **Upper Corner Frequency** введите **3.6 GHz**.
5. Отметьте **Standard Pass Band Attenuation**.
6. В поле **Pass Band Ripple (dB)** введите величину пульсаций в полосе пропускания **0.05**.
7. В поле **Conductor Thickness** (Толщина проводника) введите **0.005 mm**.
8. В поле **Dielectric Height** (Толщина диэлектрика) введите **1**.
9. В поле **Dielectric Loss Tangent** введите тангенс диэлектрических потерь **0.0001**.

На вкладке Defaults:

1. В полях **Source Resistance** (Сопrotивление источника) и **Load Resistance** (Сопrotивление нагрузки) введите **50 Ohm**.
2. В поле **Dielectric Constant (Er)** введите диэлектрическую проницаемость **10.28**.
3. В поле **Frequency Where Aliasing Begins** введите **18 GHz**.
4. Отметьте **Coupled Resonator Filter** и в поле **Coupled Res Filter Type** введите **Interdigital Tapped**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля.
5. Отметьте **Coupled Resonator Internal Impedance** и в поле **Center Resonator Impedance** введите **50 Ohm**.
6. Значения остальных полей оставьте по умолчанию.

На вкладке Schematic:

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil3**.
2. В области **Schematic Generation** отметьте **Append**.
3. Отметьте **Include Optimization Goals** (Включить цели оптимизации).
4. Отметьте **Generate Graphs** (Создать графики).
5. В области **Graphs To Generate** отметьте **Rectangular** и снимите отметки для всех остальных типов графиков.
6. В области **Measurement for Rectangular** отметьте **Forward Transfer dB(S21)**.
7. В области **Graph Limits** отметьте **Sent To MWO**, в поле **Min Freq** введите **2 GHz**, в поле **Max Freq** введите **5 GHz**.

После ввода всех данных выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется основное окно панели управления **Nuhertz Filter** (рис. 4.58), в котором определены все ранее сделанные установки. В строке меню этого окна выберите **File>Save As** и сохраните синтезируемый фильтр в файле **Fil3**.

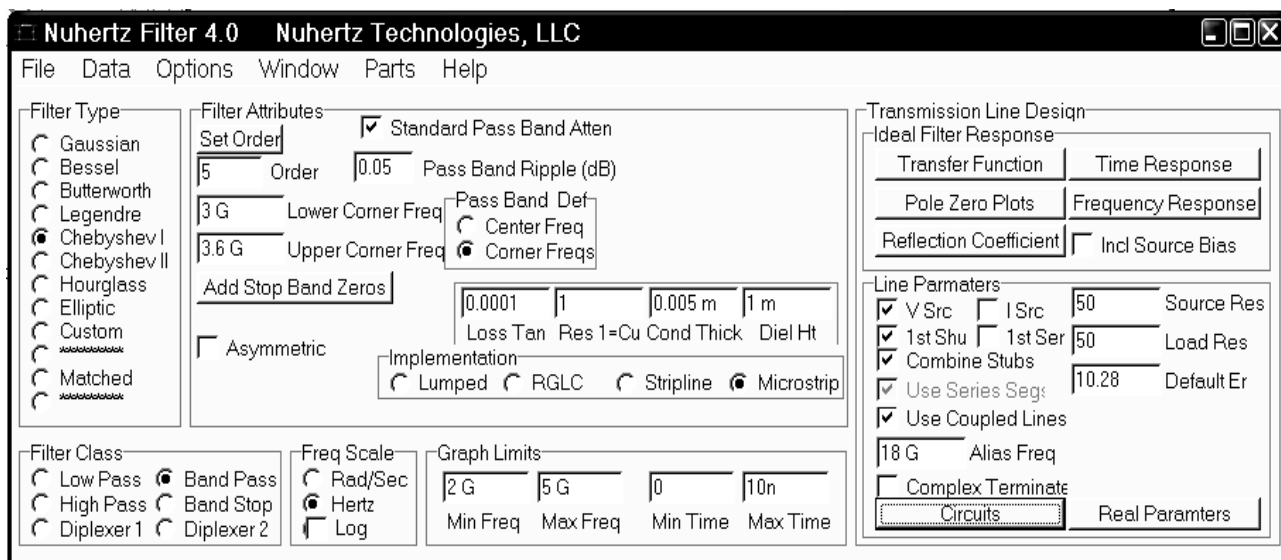


Рис. 4.58

В правом нижнем углу окна панели управления снимите отметку **1 st Ser**, отметьте **1 st Shu** и **Use Coupled Lines**. Затем щёлкните мышкой по кнопке **Circuits**. В открывшемся окне схемы отметьте **Interdigital** и **Tapped**. Синтезированная схема показана на рис. 4.59.

Щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в верхнем правом углу окна схемы. Рассчитанная Nuhertz Filter характеристика показана на рис. 4.60.

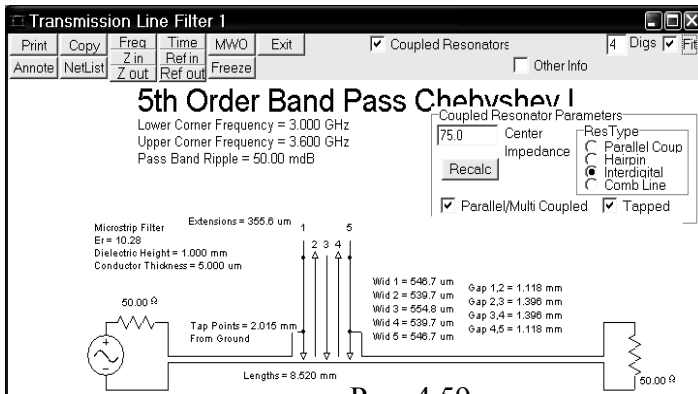


Рис. 4.59

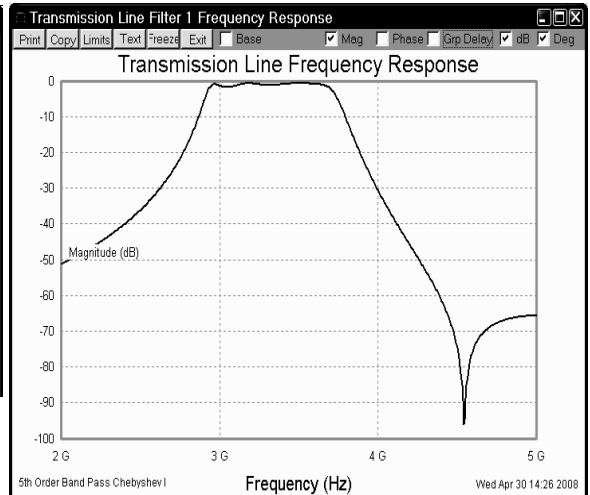


Рис. 4.60

Чтобы передать синтезированную схему фильтра в Microwave Office, щёлкните мышкой по кнопке **MWO** в левом верхнем углу окна схемы рис.

4.59. Откроется окно установки опций для передачи схемы в Microwave Office рис. 4.61.

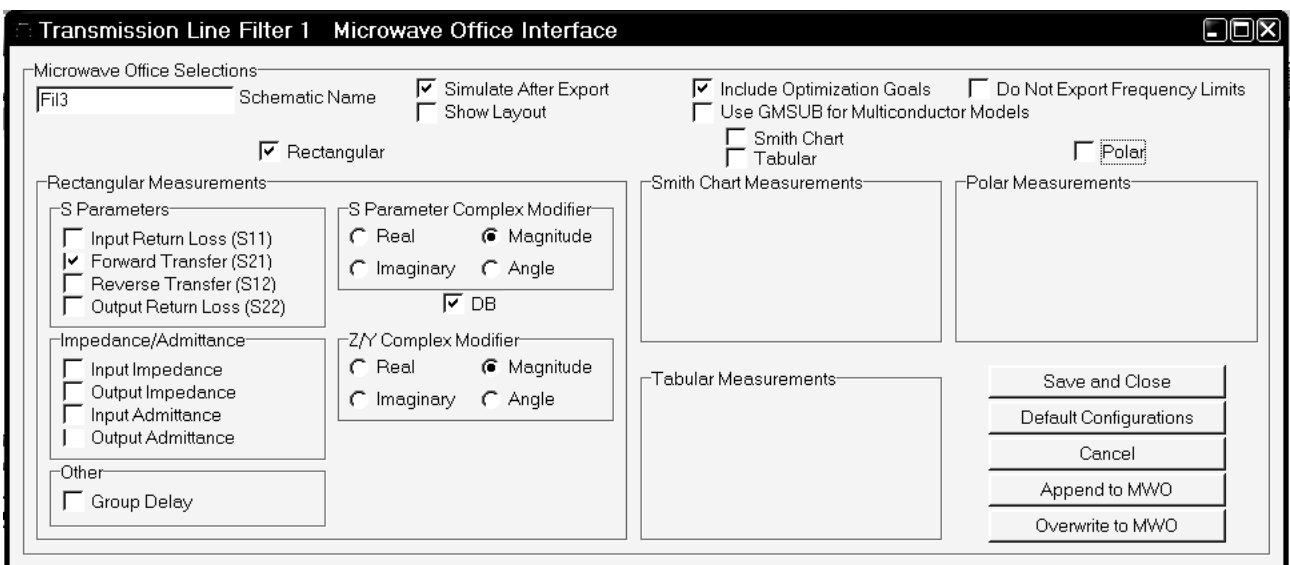


Рис. 4.61

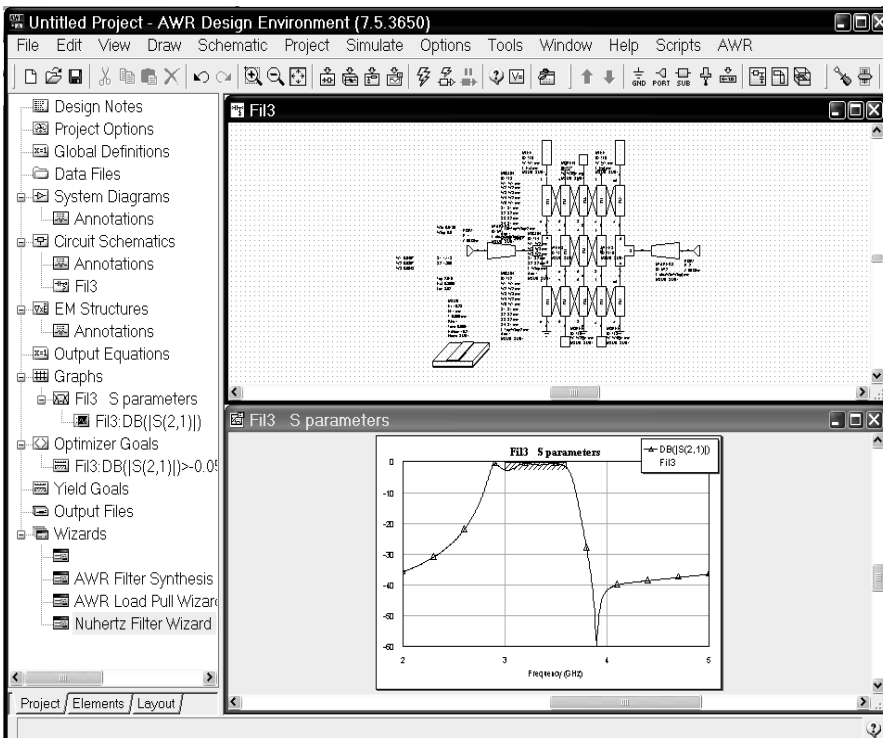


Рис. 4.62

В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil3**.

Отметьте **Simulate After Export**, чтобы сразу после передачи был выполнен анализ схемы, и **Include Optimization Goals**, чтобы добавить цели оптимизации.

Отметьте тип графика **Rectangular** и уберите отметки во всех остальных типах графиков.

Отметьте **Forward Transfer (S21)** и снимите отметки у всех остальных единиц измерения.

Щёлкните мышкой по кнопке **Append to MWO** в правом нижнем



углу окна. На рис. 4.62 показаны переданная схема и рассчитанная в Microwave Office характеристика.

Добавьте 50-омные отрезки на входе и выходе схемы. Сделайте активным окно схемы. Установите курсор на входной порт, нажмите клавишу **Ctrl** и левую кнопку мышки. Переместите входной порт на свободное место в окне схемы, прервав связь порта со схемой. Аналогично сместите выходной порт. Откройте окно просмотра элементов в левом окне проекта и раскройте группу **Microstrip**. Щёлкните мышкой по подгруппе **Lines**, перетащите элемент **MLIN** в окно схемы и соедините его со входом схемы. Дважды щёлкните по добавленному элементу **MLIN**. В открывшемся окне свойств элемента введите значения **W=0.9** и **L=3**. Щёлкните мышкой по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов (элемент **MLIN** должен быть выделен) и подключите скопированный элемент к выходу схемы. Установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и подключите порт ко входу схемы. Аналогично подключите выходной порт к выходу схемы.

Щёлкните мышкой по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов, чтобы создать топологию схемы. Выберите в меню **Edit>Select All**, чтобы выделить всю топологию. Щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов, чтобы упорядочить созданную топологию. В поле **Grid Spacing** введите **0.5**, чтобы размер сетки сделать 0.05 мм.

Выберите в меню **Simulate>Optimize**, чтобы выполнить оптимизацию схемы. В открывшемся окне **Optimizer** в поле **Optimization Methods** введите **Pointer – Robust Optimization**, в поле **Maximum Iteration** введите **5000**. Выберите в меню **Window>Tile Horizontal**, чтобы наблюдать, как изменяются график, схема и топология в процессе оптимизации (рис. 4.63). Щёлкните мышкой по кнопке **Start** в окне **Optimizer**.

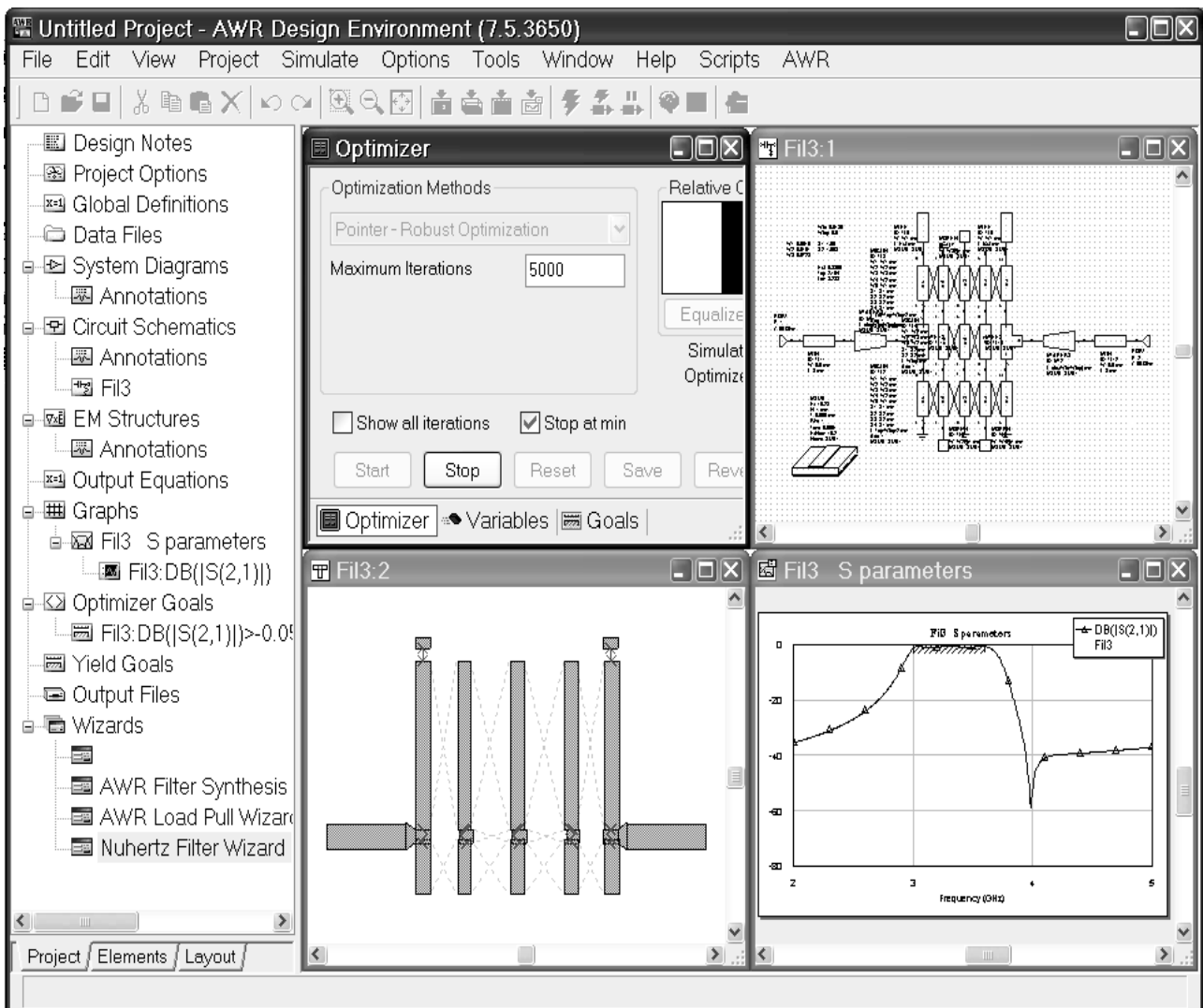


Рис. 4.63

Полученная после оптимизации характеристика показана на рис. 4.64. Неравномерность в полосе пропускания можно уменьшить, используя блок настройки. Для этого сделайте активным окно графика. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Tune** на панели инструментов и, двигая движки переменных, добейтесь более равномерной характеристики в полосе пропускания. График после ручной подстройки показан на рис. 4.65.

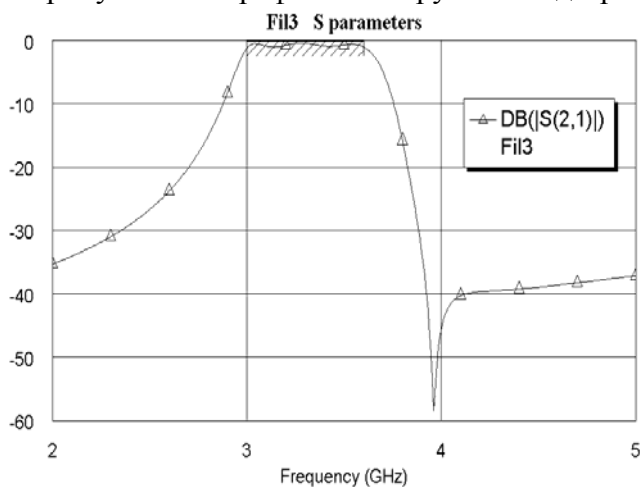


Рис. 4.64

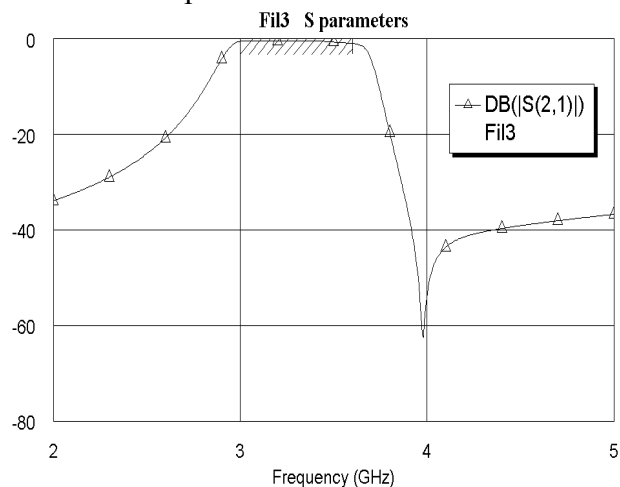


Рис. 4.65

Переменные после настройки получили значения, показанные на рис. 4.66. Сделайте активным окно схемы и круглите значения переменных до пяти сотых, как показано на рис. 4.67.

W1=0.8014    S1=1.076    Wio=0.9135    Ext=0.539  
 W2=0.5088    S2=1.492    Wtap=0.5    Tap=2.477  
 W3=0.6127    Len=8.331

Рис. 4.66

W1=0.8    S1=1.05    Wio=0.9    Ext=0.55  
 W2=0.5    S2=1.5    Wtap=0.5    Tap=2.5  
 W3=0.6    Len=8.3

Рис. 4.67

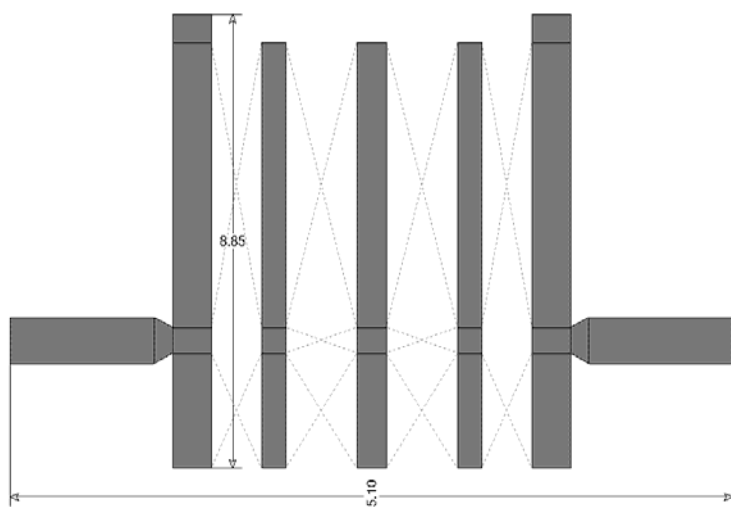


Рис. 4.68

Сделайте активным окно топологии схемы. Выделите всю топологию и щёлкните мышкой по значку **Snap Together** на панели инструментов, чтобы упорядочить топологию. Созданная топология схемы показана на рис. 4.68.

Создайте электромагнитную структуру.

1. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов, создайте структуру с именем **F3** и отметьте **AWR EM-Sight Simulator**.

2. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов.

В открывшемся окне свойств структуры на вкладке **Enclosure** введите **X\_Dim=15.1 mm**, **Y\_Dim=10 mm**, **Grid\_X=0.05 mm** и **Grid\_Y=0.05 mm**.

3. На вкладке **Material defs** введите **Er=10.28** и **TanD=0.0001**.
4. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6 мм** и для слоя **2** – толщину **1 мм**.
5. На вкладке **Materials** отметьте **1/2oz Cu**. Нажмите **OK**.
6. Сделайте активным окно топологии схемы и выделите всю топологию. Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
7. Сделайте активным окно электромагнитной структуры и щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов. Вставьте скопированную топологию в корпус так, чтобы левый и

правый края входного и выходного проводников точно совпадали с левым и правым краями корпуса соответственно.

8. Выделите всю топологию, щёлкните по любому элементу топологии правой кнопкой мышки и выберите **Shape Properties**. В открывшемся окне в поле **Material** введите **1/2oz Cu**.
9. Создайте межслойные перемычки для заземления резонаторов. Откройте окно менеджера топологии, щёлкнув мышкой по кнопке **Layout** в левой нижней части окна. Отметьте **Via**, в поле **Material** введите **1/2oz Cu**, в поле **Extent** введите **1**.

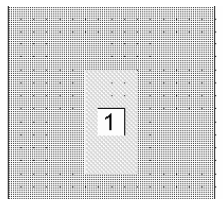


Рис. 4.69

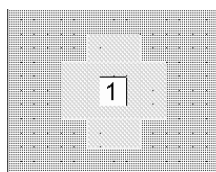


Рис. 4.70

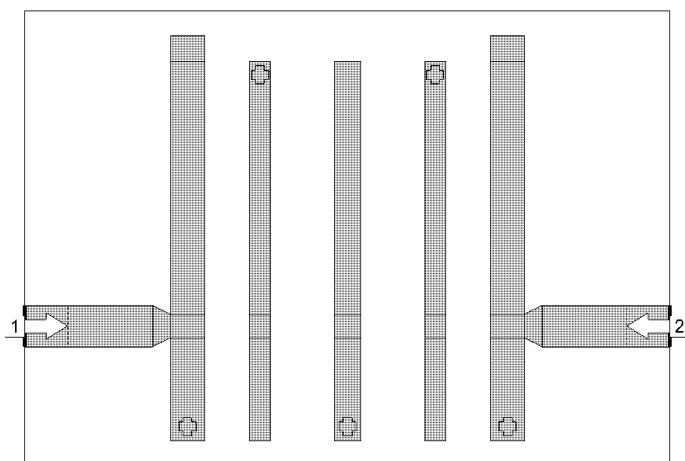


Рис. 4.71

ференсную плоскость на 1 мм влево. Созданная электромагнитная структура должна выглядеть, как показано на рис. 4.71.

16. Откройте окно просмотра проекта, щёлкнув мышкой по кнопке **Project** в левой нижней части окна.
17. Дважды щёлкните левой кнопкой мышки по **Project Options** и в открывшемся окне опций проекта на вкладке **Frequencies** в поле **Start(GHz)** введите **2**, в поле **Stop(GHz)** введите **5**, в поле **Step(GHz)** введите **0.2**. Нажмите **Apply**. Отметьте **Add** и **Single point**. В поле **Point(GHz)** введите **2.9**, нажмите **Apply**. Затем в это поле введите **3.7**, нажмите **Apply** и **OK**.
18. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **Fil3** в окне просмотра проекта и выберите **Options**. В открывшемся окне опций схемы на вкладке **Frequencies** отметьте **Use project defaults** и нажмите **OK**.
19. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени измеряемой величины **Fil3:DB(|S(2,1)|)** в окне просмотра проекта и выберите **Properties**. В открывшемся окне свойств в поле **Data Source Name** введите **All Sources**, нажмите **OK**.
20. Сделайте активным окно графика. Щёлкните по графику правой копкой мышки и выберите **Properties**. В открывшемся окне свойств графика на вкладке **Axes** для оси **x** снимите отметку в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.2**. Для оси **Left 1** снимите отметки в

10. Щёлкните мышкой по значку **Via Port** на панели инструментов. Поместите курсор в нижней части первого резонатора, нажмите левую кнопку мышки, переместите курсор на 0.2 вправо и на 0.4 вниз, отпустите кнопку. Должна образоваться прямоугольная перемычка (рис. 4.69), которая будет выделена.

11. Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированную перемычку, и поместите её, как показано на рис. 4.70.

12. Выберите в меню **Draw>Modify Shapes>Union** (Рисовать> Модифицировать формы>Объединить), чтобы объединить созданные перемычки в одну.

13. При выделенной перемычке щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов. Затем, щёлкая по значку **Paste** на панели инструментов, установите перемычки на соответствующие концы остальных резонаторов.

14. Щёлкните мышкой по входному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра. Щёлкните мышкой по порту и сдвиньте референсную плоскость на 1 мм вправо.

15. Аналогично установите порт на выходе фильтра, сдвинув его ре-

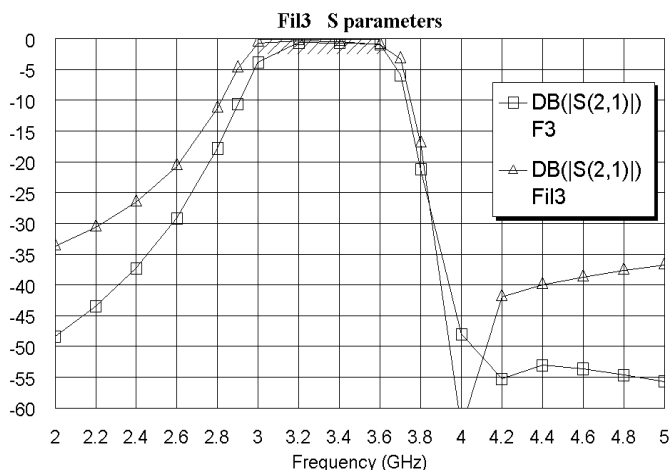


Рис. 4.72

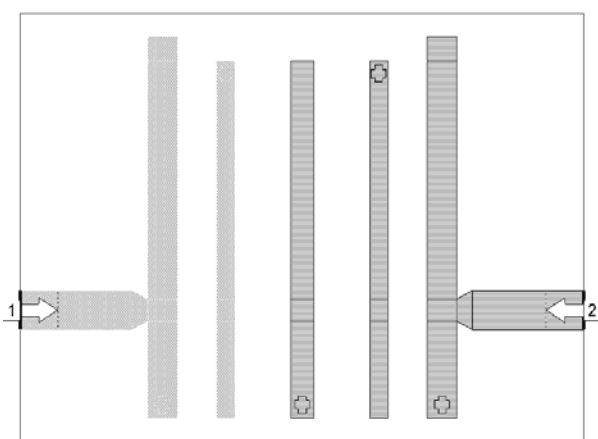


Рис. 4.73

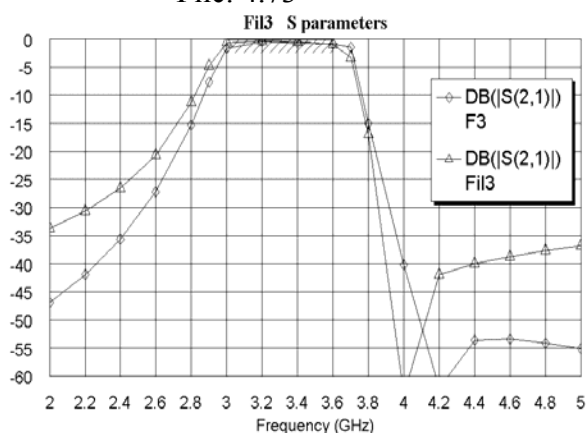


Рис. 4.74

**Auto limits** и в **Auto divs.** В поле **Min** введите **-60**, в поле **Max** введите **0** и в поле **Step** введите **5**. Нажмите **Apply** и **OK**.

21. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 4.72. Характеристика электромагнитной структуры получилась несколько уже характеристики схемы.

Чтобы расширить полосу пропускания, нужно уменьшить зазоры между вторым и третьим резонаторами, и между третьим и четвёртым резонаторами. Для этого установите курсор левее и выше электромагнитной структуры, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор правее и ниже второго резонатора, чтобы выделить входной проводник и два первых резонатора (рис. 4.73). Установите курсор на любой выделенный проводник, нажмите левую кнопку мышки и сместите выделенные проводники на 0.15 мм вправо.

Аналогично сместите выходной проводник и два последних резонатора на 0.15 мм влево.

Дважды щёлкните по входному проводнику, установите курсор на ромб посередине левого края проводника и сместите его влево на 0.15 мм до границы корпуса. Аналогично сместите правый край выходного проводника до правой границы корпуса.

Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика отредактированной электромагнитной структуры показана на рис. 4.74.

## 4.5. Шпилечный фильтр с полосой пропускания 2-2.3 ГГц

Загрузите Microwave Office, установите глобальные единицы измерения для частоты **GHz** и отметьте метрическую систему единиц **Metric units**. Загрузите **Nuhertz Filter Wizard**, чтобы открыть окно **Filter Synthesis**.

На вкладке **Topology**:

1. В поле **Implementation** (Реализация) введите **Microstrip**.
2. В поле **Shape** (Вид) введите **Chebyshev I**.
3. В поле **Type** введите **Band Pass**.

На вкладке **Settings**:

1. В поле **Order** (Порядок) введите **5**.
2. В поле **Pass Band Def** (Определение полосы пропускания) введите **Corner Freqs**.
3. В поле **Lower Corner Frequency** введите **2 GHz**.

4. В поле **Upper Corner Frequency** введите **2.3 GHz**.
5. Отметьте **Standard Pass Band Attenuation**.
6. В поле **Pass Band Ripple (dB)** введите величину пульсаций в полосе пропускания **0.05**.
7. В поле **Conductor Thickness** (Толщина проводника) введите **0.005 mm**.
8. В поле **Dielectric Height** (Толщина диэлектрика) введите **1**.
9. В поле **Dielectric Loss Tangent** введите тангенс диэлектрических потерь **0.0001**.

На вкладке **Defaults**:

1. В полях **Source Resistance** (Сопротивление источника) и **Load Resistance** (Сопротивление нагрузки) введите **50 Ohm**.
2. В поле **Dielectric Constant (Er)** введите диэлектрическую проницаемость **10.26**.
3. В поле **Frequency Where Aliasing Begins** введите **10 GHz**.
4. Отметьте **Coupled Resonator Filter** и в поле **Coupled Res Filter Type** введите **Hairpin Tapped**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля.
5. Отметьте **Coupled Resonator Internal Impedance** и в поле **Center Resonator Impedance** введите **50 Ohm**.
6. Значения остальных полей оставьте по умолчанию.

На вкладке **Schematic**:

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil2**.
2. В области **Schematic Generation** отметьте **Append**.
3. Отметьте **Include Optimization Goals** (Включить цели оптимизации).
4. Отметьте **Generate Graphs** (Создать графики).
5. В области **Graphs To Generate** отметьте **Rectangular** и снимите отметки для всех остальных типов графиков.
6. В области **Measurement for Rectangular** отметьте **Forward Transfer dB(S21)**.
7. В области **Graph Limits** отметьте **Sent To MWO**, в поле **Min Freq** введите **2 GHz**, в поле **Max Freq** введите **5 GHz**.

После ввода всех данных выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется основное окно панели управления **Nuhertz Filter** (рис. 4.75). В правом нижнем углу окна панели управления снимите отметку **1 st Ser**, отметьте **1 st Shu**, **Combine Stubs** и **Use Coupled Lines**.

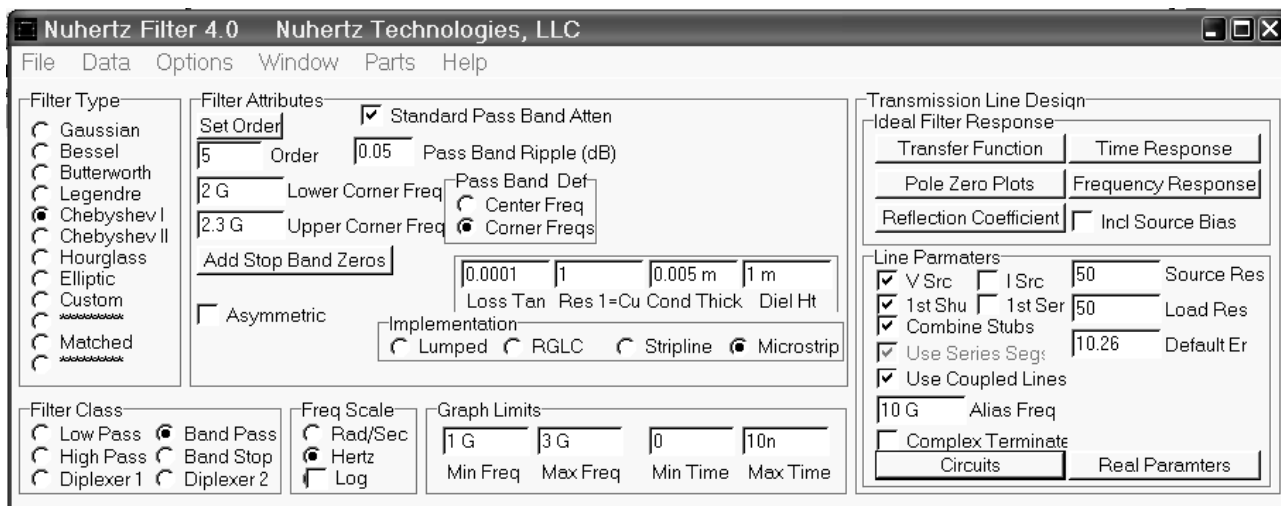


Рис. 4.75

В строке меню окна панели управления выберите **File>Save As** и сохраните синтезируемый фильтр в файле **Fil2**.

Щёлкните мышкой по кнопке **Circuits** в правом нижнем углу окна панели управления. Синтезированная схема показана на рис. 4.76. В открывшемся окне схемы отметьте **Hairpin** в правом верхнем углу и щёлкните мышкой по кнопке **Freq** в левом верхнем углу. Рассчитанная Nuhertz Filter характеристика показана на рис. 4.77.

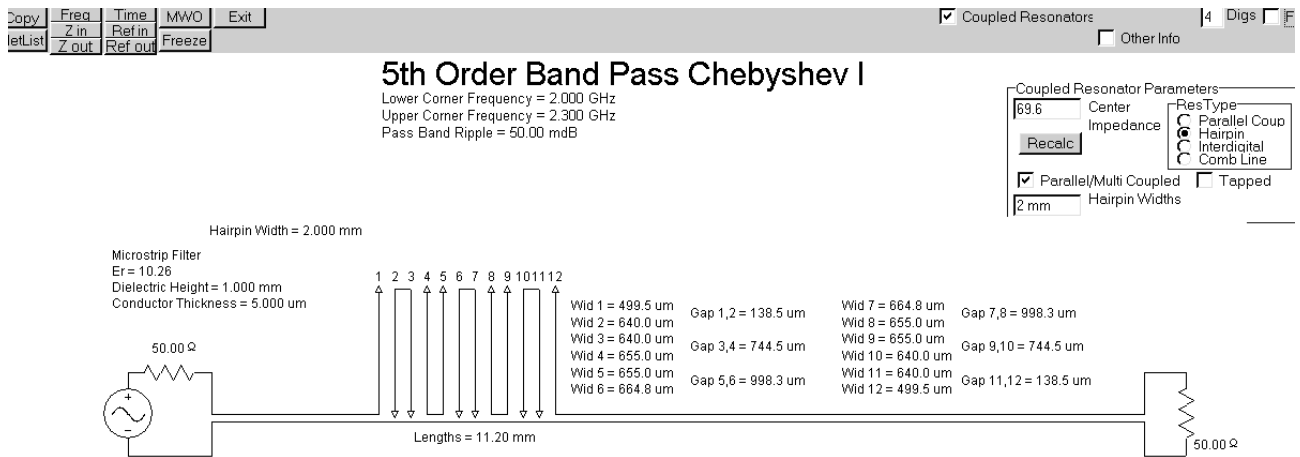


Рис. 4.76

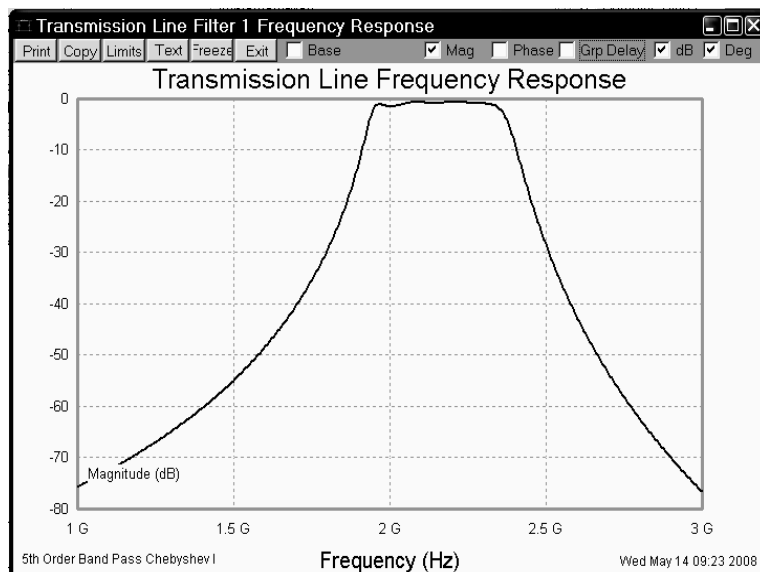


Рис. 4.77

Чтобы передать синтезированную схему фильтра в Microwave Office, щёлкните мышкой по кнопке **MWO** в левом верхнем углу окна схемы рис. 4.76. Откроется окно установки опций для передачи схемы в Microwave Office рис. 4.78. В этом окне введите следующие параметры:

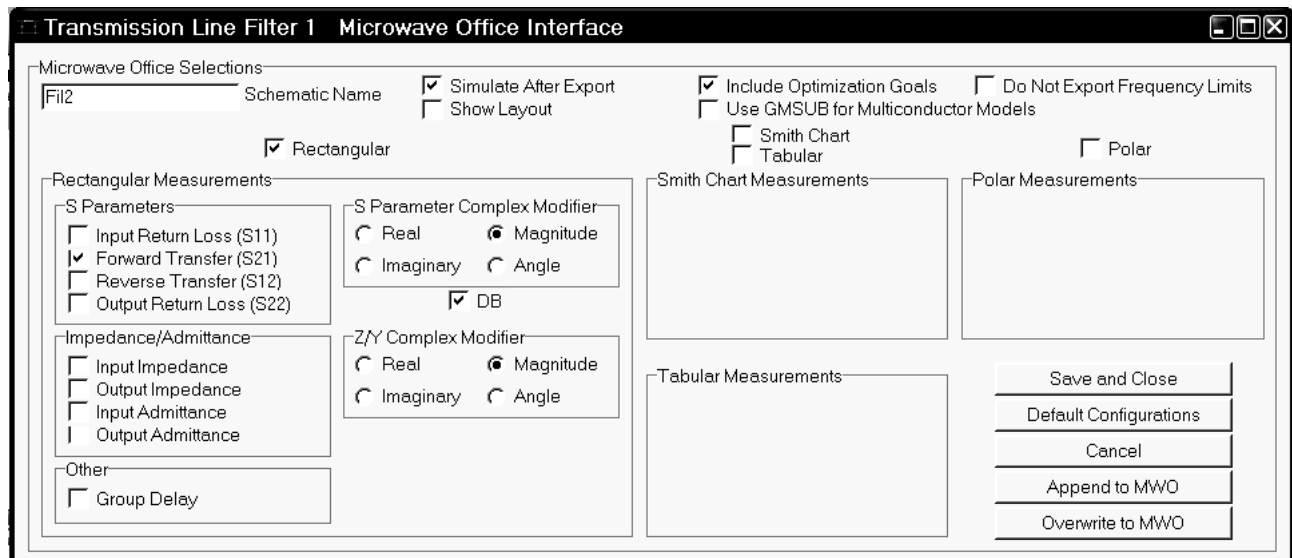


Рис. 4.78

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **Fil2**.
2. Отметьте **Simulate After Export**, чтобы сразу после передачи был выполнен анализ схемы, и **Include Optimization Goals**, чтобы добавить цели оптимизации.
3. Отметьте тип графика **Rectangular** и уберите отметки во всех остальных типах графиков.
4. Отметьте **Forward Transfer (S21)** и снимите отметки у всех остальных единиц измерения.

5. Щёлкните мышкой по кнопке **Append to MWO** в правом нижнем углу окна. Переданная в Microwave Office схема показана на рис. 4.79.

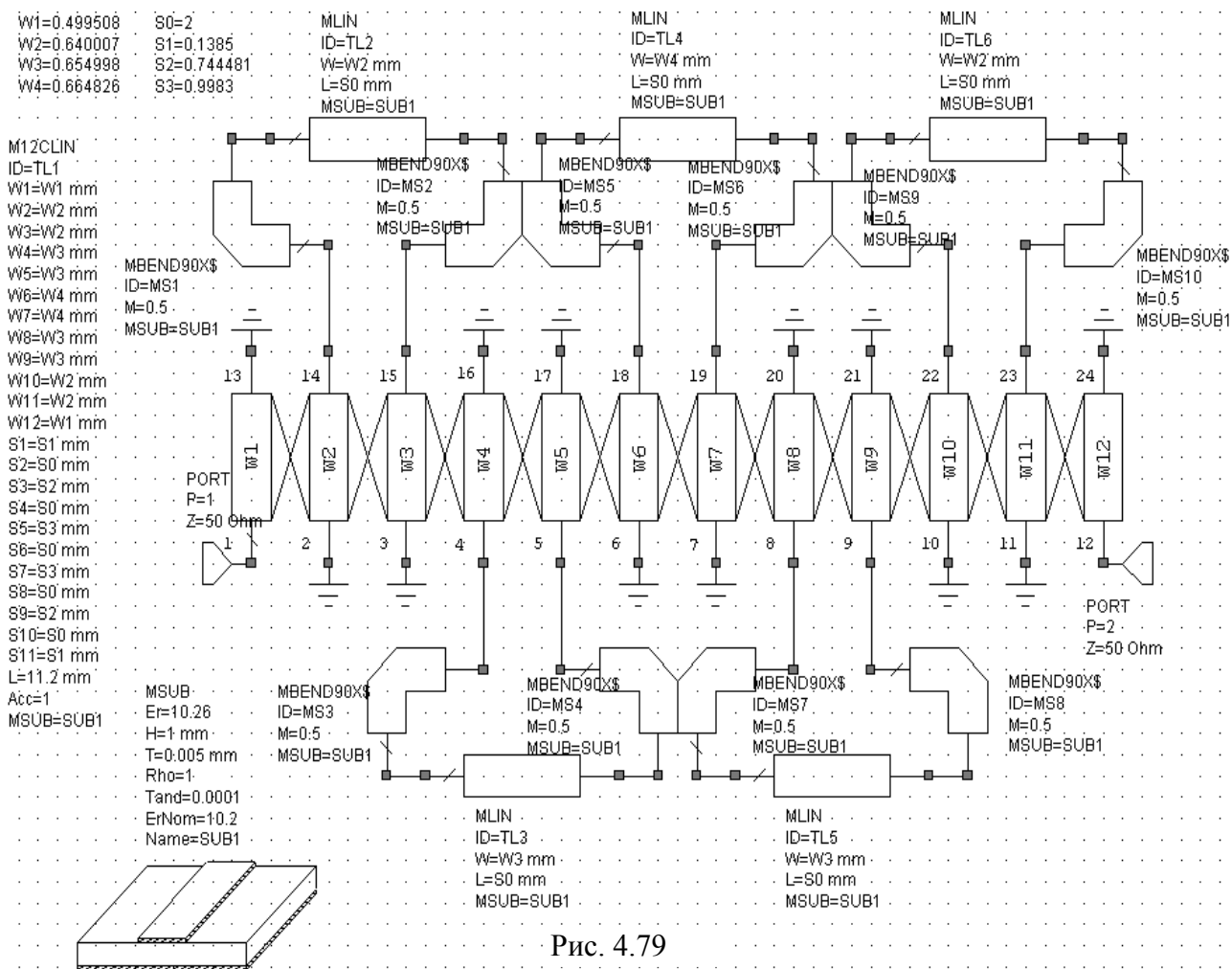


Рис. 4.79

Добавьте на входе и выходе схемы 50-омные отрезки линий. Для этого:

1. Нажмите клавишу **Ctrl**, установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и переместите порт на свободное место в окне схемы, прервав связь порта со схемой. Аналогично переместите выходной порт.
2. Щёлкните левой кнопкой мышки по элементу изгиба **MBEND90X\$ ID=MS2** в верхней части схемы, чтобы выделить его. Щёлкните мышкой по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Подключите скопированный элемент изгиба ко входу схемы, дважды щёлкните по нему и введите **W=W1**, нажмите **OK**.
3. Щёлкните левой кнопкой мышки по элементу изгиба **MBEND90X\$ ID=MS5** в верхней части схемы, чтобы выделить его. Щёлкните мышкой по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Подключите скопированный элемент изгиба к выходу схемы, дважды щёлкните по нему и введите **W=W1**, нажмите **OK**.
4. Щёлкните левой кнопкой мышки по элементу отрезка линии **MLIN ID=MS2**, чтобы выделить его.
5. Щёлкните мышкой по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Подключите скопированный элемент **MLIN** ко входу схемы. Дважды щёлкните мышкой по этому элементу и введите **W=1** и **L=3**.
6. Снова щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и подключите скопированный элемент **MLIN** к выходу схемы. Дважды щёлкните мышкой по этому элементу и введите **W=1** и **L=3**.
7. Установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и подключите порт ко входу схемы.
8. Установите курсор на выходной порт, нажмите левую кнопку мышки и подключите порт к выходу схемы.





W1=0.6 SO=1.886  
 W2=0.955 S1=0.192  
 W3=0.768 S2=1.1  
 W4=0.68 S3=1.48

Рис. 4.84

W1=0.6 SO=1.9  
 W2=1 S1=0.2  
 W3=0.8 S2=1.1  
 W4=0.7 S3=1.5

Рис. 4.85

Переменные при этом получили значения, показанные на рис. 4.84, длина связанных линий  $L=11.71$ .

Округлите эти значения до одной десятой, как показано на рис. 4.85. Для этого сделайте активным окно схемы, дважды щёлкните мышкой, например, по переменной  $W2=0.995$ , исправьте её значение на  $W2=1$  и щёлкните мышкой вне значения этой переменной. Аналогично исправьте значения всех остальных переменных. Дважды щёлкните по элементу связанных линий  $M12CLIN$  и введите  $L=11.7$ .

Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов, чтобы убедиться, что характеристика изменилась не существенно.

Создайте топологию схемы:

1. Выберите в меню **Options>Layout Options**. На вкладке **Dimension Lines** в поле **Font height** введите **0.6**, в поле **Arrow size** введите **0.5**, в поле **Precision** введите **2**, нажмите **OK**.
2. Сделайте активным окно схемы и щёлкните по значку **New Schematic Layout View**.
3. В поле **Grid Spacing** на панели инструментов введите множитель **1x**, чтобы сделать размер ячеек сетки **0.1 мм**.
4. Выберите в меню **Edit>Select All**, чтобы выделить всю топологию.
5. Щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов, чтобы упорядочить топологию.
6. Щёлкая по значку **Dimension Line** на панели инструментов, измерьте длину и ширину топологии.

Созданная топология схемы показана на рис. 4.86.

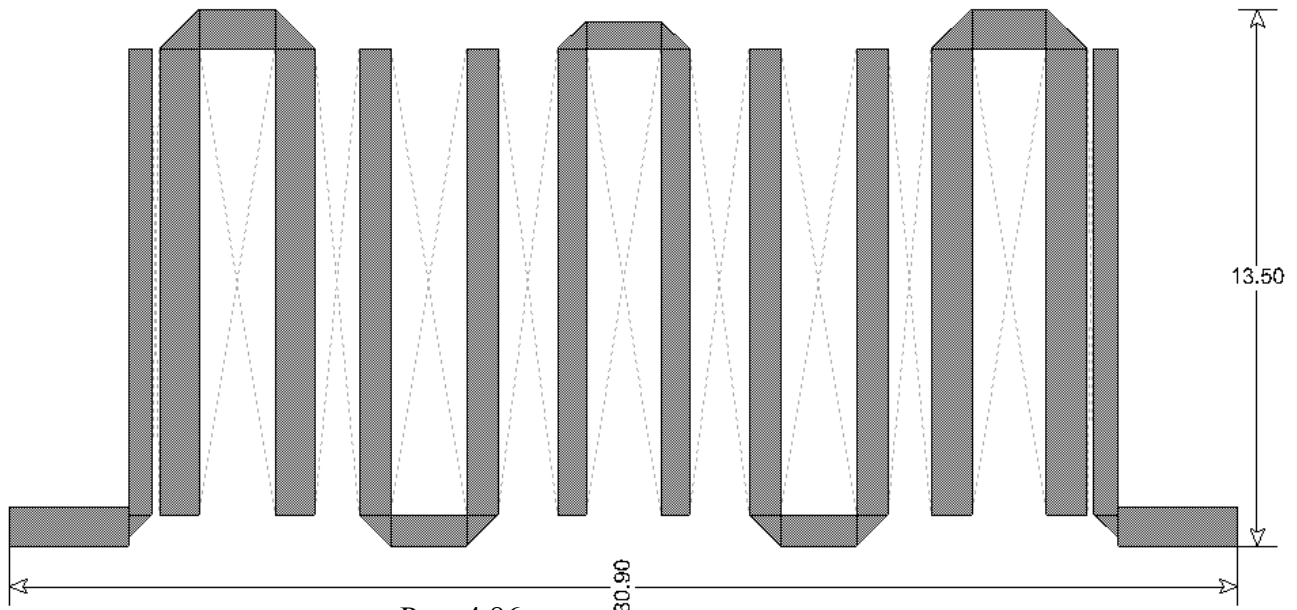


Рис. 4.86

Создайте электромагнитную структуру:

1. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов. В открывшемся окне введите имя структуры **F2**, отметьте решающее устройство **AWR EMSight Simulator** и нажмите **Create**.
2. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне свойств структуры на вкладке **Enclosure** введите **X\_Dim=30.9 mm**, **Y\_Dim=16 mm**, **Grid\_X=0.1 mm** и **Grid\_Y=0.1 mm**.
3. На вкладке **Material defs** введите **Er=10.26** и **TanD=0.0001**.
4. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6 мм** и для слоя **2** – толщину **1 мм**.
5. Нажмите **OK**.

6. Сделайте активным окно топологии схемы и выделите всю топологию. Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
7. Сделайте активным окно электромагнитной структуры и щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов. Вставьте скопированную топологию в корпус так, чтобы левый и правый края входного и выходного проводников точно совпадали с левым и правым краями корпуса соответственно.
8. Выделите всю топологию, щёлкните по любому элементу топологии правой кнопкой мышки и выберите **Shape Properties**. В открывшемся окне в поле **Material** введите **1/2oz Cu**.

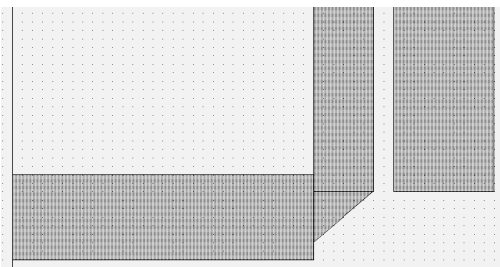


Рис. 4.87

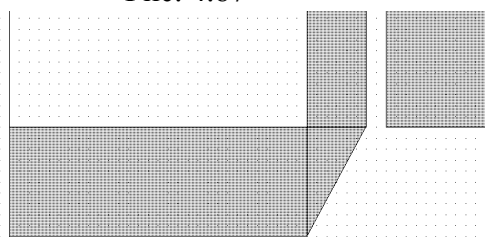


Рис. 4.88

9. Щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов и увеличьте входной проводник, чтобы удобнее было его отредактировать (рис. 4.87).

10. Установите курсор на входной проводник, нажмите левую кнопку мышки и переместите входной проводник на 0.2 мм вниз. Щёлкните мышкой по уголку, чтобы выделить его, и нажмите клавишу **Delete**, чтобы удалить уголок. Щёлкните по значку **Polygon** на панели инструментов, установите курсор на правый нижний угол первого вертикального проводника, щёлкните мышкой, сдвиньте курсор влево до левого нижнего угла первого вертикального проводника, щёлкните мышкой, сдвиньте курсор вниз до нижней границы горизонтального проводника и дважды щёлкните мышкой. Щёлкните по созданному уголку левой

кнопкой мышки, затем правой кнопкой, выберите **Shape Properties** и определите материал **1/2oz Cu**. Соединение проводников будет выглядеть, как показано на рис. 4.88.

11. Аналогично отредактируйте выходной проводник. Топология будет выглядеть, как показано на рис. 4.89.

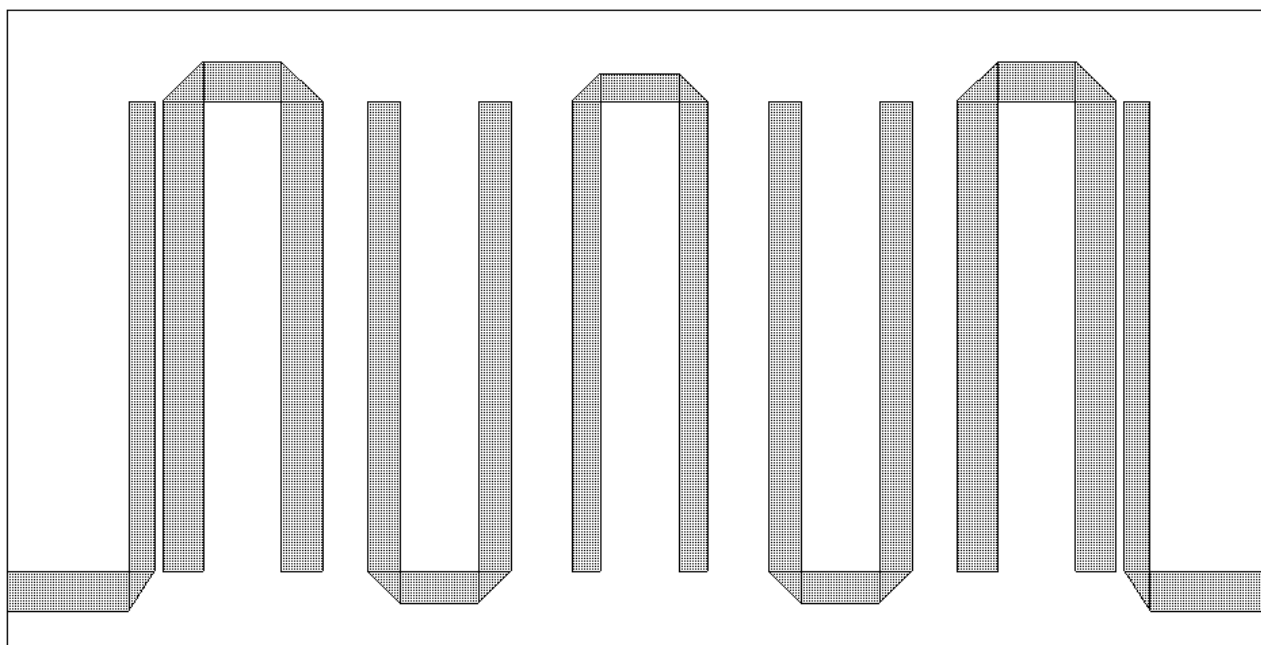


Рис. 4.89

12. Создайте межслойные перемычки для заземления резонаторов. Откройте окно менеджера топологии, щёлкнув мышкой по кнопке **Layout** в левой нижней части окна. Отметьте **Via**, в поле **Material** введите **1/2oz Cu**, в поле **Extent** введите **1**.
13. Щёлкните мышкой по значку **Via Port** на панели инструментов. Поместите курсор в верхней части входного проводника связи, нажмите левую кнопку мышки, переместите

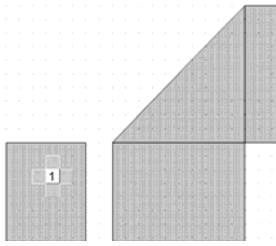


Рис. 4.90

курсор на 0.1 вправо и на 0.3 вниз, отпустите кнопку. Должна образоваться прямоугольная перемычка, которая будет выделена.

14. Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированную перемычку, и поместите её, как показано на рис. 4.90.

15. Выберите в меню **Draw>Modify Shapes>Union** (Рисовать> Модифицировать формы>Объединить), чтобы объединить созданные перемычки в одну.

16. При выделенной перемычке щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов. Затем, щёлкая по значку **Paste** на панели инструментов, установите перемычки на соответствующие концы всех шпилек и выходного проводника связи.

17. Щёлкните мышкой по входному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра. Щёлкните мышкой по порту и сдвиньте референсную плоскость на 2 мм вправо.

18. Аналогично установите порт на выходе фильтра, сдвинув его референсную плоскость на 2 мм влево. Созданная электромагнитная структура должна выглядеть, как показано на рис. 4.91.

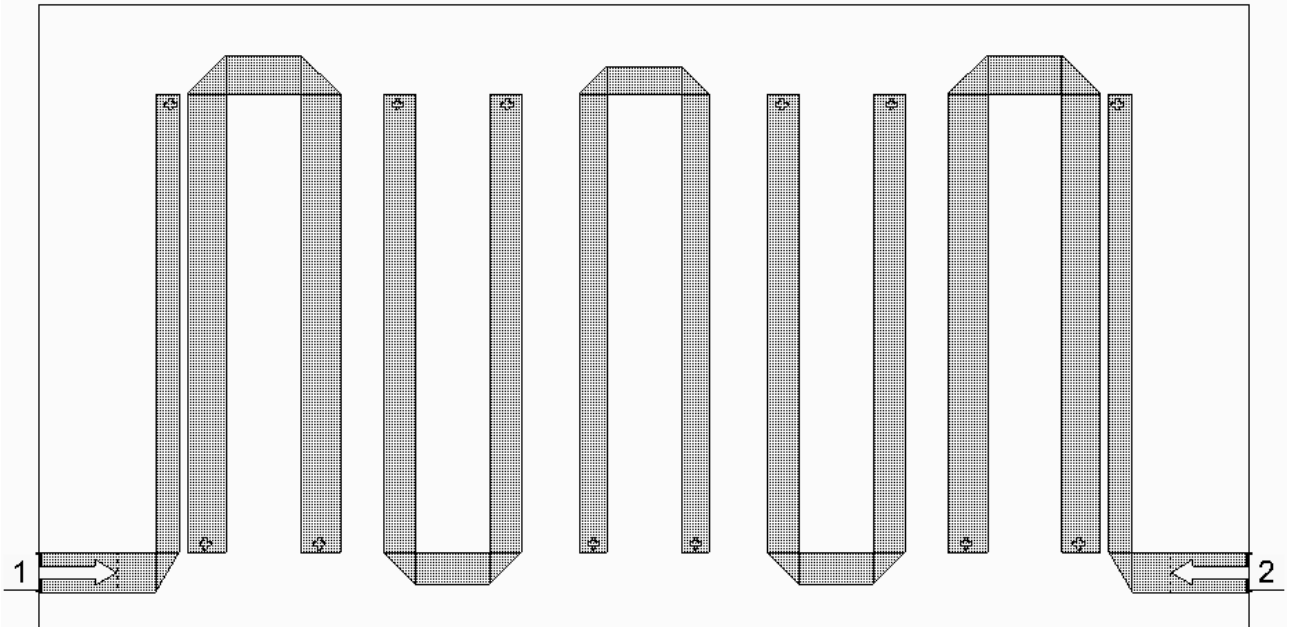


Рис. 4.91

19. Откройте окно просмотра проекта, щёлкнув мышкой по кнопке **Project** в левой нижней части окна.

20. Дважды щёлкните левой кнопкой мышки по **Project Options** и в открывшемся окне опций проекта на вкладке **Frequencies** в поле **Start(GHz)** введите **1**, в поле **Stop(GHz)** введите **3**, в поле **Step(GHz)** введите **0.05**. Нажмите **Apply** и **OK**.

21. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **Fil2** в окне просмотра проекта и выберите **Options**. В открывшемся окне опций схемы на вкладке **Frequencies** отметьте **Use project defaults** и нажмите **OK**.

22. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени измеряемой величины **Fil2:DB(|S(2,1)|)** в окне просмотра проекта и выберите **Properties**. В открывшемся окне свойств в поле **Data Source Name** введите **All Sources**, нажмите **OK**.

23. Сделайте активным окно графика. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните по графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. В открывшемся окне свойств графика на вкладке **Axes** для оси **x** снимите отметку в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.1**. Для оси **Left 1** снимите отметку в **Auto divs** и в поле **Step** введите **5**. Нажмите **Apply** и **OK**.

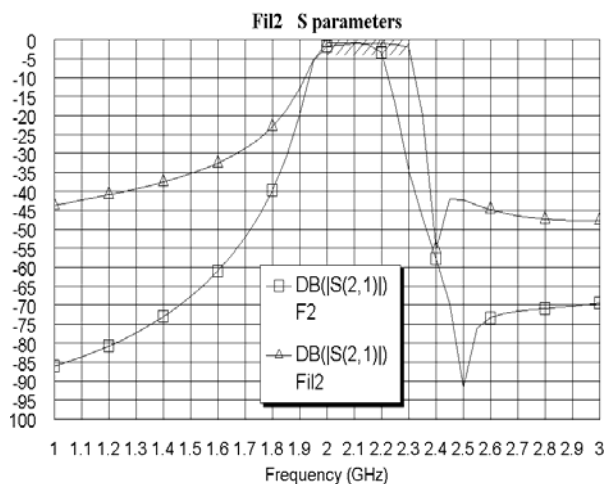


Рис. 4.92

Рассчитанный график показан на рис. 4.92. Характеристика электромагнитной структуры получилась несколько уже характеристики схемы.

Чтобы расширить полосу пропускания, нужно уменьшить зазоры между шпильками.

1. Сделайте активным окно электромагнитной структуры.
2. Установите курсор левее и выше первого проводника связи, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор правее и ниже второй шпильки, чтобы выделить две первых шпильки с входным проводником связи (рис. 4.93).

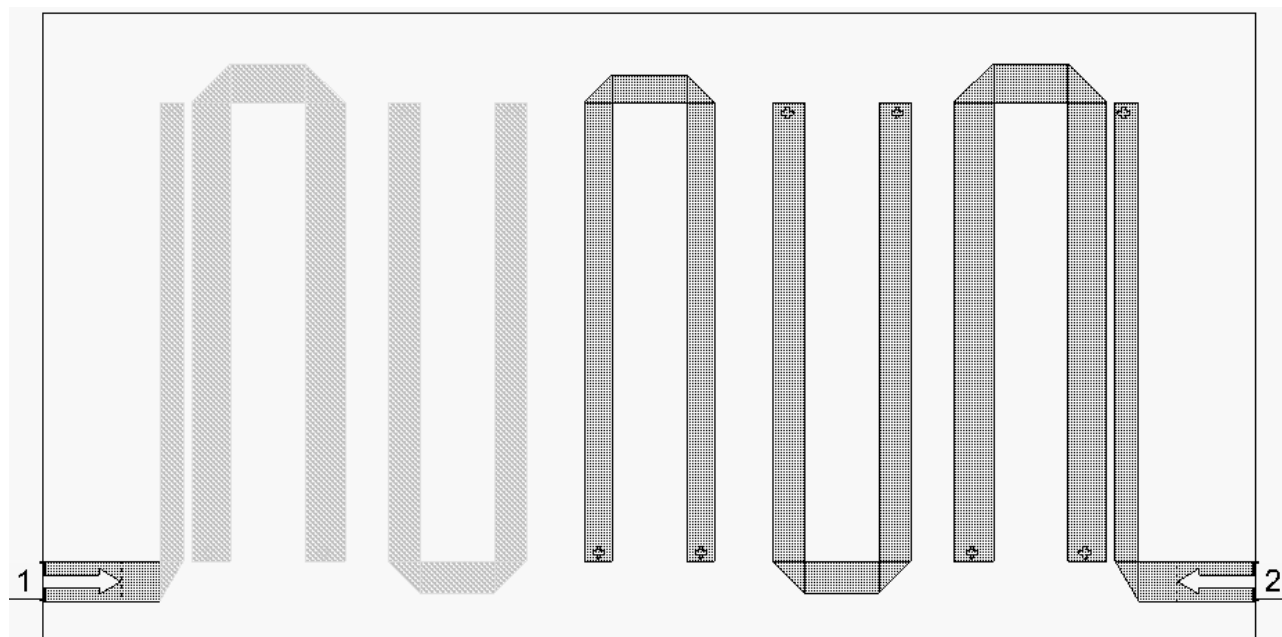


Рис. 4.93

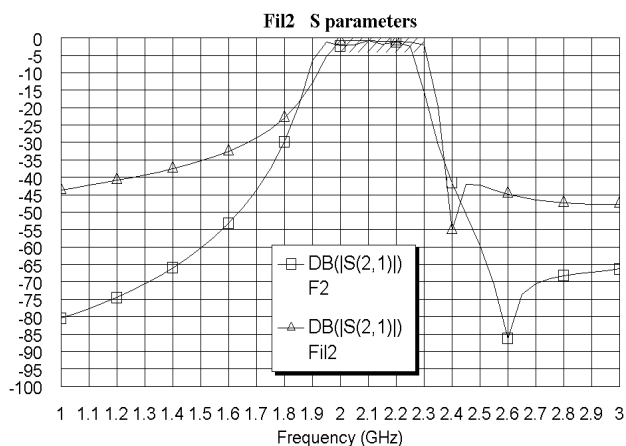


Рис. 4.94

3. Установите курсор на любой выделенный проводник, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте выделенную топологию на 0.3 мм вправо.
4. Затем аналогично выделите первую шпильку с входным проводником связи и сдвиньте их на 0.3 мм вправо.
5. Таким же образом уменьшите остальные зазоры между шпильками, выделяя их и сдвигая на 0.3 мм влево.
6. Дважды щёлкните по входному проводнику, установите курсор на ромб посередине правой стороны проводника, нажмите левую кнопку мышки и

сдвиньте эту сторону вправо до соединения с уголком. Аналогично удлините выходной проводник.

7. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 4.94.

Характеристика электромагнитной структуры сдвинута вниз по частоте, поэтому нужно укоротить длину шпилек.

Выделите межслойную перемычку на первом проводнике связи и сдвиньте её на 0.3 мм вниз. Дважды щёлкните по первому проводнику связи и сместите его верхнюю сторону на 0.3 мм вниз.

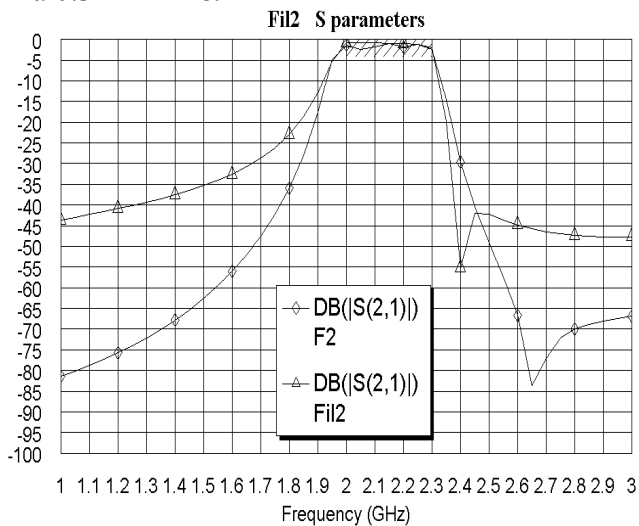


Рис. 4.95

На первой шпильке сдвиньте межслойные перемычки на 0.3 мм вверх, сдвиньте нижнюю сторону обоих проводников шпильки вверх на 0.3 мм и затем сдвиньте всю шпильку на 0.3 мм вниз.

На второй шпильке сдвиньте межслойные перемычки на 0.3 мм вниз и сдвиньте верхнюю сторону обоих проводников шпильки вниз на 0.3 мм.

Аналогично отредактируйте остальную топологию.

Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика показана на рис. 4.95.

## 5. Полосно-заграждающие фильтры

В качестве примера рассмотрим проектирование фильтра, обеспечивающего ослабление не менее 50 дБ в диапазоне от 4.5 до 5.5 ГГц. Полоса пропускания должна быть обеспечена от 0 до 3.5 ГГц и от 6.5 до 10 ГГц.

Загрузите Microwave Office и выберите в меню **Options>Project Options**. В открывшемся окне опций проекта на вкладке **Global Units** введите единицы измерения частоты **GHz** и отметьте **Metric units**. Нажмите **OK**.

На вкладке Topology:

1. В поле **Implementation** (Реализация) введите **Microstrip**.
2. В поле **Shape** (Вид) введите **Chebyshev I**.
3. В поле **Type** введите **Band Stop**.

На вкладке Settings:

1. В поле **Order** (Порядок) введите **7**.
2. В поле **Pass Band Def** (Определение полосы пропускания) введите **Corner Freqs**.
3. В поле **Lower Corner Frequency** введите **4.5 GHz**.
4. В поле **Upper Corner Frequency** введите **5.5 GHz**.
5. Отметьте **Standard Pass Band Attenuation**.
6. В поле **Pass Band Ripple (dB)** введите величину пульсаций в полосе пропускания **0.05**.
7. В поле **Conductor Thickness** (Толщина проводника) введите **0.005 mm**.
8. В поле **Dielectric Height** (Толщина диэлектрика) введите **0.5 mm**.
9. В поле **Dielectric Loss Tangent** введите тангенс диэлектрических потерь **0.0001**.

На вкладке Defaults:

1. В полях **Source Resistance** (Сопротивление источника) и **Load Resistance** (Сопротивление нагрузки) введите **50 Ohm**.
2. В поле **Dielectric Constant (Er)** введите диэлектрическую проницаемость **10.4**.
3. В поле **Frequency Where Aliasing Begins** введите **18 GHz**.
4. В поле **First Element** введите **Shunt**.
5. Остальные значения оставьте по умолчанию.

На вкладке Schematic:

1. В поле **Schematic Name** введите имя схемы **FilZ**.
2. Отметьте **Generate Graphs** (Создать графики) и **Append** (Добавить).
3. В области **Graphs To Generate** отметьте **Rectangular** (Прямоугольный).
4. В области **Measurement for Rectangular** отметьте **Forward Transfer dB(S21)**.
5. В области **Graph Limits** отметьте **Sent To MWO**, в поле **Min Freq** введите **0 GHz**, в поле **Max Freq** введите **10 GHz**.

После ввода всех данных выберите в меню **Integration>Nuhertz Interface**. Откроется основное окно панели управления **Nuhertz Filter** (рис. 5.1). В строке меню этого окна выберите **File>Save As** и сохраните синтезируемый фильтр в файле **FilZ**.

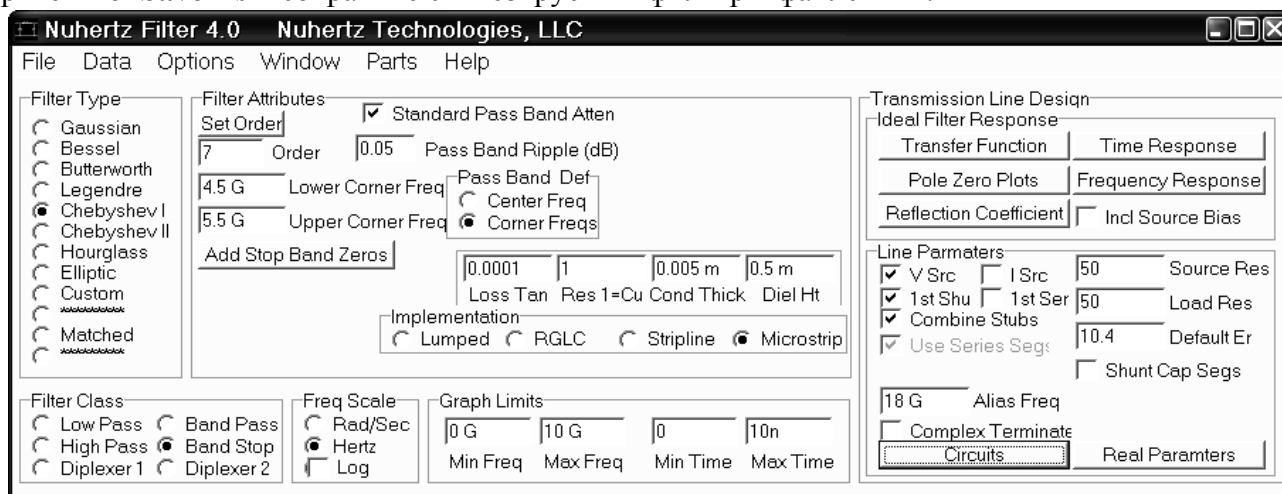


Рис. 5.1

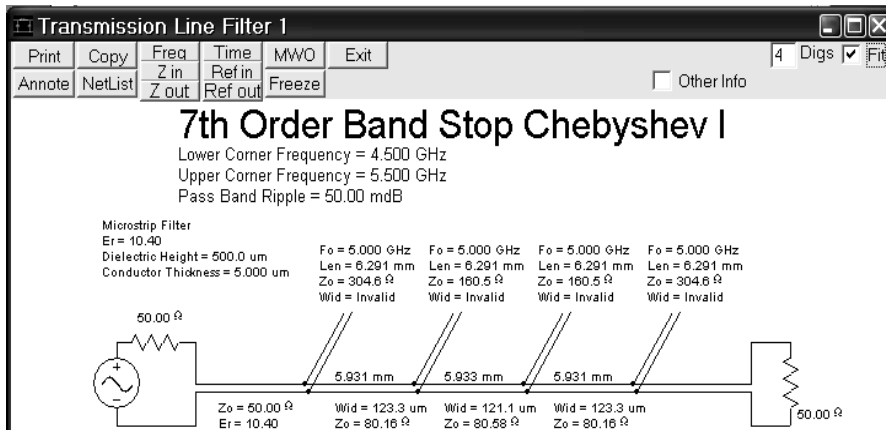


Рис. 5.2

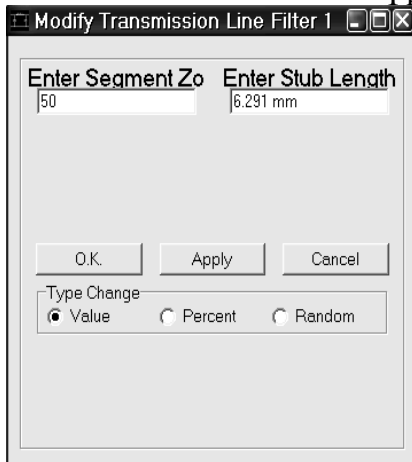


Рис. 5.3

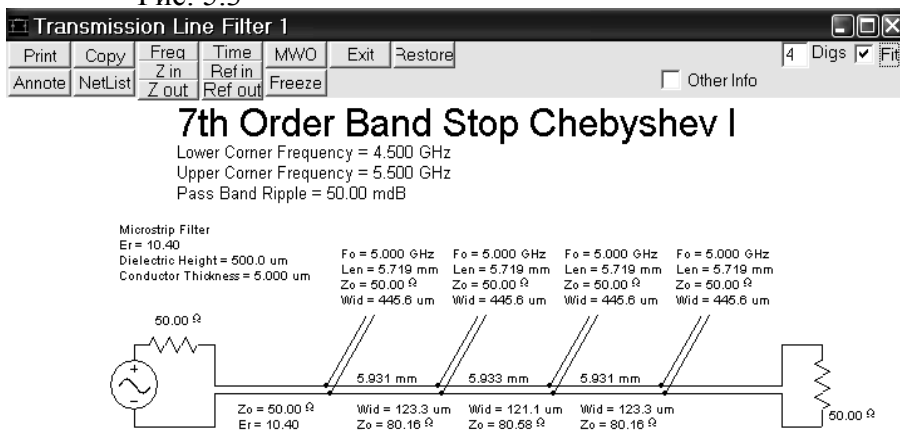


Рис. 5.4

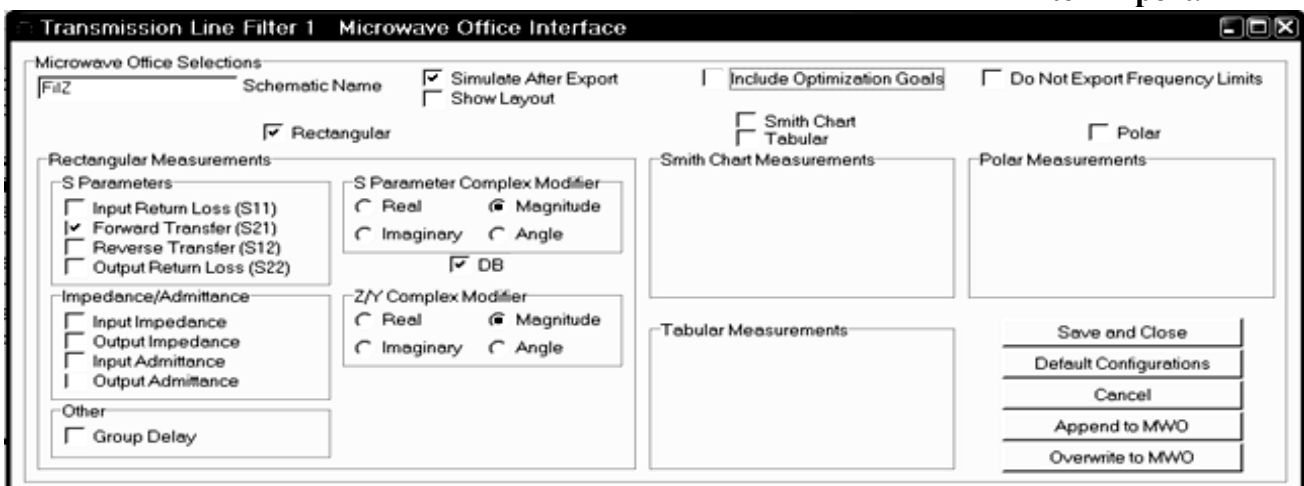


Рис. 5.5

Щёлкните мышкой по кнопке **Circuits**. Открывается окно со схемой (рис. 5.2). Ширина шлейфов на схеме помечена **Invalid**, т.е. они не реализуемы. Если щёлкнуть по кнопке **Freq** в верхнем левом углу схемы, Nuhertz Filter выполнит анализ и отобразит график. Щёлкнув мышкой по кнопке **MWO**, можно передать схему в Microwave Office,

на там анализ выполняться не будет (волновые сопротивления шлейфов в переданной схеме будут отрицательные). Чтобы анализ выполнялся и можно было настраивать схему, нужно будет изменить ширину шлейфов на реализуемое значение. Это можно сделать и в Nuhertz Filter, изменив волновые сопротивления шлейфов. На схеме рис. 5.2 установите курсор на параметры первого шлейфа (параметры должны отображаться красным цветом) и щёлкните левой кнопкой мышки. Откроется диалоговое окно **Modify Transmission Line Filter 1** (рис. 5.3). В поле **Enter Segment Zo** введите **50**, нажмите **Apply** и **ОК**. Аналогично отредактируйте волновые сопротивления всех остальных шлейфов. Схема будет выглядеть, как показано на рис. 5.4.

Щёлкните мышкой по кнопке **MWO** в левом верхнем углу схемы рис. 5.4, чтобы передать схему в Microwave Office. Откроется окно опций для передачи схемы рис. 5.5.

1. В поле **Schematic Name** введите **FilZ**.
2. Отметьте **Simulate After Export**.

- Отметьте тип графика **Rectangular** и снимите отметки у всех остальных типов графиков.
- В области **Rectangular Measurements** отметьте **Forward Transfer (S21)**.
- Щёлкните мышкой по кнопке **Append to MWO** в правом нижнем углу окна.

Сделайте активной программу Microwave Office, щёлкнув мышкой по её окну или по её имени на панели задач Windows.

Сделайте активным окно схемы и добавьте 50-омные отрезки линии на входе и выходе схемы. Для этого откройте окно просмотра элементов, щёлкнув мышкой по кнопке **Elements** внизу левого окна. Раскройте группу **Microstrip** и щёлкните мышкой по подгруппе **Lines**. Нажмите клавишу **Ctrl**, установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и переместите порт на свободное место в окне схемы, разорвав его связь со схемой. Аналогично переместите выходной порт. Перетащите элемент **MLIN** в окно схемы и подключите его ко входу схемы. Дважды щёлкните мышкой по элементу **MLIN**. В открывшемся окне свойств элемента введите **W=0.45** и **L=3**, нажмите **OK**. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов (элемент **MLIN** должен быть выделен). Подключите скопированный элемент к выходу схемы.

Установите курсор на входной порт, нажмите левую кнопку мышки и подключите порт ко входу схемы. Аналогично подключите выходной порт к выходу схемы. Схема должна иметь вид, показанный на рис. 5.6.

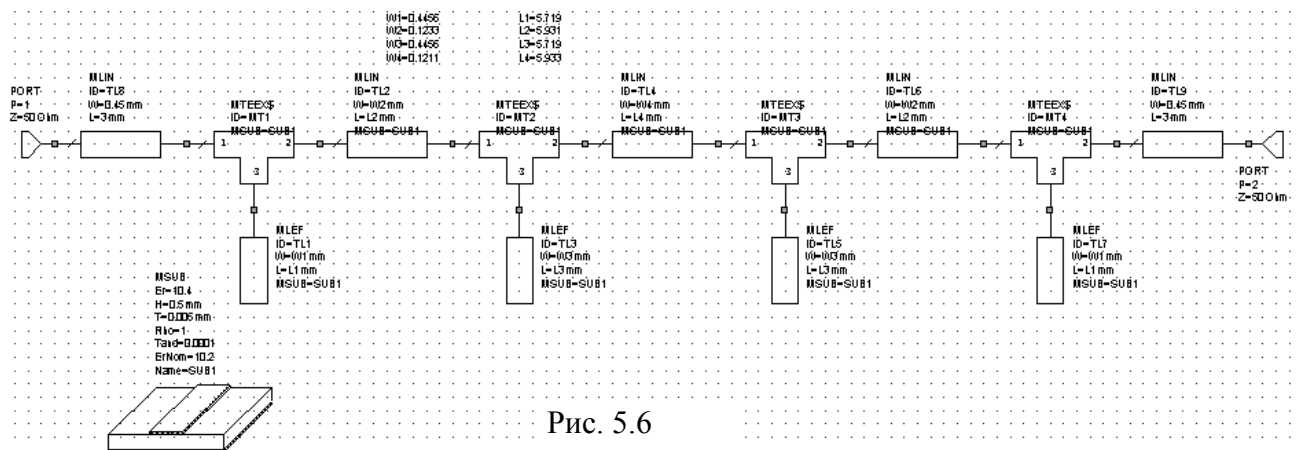


Рис. 5.6

Откройте окно просмотра проекта, щёлкнув мышкой по кнопке **Project** в нижней части левого окна.

Установите частоты проекта. Для этого дважды щёлкните мышкой по **Project Options** в окне просмотра проекта. В открывшемся окне опций на вкладке **Frequencies** в поле **Start(GHz)** введите **0**, в поле **Stop(GHz)** введите **10**, в поле **Step(GHz)** введите **0.5**, отметьте **Replace**, нажмите **Apply** и **OK**.

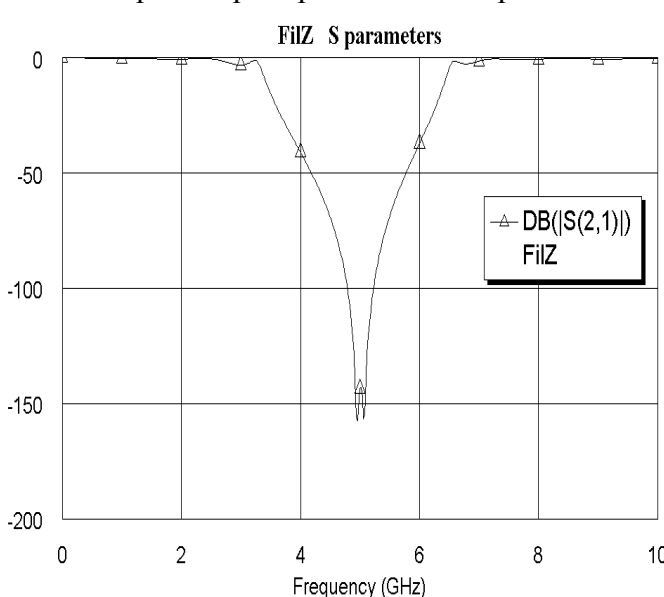


Рис. 5.7

Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **FilZ** в окне просмотра проекта и выберите **Options**. На вкладке **Frequencies** отметьте **Use project defaults** и нажмите **OK**.

Щёлкните правой кнопкой мышки по имени измеряемой величины **FilZ:DB(|S(2,1)|)** и выберите **Properties**. В открывшемся окне в поле **Data Source Name** введите **All Sources**, нажмите **OK**.

Откройте окно графика и щёлкните мышкой по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 5.7.



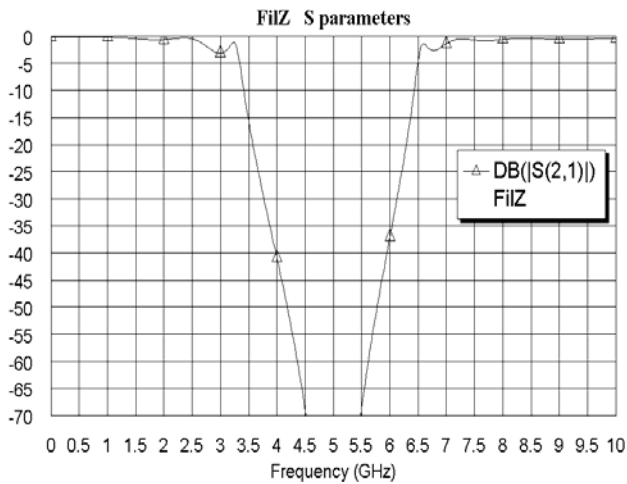


Рис. 5.8

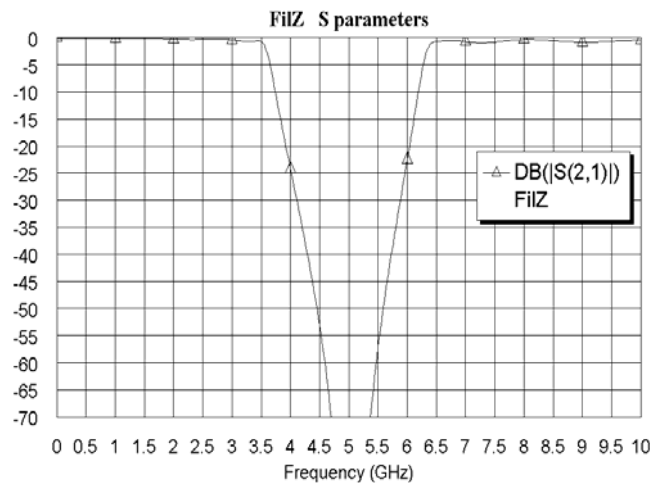


Рис. 5.9

Отредактируйте параметры графика. Щёлкните правой кнопкой мышки по полученному графику и выберите **Properties**. На вкладке **Axes** для оси **x** снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.5**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**, в поле **Min** введите **-70**, в поле **Max** введите **0** и в поле **Step** введите **5**, нажмите **Apply** и **OK**.

Отредактированный график показан на рис. 5.8

W1=0.15      L1=5.85  
W2=0.25      L2=6  
W3=0.4        L3=5.65  
W4=0.2        L4=5.75

Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов, чтобы настроить схему. Двигая движки на блоке настройки, добейтесь требуемой характеристики (рис. 5.9). Переменные получили значения, после округления до пяти сотых, показанные на рис. 5.10.

Рис. 5.10

Сделайте активным окно схемы и щёлкните мышкой по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов, чтобы создать топологию схемы. Выберите в меню **Edit>Select All**, чтобы выделить топологию. Щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов, чтобы упорядочить топологию. В поле **Grid Spacing** на панели инструментов введите **0.5x**, чтобы размер ячеек сетки был равен 0.05 мм.

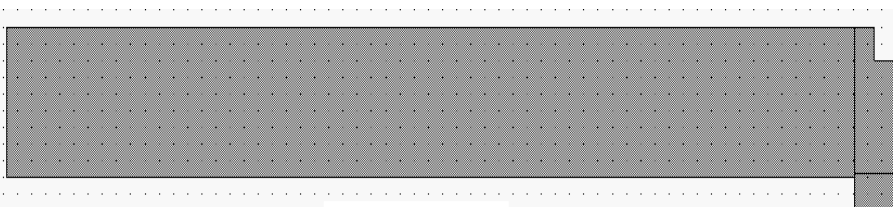


Рис. 5.11

Щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов и выделите входной проводник так, чтобы была видна сетка. Убедитесь, что проводник совпадает с сеткой. В нашем случае

это не выполняется (рис.5.11) и требуется отредактировать положение топологии, сдвинув её влево на 0.1 мм, иначе порты в электромагнитной структуре не установятся.

Выделите всю топологию, установите курсор на любой проводник, нажмите левую кнопку мышки и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне ввода координат в поле **dx** введите **-0.01**, в поле **dy** введите **0**, нажмите **OK**. Созданная топология показана на рис. 5.12.

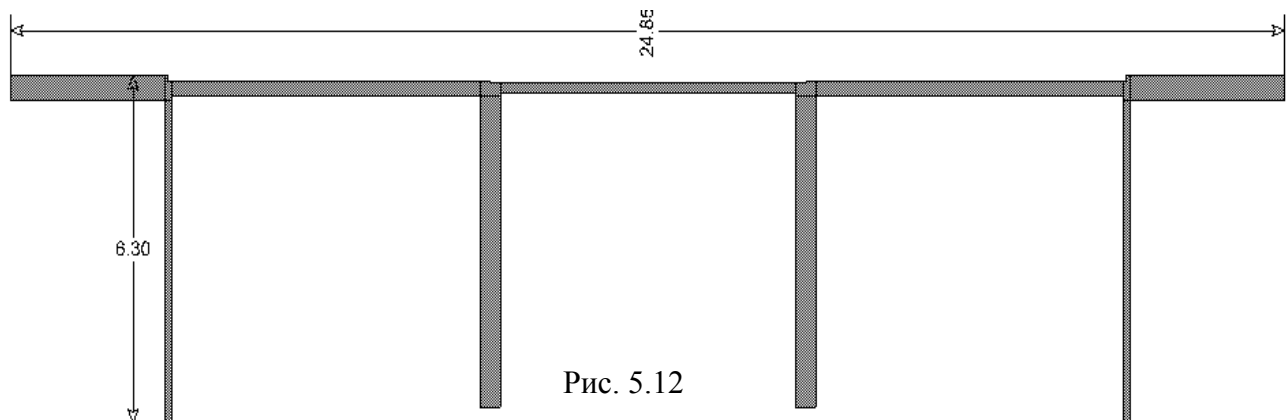


Рис. 5.12

Создайте электромагнитную структуру.

1. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов. В открывшемся окне в поле **Enter a name for the EM Structure** введите имя структуры **FZ**, отметьте **AWR EMSight Simulator** и нажмите **Create**.
2. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. Откроется окно свойств электромагнитной структуры.
3. На вкладке **Enclosure** в поле **X\_Dim** введите **24.85**, в поле **Y\_Dim** введите **9**, в поля **Grid\_X** и **Grid\_Y** введите **0.5**.
4. На вкладке **Material Defs** в области **Dielectric Definitions** введите **Er=10.4**, **TanD=0.0001**.
5. На вкладке **Dielectric Layers** в столбце **Thickness** для слоя **1** введите **6**, для слоя **2** введите **0.5**.
6. Нажмите **OK**.
7. Сделайте активным окно топологии схемы, выделите всю топологию и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
8. Сделайте активным окно электромагнитной структуры и щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов. Вставьте скопированную топологию в корпус электромагнитной структуры так, чтобы левый и правый края топологии точно совпадали с краями корпуса.
9. Установите курсор левее и выше электромагнитной структуры, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор правее и ниже электромагнитной структуры, чтобы выделить всю топологию. Щёлкните по любому проводнику правой кнопкой мышки и выберите **Shape Properties**. В открывшемся окне в поле **Material** введите **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.
10. Щёлкните мышкой по входному проводнику, чтобы выделить его. Щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов, поместите курсор на левый край входного проводника так, чтобы на нём образовался небольшой прямоугольник, и щёлкните левой кнопкой мышки. Щёлкните мышкой по прямоугольнику порта, установите курсор на правую сторону порта так, чтобы курсор отображался в виде двойной стрелки, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте референсную плоскость порта вправо на 1 мм. Аналогично установите порт на выходе фильтра. Электромагнитная структура должна выглядеть, как показано на рис. 5.13.

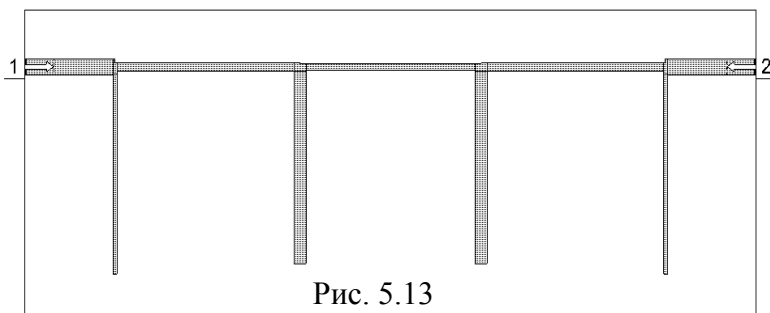


Рис. 5.13

11. Откройте окно схемы и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 5.14.

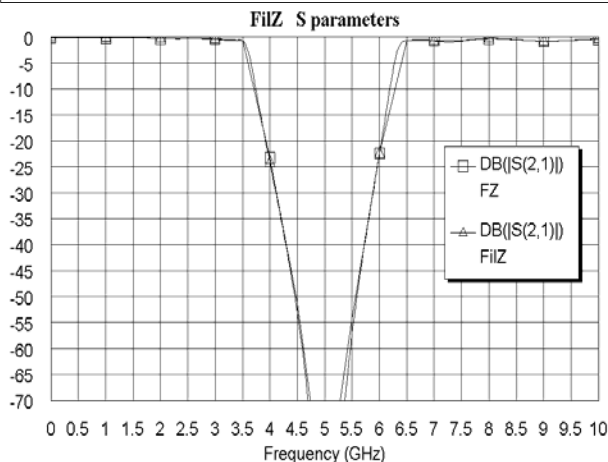


Рис. 5.14