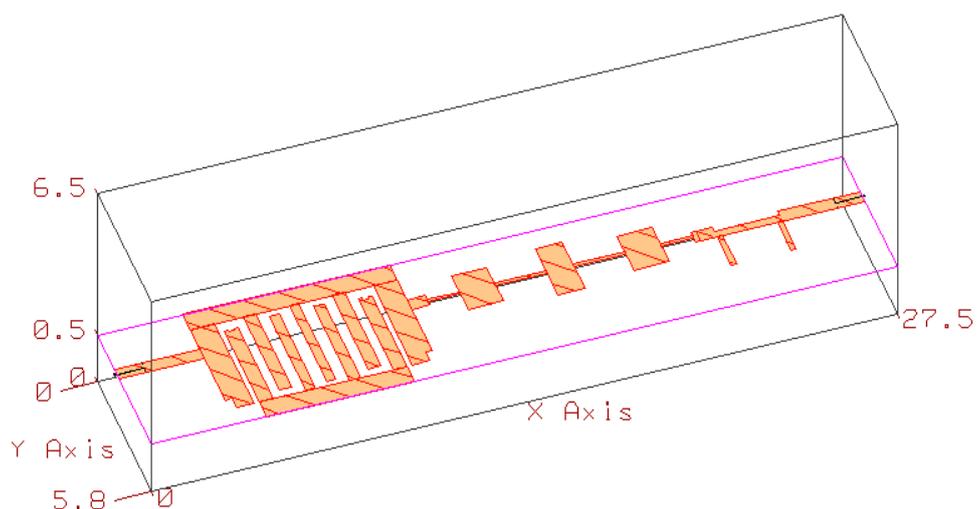


Проектирование МИКРОПОЛОСКОВЫХ фильтров СВЧ в Microwave Office



2008 г.

Оглавление

Введение.....	3
1. Заграждающие фильтры.....	6
1.1. Фильтр с полосой заграждения 14 – 18 ГГц.....	6
1.1.1. Определение параметров микрополосковой линии.....	6
1.1.2. Создание электрической схемы.....	6
1.1.3. Добавление переменных.....	8
1.1.4. Редактирование элементов схемы.....	8
1.1.5. Создание графика.....	10
1.1.6. Определение диапазона частот и проведение анализа.....	11
1.1.7. Назначение переменных и параметров элементов для оптимизации.....	12
1.1.8. Определение целей оптимизации.....	13
1.1.9. Выполнение оптимизации.....	14
1.1.10. Создание электромагнитной структуры.....	15
1.1.11. Установка портов и анализ электромагнитной структуры.....	20
1.1.12. Редактирование электромагнитной структуры.....	22
1.2. Фильтр с частотой заграждения 4 ГГц.....	24
1.2.1. Создание электрической схемы.....	24
1.2.2. Добавление переменных и редактирование элементов схемы.....	27
1.2.3. Определение частот, добавление графика и анализ схемы.....	28
1.2.4. Настройка схемы.....	28
1.2.5. Статистический анализ.....	29
1.2.6. Создание электромагнитной структуры.....	31
1.2.7. Анализ и уточнение топологии.....	32
1.3. Фильтр с полосой заграждения 4.5 – 5.5 ГГц.....	34
1.3.1. Создание электрической схемы.....	34
1.3.2. Добавление переменных, редактирование и анализ схемы.....	34
1.3.3. Оптимизация схемы.....	36
1.3.4. Создание электромагнитной структуры.....	38
1.3.5. Создание схемы с X-моделями.....	39
1.3.6. Заполнение X-моделей, анализ и оптимизация схемы.....	39
1.3.7. Создание и анализ электромагнитной структуры.....	41
2. Фильтры нижних частот.....	43
2.1. Фильтр с полосой пропускания до 3 ГГц.....	43
2.1.1. Создание схемы фильтра.....	43
2.1.2. Добавление переменных, редактирование элементов, определение частот, добавление графика и анализ схемы.....	44
2.1.3. Настройка схемы.....	45
2.1.4. Создание и анализ электромагнитной структуры.....	46
2.1.5. Редактирование электромагнитной структуры.....	48
2.2. Фильтр на емкостных секторах.....	49
2.2.1. Создание схемы.....	49
2.2.2. Добавление переменных редактирование элементов схемы.....	50
2.2.3. Анализ схемы.....	51
2.2.4. Настройка схемы.....	51
2.2.5. Создание и анализ электромагнитной структуры.....	51
3. Полосно-пропускающие фильтры.....	55
3.1. Фильтр на шлейфах с полосой пропускания 8 – 12 ГГц.....	55
3.1.1. Создание схемы фильтра.....	55
3.1.2. Добавление переменных и редактирование элементов схемы.....	56
3.1.3. Определение частот проекта, анализ и настройка схемы.....	56

3.1.3. Определение частот проекта, анализ и настройка схемы.....	57
3.1.4. Создание и анализ электромагнитной структуры.....	58
3.1.5. Редактирование топологии.....	59
3.2. Фильтр с боковыми электромагнитными связями с полосой пропускания 4 – 4.4 Гц.....	63
3.2.1. Синтез фильтра.....	63
3.2.2. Настройка схемы.....	65
3.2.3. Статистический анализ.....	67
3.2.4. Создание электромагнитной структуры.....	69
3.3. Фильтр с полуволновыми электромагнитными связями с полосой пропускания 9,5 – 10,5 ГГц.....	72
3.3.1. Создание схемы.....	73
3.3.2. Добавление переменных и редактирование элементов схемы.....	74
3.3.3. Добавление частот, анализ и настройка схемы.....	75
3.3.4. Создание электромагнитной структуры.....	76
3.4. Шпилечный фильтр с полосой пропускания 4.3 – 4.8 ГГц.....	79
3.4.1. Создание электрической схемы.....	79
3.4.2. Добавление переменных, редактирование элементов и анализ схемы.....	81
3.4.3. Настройка схемы.....	83
3.4.4. Создание и анализ электромагнитной структуры.....	84
3.4.6. Редактирование топологии.....	86
3.4.7. Моделирование заграждающего фильтра.....	89
3.4.8. Создание и редактирование структуры фильтра с заграждением.....	90
3.5. Шпилечный фильтр с полосой пропускания 875 – 1125 МГц.....	91
3.5.1. Создание электромагнитной структуры.....	92
3.5.2. Определение частот, создание графика и выполнение анализа.....	93
3.6. Встречноштыревой фильтр с полосой пропускания 865 – 880 МГц.....	96
3.6.1. Создание схемы фильтра.....	96
3.6.2. Настройка схемы фильтра.....	98
3.6.3. Создание и редактирование электромагнитной структуры.....	100
3.7. Встречноштыревой фильтр с полосой пропускания 925 – 960 МГц.....	103
3.7.1 Редактирование смоделированной топологии.....	103
3.8. Встречноштыревой фильтр с полосой пропускания 5 – 7 ГГц.....	107
3.8.1. Синтез фильтра.....	107
3.8.2. Добавление переменных и редактирование схемы.....	109
3.8.3. Анализ и настройка схемы.....	109
3.8.4. Создание электромагнитной структуры.....	110
3.8.5. Анализ и редактирование электромагнитной структуры.....	112
3.8.6. Проектирование фильтра нижних частот.....	116
3.8.7. Добавление фильтра нижних частот к полосовому и анализ.....	118
3.8.8. Проектирование заграждающего фильтра.....	119
3.8.9. Добавление заграждающего фильтра к полосовому и анализ.....	120
Литература.....	123

Введение

В настоящее время имеется обширная литература по теории и методам синтеза различных типов фильтров СВЧ. Разработанные методы синтеза многих структур фильтров СВЧ (например, на основе фильтров-прототипов нижних частот, ступенчатых трансформаторов, использования частотного преобразования Ричардса) позволяют синтезировать фильтры с высокой точностью на уровне электрических параметров (волновые сопротивления, электрические длины). Однако при переходе от электрических параметров фильтра к геометрическим параметрам топологии возникают определённые трудности, связанные с недостаточной точностью существующих моделей отрезков линий передач и различных неоднородностей, а также с проблемами учёта дисперсии, влияния корпуса, проводимости материала проводников и т.п., особенно в верхней части СВЧ диапазона. Это приводит к необходимости экспериментальной отработки топологии на макетах фильтров.

С появлением программных продуктов, позволяющих выполнять анализ топологии устройств СВЧ на электродинамическом уровне, ситуация изменилась. Появилась возможность так смоделировать топологию проектируемого фильтра, чтобы экспериментальная характеристика хорошо совпадала с расчётной.

Одним из популярных программных продуктов, используемых для проектирования микрополосковых устройств СВЧ, является Microwave Office компании Applied Wave Research (AWR). Проектирование СВЧ фильтров в этом программном продукте в общем случае можно разделить на три этапа:

- Выбор структуры фильтра в первом приближении.
- Уточнение параметров выбранной структуры в линейном моделировании.
- Окончательная доводка параметров топологии в электромагнитном моделировании.

Поскольку Microwave Office является программой анализа, для начала работы в ней необходимо предварительно выбрать структуру фильтра и определить её параметры хотя бы в достаточно грубом приближении. Для некоторых структур фильтров, например, фильтров на четвертьволновых шлейфах, это сделать достаточно просто. Но для большинства структур (фильтров с боковыми электромагнитными связями, встречноштыревых и др.) необходимо сделать какие-то предварительные расчёты. Для некоторых типов фильтров можно использовать встроенный в Microwave Office мастер синтеза фильтров (Filter Synthesis Wizard) или интегрированный модуль NuHertz Filter.

После выбора структуры фильтра создаётся электрическая схема фильтра с учётом неоднородностей и выполняется анализ созданной схемы. Затем изменяются параметры элементов схемы до получения требуемой характеристики. Для этого можно использовать оптимизацию схемы. Если полученная первоначально характеристика далека от требуемой, оптимизация может не сработать. В этом случае лучше использовать инструмент ручной настройки схемы, который сделан очень удобным и работает в режиме реального времени.

Когда требуемая характеристика получена, создаётся электромагнитная структура топологии фильтра с учётом реальных размеров корпуса и материалов диэлектрика и проводников. Полученные в линейном моделировании размеры топологии округляются так, чтобы они были кратными выбранным размерам клеток сетки электромагнитной структуры. Выполняется анализ созданной электромагнитной структуры. Полученная характеристика может довольно существенно отличаться от характеристики, полученной в линейном моделировании.

После этого делаются изменения (подбор) размеров топологии и выполняется анализ после каждого изменения до тех пор, пока будет получена требуемая характеристика фильтра. Не всегда очевидно, какие параметры топологии нужно изменять и в какую сторону, чтобы приблизить полученную характеристику к требуемой. Если необходимо сдвинуть характеристику по частоте, ясно, что нужно изменить резонансную частоту резонаторов (т.е. их длину). Чтобы изменить ширину полосы пропускания, необходимо изменить величину связей между резонаторами (например, величину зазоров в фильтрах с электромагнитной связью). Обычно, чем ближе характеристика к желаемой, тем сложнее определить, что нужно

изменить в топологии, чтобы правильно подобрать соотношения между резонансными частотами отдельных резонаторов, связями между ними и волновыми сопротивлениями. Эта процедура кропотливого подбора размеров топологии является наиболее трудоёмкой и длительной. Анализ электромагнитной структуры может занимать значительное время. Для ускорения процедуры электромагнитного моделирования можно рекомендовать вначале выполнять анализ с относительно крупной сеткой и меньшим числом частотных точек. Затем увеличить количество клеток в сетке, уменьшив их размер, и увеличить число частот. При окончательной доводке топологии можно перейти от графика вносимого ослабления к графику коэффициента стоячей волны, который более чувствителен к изменениям параметров топологии. Затраченные усилия на кропотливый подбор размеров топологии окупается высокой точностью моделирования, при которой отпадает необходимость в экспериментальной отработке или она сводится к минимуму.

Следует иметь в виду, что высокая точность электромагнитного моделирования обеспечивается при условии, когда проводники топологии параллельны сетке разбиения, а размеры топологических форм кратны размерам клеток сетки. Структуры типа, показанной на рис. 1, когда проводники расположены под углом к сетке, для получения точных результатов анализа требуют очень мелкой сетки. Это может привести к такому увеличению времени

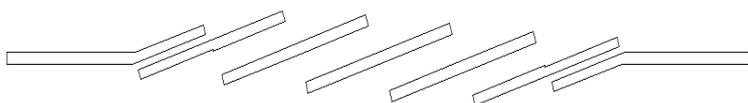


Рис. 1

анализа, что оно становится неприемлемым. В таком случае подобные структуры лучше моделировать в программных продуктах с более гибкой сеткой, например, в IE3D компании Zeland или CST Microwave Studio компании Computer Simulation Technology.

Для широкополосных фильтров, если они спроектированы с запасом по ширине полосы пропускания и крутизне скатов, обычно настройка не требуется. Узкополосные фильтры гораздо более чувствительны к технологическим разбросам и требуют настройки. При этом сдвинуть характеристику фильтра вверх по частоте сложнее, т.к. это требует укорочения (подрезки) резонаторов. Проще сдвинуть характеристику вниз по частоте, т.к. это можно сделать, например, приклеиванием узкой пластины из того же материала подложки, накладываемой на все резонаторы фильтра. Поэтому узкополосные фильтры лучше проектировать заведомо выше требуемой полосы пропускания. Кроме того, должен быть предусмотрен запас по ширине полосы пропускания. Регулировать ширину полосы пропускания характеристики можно, изменяя высоту от подложки до верхней крышки корпуса. При уменьшении этой высоты полоса пропускания уменьшается (обычно больше сдвигается в область верхних частот нижний скат характеристики фильтра). Однако этот метод не удобен для практического применения. Оценить возможный разброс характеристики можно, выполнив статистический анализ, имеющийся в линейном моделировании Microwave Office.

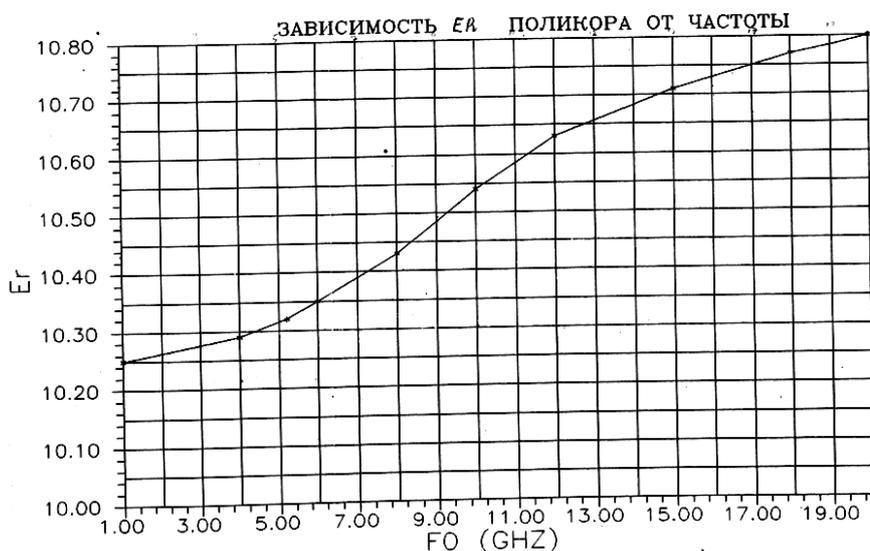


Рис. 2

Наиболее распространённым материалом для подложек микрополосковых фильтров является поликор. Это анизотропный материал. Однако в Microwave Office не предусмотрено применение анизотропных материалов. Поэтому в приводимых примерах проектирования фильтров на поликоре используются значения диэлектрической проницаемости из графика (рис. 2), полученного экспериментальным путём. Эти значения нельзя считать абсолютно

точными, поскольку результирующая диэлектрическая проницаемость зависит как от частоты, так и от конструктивных параметров (размеров и структуры топологии, ширины полосок, расстояния между полосками в связанных линиях, толщины подложки). Для поликоровых пластин толщиной 0,5 и 1,0 мм значения, взятые из графика рис. 2, обычно дают расчётную характеристику более близкую к экспериментальной по сравнению со стандартным значением 9,8. Для более тонких пластин значения результирующей диэлектрической проницаемости, взятые из этого графика, видимо, будут завышены. Такая неопределённость в выборе значения диэлектрической проницаемости может стать одной из причин необходимости экспериментальной проверки спроектированного фильтра. Обычно для этого достаточно изготовления одного макета.

В большинстве приводимых примерах проектирования фильтров СВЧ для подложек используются пластины из поликора. В этих примерах материал подложек не указывается. Если для подложки используется другой материал, то он указывается в примере проектируемого фильтра.

В некоторых примерах используется оптимизация схемы. При попытке повторить описанную процедуру оптимизации, её результат может отличаться от результата, полученного в примере. Результат оптимизации зависит от выбора метода оптимизации, от начальных установок для оптимизации и от принципа работы оптимизатора. Если оптимизатор выбирает начальную точку случайным образом, то процесс оптимизации может сходиться к другому минимуму. Процедура синтеза фильтра путём подбора значений параметров схемы (что и делает оптимизатор) не является однозначной и характеристика, удовлетворяющая поставленным требованиям, может быть получена при различных значениях этих параметров. При необходимости можно выполнить несколько вариантов оптимизации, используя различные методы оптимизации и при различных начальных значениях параметров. В Microwave Office имеется возможность запомнить все выполненные варианты оптимизации и затем выбрать лучший из них. Аналогично можно запомнить несколько вариантов ручной настройки схемы и выбрать лучший из них. Выполнять всё это имеет смысл в том случае, если есть уверенность, что схема с хорошей точностью отражает реальную топологию фильтра и можно надеяться на уменьшение времени на доработку элементов топологии.

В ряде примеров приводятся экспериментальные результаты для сравнения с расчётными данными. Характеристики макетов фильтров снимались на измерителе модуля коэффициента передачи и отражения P2M-18. Файл S-параметров, полученный на этом измерителе, затем импортировался в Microwave Office для сравнения с расчётной характеристикой.

Для моделирования фильтров в описываемых примерах использовалась Microwave Office версии 6.5.3. Обратите внимание, что при работе в Microwave Office раскладка клавиатуры должна быть английской. Использовать русские буквы можно в пояснениях к проекту, дважды щёлкнув мышкой по **Design Notes** в левом окне проекта.

Е.Е. Дмитриев

1. Заграждающие фильтры

1.1. Фильтр с полосой заграждения 14 – 18 ГГц

Спроектировать заграждающий фильтр, обеспечивающий ослабление сигнала не менее 35 дБ в диапазоне 14 – 18 ГГц и с полосой пропускания 1 – 10 ГГц. Для решения этой задачи выберем трёхрезонаторный фильтр на четвертьволновых разомкнутых шлейфах на подложке из поликора толщиной 0,5 мм.

1.1.1. Определение параметров микрополосковой линии.

Для создания в первом приближении схемы фильтра достаточно знать длину и ширину четвертьволновых отрезков линии с волновым сопротивлением 50 Ом на средней частоте заграждения 16 ГГц. Эти параметры можно определить в Microwave Office следующим образом.

1. Загрузите программу. Выберите в меню команду **File>New Project** и затем команду **File>Save Project As...** Сохраните проект под именем, например, **Fz14-18**. Это имя

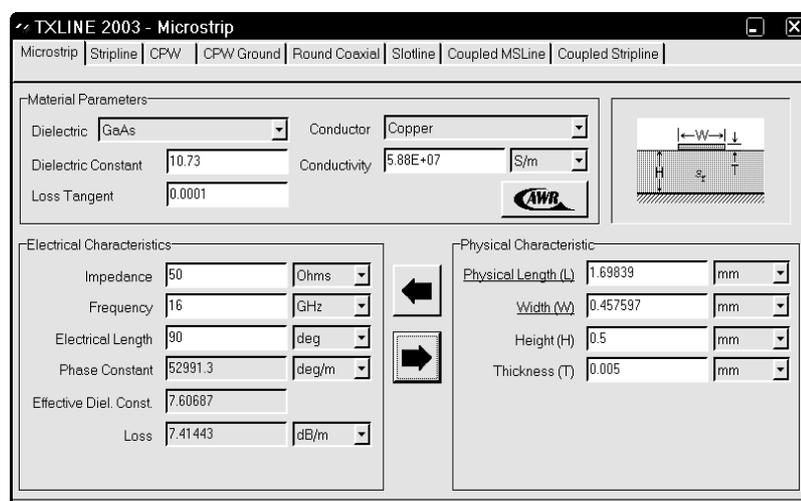


Рис. 1.1

появится в строке заголовка основного окна программы.

2. Выберите в меню команду **Tools>TXLine** и в появившемся диалоговом окне (рис. 1.1) откройте вкладку **Microstrip**.

3. В области **Material Parameters** введите следующие значения. В поле ввода **Dielectric Constant** введите значение диэлектрической проницаемости 10.73, в поле **Loss Tangent** – тангенс потерь 0.0001, в поле **Conductor** – материал проводника **Copper** (щёлкнув по кнопке в правой стороне этого поля). В области **Electrical Characteristics** введите: в поле **Impedance** – 50 Ом, в поле **Frequency** – частоту 16 ГГц, в поле **Electrical Length** – электрическую длину 90 градусов. Единицы измерения можно изменять, щёлкнув по кнопке в правой стороне соответствующего поля. В области **Physical Characteristics** в поле **Height(H)** введите толщину подложки 0.5, а в поле **Thickness(T)** – толщину проводника 0.005 мм.

4. Нажмите на кнопку со стрелкой вправо , чтобы электрические параметры пересчитать в физические.
5. В области **Physical Characteristics** в поле **Physical Length(L)** отображается длина четвертьволнового отрезка (примерно 1,7 мм), а в поле **Width(W)** – ширина проводника (примерно 0,45 мм).

1.1.2. Создание электрической схемы.

Теперь можно создать электрическую схему фильтра.

1. Выберите в меню команду **Project>Add Schematic>New Schematic** или щёлкните по значку **New Schematic**  на панели инструментов.

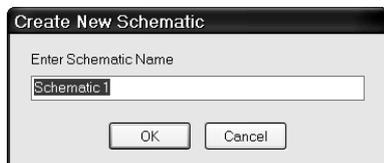


Рис. 1.2

В открывшемся окне **Create New Schematic** (рис. 1.2) введите имя схемы или оставьте имя по умолчанию. На рабочем поле основного окна Microwave Office откроется окно схемы.

2. В нижней части левого окна проекта щёлкните по кнопке **Elem**, чтобы открыть вкладку с перечнем элементов. Раскройте группу **Microstrip**, щёлкнув по значку “+” слева от этой группы или дважды щёлкнув мышкой по этой группе. Затем щёлкните по подгруппе **Lines**. В нижней части левого окна будут отображены все имеющиеся элементы микрополосковой линии. Если установить курсор мышки на линию, разделяющую левое и правое окна проекта так, чтобы курсор отображался в виде двойной стрелки, можно, нажав кнопку мышки и сдвигая курсор вправо, несколько увеличить ширину левого окна так, чтобы список элементов отображался в две колонки.
3. Найдите элемент **MLIN**, установите на него курсор мышки, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите этот элемент в окно схемы, отпустите кнопку.
4. Перемещая элемент в окне схемы мышкой, установите его в любом удобном месте окна и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы закрепить элемент.
5. Щёлкните по подгруппе **Junctions** (Разветвления) в верхней части левого окна, выберите элемент Т-соединения **МТЕЕ**, перетащите его в окно схемы, как описано выше. Поместите этот элемент в окне схемы так, чтобы его левый конец соединился с правым концом ранее установленного элемента отрезка линии, и щёлкните левой кнопкой мышки. В точке соединения элементов должен появиться зелёный квадратик, говорящий о том, что соединение создано. В противном случае установите курсор на элемент Т-соединения, нажмите левую кнопку мышки и переместите элемент так, чтобы соединение произошло.

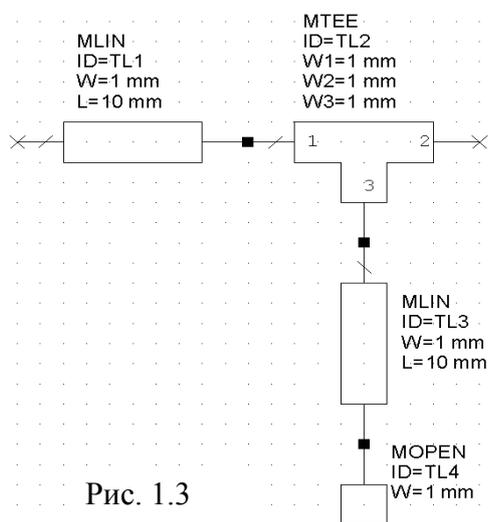


Рис. 1.3

6. Щёлкните по элементу **MLIN** на создаваемой схеме, чтобы выделить его. Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов и затем по значку **Paste**. Альтернативно, можно использовать команды меню **Edit>Copy** и **Edit>Paste**. Перемещая мышку, поместите скопированный элемент в окно схемы, три раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированный элемент на 270 градусов, и соедините его с плечом 3 элемента **МТЕЕ**, как описано выше.
7. Щёлкните по группе **Other** (Другие) в верхней части левого окна. Найдите элемент **МОПЕН**, перетащите его в окно схемы, три раза щёлкните мышкой, чтобы развернуть этот элемент. Соедините элемент **МОПЕН** с нижним концом элемента **MLIN** (**ID=TL3**). Должна получиться схема, показанная на рис. 1.3.
8. Установите курсор мышки левее и выше этой схемы, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор мышки по диагонали правее и ниже схемы так, чтобы все элементы схемы попали в образующийся прямоугольник. Отпустите кнопку мышки, все элементы схемы будут выделены. Или выберите в меню **Edit>Select All**.
9. На панели инструментов щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste**. Соедините скопированные элементы с правым концом схемы. Если после этого в окне схемы видна только часть схемы, выберите в меню команду **View> View All** или щёлкните по значку **View All** (Показать всё) на панели инструментов. Или можно, пользуясь скроллингом, сдвинуть схему влево так, чтобы видеть правый конец схемы.
10. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов снова, чтобы скопировать элементы ещё раз, и подключите их к правому концу схемы.
11. Щёлкните по первому в схеме элементу **MLIN** (**ID=TL1**), скопируйте его, переместите в окно схемы и подключите к правому концу схемы.

- Выберите в меню команду **Draw>Add Port** или щёлкните по значку **Port** . Переместите порт в окно схемы и соедините его с левым концом схемы.
- Снова щёлкните по значку **Port**, переместите порт в окно схемы, два раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы повернуть порт, и соедините его с правым концом схемы.
- Щёлкните по группе **Substrates** (Подложки) в верхней части левого окна. Найдите элемент **MSUB**, перетащите его в окно схемы и разместите в любом свободном месте схемы. Схема должна выглядеть, как показано на рис. 1.4.

1.1.3. Добавление переменных.

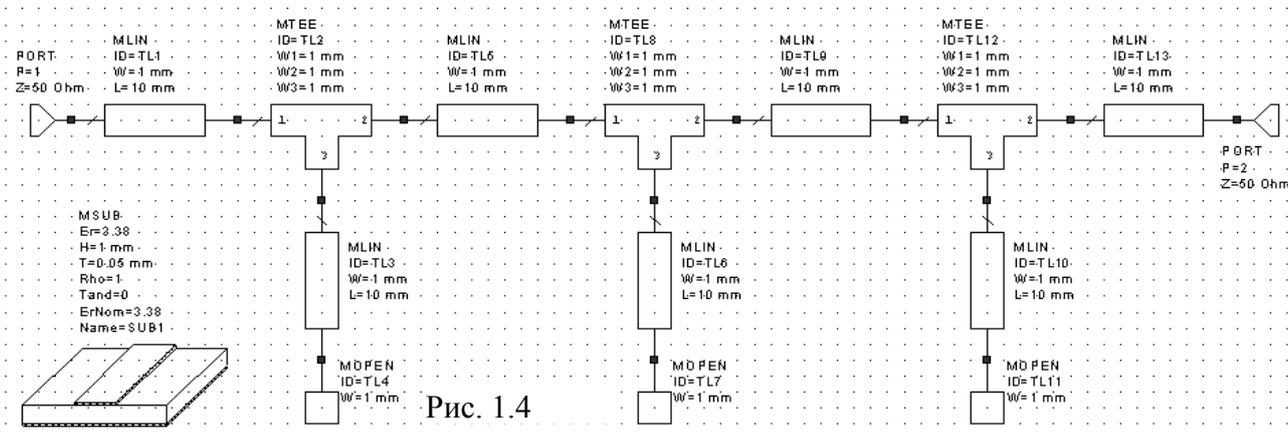


Рис. 1.4

Схема фильтра должна быть симметричной, т.е. параметры крайних шлейфов и отрезков линий между этими шлейфами должны быть одинаковыми и при настройке или оптимизации должны изменяться одинаково. Чтобы обеспечить это, введите в схему переменные следующим образом.

- Выберите в меню команду **Draw>Add Equation** или щёлкните по значку **Equation** (Уравнение)  на панели инструментов. Переместите курсор в любое свободное место в окне схемы и щёлкните левой кнопкой мышки.
- В образовавшемся поле ввода введите **WS1=0.45** и щёлкните левой кнопкой мышки где-либо на свободном месте в окне схемы.
- Повторите шаги 1 и 2 и аналогично введите **LS1=1.7**.
- Аналогично добавьте переменные **WS2=0.45**, **LS2=1.7**, **WL=0.45** и **LL=1.7**.

1.1.4. Редактирование элементов схемы.

- Дважды щёлкните по первому элементу **MLIN** схемы. Откроется диалоговое окно свойств элемента рис. 1.5. На вкладке **Parameters** в поле **W** введите **0.45**, а в поле **L** введите **3**. Нажмите **OK**.
- Дважды щёлкните по элементу **MLIN (ID=TL5)** между первым и вторым шлейфами.

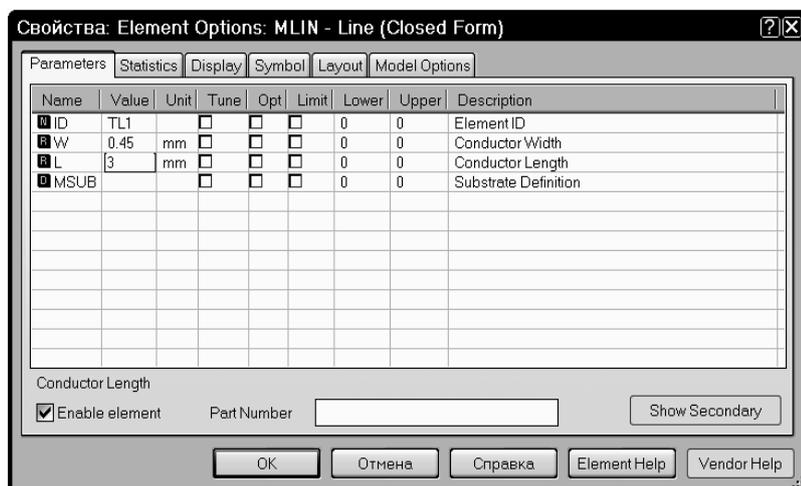


Рис. 1.5

- В открывшемся окне в поле **W** введите **WL**, а в поле **L** введите **LL**. Нажмите **OK**.
- Дважды щёлкните по первому шлейфу (элемент **MLIN, ID=TL3**). В открывшемся окне в поле **W** введите **WS1**, а в поле **L** введите **LS1**. Нажмите **OK**.

4. Дважды щёлкните по первому элементу **MTEE**. Откроется диалоговое окно свойств

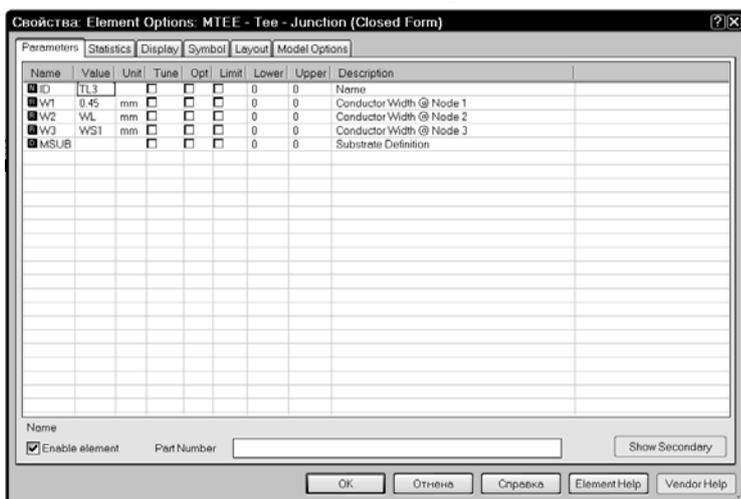


Рис. 1.6

В поле **W1** введите **0.45**, в поле **W2** введите **WL**, в поле **W3** введите **WS1**. Обратите внимание, ширина проводников узлов элемента **MTEE** должна быть такой же, как ширина соответствующих подсоединённых проводников. Нажмите **OK**.

5. Дважды щёлкните по первому элементу **MOPEN** и в поле **W** введите **WS1**. Нажмите **OK**.

6. Дважды щёлкните по второму шлейфу (элемент **MLIN**, ID=**TL6**). В поле **W** введите **WS2**, а в поле **L** введите **LS2**.

7. Аналогично отредактируйте все остальные элементы схемы.

8. Дважды щёлкните по элементу подложки **MSUB**. В открывшемся окне свойств элемента в поля **Er** и **ErNom** введите **10.73**, в поле **H** введите **0.5**, в поле **T** введите **0.005**, в поле **Tand** введите **0.0001**. Нажмите **OK**.

Должна получиться схема, показанная на рис 1.7.

Замечание. В схеме использованы элементы **MTEE** и **MOPEN** только для того, что-

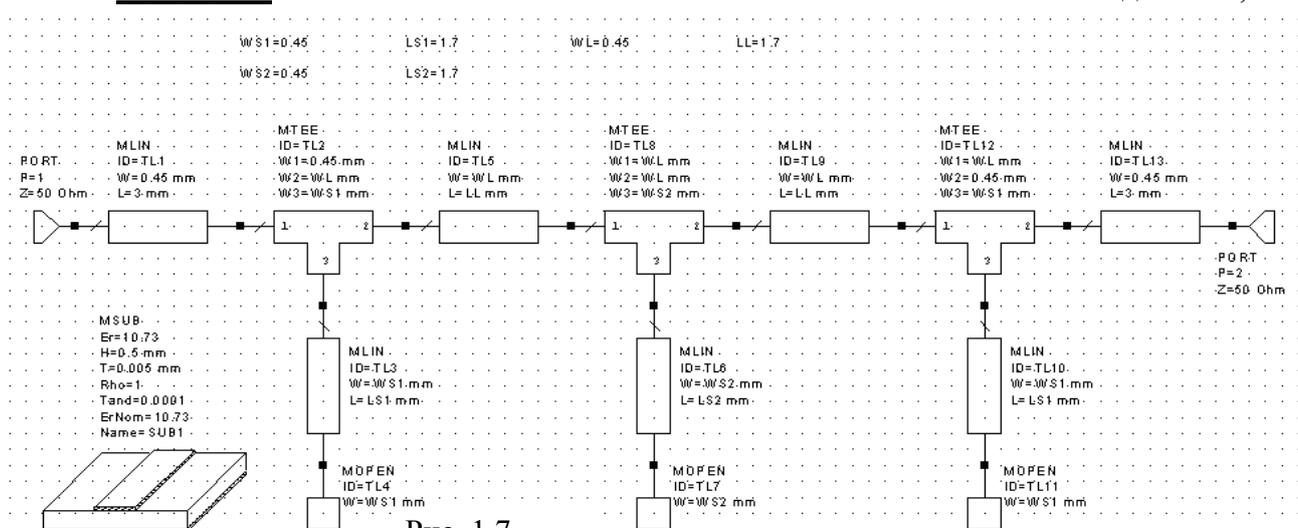


Рис. 1.7

бы показать пример редактирования параметров подобных элементов. На практике обычно лучше использовать вместо них элементы **MTEES** и **MOPENS**. По своему назначению это точно такие же элементы, но они являются 'интеллектуальными', т.е. для них не требуется ввода никаких параметров. Все необходимые значения эти элементы получают автоматически из подсоединённых к ним отрезков линий. Чтобы изменить схему, откройте вкладку элементов в левом окне, нажав на кнопку **Elem**. Щёлкните по элементу **MTEE** в схеме и нажмите клавишу **Delete**, чтобы удалить этот элемент. Из списка элементов в левом окне перетащите в окно схемы элемент **MTEES**, как описывалось ранее, и установите его вместо удалённого элемента. Аналогично замените все элементы **MTEE** и **MOPEN** на элементы **MTEES** и **MOPENS**. Переменные **WS2** и **LS2** были введены только потому, что эти параметры среднего шлейфа при оптимизации или настройке должны изменяться одинаково в трёх элементах: **MTEE**, **MLIN** и **MOPEN**. Поскольку теперь элементы **MTEES** и **MOPENS** получают значения параметров автоматически, от этих переменных можно отказаться. Щёлкните по переменной **WS2** и нажмите клавишу **Delete**. Аналогично удалите переменную **LS2**. Щёлкните по элементу **MLIN** среднего шлейфа (ID=**TL6**) и измените параметры **W** на **0.45** мм и **L** на **1.7**

мм. Изменённая схема с элементами **MTEES** и **MOPENS**, полностью идентичная предыдущей схеме, показана на рис. 1.8. В дальнейшем мы будем использовать эту схему.

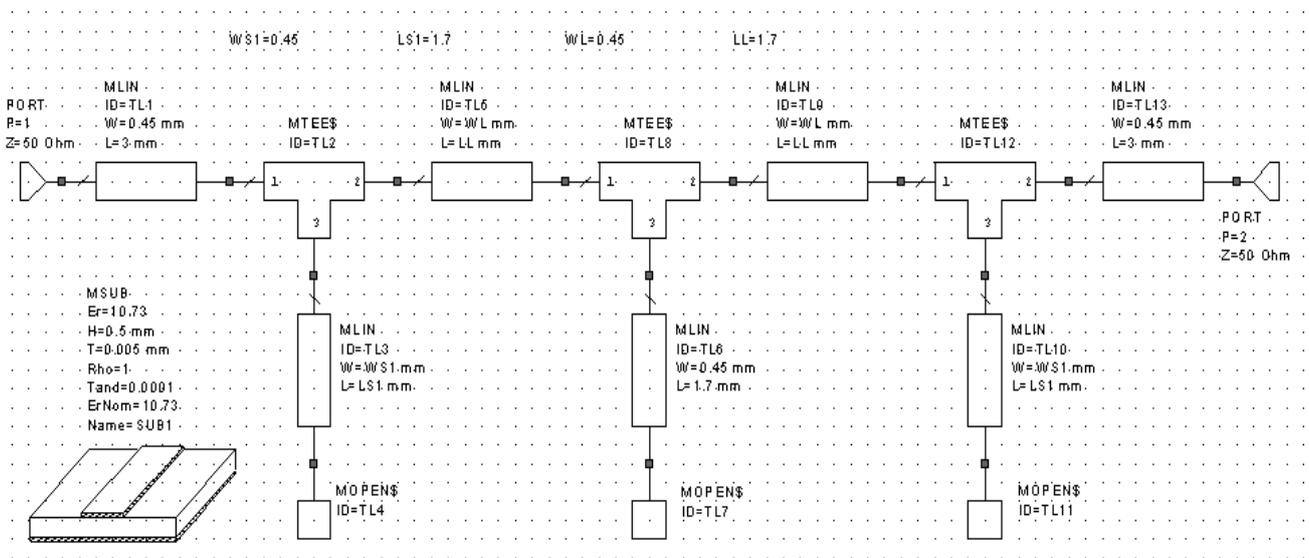


Рис. 1.8

1.1.5. Создание графика.

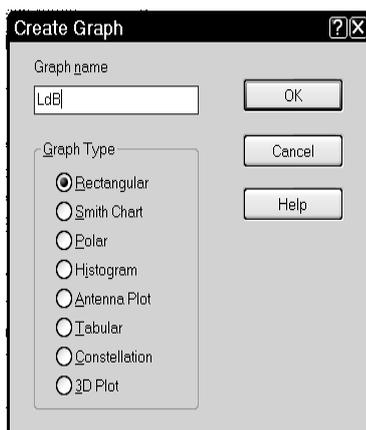


Рис. 1.9

1. Выберите в меню команду **Project>Add Graph** или щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов. В открывшемся окне **Create Graph** (рис. 1.9) в поле **Graph name** введите имя графика, например, **LdB**. В области **Graph Type** отметьте **Rectangular** (Прямоугольный). Нажмите **OK**. На рабочем поле откроется окно графика, а в левом окне в группе **Graphs** появится значок созданного графика с именем **LdB**.
2. Откройте в левом окне вкладку **Proj**. Щёлкните правой кнопкой по значку графика **LdB** в левой части окна и в появившемся всплывающем меню выберите команду **Add Measurement** (Добавить измерение) или щёлкните по значку **Add Measurement** на панели инструментов.

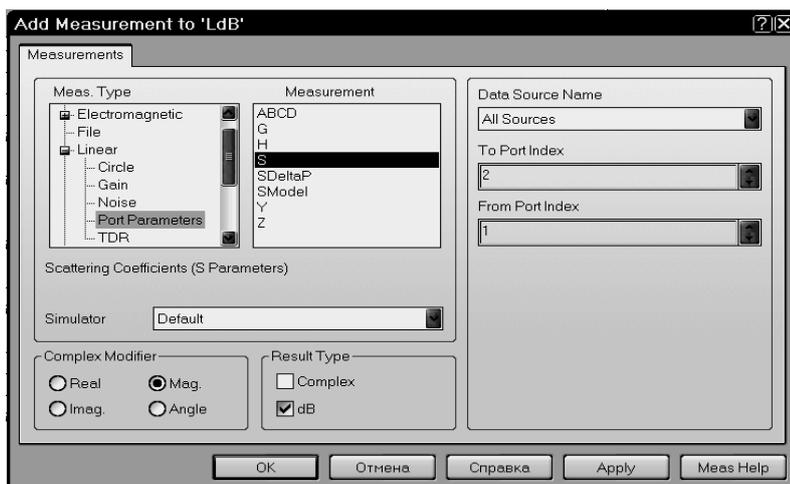


Рис. 1.10

Откроется диалоговое окно **Add Measurement to 'LdB'** (рис. 1.10).

3. В области **Meas. Type** отметьте **Port Parameters**, в области **Measurement** отметьте **S**. В поле **Data Source Name** (Имя источника данных) можно, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля, установить имя созданной схемы. В этом случае всегда будет отображаться график только для этой схемы. Учитывая, что в дальнейшем мы будем создавать электромагнитную структуру, оставьте значение по умолчанию **All Sources** (Все источни-

ки), чтобы отображать графики и для схемы, и для электромагнитной структуры чтобы их можно было сравнивать.

4. В поле **To Port Index** (Индекс входного порта) введите **2**, в поле **From Port Index** (Индекс выходного порта) введите **1**, щёлкая по кнопкам в правом конце поля. В области **Complex Modifier** (Форма комплексного числа) отметьте **Mag** (Модуль). В области **Result Type** (Тип результата) отметьте **dB**. Нажмите кнопки **Apply** (Применить) и затем **OK**.

1.1.6. Определение диапазона частот и проведение анализа.

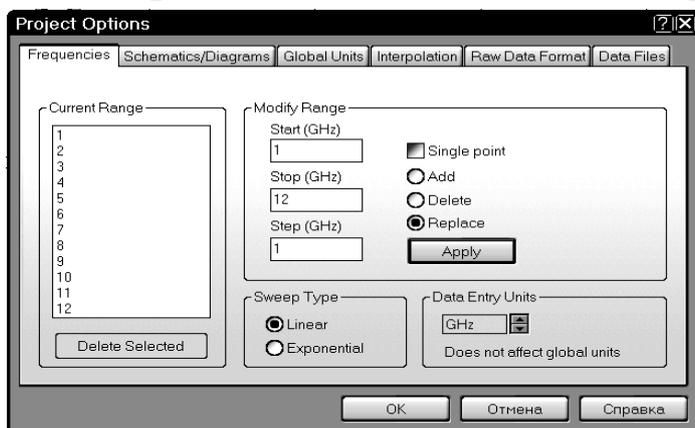


Рис. 1.11

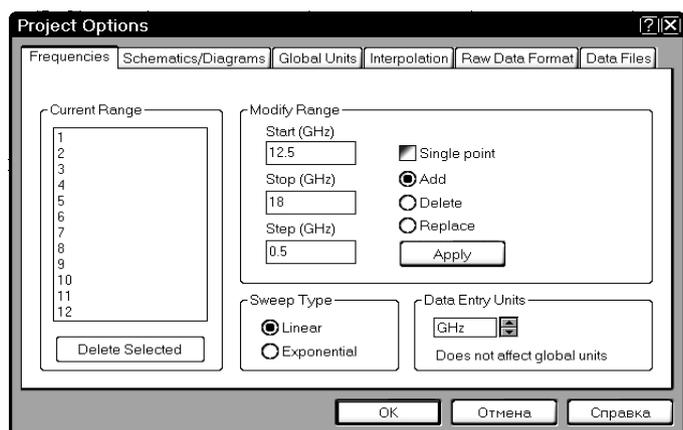


Рис. 1.12

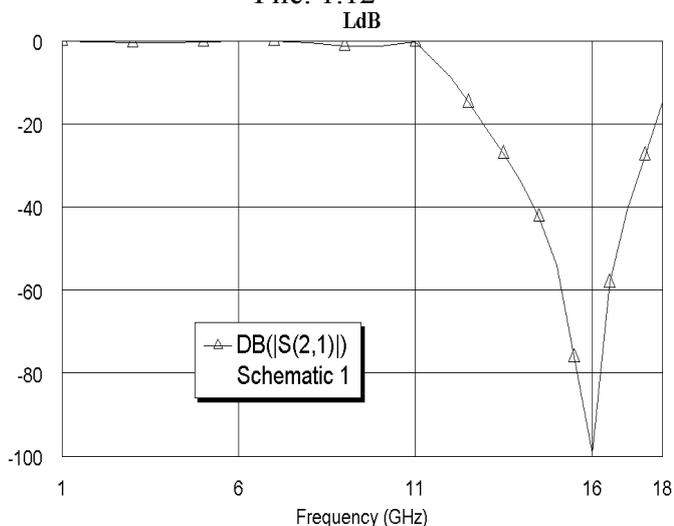


Рис. 1.13

1. Дважды щёлкните по **Project Options**. Откроется диалоговое окно **Project Options** (рис. 1.11).
2. В области **Modify Range** (Изменить диапазон) отметьте **Replace** (Заменить). В поле **Start(GHz)** введите **1**, в поле **Stop(GHz)** введите **12**, в поле **Step (Шаг)** введите **1**. Нажмите **Apply**.
3. В диапазоне заграждения лучше характеристику отобразить точнее, т.е. с более мелким шагом. Поэтому отметьте **Add** (Добавить) и затем в поле **Start(GHz)** введите **12.5**, в поле **Stop(GHz)** введите **18** и в поле **Step** введите **0.5** (рис. 1.12). Нажмите **Apply** и затем **OK**.
4. Для проведения анализа созданной схемы выберите в меню команду **Simulate>Analyze** или щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 1.13.

В прямоугольнике на графике отображается измеряемая величина **DB(|S(2,1)|)** и имя схемы, для которой создан график (**Schematic 1**). Если щёлкнуть по этому прямоугольнику, чтобы выделить его, затем установить на него курсор, нажать левую кнопку мышки и, не отпуская кнопку, перемещать мышку, можно переместить этот прямоугольник в любое место, удобное для отображения характеристики. В выделенном прямоугольнике на серединах сторон отображаются небольшие ромбики, а по углам квадратики. Установив курсор на ромбик или квадратик так, чтобы он отображался в виде двойной стрелки, можно, нажав левую кнопку мышки, изменять размеры

этого прямоугольника. При этом параметры шрифта внутри прямоугольника изменяются автоматически.

Параметры графика, включая тип и цвет кривых, пределы и шаг переменных по осям, шрифты и т.д., можно изменить в любое время. Для этого окно графика должно быть активным.

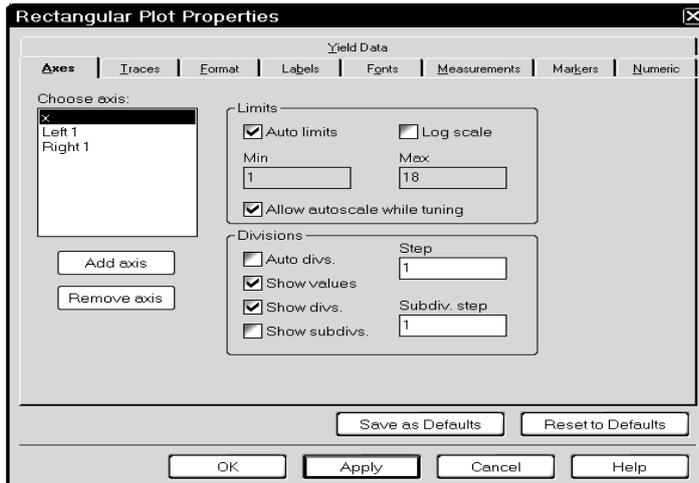


Рис. 1.14

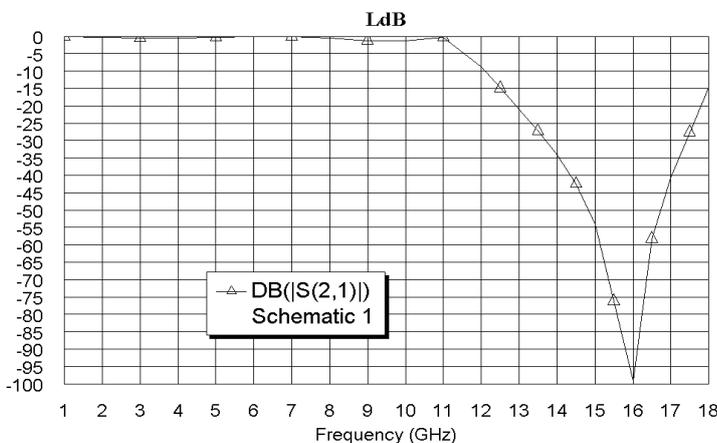


Рис. 1.15

Установите курсор в любое место в окне графика и щёлкните правой кнопкой мышки. В открывшемся меню выберите команду **Properties** (Свойства). Или щёлкните по значку **Properties**. Откроется диалоговое окно свойств графика, вид которого зависит от типа графика. В нашем случае это будет окно **Rectangular Plot Properties** (Свойства прямоугольного графика), показанное на рис. 1.14. Здесь, например, можно сделать следующее.

1. На вкладке **Axes** (Оси) в области **Choose axis** (Выбрать ось) отметьте **x**. В области **Divisions** (Деления) снимите “галочку” в **Auto divs** и введите в поле **Step** значение **1**, нажмите **Apply**.
2. На вкладке **Axes** в области **Choose axis** отметьте **Left 1** (Левая 1). В области **Divisions** снимите “галочку” в **Auto divs** и введите в поле **Step** значение **5**, нажмите **Apply**. Нажмите **OK**.

Полученный график показан на рис. 1.15.

1.1.7. Назначение переменных и параметров элементов для оптимизации.

В процессе оптимизации должны изменяться длина и ширина шлейфов и отрезков линии между шлейфами. Т.е. мы должны назначить для оптимизации все добавленные к схеме переменные и параметры элемента **MLIN** среднего шлейфа.

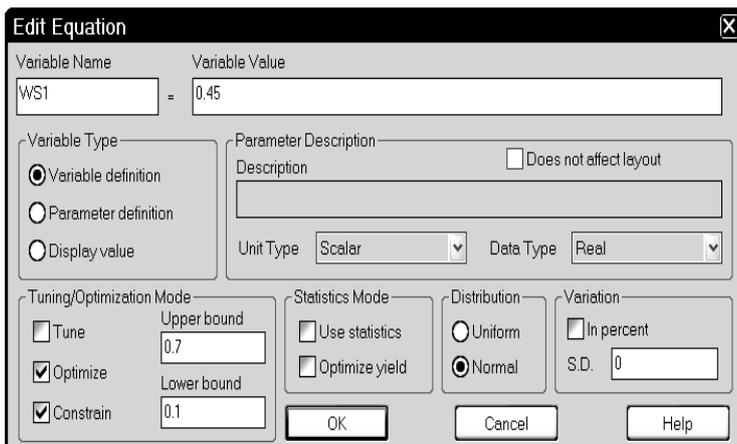


Рис. 1.16

strain (Ограничить). В поле **Upper bound** (Верхняя граница) введите **0.7**. В поле **Lower bound** введите **0.1**. Нажмите **OK**.

3. Аналогично назначьте для оптимизации переменную **WL** и определите такие же границы изменений значения для этой переменной, как и для переменной **WS1**.

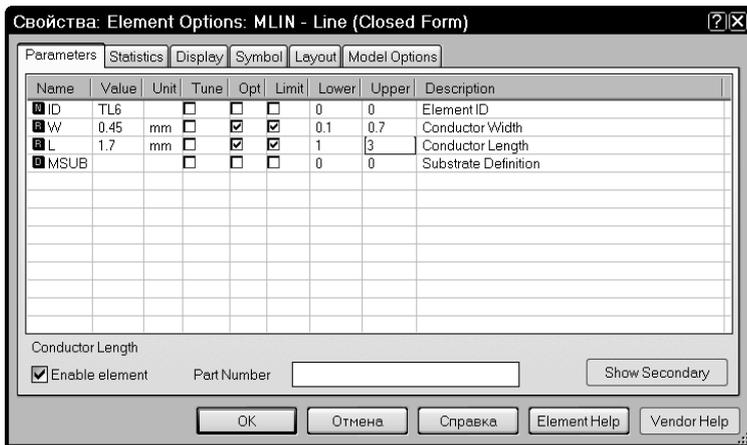


Рис. 1.17

Установите верхний предел (**Upper**) **0.7** для **W** и **3** для **L**. Нажмите **OK**.

1.1.8. Определение целей оптимизации.

В качестве целей оптимизации для данного фильтра установим диапазоны полос пропускания и заграждения и допустимое значение модуля S_{21} в этих диапазонах. Откройте окно графика, дважды щёлкнув по его имени **LdB** в левом окне проекта.

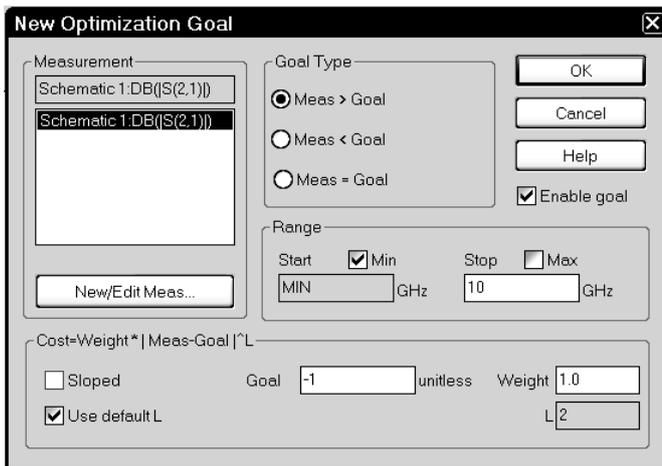


Рис. 1.18

полосы пропускания). В поле **Goal** введите **-1** (допустимое ослабление в полосе пропускания). Нажмите **OK**.

- Теперь введём цель в полосе заграждения. Снова щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Optimizer Goals** и в открывшемся меню выберите **Add Opt Goal**.

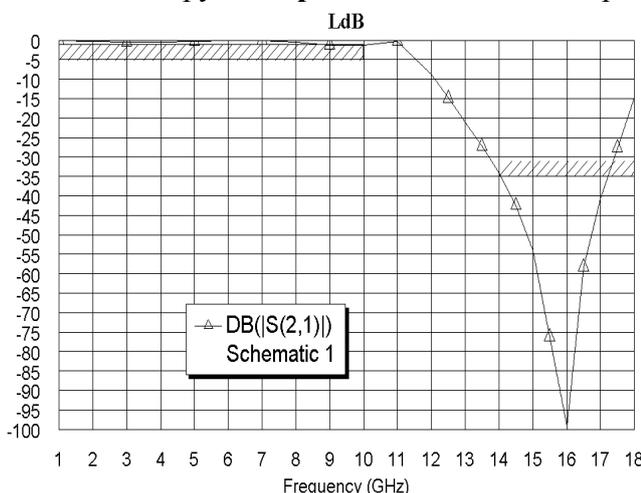


Рис. 1.19

- Аналогично назначьте для оптимизации переменные **LS1** и **LL** и определите для них верхнюю границу **3** и нижнюю границу **1**.

- Дважды щёлкните по элементу **MLIN** среднего шлейфа (**ID=TL6**). Откроется диалоговое окно свойств элемента (рис. 1.17). Отметьте столбцы **Opt** и **Limit** для параметров **W** и **L**. Установите нижний предел (**Lower**) **0.1** для **W** и **1** для **L**. Установите верхний предел (**Upper**) **0.7** для **W** и **3** для **L**. Нажмите **OK**.

- Сначала введём цель в полосе пропускания. Щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Optimizer Goals** (Цели оптимизации) на вкладке **Proj** в левом окне проекта. В открывшемся меню выберите **Add Opt Goal**. Откроется диалоговое окно **New Optimization Goal** (рис. 1.18).

- Здесь характеристика должна быть расположена выше допустимого значения, поэтому отметьте **Meas > Goal**. В области **Range** снимите “галочку” **Max** и в поле **Stop** введите **10 GHz** (верхняя частота

- Здесь характеристика должна быть расположена ниже допустимого значения, поэтому в открывшемся окне отметьте **Meas < Goal**. В области **Range** снимите “галочки” в **Max** и **Min**. В поле **Start** введите **14 GHz**, а в поле **Stop** введите **18 GHz**. В поле **Goal** введите **-35**. Нажмите **OK**.

После установки целей, их имена отображаются как подгруппы в группе **Optimizer Goals**, а сами цели отображаются на графике, как показано на рис. 1.19. Обратите внимание, что направление штриховки указывает на недопустимые значения характеристики.

Установленные ошибочно цели можно изменить. Для этого щёлкните правой кнопкой мышки по имени цели в левом окне проекта и выберите **Properties**. Откроется диалоговое окно, аналогичное рис. 1.18, в котором можно изменить установки цели.

Отредактировать цель можно и непосредственно на графике. Для этого щёлкните по цели левой кнопкой мышки, чтобы выделить её. Если установить курсор на выделенную цель и нажать левую кнопку мышки, можно перемещать цель по графику. Если установить курсор на синий прямоугольник в углу выделенной цели и нажать левую кнопку мышки, можно изменять границы цели.

1.1.9. Выполнение оптимизации.

Для выполнения оптимизации:

1. Выберите в меню команду **Simulate>Optimize**. Откроется окно **Optimizer** (рис. 1.20).

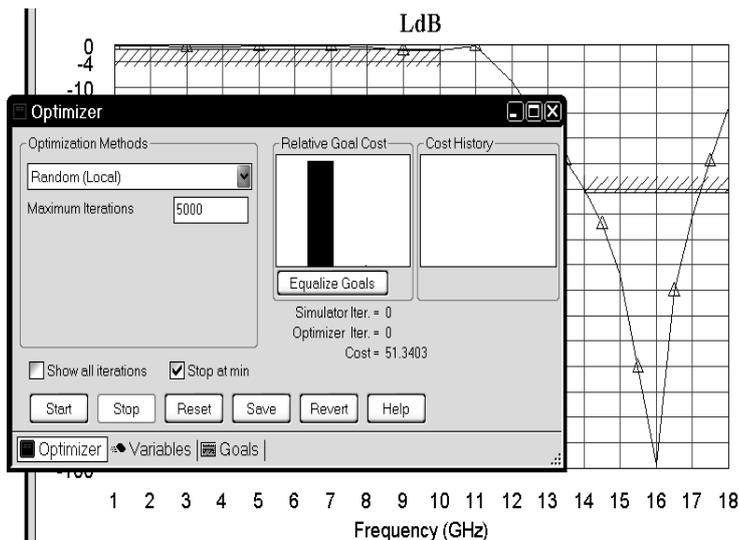


Рис. 1.20

В процессе выполнения оптимизации в области **Relative Goal Cost** отображается относительная значимость целей. В нашем случае видно, что значимость одной из целей (в полосе заграждения) намного превышает значимость другой, настолько, что второй цели просто не видно. Это объясняется тем, что в полосе пропускания характеристика почти удовлетворяет цели оптимизации.

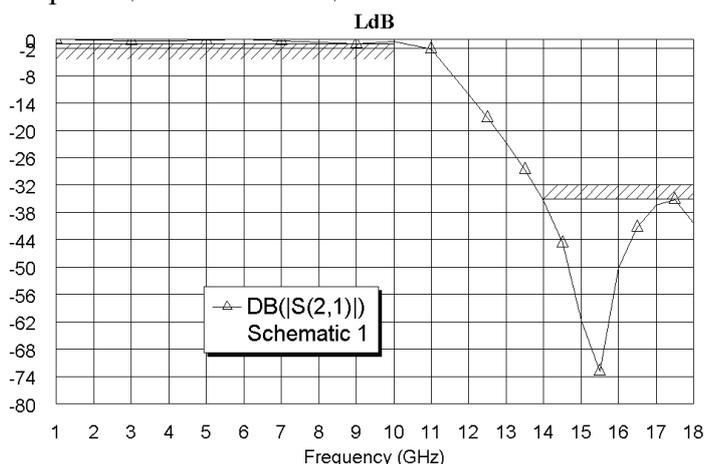


Рис. 1.21

Щёлкните по подгруппе схемы (**Schematic 1**) в группе **Circuit Schematics** в левом окне проекта, чтобы сделать активным окно схемы. Полученная после оптимизации схема показана рис. 1.22. В нашем случае переменные получили значения $WS1=0.3404$, $LS1=1.779$, $WL=0.3852$ и $LL=1.922$. Параметры среднего шлейфа получили значения $W=0.6488$ и $L=1.505$. При создании электромагнитной структуры размеры элементов топологии должны быть кратны размерам клеток в сетке. Предварительно примем размер клеток 0,05 мм. Соответственно мы должны округлить значения переменных и параметров среднего шлейфа. Изменим эти значения следующим образом: $WS1=0.35$, $LS1=1.8$, $WL=0.35$, $LL=1.9$, $W=0.65$ и $L=1.5$. Дважды щёлкните по переменной **$WS1=0.3404$** и измените её значение на

- Щёлкнув по кнопке в правом конце поля ввода **Optimization Methods**, выберите один из методов оптимизации, например, **Random (Local)**.
- В поле **Maximum Iterations** введите желаемое максимальное количество итераций при оптимизации или оставьте значение по умолчанию. Нажмите **Start**.

В процессе выполнения оптимизации в области **Relative Goal Cost** отображается относительная значимость целей. В нашем случае видно, что значимость одной из целей (в полосе заграждения) намного превышает значимость другой, настолько, что второй цели просто не видно. Это объясняется тем, что в полосе пропускания характеристика почти удовлетворяет цели оптимизации.

В области **Cost History** отображается график изменения целевой функции в процессе оптимизации.

Полученный после оптимизации график показан на рис. 1.21. Из этого графика видно, что поставленные в задании требования выполняются. В зависимости от выбранного метода оптимизации и других установок в окне рис. 1.20 результаты оптимизации могут несколько отличаться от полученных здесь.

Щёлкните по подгруппе схемы (**Schematic 1**) в группе **Circuit Schematics**

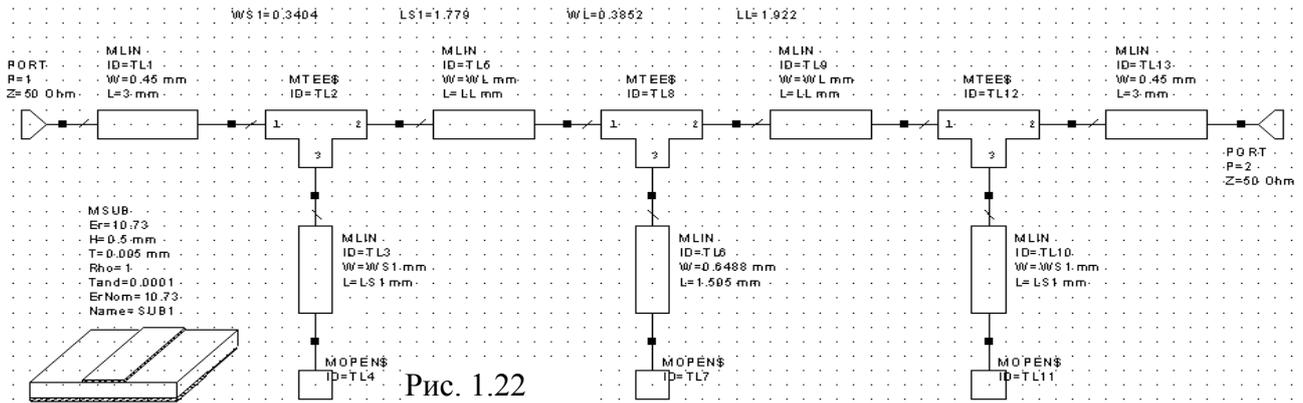


Рис. 1.22

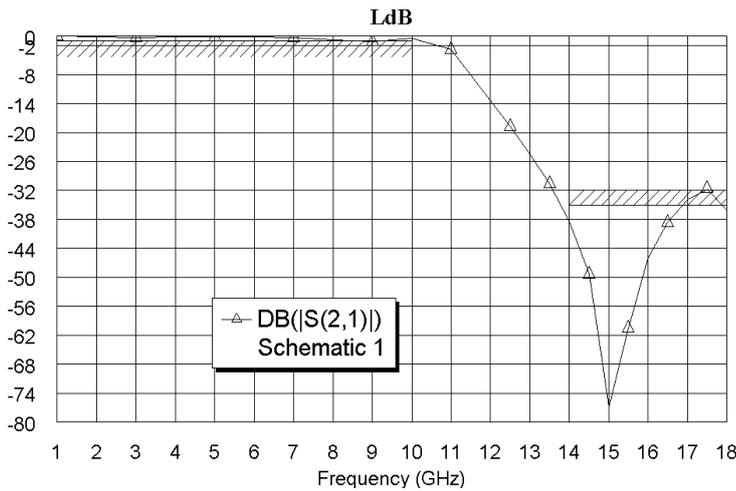


Рис. 1.23

рументов. Полученный график показан на рис. 1.23.

1.1.10. Создание электромагнитной структуры.

Электромагнитная структура топологии фильтра может быть создана различными способами. Мы здесь рассмотрим два:

- Использование топологии схемы с последующим копированием её и вставкой в редактор электромагнитных структур.
- Черчение топологии непосредственно в редакторе электромагнитных структур.

Чтобы получить топологию схемы:

1. Щёлкните по имени схемы (**Schematic 1**) в группе **Circuit Schematics** в левом окне проекта, чтобы сделать активным окно схемы.

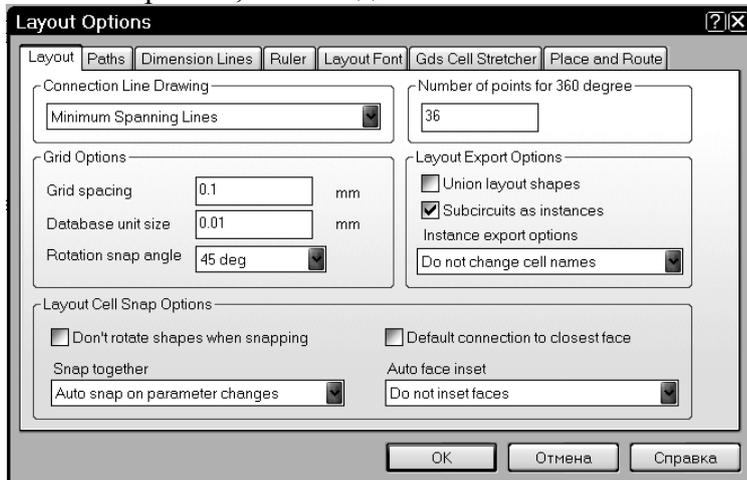


Рис. 1.24

0.35, затем щёлкните на свободном месте в окне схемы. Аналогично измените значения остальных переменных. Дважды щёлкните по параметру **W** в среднем шлейфе, измените его значение на 0.65 и щёлкните на свободном месте в окне схемы. Аналогично измените значение параметра **L** на 1.5. Щёлкните по имени графика **LdB** в левом окне проекта, чтобы сделать активным окно графика (он будет отображаться бледным цветом, указывающим, что с новыми параметрами анализ не проводился). Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов.

2. Выберите в меню команду **Options> Layout Options**. Откроется окно установки опций топологии (рис. 1.24). На вкладке **Layout** этого окна в поле ввода **Snap together** (Связать вместе) введите опцию **Auto snap parameter changes** (Автоматически изменять параметры привязки), щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля, и нажмите **OK**. Выберите в меню команду **View>New Layout View** или

щёлкните по значку **New Schematic Layout View**  на панели инструментов. Откроется окно с топологией схемы (рис. 1.25). Элементы топологии могут располагаться беспорядочно, но соединения между ними указываются правильно (красными пунктирными линиями). Чтобы исправить топологию, выделите все элементы топологии, выбрав в меню команду **Edit> Select All**. Затем выберите в меню команду **Edit> Snap Together** или щёлкните по значку **Snap Together**  на панели инструментов. Исправленная топология показана на рис. 1.26.

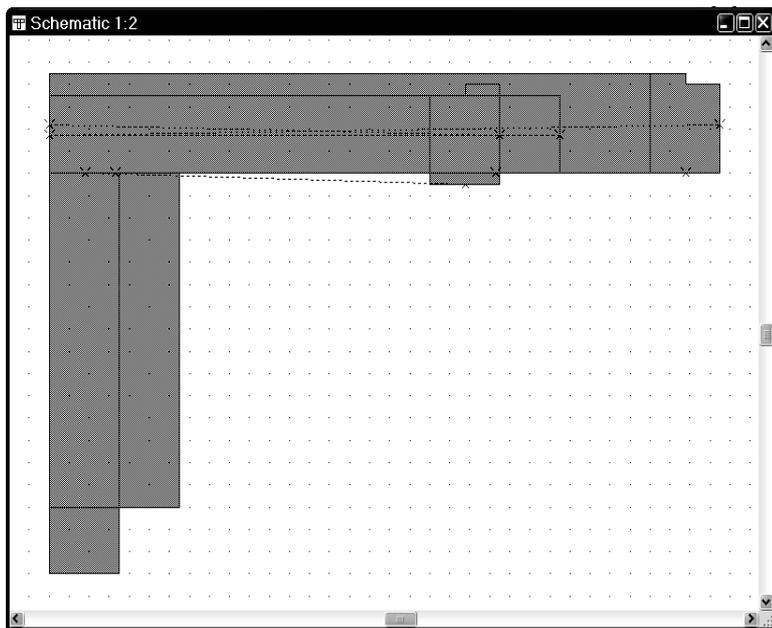


Рис. 1.25

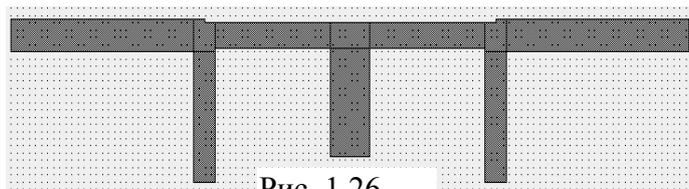


Рис. 1.26

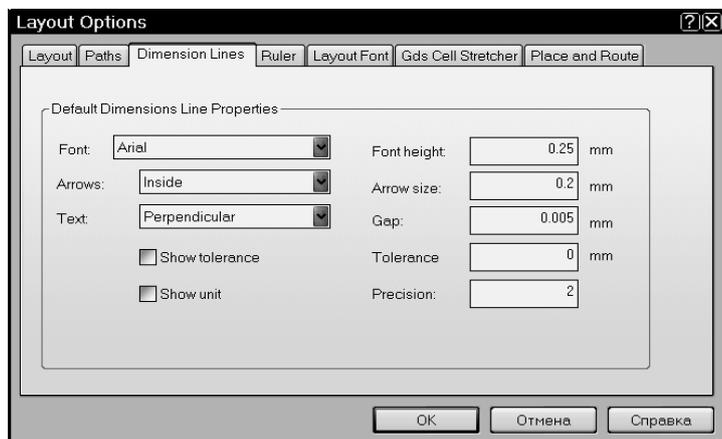


Рис. 1.27

после запятой) введите **2**. Нажмите **OK**. Выберите в меню команду **Draw>Dimension Line** или щёлкните по значку **Dimension Line**  на панели инструментов. Чтобы определить полную длину топологии, установите курсор на левую верхнюю точку входного проводника, нажмите на левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор на правую верхнюю точку выходного проводника. Отпустите кнопку. Двигая мышку, установите измерительную линию в позицию, удобную для наблюдения, и щёлкните левой кнопкой мышки. Аналогично можно определить любые размеры топологии. Топология фильтра с установленными размерами показана на рис. 1.28.

топологии, выбрав в меню команду **Edit> Select All**. Затем выберите в меню команду **Edit> Snap Together** или щёлкните по значку **Snap Together**  на панели инструментов. Исправленная топология показана на рис. 1.26.

- Щёлкните по кнопке в правом конце поля **Set Grid Snap Multiple** (Установить кратность привязки сетки) **0.1x**  на панели инструментов и установите **0.1**.

- На полученной топологии можно обозначить размеры, которые в данном случае нужны для определения необходимых размеров корпуса в электромагнитной структуре и для черчения топологии, если её чертить непосредственно в редакторе электромагнитной

структуры. Сначала определите размер стрелок и шрифтов для удобного наблюдения размеров топологии. Выберите в меню команду **Options> Layout Options**. Откроется окно установки опций топологии. На вкладке **Dimension Lines** (Измерительная линия) этого окна (рис. 1.27) в поле **Font height** (Высота шрифта) введите **0.25**. В поле **Arrow size** (Размер стрелки) введите **0.2**. В поле **Precision** (Точность, т.е. количество знаков

5. Выберите в меню команду **Project>Add EM Structure>New EM Structure** или

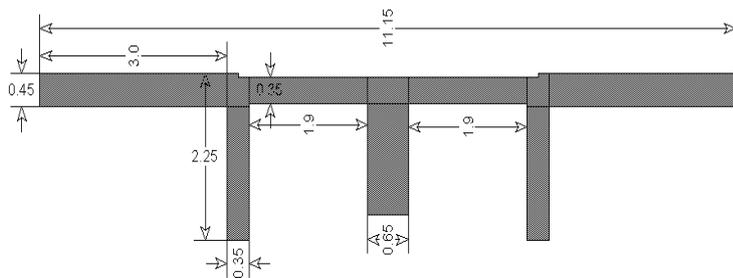


Рис. 1.28

щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов. Откроется окно **New EM Structure** (рис. 1.29). В поле **Enter a name for the EM Structure** введите имя структуры, например **FZ**, и нажмите **Create**. На рабочем поле

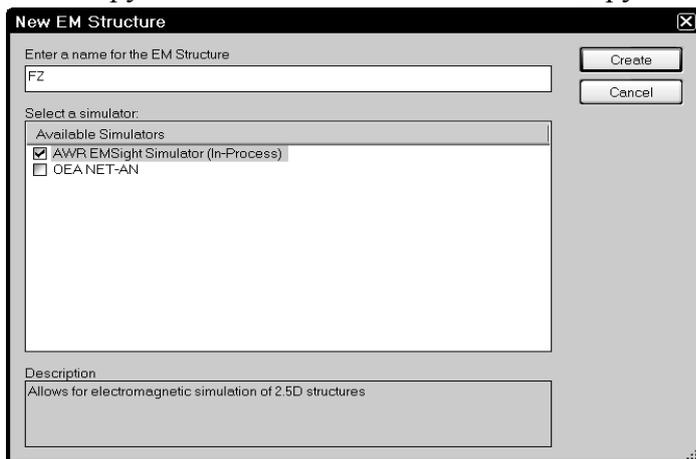


Рис. 1.29

6. В этой же группе **EM Structures** имеется подгруппа **Materials**, в которой отображаются все используемые в проекте материалы. Если дважды щёлкнуть по имени любого материала или щёлкнуть по нему правой кнопкой мышки и выбрать **Properties**, можно отредактировать свойства этого материала. Также можно добавить в проект любое количество других материалов. Щёлкните правой кнопкой мышки по подгруппе **Materials** и выберите **Add New Material**. Откроется окно **Create New Material** (рис. 1.30). В поле **Material name** введите имя материала **Copper** (Медь). Отметьте **Physical parameters**. В поле **Conductor thickness** (Толщина проводника) введите **0.005** мм. В поле **Material conductivity** (Проводимость материала) введите **5.88e7**. Щёлкнув по кнопке **Edit**, можно изменить цвет материала. Нажмите **OK**. Аналогично добавьте материал **Aluminum**

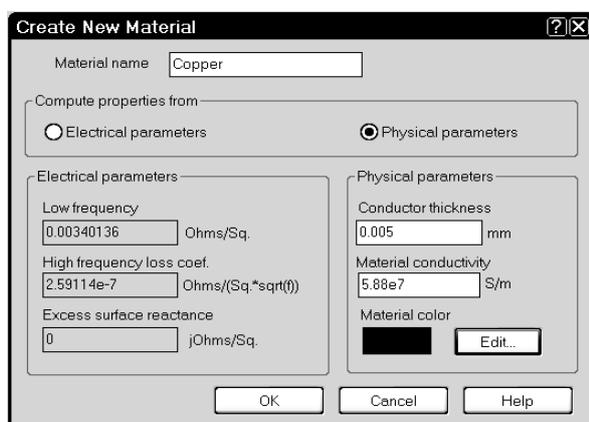


Рис. 1.30

толщиной **0.1** и проводимостью **3.53e7**. Эти материалы появятся в подгруппе **Materials**.

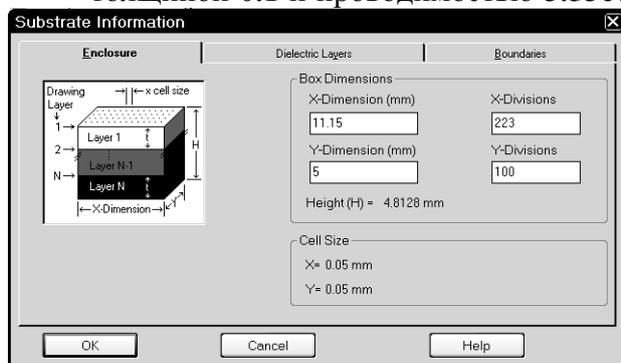


Рис. 1.31

223 (количество делений по оси X, при котором размер клетки по этой оси будет 0,05 мм). В поле **Y-Dimension(mm)** введите **5**, а в поле **Y-Divisions** введите **100**.

7. Выберите в меню команду **Structure>Substrate Information** или щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. Откроется окно **Substrate Information**.

8. На вкладке **Enclosure** (Корпус, рис. 1.31) в поле **X-Dimension(mm)** введите **11.15** (размер корпуса по оси X). В поле **X-Divisions** введите

9. На вкладке **Dielectric Layers** (Диэлектрические слои, рис. 1.32) отметьте верхнюю строку и в нижней строке редактирования в поле **Thickness** (Толщина) введите **6**.

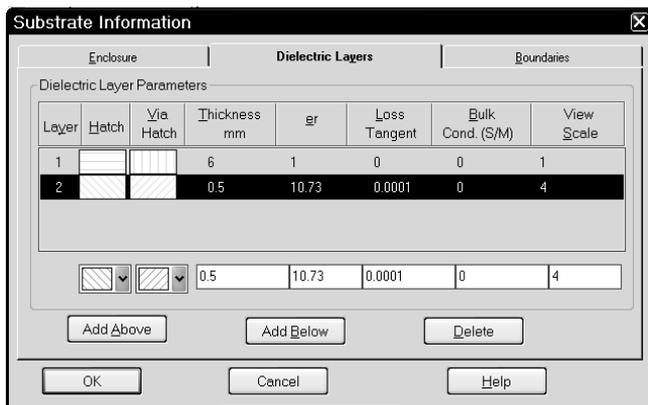


Рис. 1.32

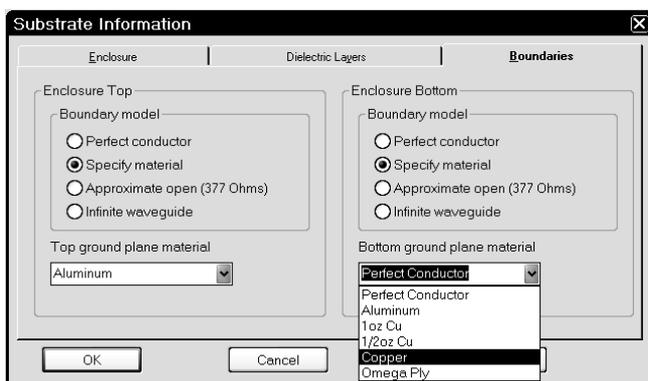


Рис. 1.33

Отметьте вторую строку и в нижней строке редактирования в поле **Thickness** введите **0.5**, в поле **er** введите **10.73**, в поле **Loss Tangent** введите **0.0001** и в поле **View Scale** (Масштаб отображения) введите **4** (чтобы при просмотре трёхмерного отображения структуры этот слой не был слишком тонким).

10. На вкладке **Boundaries** (Границы, рис. 1.33) в области **Enclosure Top** (Верх корпуса) отметьте **Specify material** и в поле **Top ground plane material** введите **Aluminum**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля. В области **Enclosure Bottom** (Низ корпуса) отметьте **Specify material** и в поле **Bottom ground plane material** введите **Copper**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля. Нажмите **OK**.

11. Сделайте активным окно топологии схемы. Это окно не отображается в левом окне проекта, поэтому сделать его активным можно, щёлкнув по нему мышкой (если это окно открыто). Если открытого окна топологии схемы на рабочем поле не видно, выберите в меню какую-нибудь команду упорядочения расположе-

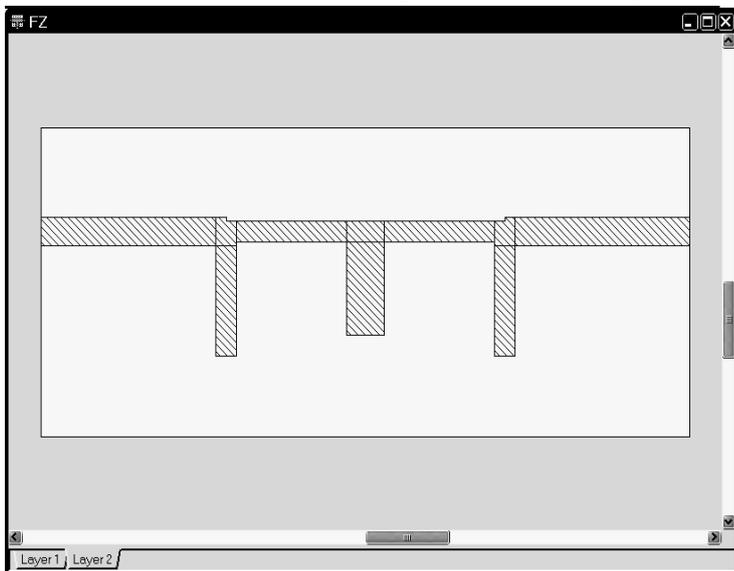


Рис. 1.34

ния окон, например **Window>Cascade**. Установите курсор мышки левее и выше топологии, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор правее и ниже топологии, чтобы выделить все элементы топологии. Или выберите в меню команду **Edit>Select All**. Затем щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов. Сделайте активным окно электромагнитной структуры, дважды щёлкнув по её имени в левом окне проекта или по окну электромагнитной структуры на рабочем поле. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов, поместите скопированную топологию в электромагнитную структуру так, чтобы края входного и выходного проводников точно совпадали с границами корпуса (рис. 1.34). Обратите внимание, границы проводников топологии должны точно совпадать с сеткой разбиения. Для этого размеры клеток сетки в редакторе топологии схемы и в редакторе электромагнитной структуры должны быть одинаковыми или кратными.

Чтобы продемонстрировать второй способ создания электромагнитной структуры фильтра мы не будем создавать новой структуры. Выделите все элементы топологии, например, выбрав в меню команду **Edit>Select All**, и удалите их, нажав клавишу **Delete**. Теперь начертим топологию непосредственно в окне редактора электромагнитной структуры, используя значения параметров элементов схемы. Чертить также можно различными способами. Можно, например, начертить сразу всю топологию, используя инструмент **Polygon Conductor**. Или можно чертить отдельными прямоугольниками. При этом начерченная топология не обязательно должна абсолютно точно совпадать с полученной ранее.

Проводники топологии чертятся точно по сетке. Поэтому удобнее, если сетка видна. Если сетка мелкая и её не видно, щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов или выберите в меню команду **View>View Area** и выделите тот участок электромагнитной структуры, на котором будет выполняться черчение.



Рис. 1.35

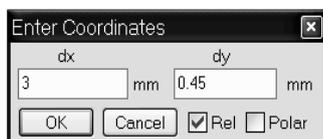


Рис. 1.36

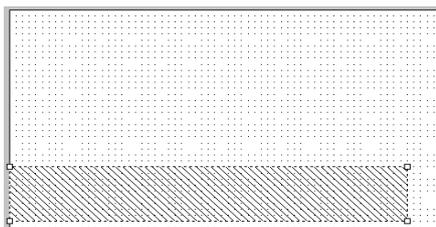


Рис. 1.37

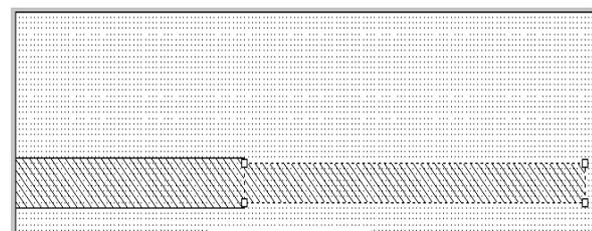


Рис. 1.38

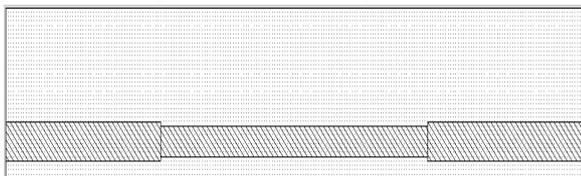


Рис. 1.39

границу рабочего поля, можно использовать клавиши перемещения курсора для скроллинга отображаемой топологии, не отпуская кнопки мышки. Переместите курсор вниз на **dy: 0.35** и снова щёлкните мышкой. Переместите курсор влево на **dx: -5.15** и дважды щёлкните мышкой, чтобы замкнуть прямоугольник. Альтернативно, можно щёлкнуть один раз, переместить курсор на **dy: -0.35** вверх и снова щёлкнуть мышкой. Полученная топология показана на рис. 1.38.

- Щёлкните по входному проводнику, чтобы выделить его. Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов и затем по значку **Paste**. Переместите скопированный прямоугольник в окно электромагнитной структуры, соедините его с правым концом второго прямоугольника и щёлкните мышкой. Полученная топология показана на рис. 1.39.

- Выберите в меню команду **Draw>Add Rect Conductor** или щёлкните по значку **Rectangle Conductor**  на панели инструментов. Поместите курсор в окно электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне **Enter Coordinates** (Ввод координат) в поле **x** введите **0**, а поле **y** введите **1.3** (рис. 1.35). Нажмите **OK**. Нажмите клавишу **Tab** снова. В новом открывшемся окне в поле **dx** введите длину входного проводника **3**, а в поле **dy** введите ширину проводника **0.45** (рис. 1.36) и нажмите **OK**. Входной прямоугольный проводник отобразится на электромагнитной структуре (рис. 1.37).

- Если пользоваться координатным вводом не очень удобно, можно использовать инструмент для создания многоугольников. Выберите в меню команду **Draw>Add Conductor** или щёлкните по значку **Polygon Conductor**  на панели инструментов. Поместите курсор на правую сторону входного проводника на 0,05 мм ниже правого верхнего угла (т.е. на одну клетку сетки) и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы закрепить эту точку. Переместите курсор вправо на **dx: 5.15** (смещение отображается рядом с курсором) и снова щёлкните мышкой. Если топология выходит за пределы окна и при этом курсор выходит за границу рабочего поля, можно использовать клавиши перемещения курсора для скроллинга отображаемой топологии, не отпуская кнопки мышки. Переместите курсор вниз на **dy: 0.35** и снова щёлкните мышкой. Переместите курсор влево на **dx: -5.15** и дважды щёлкните мышкой, чтобы замкнуть прямоугольник. Альтернативно, можно щёлкнуть один раз, переместить курсор

- Щёлкните по значку **Polygon Conductor** на панели инструментов. Поместите курсор на левый нижний угол второго проводника и щёлкните левой кнопкой мышки. Переместите курсор вправо на **dx: 0.35** и щёлкните мышкой. Переместите курсор вниз на **dy: 1.85** и щёлкните мышкой. Переместите курсор влево на **dx: -0.35** и дважды щёлкните мышкой. Полученная топология с первым шлейфом показана на рис. 1.40.

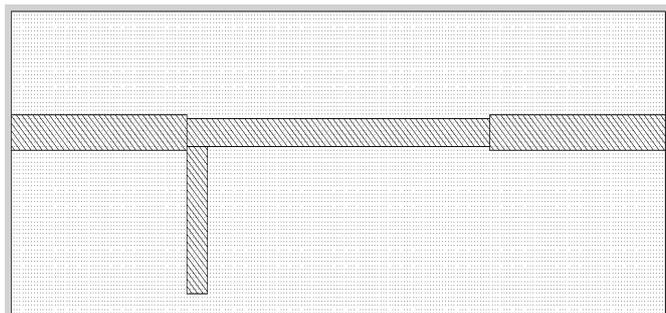


Рис. 1.40

- Щёлкните по последнему созданному прямоугольнику, чтобы его выделить (если он не выделен).

Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов и затем по значку **Paste**. Поместите скопированный прямоугольник примерно посередине среднего проводника так, чтобы его верхняя сторона касалась нижней стороны среднего проводника, и щёлкните мышкой. Измерьте расстояние между шлейфами. Для этого щёлкните по значку **Measure** (Измерение) на панели инструментов или щёлкните правой кнопкой мышки в любом месте рабочего поля и выберите команду **Measure**. Поместите курсор на верхний правый угол первого шлейфа, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор на верхний левый угол второго шлейфа и отметьте расстояние между шлейфами. Допустим, это расстояние оказалось равным 2,3 мм. Поместите курсор на второй шлейф, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите шлейф влево на **dx: -0.4**, чтобы расстояние между шлейфами было равно 1,9 мм. Дважды щёлкните по второму шлейфу. Поместите курсор на ромбик посередине правой стороны шлейфа так, чтобы он отображался в виде двойной стрелки. Нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите правую сторону шлейфа вправо на **dx: 0.3**, чтобы ширина шлейфа была равна 0,65 мм. Поместите курсор на ромбик посередине нижней стороны шлейфа так, чтобы он отображался в виде двойной стрелки. Нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите нижнюю сторону шлейфа вверх на **dy: -0.35**, чтобы длина шлейфа была равна 1,5 мм.

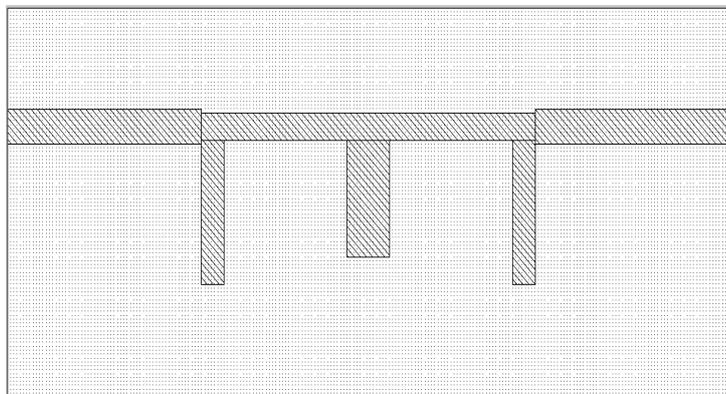


Рис. 1.41

- Снова по значку **Paste**. Поместите скопированный прямоугольник в конце среднего проводника. Полученная топология показана на рис. 1.41.
- Выделите всю топологию, щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу топологии и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне выберите материал **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.

Проверить правильность размеров топологии можно, используя инструмент **Measure**, как указывалось выше.

1.1.11. Установка портов и анализ электромагнитной структуры.

- Щёлкните по входному проводнику топологии, чтобы выделить его. Выберите в меню команду **Draw>Add Edge Port** или щёлкните по значку **Edge Port** (Порт грани), поместите курсор на левую сторону входного проводника так, чтобы на ней появился небольшой прямоугольник, и щёлкните мышкой.

- Теперь нужно установить референсную плоскость на некотором расстоянии от левого края корпуса. Это расстояние должно быть таким, чтобы возникшие на левом краю высшие типы волн затухли к референсной плоскости. Обычно это расстояние рекомендуют не менее толщины подложки. Щёлкните левой кнопкой мышки по прямоугольнику порта. Установите курсор на правую сторону этого прямоугольника так, чтобы курсор отображался в виде двойной стрелки. Нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор вправо на **dx: 1**.

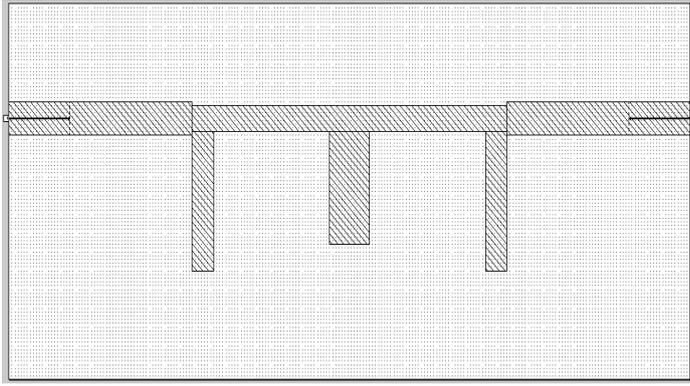


Рис. 1.42

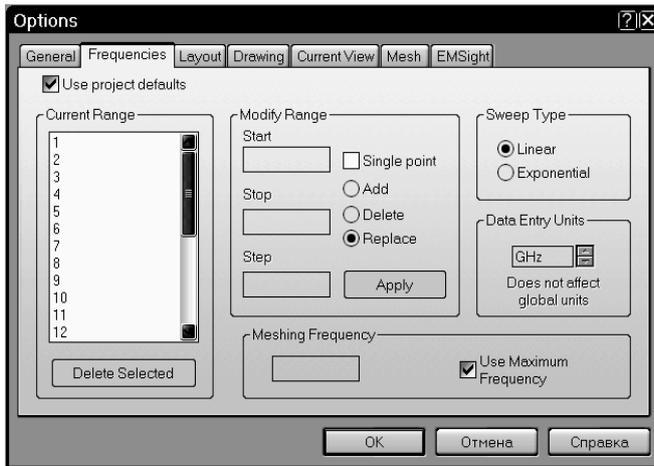


Рис. 1.43

магнитной структуры можно установить свои частоты для анализа, отличные от частот проекта. Это бывает полезно, если частот для анализа в проекте много и время электродинамического анализа слишком большое. Чтобы установить частоты только для данной структуры, нужно снять “галочку” в **Use project defaults** (Использовать значения проекта по умолчанию) и затем ввести значения частот обычным образом. Мы для анализа будем использовать частоты проекта, поэтому эта “галочка” должна быть установлена.

- Дважды щёлкните левой кнопкой мышки по имени графика (**LdB**) в левом окне проекта, чтобы сделать окно графика активным. Выберите в меню команду **Simulate>Analyze** или щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Анализ начнёт выполняться и откроется окно, в котором отображается процесс ана-

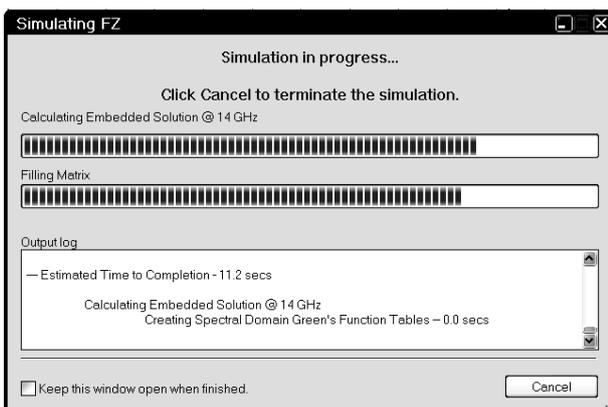


Рис. 1.44

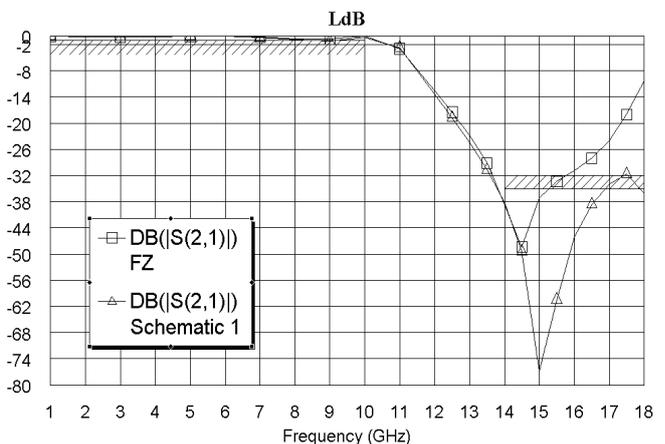


Рис. 1.45.

лиза (рис. 1.44). Щёлкнув по кнопке **Cancel** в этом окне, выполнение анализа можно остановить в любое время. Полученная характеристика показана на рис. 1.45. Как видно из графиков, эта характеристика заметно отличается в полосе заграждения от полученной в линейном моделировании и не удовлетворяет заданным требованиям.

1.1.12. Редактирование электромагнитной структуры.

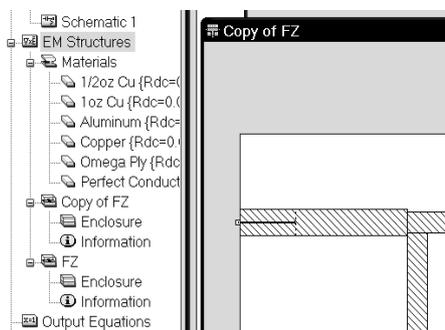


Рис. 1.46

На этом этапе необходимо подобрать такие размеры топологии, чтобы характеристика фильтра удовлетворяла предъявляемым требованиям. Чтобы удобнее было вернуться к предыдущему варианту в случае неудачной попытки, обычно лучше сделать копию электромагнитной структуры и редактировать её.

1. Установите курсор на подгруппу электромагнитной структуры **FZ** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор на группу **EM Structures**, отпустите кнопку. В группе **EM Structures** появится подгруппа **Copy of FZ** (рис.1.46), а на рабочем поле откроется окно созданной копии нашей структуры.

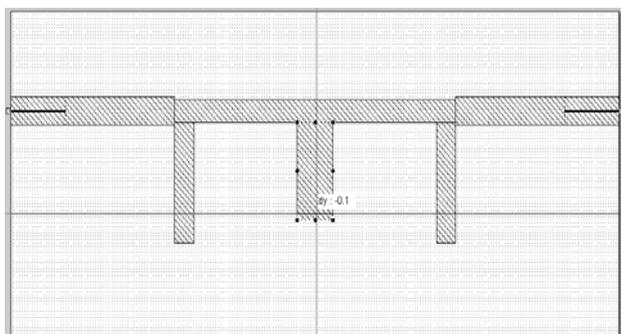


Рис. 1.47

1. Дважды щёлкните по среднему шлейфу, установите курсор на синий ромб посередине нижней стороны шлейфа так, чтобы курсор отображался в виде двойной стрелки. Нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор вверх на величину **dy:-0.1** (рис. 1.47), отпустите кнопку.
2. Дважды щёлкните по имени графика в левом окне проекта, чтобы сделать активным окно графика.

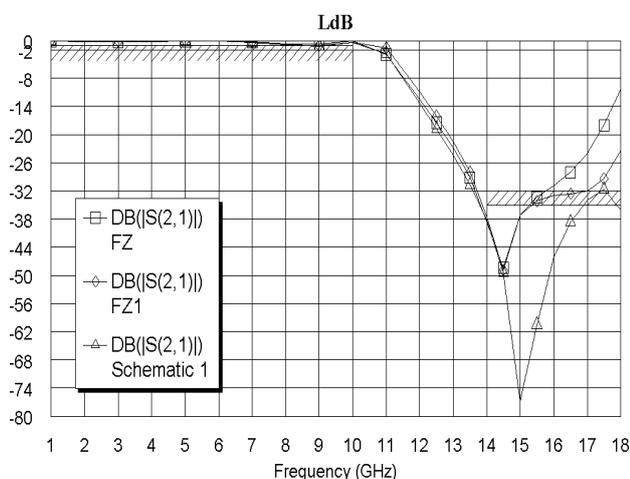


Рис. 1.48

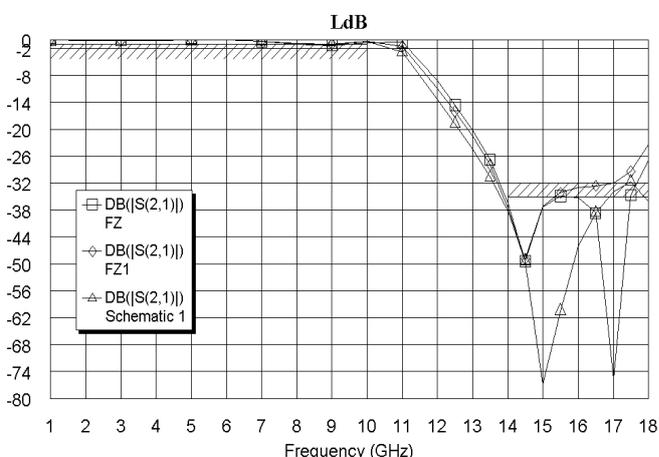


Рис. 1.49

3. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов, чтобы выполнить анализ структуры с укороченным шлейфом. Полученный график показан на рис. 1.48. Как

видно, новая характеристика ближе к требуемой, поэтому продолжим укорочение среднего шлейфа.

4. Сначала удалите структуру **FZ**, имеющую худшую характеристику. Для этого щёлкните правой кнопкой мышки по подгруппе **FZ** в левом окне проекта и выберите **Delete EM Structure**. Затем создайте копию структуры **FZ1**, как описано выше. Этой копии можно присвоить прежнее имя **FZ**.

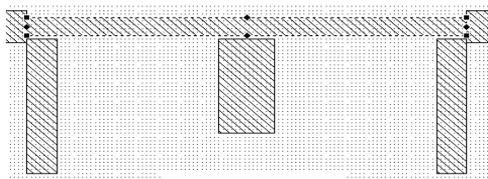


Рис. 1.50

0.1, как описано выше на шаге 1.

6. Выполните анализ новой структуры. Полученный график показан на рис. 1.49. Полученная характеристика ближе к требуемой, но не удовлетворяет требованию на частоте 18 ГГц.

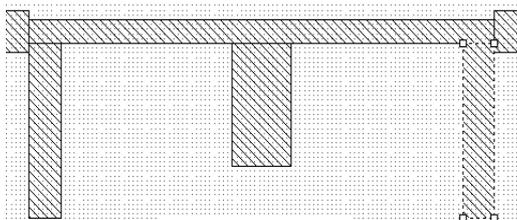


Рис. 1.51

верхней стороны этой микрополоски и сместите её вниз на 0.05. Затем поместите

5. В новой структуре **FZ** дважды щёлкните по среднему шлейфу и снова укоротите его на

7. Удалите предыдущую структуру **FZ1** и сделайте копию последней структуры **FZ**, её можно снова переименовать в **FZ1**. Уменьшите ширину микрополоски, с которой соединены шлейфы на 0,1 мм. Для этого дважды щёлкните по этой микрополоске. Установите курсор на синий ромб посередине

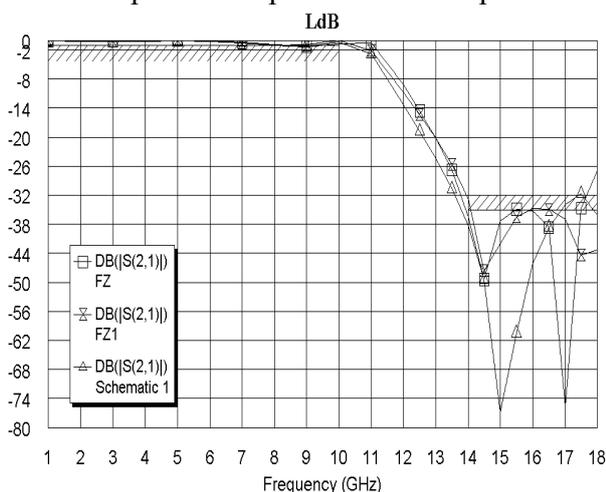


Рис. 1.52

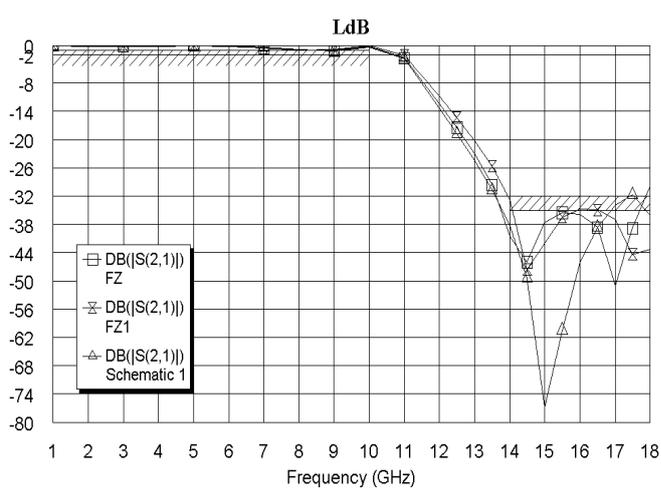


Рис. 1.53

курсор на синий ромб посередине нижней стороны и сместите её вверх на 0.05 (рис. 1.50). Установите курсор на первый шлейф, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, сдвиньте шлейф вверх так, чтобы он соединился с микрополоской. Аналогично соедините второй и третий шлейфы с микрополоской (рис. 1.51). Выполните анализ полученной структуры. График показан на рис. 1.52. Полученный график уже близок к требуемому, но немного сдвинут вверх по частоте.

8. Удалите предыдущую структуру **FZ** и сделайте копию последней структуры **FZ1**, её можно снова переименовать в **FZ**. Дважды щёлкните по первому шлейфу в новой структуре, установите курсор на ромб посередине нижней стороны этого шлейфа и сместите эту сторону вниз на 0.05. Аналогично удлините на 0.05 третий шлейф. Выполните анализ новой структуры. Полученная характеристика показана на рис. 1.53. Эта характеристика несколько уже по полосе заграждения и не удовлетворяет требованиям на верхней частоте 18 ГГц.

9. Удалите предыдущую структуру **FZ1** и сделайте копию последней структуры **FZ**, её можно снова переименовать в **FZ1**. Дважды щёлкните по микрополоске, с которой соединены шлейфы, установите курсор на ромб посередине верхней стороны и сместите её вниз на 0.05. Выполните анализ этой структуры. Полученная характери-

стика (рис. 1.54) удовлетворяет поставленным требованиям. Чтобы не затемнять график, можно щёлкнуть правой кнопкой мышки в группе графика **LdB** по имени

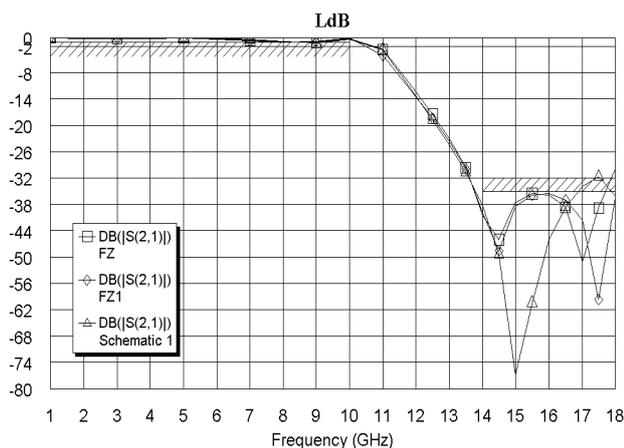


Рис. 1.54

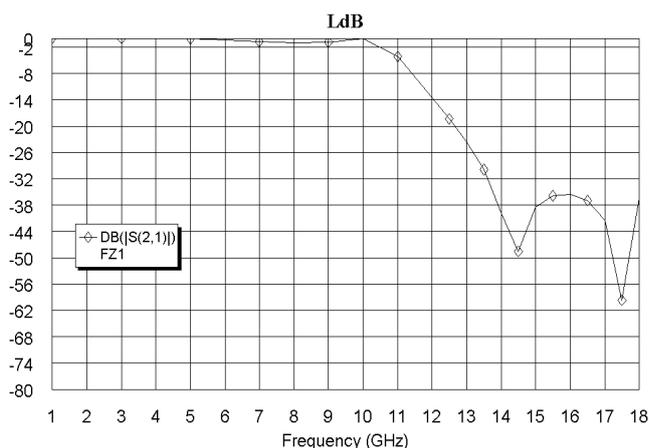


Рис. 1.55

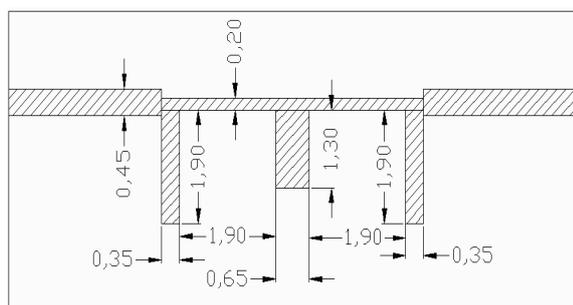


Рис. 1.56

кривой **All Sources:DB(|S(2,1)|)** в левом окне проекта и выбрать **Properties**. В открывшемся окне в поле **Data Source Name** (см. рис. 1.10) введите имя последней электромагнитной структуры **FZ1**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля, и нажмите **OK**. Или можно просто удалить схему (Schematic 1) и предыдущую электромагнитную структуру (FZ) из проекта. Характеристика последнего варианта электромагнитной структуры показана на рис. 1.55.

Полученная в результате электромагнитного моделирования топология фильтра показана на рис. 1.56. Как видно, размеры элементов топологии несколько отличаются от соответствующих размеров, полученных в линейном моделировании.

1.2. Фильтр с частотой заграждения 4 ГГц

Требуется спроектировать фильтр с боковыми электромагнитными связями, обеспечивающий ослабление на частоте 4 ГГц не менее 50 дБ.

1.2.1. Создание электрической схемы.

1. Создайте новый проект и сохраните его под именем **FZ4**.
2. Щёлкните по значку **New Schematic** и создайте схему с именем **FilZ**.
3. Откройте в левом окне вкладку **Elem**. Раскройте группу **Microstrip**, дважды щёлкнув по ней мышкой или щёлкнув по значку “+” слева от этой группы. Затем щёлкните по подгруппе **Lines**.

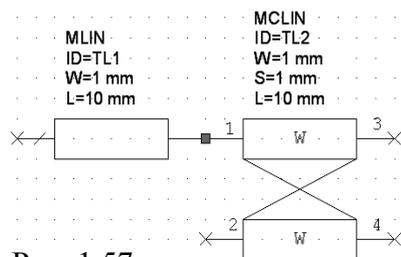


Рис. 1.57

4. В нижней части левого окна выберите элемент **MLIN** и перетащите его в окно схемы. Затем в верхней части левого окна щёлкните по подгруппе **Coupled Lines** (Связанные линии), в нижней части левого окна найдите элемент **MCLIN**, перетащите его в окно схемы и соедините с правым концом элемента **MLIN**, как показано на рис. 1.57.

5. В верхней части левого окна щёлкните по подгруппе **Bends** (Изгибы). Найдите элемент **MBENDAS** и подключите его к узлу 4 элемента **MCLIN**.

6. В верхней части левого окна щёлкните по подгруппе **Lines**, выберите элемент **MLIN**, перетащите его в окно схемы, три раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть элемент на 270 градусов и подключите его к элементу **MBENDAS**.

7. В верхней части левого окна щёлкните по подгруппе **Other** (Другие), выберите элемент **MOPEN\$,** перетащите его в окно схемы, два раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть элемент на 180 градусов и подключите его к узлу 2 элемента **MCLIN.** Снова выберите элемент **MOPEN\$,** перетащите его в окно схемы, три раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть элемент на 270 градусов и подключите его к последнему элементу **MLIN.**

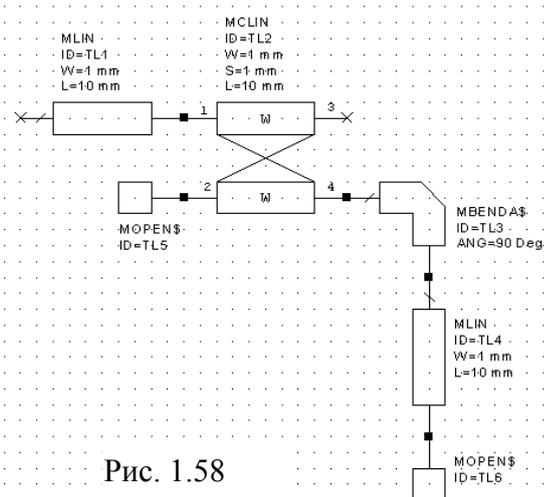


Рис. 1.58

Используя горизонтальную полосу скроллинга, сдвиньте схему в левую часть окна.

2. Выделите все элементы схемы. Для этого поместите курсор выше и левее схемы, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор правее и ниже последнего элемента схемы. Или выберите в меню команду **Edit>Select All.**

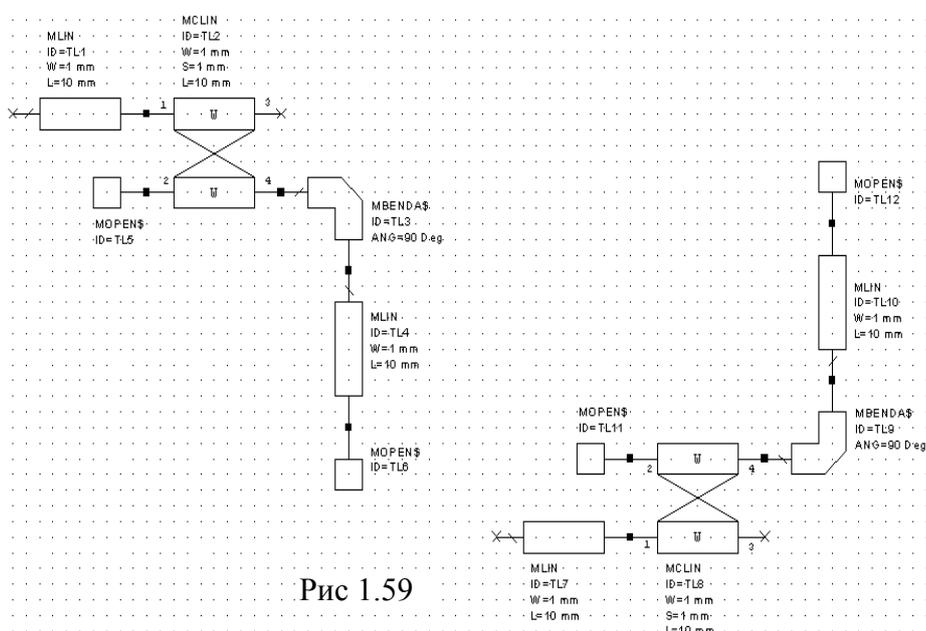


Рис 1.59

Будет создано зеркальное отображение схемы относительно оси Y. Щёлкните правой кнопкой мышки по зеркальному отображению и выберите **Rotate** (Повернуть) или выберите в меню команду **Edit> Rotate.** Установите курсор на входной узел элемента **MLIN,** нажмите левую кнопку мышки и поверните схему на 180 градусов. Во время всех этих операций все элементы второго резонатора должны быть выделены. Результат должен быть таким, как показано на рис. 1.59.

4. Выделите все элементы первого резонатора и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов. Затем выделите все элементы второго резонатора и соедините его входной узел элемента **MLIN** с выходным узлом 3 элемента **MCLIN** первого резонатора. Теперь щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и соедините входной узел элемента **MLIN** скопированного резонатора с выходным узлом 3 элемента **MCLIN** второго резонатора.

5. Щёлкните по первому элементу **MLIN** полученной схемы, щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Подключите скопированный элемент отрезка линии к узлу 3 элемента **MCLIN** последнего резонатора. Полученная схема должна выглядеть, как показано на рис. 1.60. Напомним, что если при вставке элемента

в схему значения его параметров отображаются так, что читать схему не удобно, то их можно переместить. Для этого установите курсор на параметры, нажмите левую кнопку мышки и переместите параметры в любое удобное место.

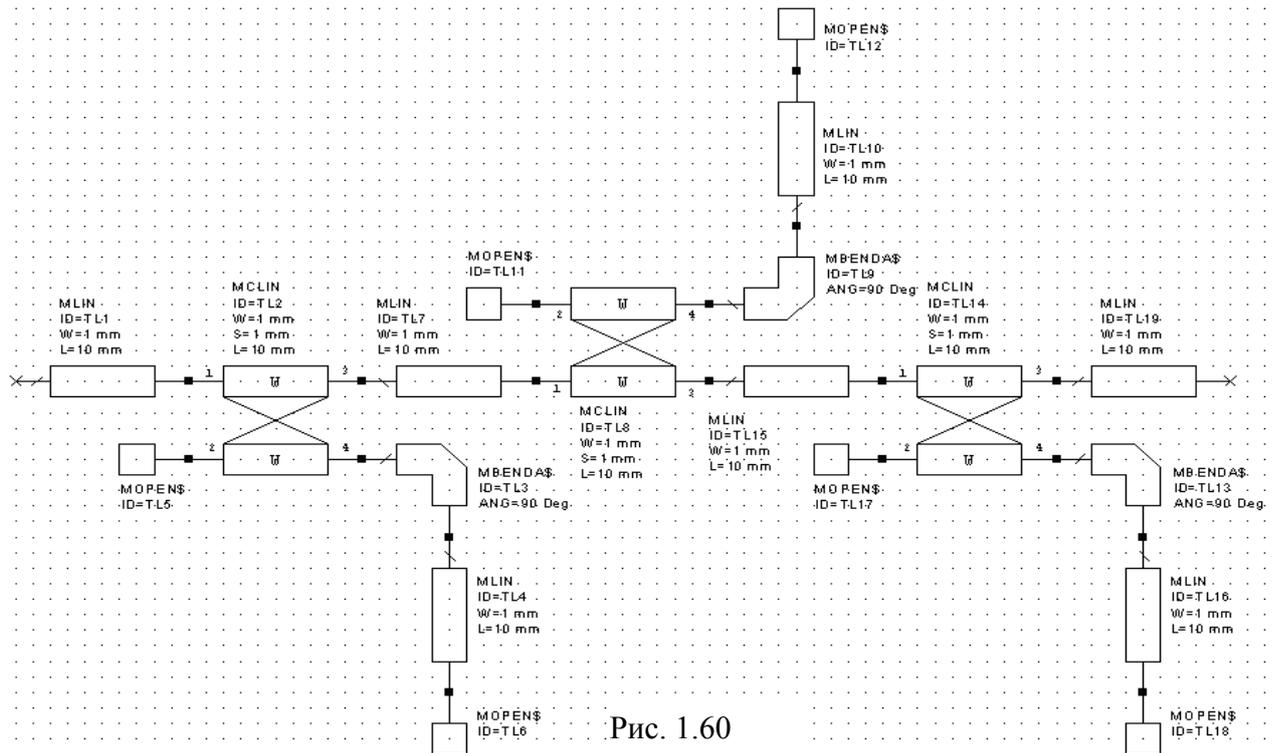


Рис. 1.60

- Щёлкните по значку **Port** на панели инструментов и подключите порт ко входу фильтра. Снова щёлкните по значку **Port** на панели инструментов, переместите курсор в окно схемы, дважды щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть порт, и подключите его к выходу схемы.
- Щёлкните по группе **Substrates** в левом окне проекта, выберите элемент **MSUB** и поместите его в окне схемы на свободном месте. Полученная схема фильтра показана на рис. 1.61.

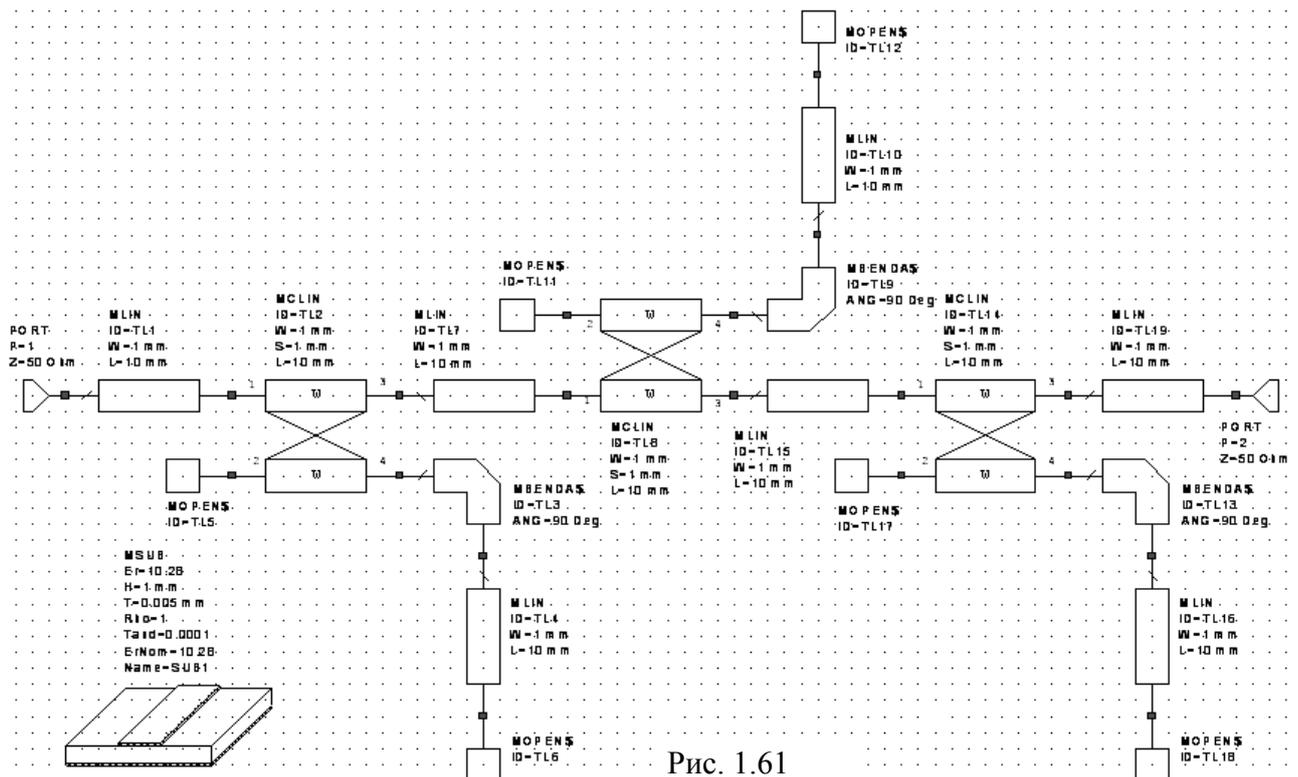


Рис. 1.61

1.2.2. Добавление переменных и редактирование элементов схемы.

Добавим следующие переменные в схему.

- Щёлкните по значку **Equation** $X=Y$ ERN на панели инструментов, переместите курсор в окно схемы на свободное место и щёлкните мышкой. В открывшемся поле введите $L1=14$ (примерно длина полуволны на частоте 4 ГГц) и щёлкните мышкой вне этого поля. Аналогично добавьте переменную $L2=14$. Затем добавьте переменные $LS1=L1/2$ и $LS2=L2/2$. Добавьте также переменные $LS1:$ и $LS2:$, чтобы отобразить значения этих переменных после выполнения анализа схемы. Так же добавьте переменные $WS1=1$, $WS2=1$, $S1=0.1$, $S2=0.1$, $LL=3$.

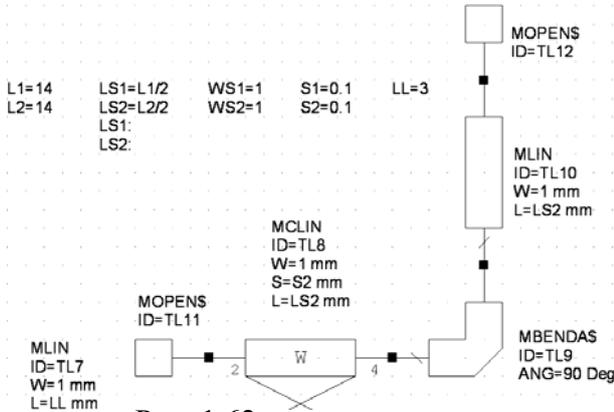


Рис. 1.62

- Дважды щёлкните по входному элементу **MLIN** и введите $W=1$ и $L=3$. Эти же значения введите для выходного элемента **MLIN**.
- Дважды щёлкните по элементу **MCLIN** первого резонатора и введите $W=1$, $S=S1$ и $L=LS1$. Эти же значения параметров введите для элемента **MCLIN** третьего резонатора. Для элемента **MCLIN** второго резонатора введите $W=1$, $S=S2$ и $L=LS2$.
- Для элемента **MLIN** первого резонатора, соединённого с элементом уголкового изгиба **MBENDAS**, введите $W=1$, и $L=LS1$. Эти же значения параметров введите для аналогичного элемента **MLIN** третьего резонатора. Для аналогичного элемента **MLIN** второго резонатора введите $W=1$, и $L=LS2$.
- Для элементов **MLIN**, соединяющих первый резонатор со вторым и второй с третьим, введите $W=1$ и $L=LL$.
- Дважды щёлкните по элементу **MSUB** и введите $Er=10.28$, $H=1$, $T=0.005$, $Tand=0.0001$ и $ErNom=10.28$.

Окончательная отредактированная схема фильтра показана на рис. 1.63.

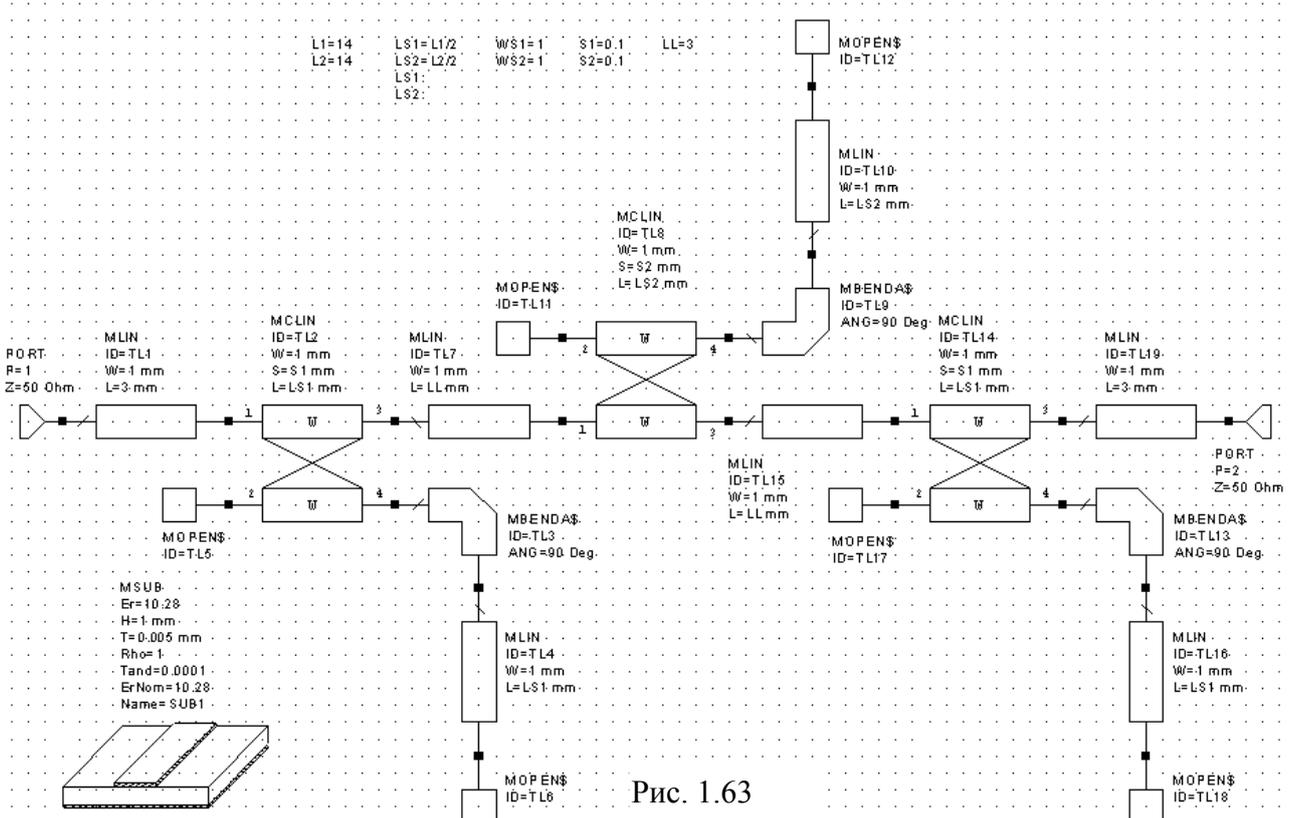


Рис. 1.63

1.2.3. Определение частот, добавление графика и анализ схемы.

1. Откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта и дважды щёлкните по **Project Options** или выберите в меню команду **Options> Project Options**. В открывшемся окне на вкладке **Frequencies** в поле **Start(GHz)** введите **2**, в поле **Stop(GHz)** введите **6** и в поле **Step(GHz)** введите **0.2**. Нажмите **Apply** и затем **OK**.
2. Щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов. В открывшемся окне введите имя графика **LdB** и нажмите **OK**.
3. В левом окне проекта щёлкните по появившемуся имени графика **LdB** правой кнопкой мышки и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне в поле **To Port Index** введите **2**, щёлкая по кнопке в правом конце этого поля. В поле **From Port Index** введите **1**. В поле **dB** установите “галочку”. Нажмите **Apply** и затем **OK**.
4. Щёлкните по значку **Analyze** ⚡ на панели инструментов, чтобы выполнить анализ.
5. Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и выберите **Properties**. На вкладке **Axes** открывшегося окна в области **Choose axis** отметьте **x**. В области **Divisions** снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.2**. Нажмите **Apply**. Масштаб по левой оси по умолчанию определяется автоматически. При настройке схемы может быть удобным зафиксировать этот масштаб, чтобы он не изменялся в процессе настройки. Поэтому в области **Choose axis** отметьте **Left 1**. В области **Limits** снимите “галочку” в **Auto limits** и в поле **Min** введите **-80**. В области **Divisions** снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **5**. Нажмите **Apply** и затем **OK**. Полученный график показан на рис. 1.64.

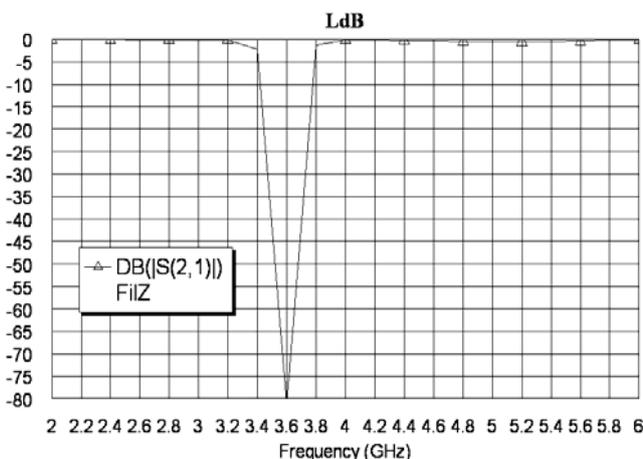


Рис. 1.64

1.2.4. Настройка схемы.

1. Чтобы точнее отобразить график в полосе заграждения, добавьте частоты от **3.85** до **4.25** с шагом **0.05**, дважды щёлкнув по **Project Options** в левом окне проекта и отметив **Add** в открывшемся окне.
2. Сделайте активным окно схемы. Выберите в меню команду **Simulate>Tune Tool** (Моделировать>Инструмент настройки) или щёлкните по значку **Tune Tool** 🗝 на панели инструментов и переместите курсор на поле схемы. Курсор будет отображаться в виде крестообразной отвёртки. Поместите перекрестие курсора на переменную **L1=14** и щёлкните левой кнопкой мышки. Цвет переменной должен измениться на синий. Затем поместите перекрестие курсора на переменную **L2=14** и щёлкните левой кнопкой мышки. Аналогично назначьте для настройки переменные **WS1=1**, **WS2=1**, **S1=0.1**, **S2=0.1** и **LL=3**. Переместите курсор на свободное место в окне схемы и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы отменить режим выбора переменных для настройки.

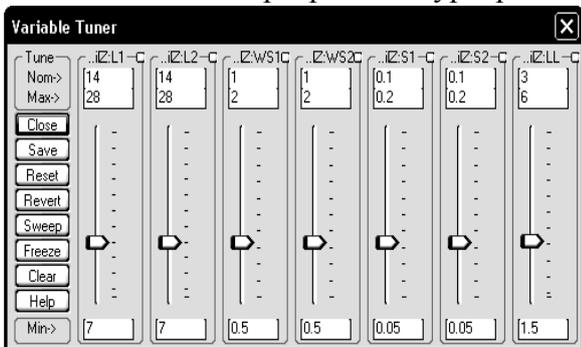


Рис. 1.65

Tuner (Механизм настройки переменной, рис. 1.65). Установив курсор на верхнюю часть окна и, нажав кнопку мышки, можно переместить окно в любое удобное место.

4. Из графика рис. 1.64 видно, что характеристику необходимо сдвинуть вверх по частоте. Для этого необходимо уменьшить длину резонаторов **L1** и **L2**. Пределы регулировки переменных отображаются в полях **Min->** и **Max->**, текущее значение переменных – в поле **Nom->**. Установленные по умолчанию пределы регулировки могут быть настолько большими, что точную настройку выполнить трудно. Например, для **L1** и **L2** эти пределы могут быть от 7 до 28 (см. рис. 1.65). Чтобы настройка была плавной, уменьшите эти пределы. Т.к.

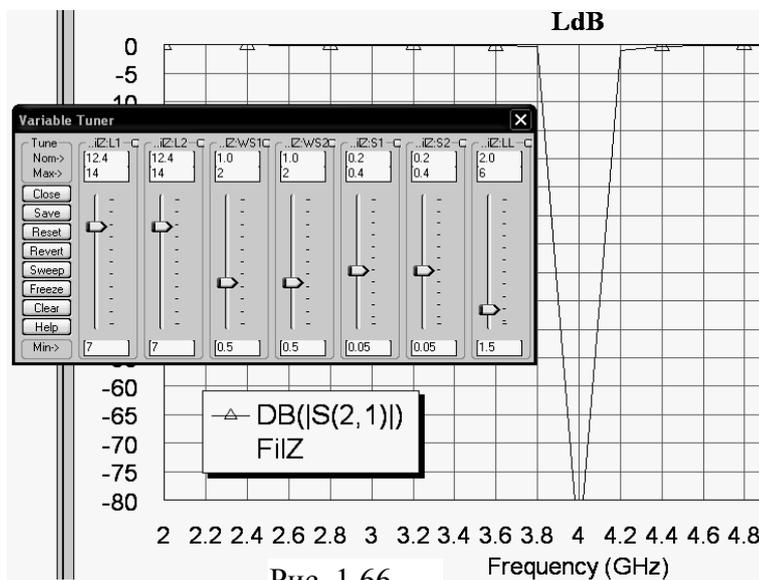


Рис. 1.66

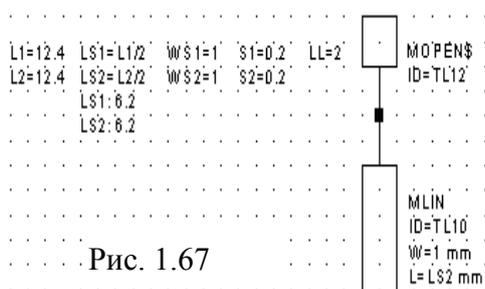


Рис. 1.67

Значения переменных после настройки показаны на рис. 1.67.

уменьшите эти пределы. Т.к. **L1** и **L2** нужно регулировать только в меньшую сторону, введите для этих переменных в поле **Min->** значение 7, а в поле **Max->** - значение 14. Двигайте движки у этих переменных в сторону уменьшения (т.е. вниз), пока не получите максимум ослабления на частоте 4 ГГц. Затем, двигая движки у переменных **S1** и **S2**, добейтесь максимального ослабления на частоте 4 ГГц. Двигая движки у переменных **WS1** и **WS2**, убедитесь, что при изменении ширины про-

водников связанных линий характеристика практически не изменяется и эти переменные можно оставить без изменения. Двигая движок у переменной **LL**, убедитесь, что при уменьшении этого расстояния характеристика незначительно улучшается. Окончательная характеристика после настройки показана на рис. 1.66. Закройте окно настройки.

5. Сделайте активным окно схемы. Значения переменных после настройки показаны на рис. 1.67.

1.2.5. Статистический анализ.

Поскольку проектируемый фильтр является узкополосным, его желательно спроектировать несколько выше по частоте т.к. сдвинуть характеристику в сторону нижних частот проще, например, приклеивая узкие пластины из поликора на резонаторы или удлиняя резонаторы кусочками фольги из индия. Чтобы определить, насколько выше по частоте нужно спроектировать фильтр, оценим разброс характеристики от технологических допусков. Для этого необходимо назначить переменные для проведения статистического анализа и определить допуски. Очевидно, что наибольшее влияние на частоту заграждения фильтра будет

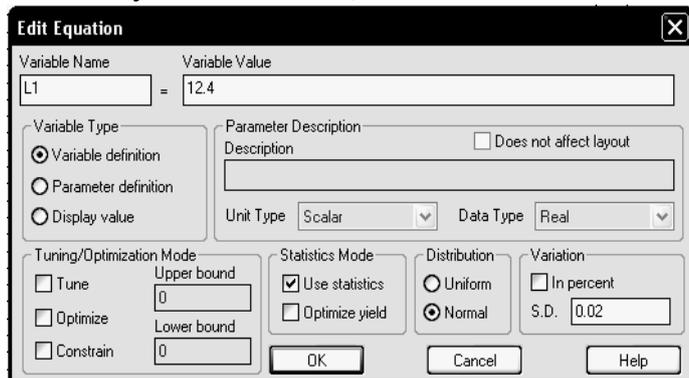


Рис. 1.68

влиять допуск на длину резонаторов **L1** и **L2**. Заметное влияние могут так же оказывать разброс диэлектрической проницаемости и толщины подложки. Эти переменные и назначим для статистического анализа.

1. Сделайте активным окно схемы. Щёлкните правой кнопкой мышки по переменной **L1** и выберите **Properties**. Откроется диалоговое окно **Edit Equation** (рис. 1.68). В этом окне отметьте **Use statistics** (Ис-

пользовать статистику) и **Normal** (Нормальное распределение). В поле **S.D.** (Seated Deviate – Установка отклонения) введите допуск на длину резонатора **0.02**. Поле **In percent** (В процентах) должно быть не отмеченным, чтобы допуск считался заданным в единицах длины, т.е. в мм, а не в процентах. Нажмите **OK**.

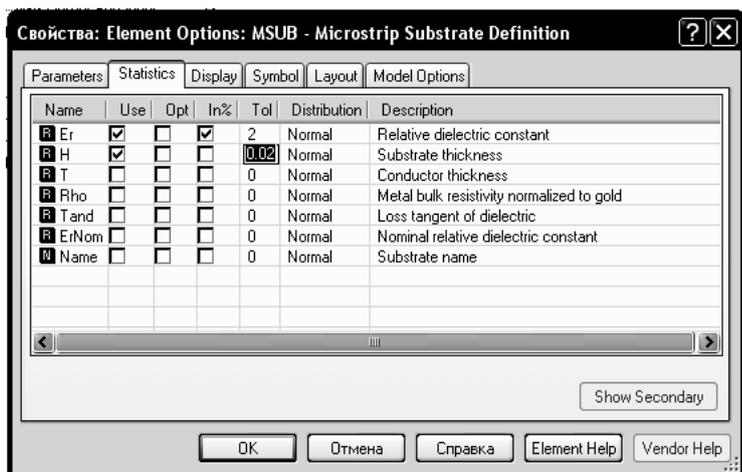


Рис. 1.69

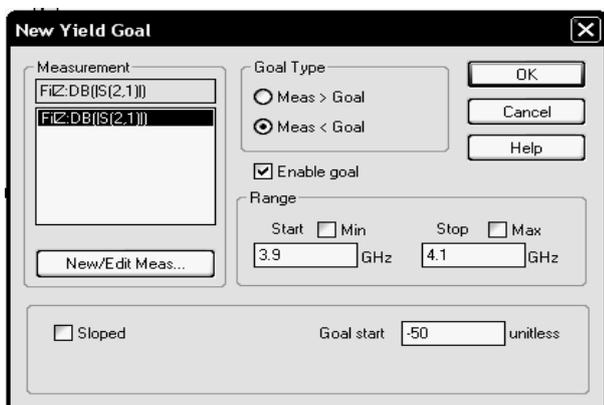


Рис. 1.70

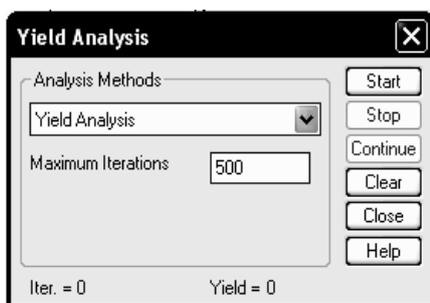


Рис. 1.71

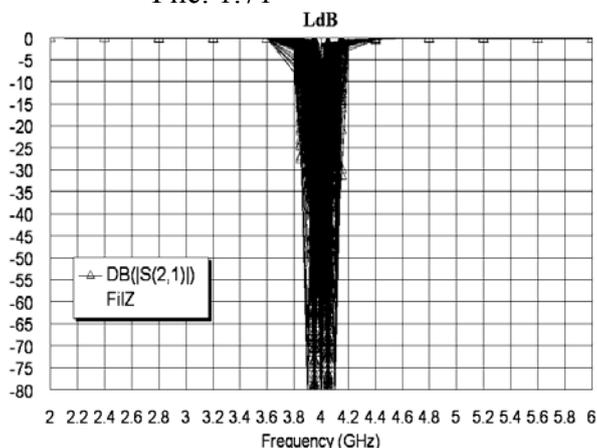


Рис. 1.72

2. Аналогично для статистического анализа назначьте переменную **L2**.

3. Введите допуск на параметры подложки. Дважды щёлкните левой кнопкой мышки по элементу **MSUB**. Откроется диалоговое окно **Element Options**. На вкладке **Parameters** этого окна в столбце **Value** напротив параметра **H** введите толщину подложки **0.98**. Дело в том, что по ТУ допуск на толщину подложки только минусовой **-0.04**, а в Microwave Office можно определить только симметричный допуск.

Чтобы остаться в поле возможных размеров толщины, её можно задать 0.98 с симметричным допуском 0.02. Откройте вкладку **Statistics** диалогового окна (рис. 1.69). На этой вкладке отметьте столбец **Use** напротив параметров **Er** и **H**. Напротив переменной **Er** отметьте столбец **In%**, чтобы задать допуск в процентах, и в столбце **Tol** (Tolerance – допуск) введите **2**. Напротив переменной **H** в столбце **Tol** введите **0.02**. Нажмите **OK**.

4. Сделайте активным окно графика и установите цель статистического анализа. Для этого щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Yield Goals** в левом окне проекта и выберите **Add Yield Goal**. Откроется диалоговое окно **New Yield Goal** (рис. 1.70). Отметьте **Meas<Goal**. Снимите “галочки” в полях **Start Min** и **Start Max**, и введите соответственно нижнюю частоту заграждения **3.9** и верхнюю **4.1** ГГц. В поле **Goal start** введите **-50**. Нажмите **OK**.

5. Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и выберите **Properties**. В открывшемся окне свойств графика на вкладке **Yield Data** отметьте **Show traces** (Показывать трассы) и **All traces** (Все трассы). Нажмите **Apply** и затем **OK**.

6. Выполните статистический анализ, выбрав в меню команду **Simulate>Yield Analysis**. Откроется диалоговое окно **Yield Analysis** (рис. 1.71). В выпадающем списке **Analysis Methods** выберите **Yield Analysis**, в поле **Maximum Iteration** введите **500**. Нажмите **Start**. Во время выполнения статистического анализа в нижней части этого диалогового окна

отображается общее количество выполненных выборок (**Iter. =**) и количество выборок, удовлетворяющих установленной цели, в процентах (**Yield =**). Из полученного графика (рис. 1.72) видно, что резонансная частота может смещаться примерно на 0.1 ГГц.

Чтобы удалить из графика результаты статистического анализа, щёлкните по кнопке **Clear** в окне рис. 1.71. Или, если это окно уже закрыто, щёлкните по графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. В открывшемся окне свойств графика на вкладке **Yield Data** снимите “галочку” в **Show traces**, нажмите **Apply** и **OK**.

1.2.6. Создание электромагнитной структуры.

1. Выберите в меню команду **Options> Layout Options**. В открывшемся окне на вкладке **Layout** в поле **Grid spacing** (Шаг сетки) введите **0.1**, в поле **Database unit size** (Размер базы данных единицы измерения, определяет точность размера клеток сетки) введите **0.001**. Откройте вкладку **Dimension Line** (Измерительная линия) в поля **Font height** (Высота шрифта) и **Arrow size** (Размер стрелки) введите **1**. Нажмите **OK**.
2. Сделайте активным окно схемы. Щёлкните по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов, откроется окно топологии схемы. Выберите в меню команду **Edit>Select All** и затем команду **Edit>Snap Together**.

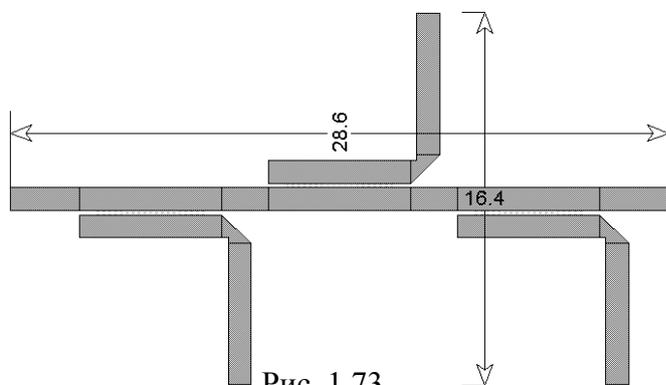


Рис. 1.73

3. Щёлкните по значку **Dimension Line** на панели инструментов, установите курсор на левый край топологии фильтра, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор на правый край топологии, отпустите кнопку, двигая мышкой, установите размер длины фильтра

и щёлкните мышкой. Аналогично установите размер ширины фильтра. Полученная топология показана на рис. 1.73.

4. Выделите все элементы топологии и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
5. Щёлкните по значку **New Em Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру с именем **FZ4**.

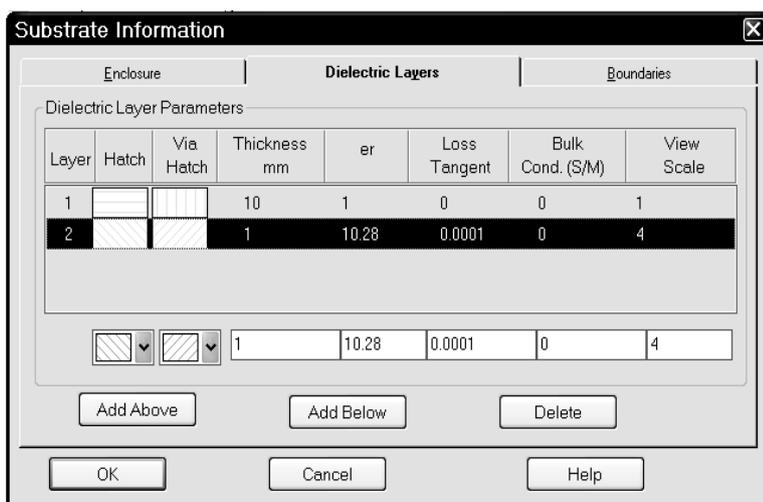


Рис. 1.74

20, в поле **Y-Divisions** введите **200**. Откройте вкладку **Dielectric Layers**. Для первого слоя введите толщину **10** мм. Для второго слоя введите толщину **1** мм, диэлектрическую проницаемость **10.28**, тангенс потерь **0.0001** и масштаб просмотра **4** (рис. 1.74). Нажмите **OK**.

6. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. На вкладке **Enclosure** открывшегося диалогового окна в поле **X-Dimension(mm)** введите **28.6** (длина электромагнитной структуры должна быть точно равна длине топологии фильтра), в поле **X-Divisions** введите **286**, в поле **Y-Dimension(mm)** введите

- Щёлкните по значку **View All** на панели инструментов, чтобы открыть всё окно топологии. Щёлкните по значку **Paste** и поместите скопированную топологию по центру электромагнитной структуры.

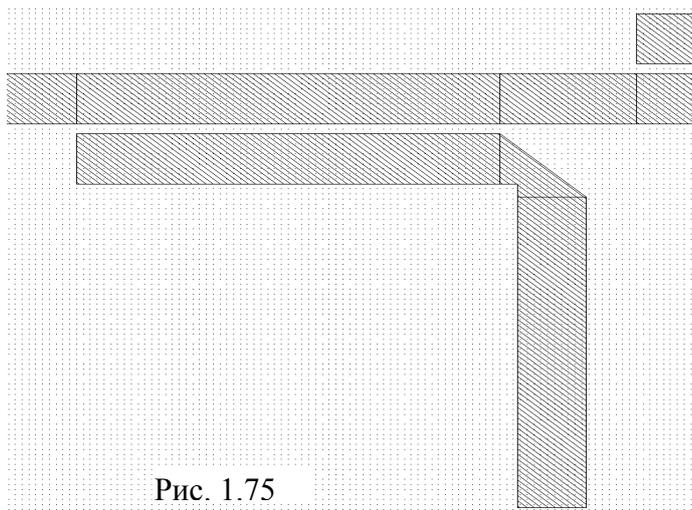


Рис. 1.75

- Щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов и выделите часть топологии с первым резонатором так, чтобы видеть сетку (рис. 1.75). Из рисунка видно, что изгиб резонатора и несвязанный (вертикальный) проводник несколько не совпадают с сеткой. Это может сказаться на точности анализа, хотя и не значительно. При желании топологию можно отредактировать следующим образом.

- Щёлкните по значку **Polygon Conductor** на панели инструментов. Установите курсор на верхний угол изгиба и щёлкните мышкой, переместите курсор к правому нижнему углу изгиба и снова щёлкните мышкой. Этот угол будет точно привязан к сетке. Перемещайте курсор к остальным углам изгиба, щёлкая мышкой, пока не получите замкнутый многоугольник изгиба (рис. 1.76). Он несколько не совпадает с прежним изгибом. Щёлкните по видимой части прежнего изгиба и нажмите клавишу **Delete**, чтобы удалить его. Щёлкните по вертикальному проводнику этого резонатора и удалите его. Щёлкните по горизонтальному проводнику резонатора, скопируйте

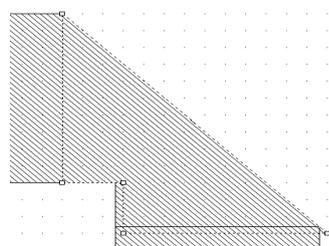


Рис. 1.76

его, щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть проводник на 90 градусов и соедините с нижней стороной изгиба. Удалите изгибы и вертикальные проводники у двух последних резонаторов. Скопируйте изгиб первого резонатора и соедините его с горизонтальными проводниками второго и затем третьего резонаторов. При соединении изгиба с проводником второго резонатора, разверните изгиб, щёлкая правой кнопкой мышки. Скопируйте вертикальный проводник первого резонатора и соедините его с изгибом второго резонатора. Снова скопируйте вертикальный проводник первого резонатора и соедините его с изгибом третьего резонатора.

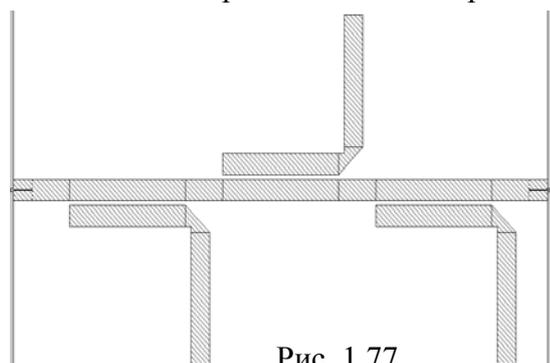


Рис. 1.77

- Щёлкните мышкой по входному проводнику топологии фильтра, затем щёлкните

по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт, отодвинув его референсную плоскость вправо на $dx: 1$. Аналогично установите порт на выходной проводник фильтра. Полученная топология показана на рис. 1.77.

- Выделите всю топологию, Щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу топологии и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне выберите материал **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.

1.2.7. Анализ и уточнение топологии.

- Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 1.78. Характеристика электромагнитной структуры лежит выше по частоте, чем и требуется. Напомним, что частота заграждения по результатам статистического анализа должна быть около 4.1 ГГц. Од-

нако ослабление на частоте заграждения мало. Усилим связь резонаторов с основным проводником.

- Установите курсор на имя электромагнитной структуры **FZ4** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки, переместите курсор на группу **EM Structures** и от-

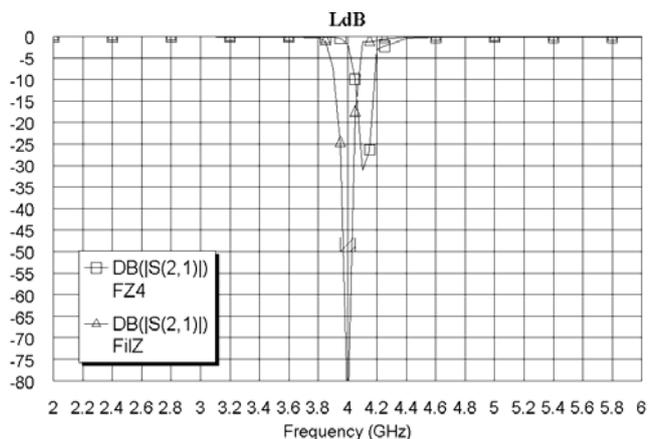


Рис. 1.78

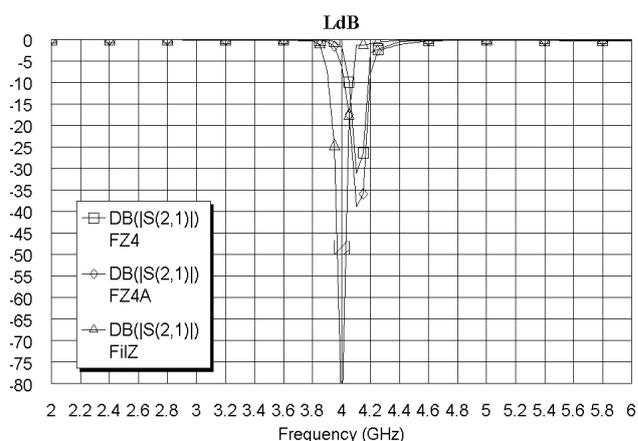


Рис. 1.79

пустите кнопку. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени полученной копии электромагнитной структуры, выберите **Rename EM Structure** и переименуйте её в **FZ4A**.

- Щёлкните по горизонтальному проводнику первого резонатора структуры **FZ4A**, нажмите клавишу **Shift** и, не отпуская её, щёлкните по изгибу этого резонатора и затем по вертикальному проводнику. Все элементы первого резонатора будут выделены.
- Установите курсор на любой элемент выделенного резонатора, нажмите левую кнопку мышки и переместите резонатор вверх на **dx: 0 dy: -0.1**. Аналогично уменьшите зазор на 0.1 мм у остальных резонаторов.
- Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 1.79. Характеристика уже ближе к требуемой.
- Щёлкните правой кнопкой мышки по имени структуры **FZ4** в левом окне проекта и выберите **Delete EM Structure**, чтобы удалить эту структуру.
- Скопируйте структуру **FZ4A**, как описано в п. 2 и переименуйте её в **FZ4**. Дважды щёлкните по горизонтальному проводнику первого резонатора, установите курсор на ромбик посередине левой стороны этого проводника и сдвиньте эту сторону вправо на 0.1. Аналогично укоротите на 0.1 остальные два резонатора.
- Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 1.80. Характеристику последней струк-

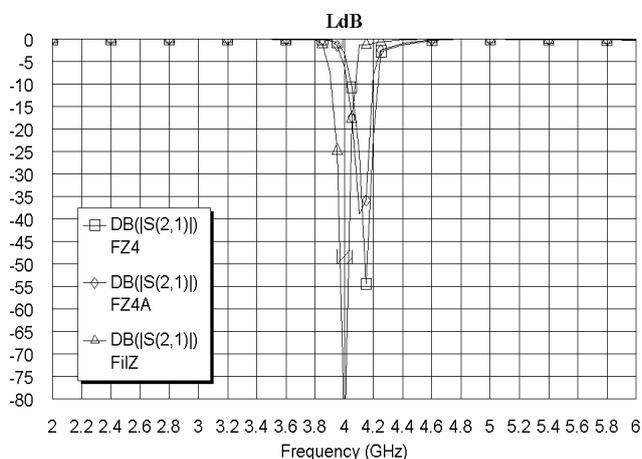


Рис. 1.80

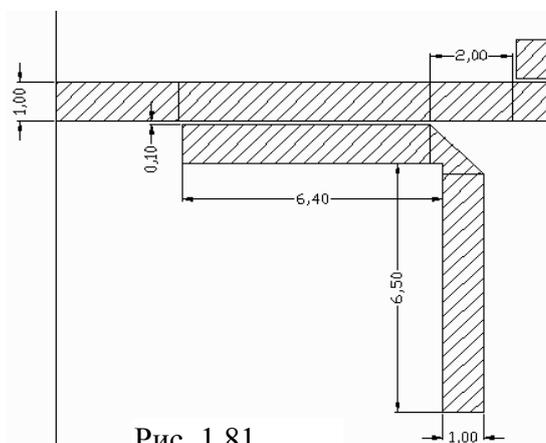


Рис. 1.81

туры **FZ4** можно считать удовлетворительной. Размеры резонаторов в окончательной топологии показаны на рис. 1.81.

1.3. Фильтр с полосой заграждения 4.5 – 5.5 ГГц

Спроектировать фильтр, обеспечивающий ослабление не менее 50 дБ в полосе заграждения 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.

В этом примере сравним использование обычной схемы и схемы с X-моделями.

1.3.1. Создание электрической схемы.

1. Создайте новый проект и сохраните его под именем **FZ5**.
2. Т.к. в проекте будет две схемы с одинаковой подложкой, поместим элемент подложки в **Global Definition**, откуда он будет доступен для всех схем проекта. Дважды щёлкните по **Global Definition**, откройте в левом окне вкладку **Elem**, щёлкните мышкой по группе **Substrates** и перетащите элемент **MSUB** в окно **Global Definition**.

MSUB
Er=10.4
H=0.5 mm
T=0.005 mm
Rho=0.7118
Tand=0.0001
ErNom=10.4
Name=SUB

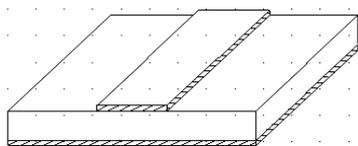


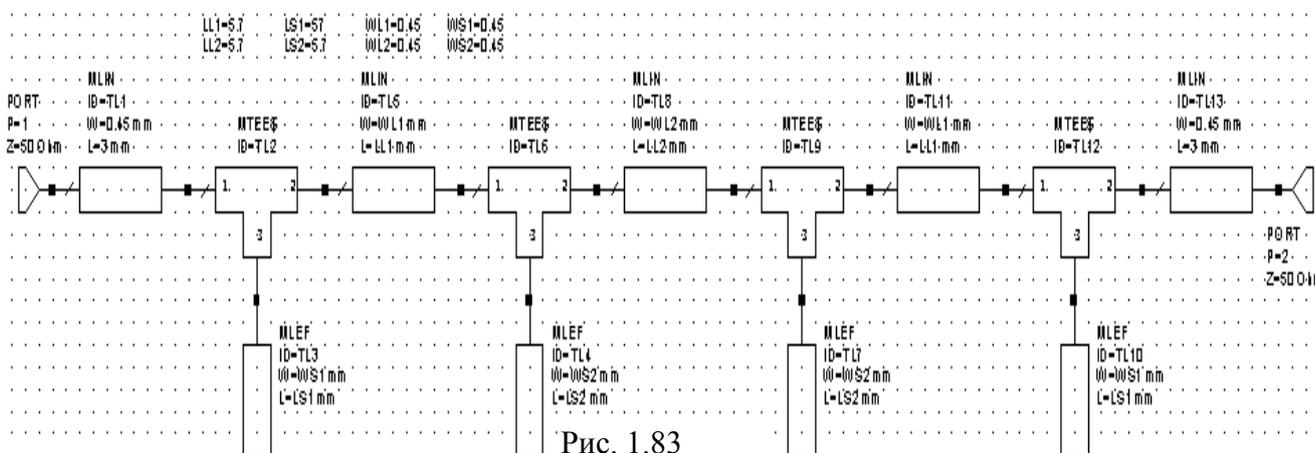
Рис. 1.82

3. Дважды щёлкните по элементу **MSUB** и в открывшемся окне введите **Er=10.4, H=0.5, T=0.005, Rho=0.7118** (проводимость меди относительно золота), **Tand=0.0001, ErNom=10.4** (рис.1.82), нажмите **OK**.
4. Щёлкните по значку **New Schematic** и создайте схему с именем **FilZ**.
5. Раскройте группу **Microstrip**, щёлкните мышкой по подгруппе **Lines** и перетащите элемент **MLIN** в окно схемы.
6. Щёлкните мышкой по подгруппе **Junctions**, перетащите элемент **MTEES** в окно схемы и подключите его к правому плечу элемента **MLIN**.
7. Щёлкните мышкой по подгруппе **Lines**, перетащите элемент **MLEF** в окно схемы, три раза щёлкните правой кнопкой мышки и подключите его к плечу 3 элемента **MTEES**.
8. Выделите все элементы созданной схемы и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
9. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и подключите скопированные элементы к плечу 2 элемента **MTEES**.
10. Повторите п.9 ещё два раза.
11. Перетащите элемент **MLIN** в окно схемы и подключите его к плечу 2 последнего элемента **MTEES**.
12. Щёлкая по значку **Port** на панели инструментов, подключите порты к входу и выходу схемы.

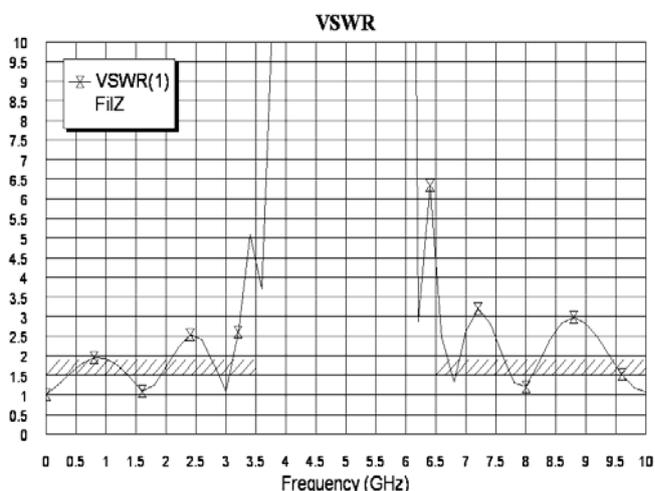
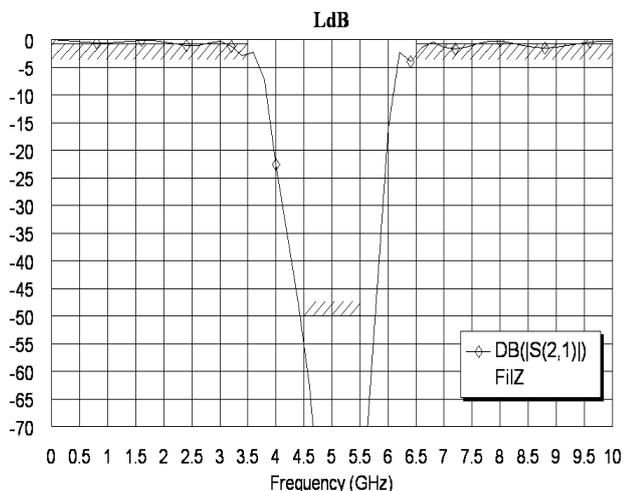
1.3.2. Добавление переменных, редактирование и анализ схемы.

1. С помощью инструмента **Tools>TXLine** Определим, что длина полуволнового отрезка при диэлектрической постоянной 10.4 и толщине подложки 0.5 на частоте 5 ГГц равна примерно 5.7 мм.
2. Щёлкая по значку **Equation** на панели инструментов, добавьте переменные **LL1=5.7, LL2=5.7, LS1=5.7, LS2=5.7, WL1=0.45, WL2=0.45, WS1=0.45** и **WS2=0.45**.
3. Дважды щёлкните по первому элементу **MLIN** и в открывшемся окне введите **W=0.45, L=3**. Эти же параметры введите для последнего элемента **MLIN**.
4. Дважды щёлкните по второму элементу **MLIN** и в открывшемся окне введите **W=WL1, L=LL1**. Эти же параметры введите для предпоследнего элемента **MLIN**.
5. Дважды щёлкните по третьему элементу **MLIN** и в открывшемся окне введите **W=WL2, L=LL2**.
6. Дважды щёлкните по первому элементу **MLEF** и в открывшемся окне введите **W=WS1, L=LS1**. Эти же параметры введите для последнего элемента **MLEF**.

7. Дважды щёлкните по второму элементу **MLEF** и в открывшемся окне введите **W=WS2, L=LS2**. Эти же параметры введите для третьего элемента **MLEF**. Отредактированная схема должна иметь вид, показанный на рис. 1.83.



8. Откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта. Дважды щёлкните мышкой по **Project Options** в левом окне проекта и введите частоты от 0 до 10 ГГц с шагом 0.2.
9. Щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов и создайте график **LdB**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени созданного графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне в области **Meas. Type** отметьте **Port Parameters**, в области **Measurement** отметьте **S**, в поле **To Port Index** введите **2**, в поле **From Port Index** введите **1**, отметьте **dB**, нажмите **Apply** и **OK**.
10. Снова щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов и создайте график **VSWR**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени этого графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне в области **Meas. Type** отметьте **Linear**, в области **Measurement** отметьте **VSWR**, в поле **Port Index** введите **1**, снимите отметку в **dB**, нажмите **Apply** и **OK**.
11. Откройте окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. 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**. На вкладке **Fonts** нажмите кнопку **Axis number**. Во втором открывшемся окне в области **Шрифт** отметьте **Arial**, в области **Начертание** отметьте **обычный**, в области **Размер** отметьте **18** и нажмите **OK**. Будет возврат к первому окну, в котором нажмите **Apply** и **OK**.



12. Откройте окно графика **VSWR** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. 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 **0**, в поле **Max** введите **10** и в поле **Step** введите **0.5**. На вкладке **Fonts** введите те же параметры, что и в предыдущем пункте.

Рассчитанный график вносимого ослабления показан на рис. 1.84, а коэффициента стоячей волны – на рис. 1.85.

1.3.3. Оптимизация схемы.

1. Откройте окно схемы. Щёлкните правой кнопкой мышки по переменной **LL1** и выберите **Properties**.

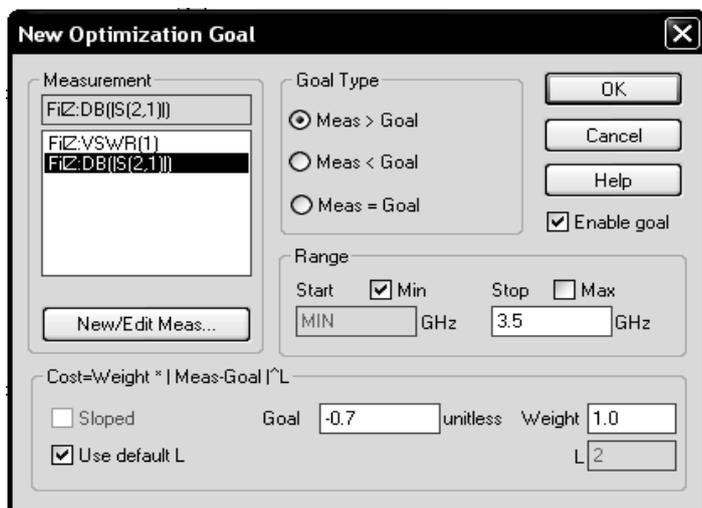


Рис.1.86

мизации переменную **WL2**.

3. Щёлкните правой кнопкой мышки по переменной **WS1**, отметьте **Optimize** и **Constrain**, в поле **Upper bound** введите **2**, в поле **Lower bound** введите **0.2**, нажмите **OK**. Аналогично с такими же параметрами назначьте для оптимизации переменную **WS2**.

4. Откройте окно графика **LdB**. Щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Optimizer Goals** в левом окне проекта и выберите **Add Opt Coal**. Сначала добавим цель оптимизации по ослаблению в нижней полосе пропускания. В открывшемся окне (рис. 1.86) в области **Measurement** отметьте имя схемы и оптимизируемую величину **FilZ:DB(|S(2,1)|)**, Отметьте **Meas>Goal**, снимите “галочку” в **Max** и введите **3.5** в поле **Stop**, введите **-0.7** поле **Goal** и нажмите **OK**.

5. Добавьте цель оптимизации по ослаблению в верхней полосе пропускания. Отметьте **FilZ:DB(|S(2,1)|)**, отметьте **Meas>Goal**, снимите “галочку” в **Min** и введите **6.5** в поле **Start**, введите **-0.7** в поле **Goal**.

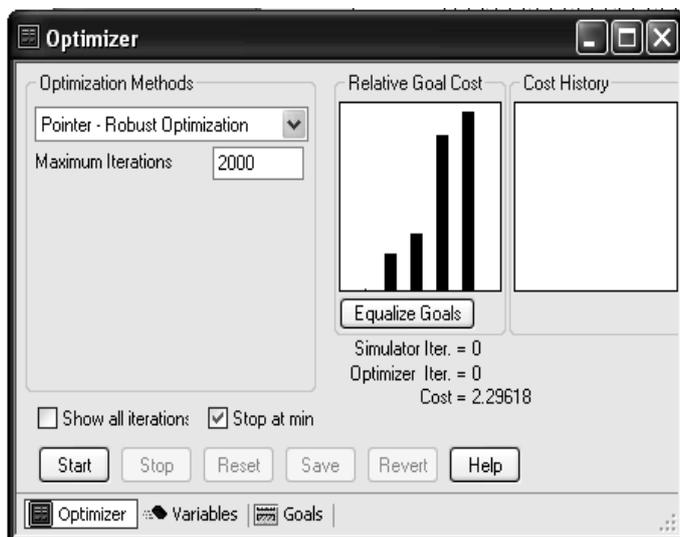


Рис.1.87

В открывшемся окне редактирования переменной отметьте **Optimize** и **Constrain**, в поле **Upper bound** введите **7**, в поле **Lower bound** введите **3**, нажмите **OK**. Аналогично с такими же параметрами назначьте для оптимизации переменные **LL2**, **LS1** и **LS2**.

2. Щёлкните правой кнопкой мышки по переменной **WL1**, отметьте **Optimize** и **Constrain**, в поле **Upper bound** введите **0.5**, в поле **Lower bound** введите **0.2**, нажмите **OK**. Аналогично с такими же параметрами назначьте для опти-

6. Добавьте цель оптимизации по ослаблению в полосе заграждения. Отметьте **FilZ:DB(|S(2,1)|)**, отметьте **Meas<Goal**, снимите “галочки” в **Min** и **Max**, введите **4.5** в поле **Start** и **5.5** в поле **Stop**, введите **-50** поле **Goal**.

7. Добавьте цель оптимизации по КСВн в нижней полосе пропускания. Отметьте **FilZ:VSWR(1)**, отметьте **Meas<Goal**, снимите “галочку” в **Max**, введите **3.5** в поле **Stop**, введите **1.5** поле **Goal**.

8. Добавьте цель оптимизации по КСВн в верхней полосе пропускания. Отметьте **FilZ:VSWR(1)**, от-

метьте **Meas<Goal**, снимите “галочку” в **Min**, введите **6.5** в поле **Start**, введите **1.5** поле **Goal**.

9. Выберите в меню **Simulate>Optimize**. В открывшемся окне (рис. 1.87) выберите метод оптимизации **Pointer-Robust Optimization**, введите число итераций **2000** и нажмите **Start**.

Полученный после оптимизации график ослабления показан на рис. 1.88, а КСВн – на

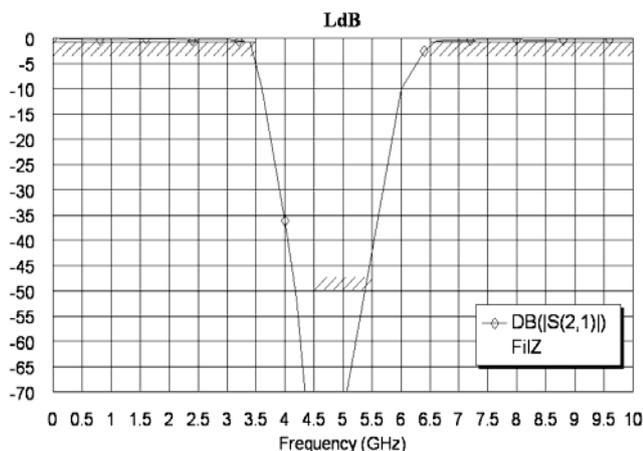


Рис.1.88

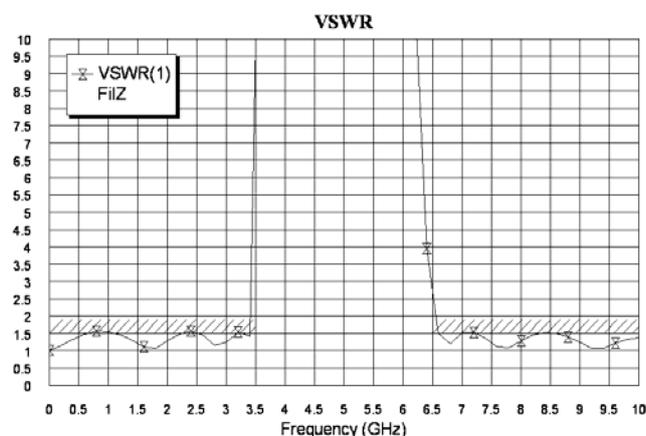


Рис.1.89

рис. 1.89. Из этих графиков видно, что оптимизация хорошо справилась с характеристикой КСВн, но требование по полосе заграждения не выполняется. Попробуем исправить эту характеристику ручной настройкой, причём так, чтобы значения переменных были кратны пяти сотым (предполагаемый размер ячеек сетки в электромагнитной структуре).

Откройте окно схемы. Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов и, установли-

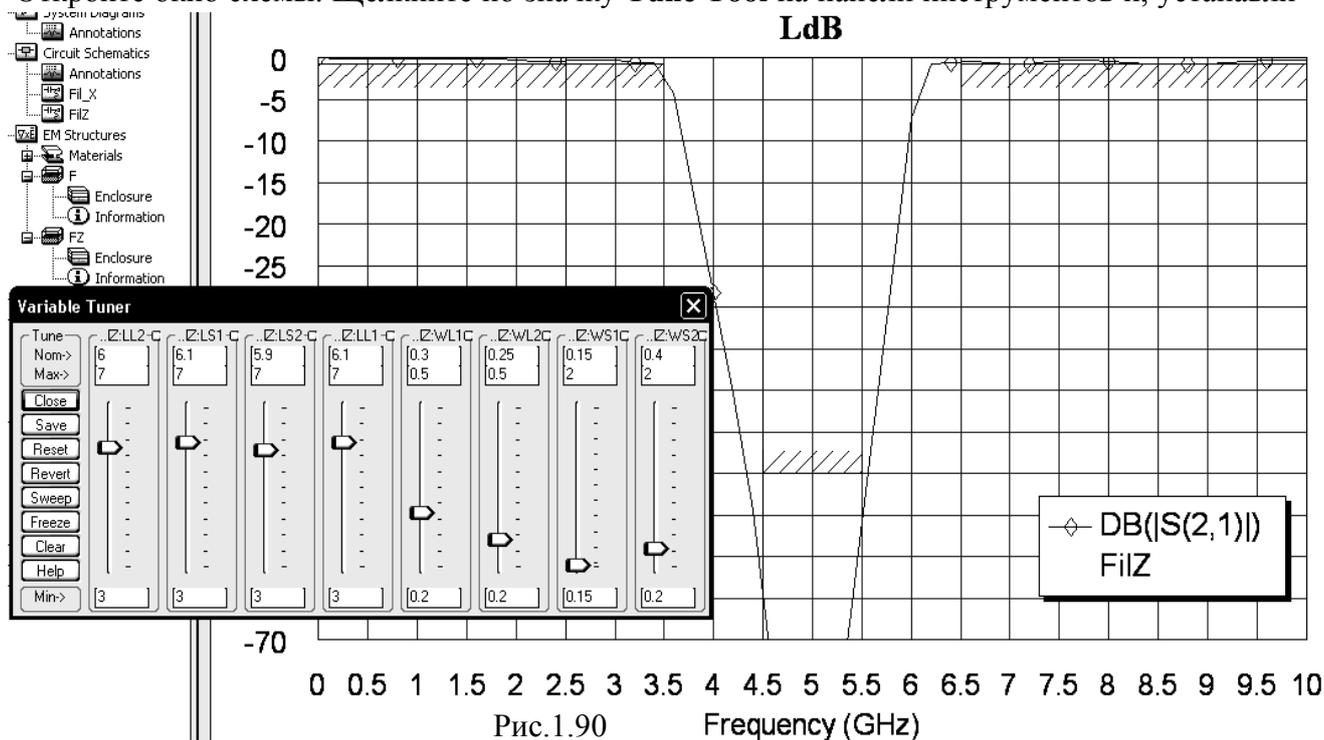


Рис.1.90

вая курсор на переменные и щёлкая мышкой, назначьте все переменные для настройки.

Откройте окно графика LdB. Щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов. Характеристику необходимо сдвинуть вверх по частоте. Для этого двигайте движки переменных LS1 и LS2, определяющих длину шлейфов, в сторону уменьшения, чтобы сдвинуть график вверх по частоте. При необходимости подрегулируйте значения других переменных. Возможный вариант характеристики после настройки показан на рис. 1.90.

Переменные получили значения: LL1=6.1, LL2=6.0, LS1=6.1, LS2=5.9, WL1=0.3, WL2=0.25, WS1=0.15 и WS2=0.4.

1.3.4. Создание электромагнитной структуры.

1. Выберите в меню **Options>Layout Options**. В открывшемся окне в поле **Grid spacing** введите **0.01**, в поле **Database unit size** введите **0.001**, нажмите **OK**.
2. Откройте окно схемы и щёлкните по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов.
3. В открывшемся окне топологии схемы выделите все элементы топологии и щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов.
4. С помощью инструмента **Measure** на панели инструментов определим размер созданной топологии 25.3x6.55 мм.
5. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов и создайте структуру с именем **FZ**.
6. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension(mm)** введите **25.3**, в поле **X-Divisions** введите **506**. В поле **Y-Dimension(mm)** введите **8**, в поле **Y-Divisions** введите **160**. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину слоя **6**; для слоя **2** введите толщину слоя **0.5**, диэлектрическую проницаемость **10.4**, тангенс потерь **0.0001**, нажмите **OK**.
7. Откройте окно топологии схемы. Это окно не отображается в левом окне проекта и если его не видно (закрыто другими окнами), упорядочите расположение окон, например, выбрав в меню **Window>Cascade**. Выделите всю топологию схемы и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов. Откройте окно электромагнитной структуры, щёлкните мышкой по значку **Paste** на панели инструментов и вставьте скопированную топологию в электромагнитную структуру так, чтобы края входного и выходного проводников точно совпадали с границами корпуса. Щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу топологии (вся топология

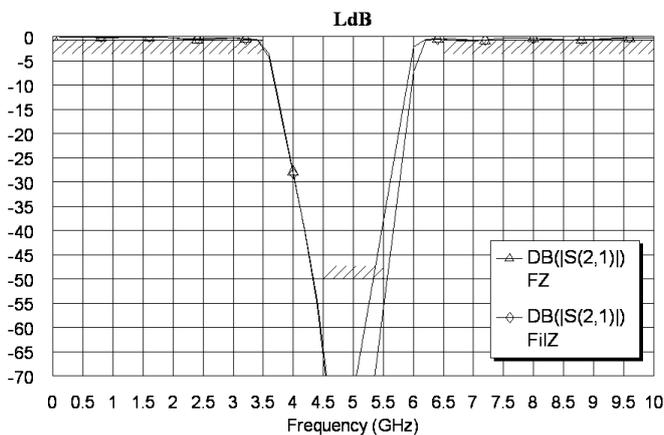


Рис.1.91

должна быть выделена) и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне выберите материал **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.

8. Щёлкните мышкой по входному проводнику, чтобы выделить его, затем щёлкните мышкой по значку **Edge Port** на панели инструментов, установите порт на входе фильтра и сдвиньте референсную плоскость вправо на 1 мм. Аналогично установите порт на выходе фильтра.
9. Откройте окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов.

Расчитанный график показан на рис. 1.91. Характеристика не удовлетворяет требованиям в полосе заграждения и требуется редактирование электромагнитной структуры. Создадим схему с использованием X-моделей.

X-модели являются моделями, полученными на основе электромагнитного моделирования. Эти модели объединяют возможности электромагнитного (высокая точность) и линейного (высокое быстродействие, возможность проведения настройки, оптимизации и статистического анализа) моделирования. Имена всех X-моделей оканчиваются на X (например, MTEEX, MSTEPX, MBEND90X), и их легко отличить от других моделей.

Любая X-модель должна иметь таблицу данных, сгенерированную для модели на подложке с определённой диэлектрической проницаемостью. Для некоторых типичных подложек (например, для диэлектрической проницаемости, равной 9.8) такие таблицы сгенерированы компанией AWR и включены в Microwave Office. Эти модели находятся в корневом ка-

талог программы в папке EM_Models (файлы с расширением EMX). Если для применяемого материала такой таблицы нет, она должна быть заполнена до выполнения анализа.

Замечание. Вместо заполнения X-модели можно использовать имеющуюся заполненную модель с ближайшим значением диэлектрической проницаемости, введя это значение в параметр подложки ErNom. Например, имеющийся файл Microstrip_10p2_MTEEX_A.EMX означает, что это X-модель микрополоскового Т-сочленения для материала с диэлектрической проницаемостью, равной 10.2. Если в параметры подложки рис. 1.82 этого примера ввести ErNom=10.2, то заполнения модели не потребуется. На точности анализа это обычно сказывается незначительно.

1.3.5. Создание схемы с X-моделями.

1. Откройте окно схемы **FilZ**. Щёлкните мышкой по значку **Tune Tool** на панели инструментов и, устанавливая курсор на переменные и щёлкая мышкой, отмените настрой-

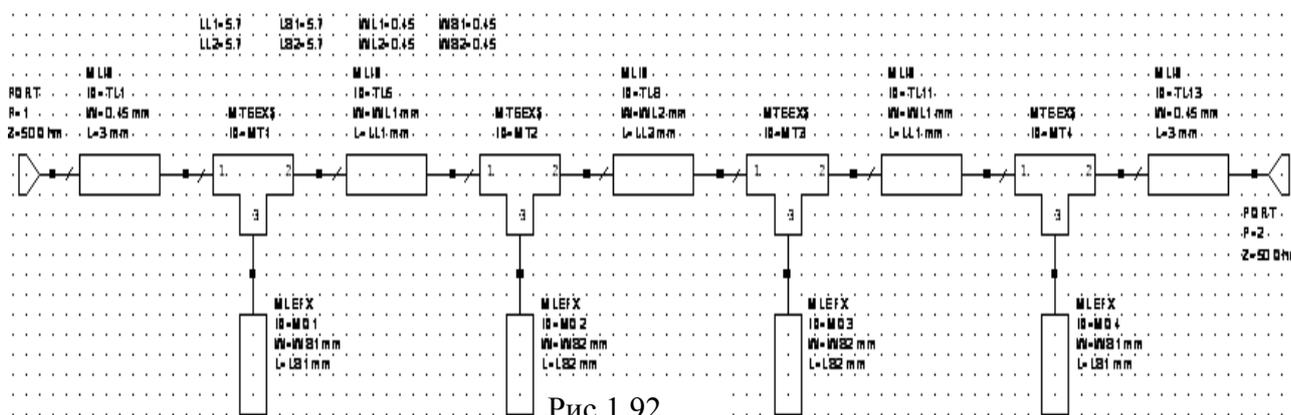


Рис.1.92

ку для всех переменных. Установите курсор на имя схемы в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор на группу **Circuit Schematics**. Щёлкните по имени скопированной схемы правой кнопкой мышки и переименуйте копию схемы в **FilZ_X**.

2. Откройте вкладку **Elem** в левом окне проекта и раскройте группу **Microstrip**. Щёлкните левой кнопкой мышки по подгруппе **Junctions** в левом окне проекта. Щёлкните мышкой по первому элементу **MTEES**, чтобы выделить его, и нажмите клавишу **Delete**, чтобы удалить этот элемент. Перетащите элемент **MTEEXS** в окно схемы и установите его вместо первого удалённого элемента **MTEES**. Аналогично замените все остальные элементы **MTEES** на элементы **MTEEXS**.
3. Щёлкните мышкой по подгруппе **Lines** в левом окне проекта и замените все элементы **MLEF** на элементы **MLEFX**.
4. Дважды щёлкая мышкой по переменным, присвойте им первоначальные значения, как будто схема создаётся впервые: **LL1=5.7**, **LL2=5.7**, **LS1=5.7**, **LS2=5.7**, **WL1=0.45**, **WL2=0.45**, **WS1=0.45** и **WS2=0.45**. Схема должна выглядеть, как на рис. 1.92.
5. Дважды щёлкните по первому элементу **MLEFX** и введите **W=WS1**, **L=LS1**. Эти же значения параметров введите для последнего элемента **MLEFX**. Для второго и третьего элементов **MLEFX** введите **W=WS2**, **L=LS2**.

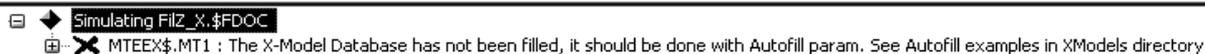


Рис.1.93

1.3.6. Заполнение X-моделей, анализ и оптимизация схемы.

1. Откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта и сделайте активным окно графика **LdB**. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Analyze** на панели инструментов. Если в Microwave Office имеется заполненная X-модель, начнётся анализ схемы. В противном случае открывается окно, в котором сообщается, что модель не заполнена и нужно её заполнить (рис. 1.93). В этом случае закройте это окно сообщения и выполните сле-

дующие действия для заполнения X-модели. Имейте в виду, что заполнение X-модели занимает длительное время (может до нескольких часов). Но однажды заполненная X-модель затем может использоваться во всех проектах, в которых используется материал

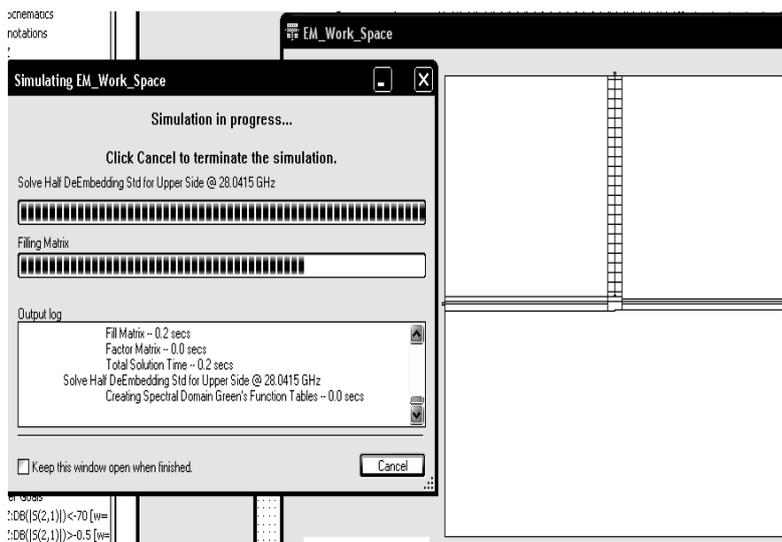


Рис. 1.94

на **1** и нажмите **ОК**.

3. Дважды щёлкните по первому элементу **MLEFX** и аналогично в поле **AutoFill** измените значение **0** на **1**, нажмите **ОК**.

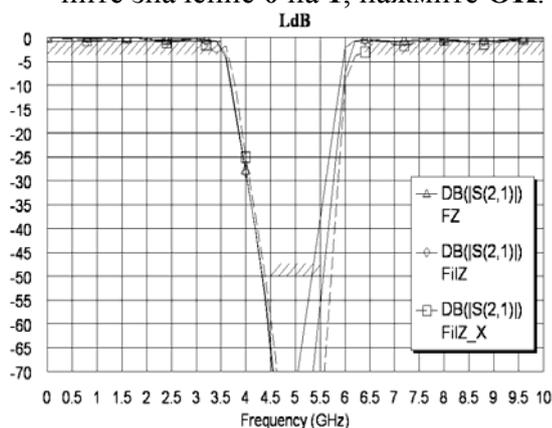


Рис. 1.95

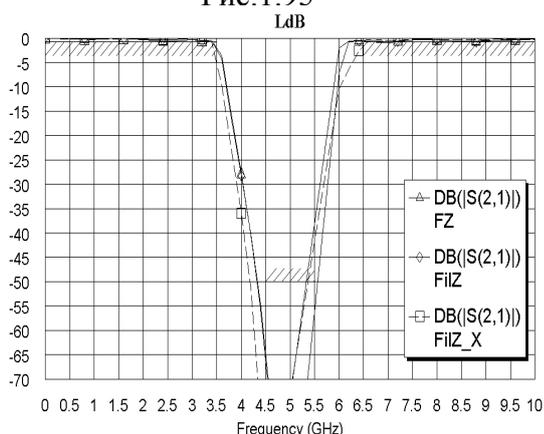


Рис. 1.96

анализа этот процесс будет продолжен с момента его остановки.

5. После окончания процесса заполнения сразу же будет рассчитан график схемы (рис. 1.95, пунктирная линия).
6. Выполним оптимизацию этой схемы. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени одной из целей оптимизации в левом окне проекта и выберите **Properties**. В открывшемся окне в области **Measurement** отметьте имя схемы **FilZ_X:DB((S(2,1)))**, нажмите **ОК**. То же самое сделайте для всех целей оптимизации.

подложки с такой же диэлектрической проницаемостью.

2. Откройте окно схемы **FilZ_X**. Дважды щёлкните по первому элементу **MTEEX\$**. В открывшемся окне свойств элемента щёлкните по кнопке **Show Secondary** (показать дополнительные). В окне будут отображены дополнительные параметры элемента, которые по умолчанию скрыты, а кнопка изменит своё имя на **Hide Secondary** (скрыть дополнительные). В поле **AutoFill** измените значение **0**

4. Откройте окно графика и щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Analyze** на панели инструментов. Откроется окно для выбора решающего устройства. Просто закройте это окно, согласившись с предлагаемым по умолчанию. Начнётся процесс заполнения X-модели и в левом окне проекта в группе **EM Structures** появится электромагнитная структура с именем **EM_Work_Space**. Процесс заполнения отображается точно так же, как и обычный процесс электромагнитного анализа. Если процесс автозаполнения остановится, щёлкнув мышкой по кнопке **Cancel** в окне отображения процесса, открыть окно электромагнитной структуры **EM_Work_Space**, щёлкнув правой кнопкой мышки по этому имени, и продолжить анализ, щёлкнув по значку **Analyze** на панели инструментов, то можно наблюдать, как изменяется электромагнитная структура модели при её заполнении (рис. 1.94). При этом процесс автозаполнения будет продолжен с того момента, где был остановлен. Можно вообще выгрузить проект и выключить компьютер. При следующей загрузке проекта и запуска

7. Выберите в меню команду **Simulate>Optimize**. В открывшемся окне выберите метод оптимизации **Pointer-Robust Optimization**, введите количество итераций **2000** и нажмите **Start**. Оптимизация для этой схемы не привела к улучшению характеристики (рис. 1.96), поэтому подстроим схему вручную.
8. Откройте окно схемы **FilZ_X**, щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов и назначьте все переменные для настройки.
9. Откройте окно графика **LdB**. щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов и, двигая движки переменных на блоке настройки, добейтесь удовлетворительной характеристики, стараясь, чтобы значения переменных были кратны пяти сотым (рис. 1.97).

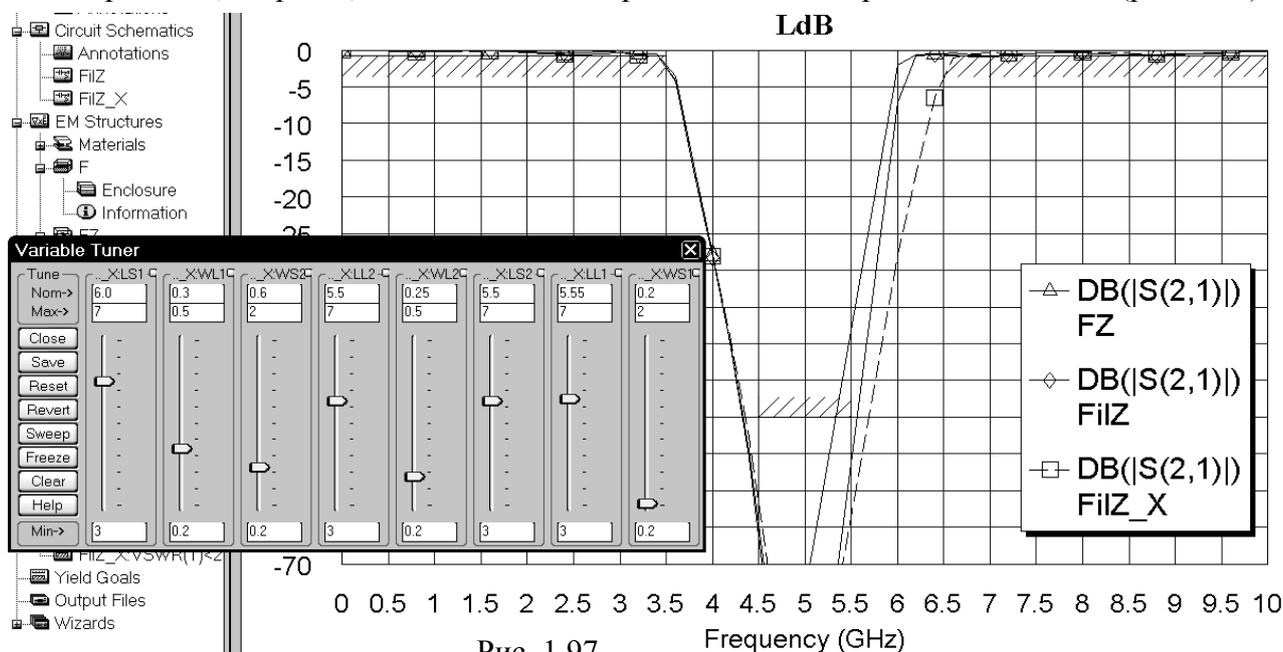


Рис. 1.97

1.3.7. Создание и анализ электромагнитной структуры.

10. Откройте окно схемы **FilZ_X** и щёлкните по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов.
11. В открывшемся окне топологии схемы выделите все элементы топологии и щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов.
12. С помощью инструмента **Measure** на панели инструментов определим размер созданной топологии 24.2x6.45 мм.
13. Установите курсор на имя электромагнитной структуры **FZ**, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures** в левом окне проекта. Переименуйте скопированную структуру в **FZ_X**. Выделите всю топологию и нажмите клавишу **Delete**, чтобы удалить её. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension(mm)** введите **24.2**, в поле **X-Division** введите **484**, нажмите **OK**.
14. Откройте окно топологии схемы. Выделите всю топологию схемы и скопируйте её в буфер обмена, щёлкнув по значку **Copy** на панели инструментов. Откройте окно электромагнитной структуры, щёлкните мышкой по значку **Paste** на панели инструментов и вставьте скопированную топологию в электромагнитную структуру так, чтобы края входного и выходного проводников точно совпадали с границами корпуса (рис. 1.98). Щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу топологии (вся топология должна быть выделена) и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне выберите материал **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.
15. Щёлкните мышкой по входному проводнику, чтобы выделить его, затем щёлкните мышкой по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра. Аналогично установите порт на выходе фильтра. Должна получиться структура, показанная на рис. 1.98.

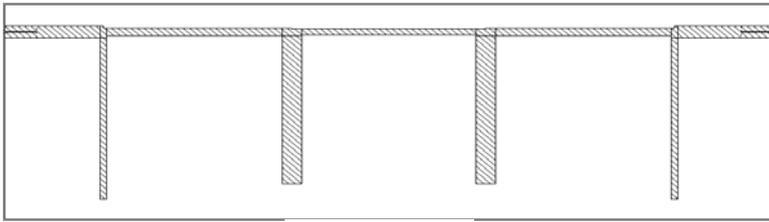


Рис. 1.98

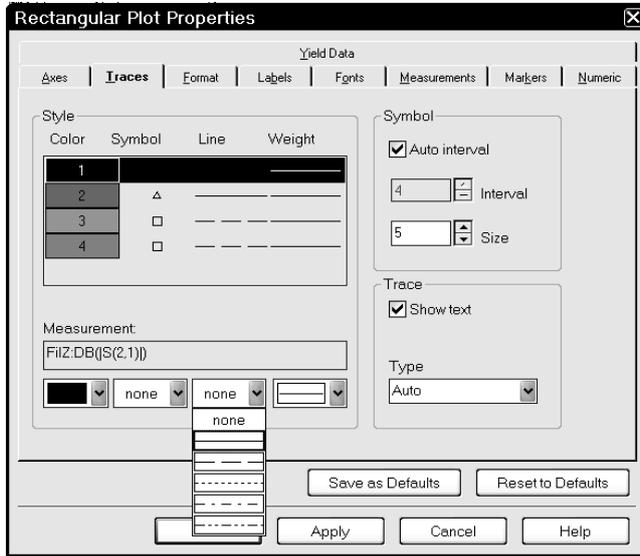


Рис. 1.99

характеристики электромагнитной структуры **FZ**. Нажмите **Apply** и **OK**.

18. Откройте график **VSWR** и измените его свойства, как описано в предыдущем пункте.

Рассчитанный график **LdB** показан на рис. 1.100, а график **KCBн** – на рис. 1.101. Ха-

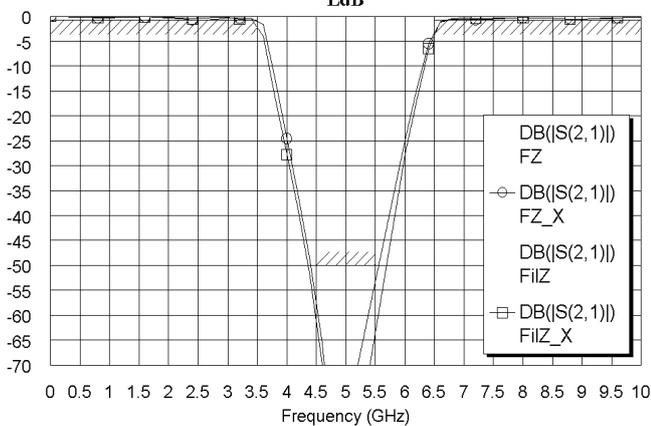


Рис. 1.100

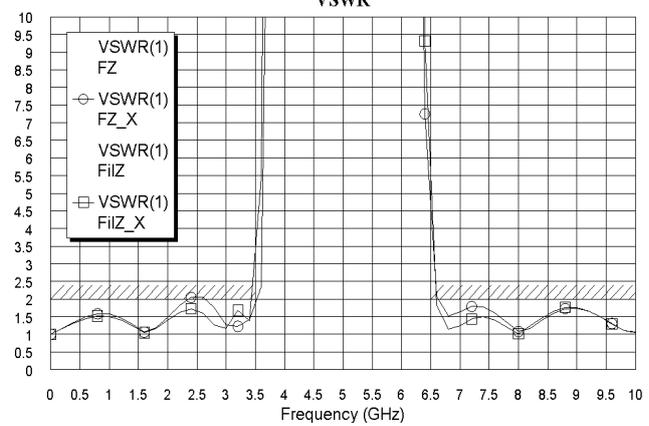


Рис. 1.101

актеристика схемы довольно хорошо совпадает с характеристикой электромагнитной структуры и редактирования топологии не требуется.

В составе Microwave Office имеется пример ...\Examples\Circuit Design Types\Filters\18Ghz_LPF, в котором показано моделирование фильтра на шлейфах, в схеме которого используются X-модели и учитывается связь между шлейфами. Т.е. вместо элементов отдельных отрезков линий используется элемент связанных линий. Показано хорошее совпадение характеристик схемы, электромагнитной структуры и экспериментальной характеристики.

Очевидно, чем точнее схема отражает особенности электромагнитной структуры, тем точнее выполняется линейное моделирование и сокращается время на проектирование. Однако добиться этого не всегда просто и ожидаемого эффекта от использования X-моделей может не получиться.

16. Откройте окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов.

17. Чтобы не затемнять рассчитанный график характеристиками предыдущих схемы и электромагнитной структуры, не удаляя их из проекта

(на всякий случай), можно сделать следующее. Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и выберите **Properties**. В открывшемся окне свойств графика на вкладке **Traces** в области **Style** в столбце **Color** отметьте имя схемы **FilZ:DB(|S(2,1)|)** (имя схемы или электромагнитной структуры в отмеченной строке отображается в поле **Measurement**). В строке редактирования в нижней части области **Style** щёлкните по кнопке в правом конце поля столбца **Symbol** и в выпадающем списке выберите **none**. То же самое сделайте в столбце **Line** (рис. 1.99). Таким же образом снимите отображение символов и линии для

2. Фильтры нижних частот

2.1. Фильтр с полосой пропускания до 3 ГГц

Спроектировать фильтр нижних частот с полосой пропускания до 3 ГГц и обеспечивающий ослабление сигнала не менее 30 дБ на частоте 4.5 ГГц. Для реализации фильтра выберем структуру из чередующихся высокоомных отрезков линии (индуктивности) и низкоомных отрезков (ёмкости).

2.1.1. Создание схемы фильтра.

Вначале создадим схему, которая кажется очевидной.

1. Создайте новый проект и сохраните его под именем **FN3**.
2. Щёлкните по значку **New Schematic** и создайте схему с именем **FN**.
3. Откройте в левом окне вкладку **Elem** и раскройте группу **Microstrip**.
4. Щёлкните по подгруппе **Lines**. Найдите элемент **MLIN** и перетащите его в окно схемы.

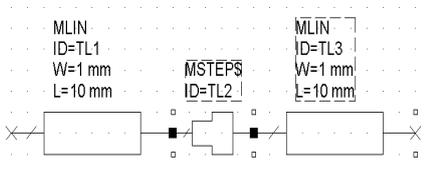


Рис. 2.1

5. Щёлкните по подгруппе **Junctions**. Найдите элемент **MSTEP\$**, перетащите его в окно схемы и подключите к правому выводу элемента **MLIN**. Щёлкните по элементу **MLIN**, чтобы выделить его. Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Подключите скопированный элемент к правому выводу элемента **MSTEP\$** (рис. 2.1).

6. Щёлкните по элементу **MSTEP\$**, нажмите клавишу **Shift** и щёлкните по второму элементу **MLIN**. Оба эти элемента должны быть выделены (рис.2.1). Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Подключите скопированные элементы к правому выводу схемы.
7. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и подключите скопированные элементы к правому выводу схемы.
8. Повторите шаг 7.
9. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов, переместите курсор в окно схемы, три раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированные элементы на 270 градусов, и подключите их к последнему выводу схемы.
10. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов, переместите курсор в окно схемы, два раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированные элементы на 180 градусов, и подключите их к последнему выводу схемы.
11. Два раза повторите шаг 10.
12. Щёлкните по значку **Port** на панели инструментов и подключите порт ко входу схемы. Аналогично подключите порт к выходу схемы.
13. Щёлкните по группе **Substrates** в левом окне проекта, выберите элемент **MSUB** и перетащите его на свободное место в окне схемы. Полученная схема показана на рис. 2.2.

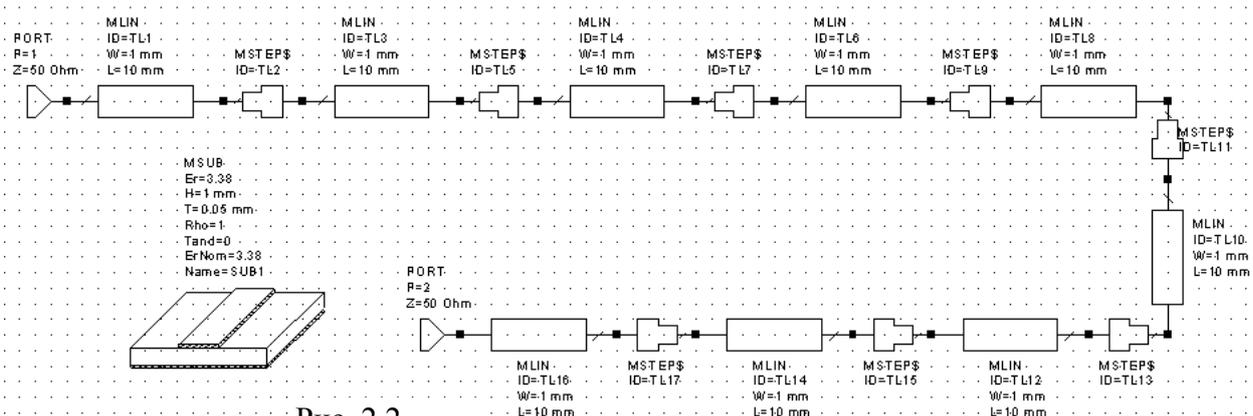
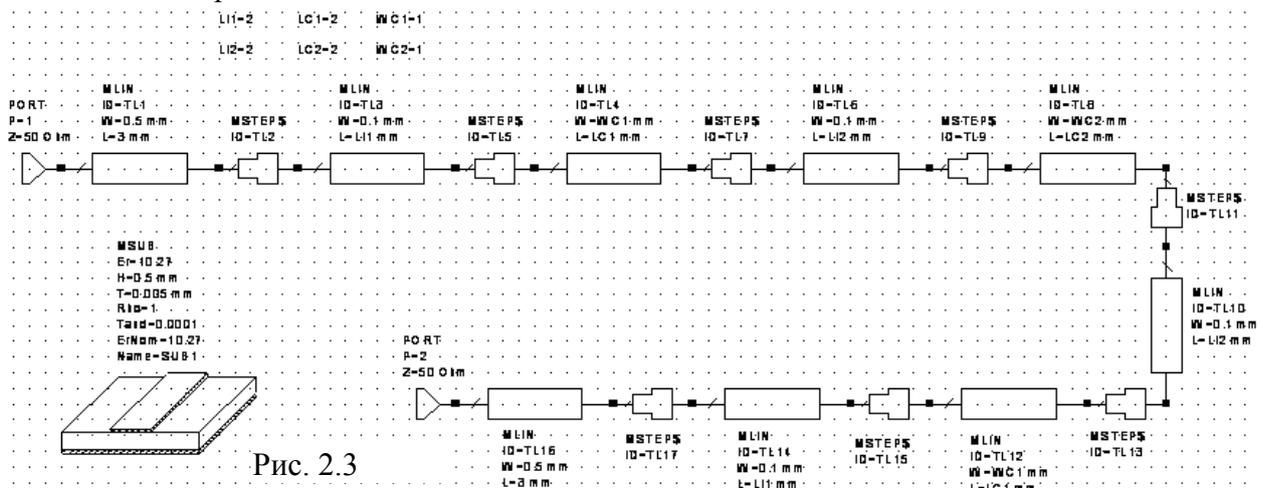


Рис. 2.2

2.1.2. Добавление переменных, редактирование элементов, определение частот, добавление графика и анализ схемы.

Поскольку никаких предварительных расчётов не проводилось, присвоим переменным заведомо малые значения. В таком случае не нужно гадать, в какую сторону изменять эти значения при настройке.

- Щёлкните по значку **Equation** на панели инструментов. Переместите курсор в окно схемы, поместите поле для ввода переменной в свободном месте на поле схемы и щёлкните мышкой. Введите **LI1=2**. Аналогично введите переменную **LI2=2**. Эти переменные будут определять длину индуктивностей.
- Аналогично введите переменные **LC1=2**, **LC2=2**, **WC1=1** и **WC2=1**, которые будут определять длину и ширину емкостей.
- Дважды щёлкните по первому элементу **MLIN (ID=TL1)** в схеме и введите **W=0.5** и **L=3**. Такие же значения введите и для последнего элемента **MLIN**. Хотя значение длины не принципиально для этих элементов и можно ввести любую длину или оставить по умолчанию. Нажмите **ОК**.
- Дважды щёлкните по второму элементу **MLIN (ID=TL3)** и введите **W=0.1** и **L= LI1** (ширину для индуктивных полосок выберем постоянной и равной 0,1 мм). Эти же значения введите для предпоследнего элемента **ID=TL14**.
- Для третьего (**ID=TL4**) и седьмого (**ID=TL12**) элементов введите **W=WC1** и **L=LC1**.
- Для четвертого (**ID=TL6**) и шестого (**ID=TL10**) элементов введите **W=0.1** и **L=LI2**.
- Для пятого элемента (**ID=TL8**) введите **W=WC2** и **L=LC2**.
- Дважды щёлкните по элементу **MSUB** и введите значения параметров **Er=10.27**, **H=0.5**, **T=0.005**, **Tand=0.0001** и **ErNom=10.27**. Нажмите **ОК**. Отредактированная схема показана на рис. 2.3.



- Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов. Поочерёдно устанавливая курсор на переменные так, чтобы курсор отображался в виде перекрестия, и, щёлкая мышкой, назначьте все переменные для настройки. Затем щёлкните мышкой на свободном месте на поле схемы, чтобы отменить режим назначения переменных для настройки.
- Откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта и дважды щёлкните по **Project Options**. В открывшемся окне на вкладке **Frequencies** в поле **Start(GHz)** введите **2**, в поле **Stop(GHz)** введите **6** и в поле **Step(GHz)** введите **0.2**. (Переключаться между полями можно, нажимая клавишу **Tab**). Нажмите **Apply** и затем **ОК**.
- Щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов и создайте график с именем **LdB**.
- Щёлкните правой кнопкой мышки по имени графика **LdB** в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне в поле **To Port Index** введите **2**, в поле **From Port Index** введите **1** и установите “галочку” в поле **dB**. Нажмите **Apply** и затем **ОК**.

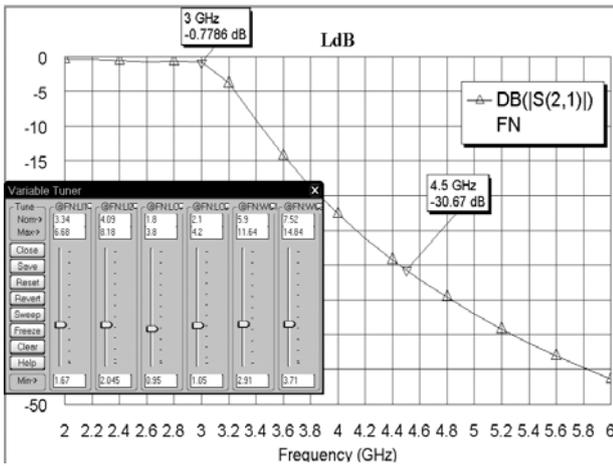


Рис. 2.7

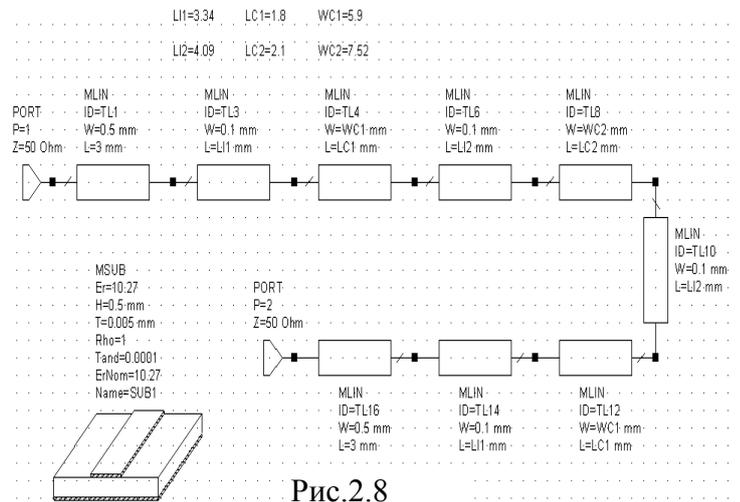


Рис.2.8

- Щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов. Двигая движки переменных на блоке настройки, добейтесь нужной характеристики (рис. 2.7). При необходимости можно изменить пределы регулировки переменных, изменяя значения в полях **Max->** и **Min->** на блоке настройки.
- Сделайте активным окно схемы. После настройки переменные получили следующие значения: $L1=3.34$, $L2=4.09$, $LC1=1.8$, $LC2=2.1$, $WC1=5.9$ и $WC2=7.52$ (рис. 2.8).

2.1.4. Создание и анализ электромагнитной структуры.

- Щёлкните по значку **New Em Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру с именем **FN3**.

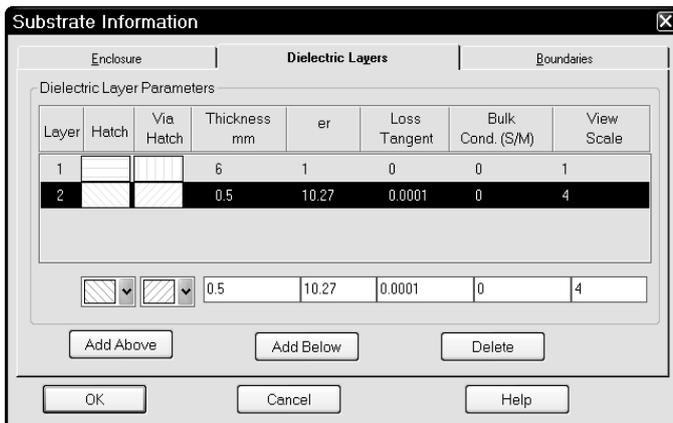


Рис. 2.9

- Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. На вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension (mm)** введите **14.8**, в поле **X-Divisions** введите **148**, в поле **Y-Dimension (mm)** введите **11.5** и в поле **Y-Divisions** введите **115**. На вкладке **Dielectric Layers** отметьте верхний слой (**Layer 1**) и в строке редактирования (нижняя строка) в поле **Thickness mm** введите **6**. Отметьте второй слой. В поле **Thickness mm** введите **0.5**, в поле **er** введите **10.27**, в поле **Loss Tangent** введите

0.0001 и в поле **View Scale** введите **4** (рис. 2.9). Нажмите **OK**.

- Щёлкните по значку **View All** на панели инструментов, чтобы видеть всю электромагнитную структуру. Чтобы начертить входной проводник, щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов. Поместите курсор на левый край электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В поле **x** введите **0**, в поле **y** введите **4**, нажмите **OK** и затем клавишу **Tab**. В поле **dx** введите **3**, в поле **dy** введите **0.5**. Нажмите **OK**.
- Чтобы начертить первый индуктивный проводник, щёлкните по значку **Polygon Conductor** на панели инструментов. Установите курсор на правую сторону начерченного входного проводника на 2 клеточки сетки выше нижней стороны входного проводника и щёлкните левой кнопкой мышки. Затем последовательно перемещайте курсор следующим образом, щёлкая мышкой после каждого перемещения: на 0.3 вправо, на 2.7 вниз, на 0.4 вправо, на 0.1 вверх, на 0.3 влево, на 2.7 вверх, на 0.4 влево (здесь курсор должен оказаться на правой стороне входного проводника) и в этом месте щёлкните мышкой два раза.

5. Чтобы начертить первый емкостной проводник, щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов. Поместите курсор в любое свободное место на электромагнитной структуре и нажмите клавишу **Tab**. Введите в поля **x** и **y** любые значения координат в пределах электромагнитной структуры, например, **5** и **5**. Нажмите **OK** и затем снова нажмите клавишу **Tab**. В поле **dx** введите **1.8**, поле **dy** введите **5.9**, Нажмите **OK**. Установите курсор на полученный прямоугольник, нажмите левую кнопку мышки и переместите прямоугольник так, чтобы соединить индуктивный проводник с серединой емкостного прямоугольника. Должна получиться топология, показанная на рис. 2.10.

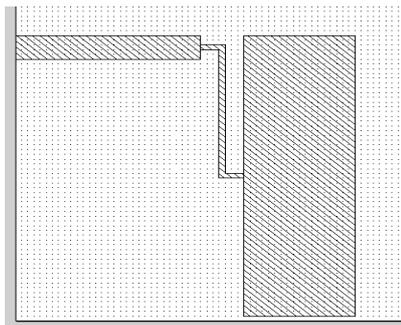


Рис. 2.10

6. Чтобы начертить второй индуктивный проводник, щёлкните по значку **Polygon Conductor** на панели инструментов. Установите курсор на середину правой стороны емкостного проводника и щёлкните левой кнопкой мышки. Затем последовательно перемещайте курсор следующим образом, щёлкая мышкой после каждого перемещения: на 0.3 вправо, на 3.5 вверх, на 0.4 вправо, на 0.1 вниз, на 0.3 влево, на 3.5 вниз, на 0.4 влево (здесь курсор должен оказаться на правой стороне емкостного проводника) и в этом месте щёлкните мышкой два раза.
7. Чтобы начертить второй емкостной проводник, щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов. Поместите курсор в любое свободное место на электромагнитной структуре и нажмите клавишу **Tab**. Введите в поля **x** и **y** любые значения координат в пределах электромагнитной структуры, например, **7** и **5**. Нажмите **OK** и затем снова нажмите клавишу **Tab**. В поле **dx** введите **2,1**, в поле **dy** введите **7,5**, Нажмите **OK**. Установите курсор на полученный прямоугольник, нажмите левую кнопку мышки и переместите прямоугольник так, чтобы соединить емкостной проводник с индуктивным.
8. Выделите второй индуктивный проводник, щёлкнув по нему мышкой. Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Поместите скопированный проводник на свободном месте на электромагнитной структуре. Щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы закрепить его, и затем щёлкните по нему правой кнопкой мышки и выберите **Flip**. Установите курсор на скопированный проводник, нажмите левую кнопку мышки и, двигая мышкой, создайте его зеркальное отображение. Установив курсор на полученный проводник и, нажав кнопку мышки, соедините его с емкостным проводником фильтра.
9. Выделите первый емкостной проводник, скопируйте его и соедините с последним индуктивным проводником.
10. Скопируйте первый индуктивный проводник, создайте его зеркальное отображение и соедините с последним емкостным проводником.
11. Скопируйте входной проводник и соедините его с последним индуктивным проводником. Дважды щёлкните по созданному выходному проводнику, установите курсор на ромб посередине правой стороны этого проводника, так чтобы он отображался в виде двойной стрелки, нажмите левую кнопку мышки и совместите эту сторону с правым краем корпуса.
12. Выделите входной проводник, щёлкнув по нему мышкой. Щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов, установите курсор на левый край входного проводника так, чтобы на этом краю появился небольшой прямоугольник, и щёлкните мышкой. Щёлкните по этому прямоугольнику, установите курсор на правую сторону прямоугольника так, чтобы курсор отображался в виде двойной стрелки. Нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор вправо на величину **dx: 1**. Аналогично установите порт на выходной проводник.
13. Выделите все элементы топологии, выбрав в меню **Edit>Select All**. Или установите курсор левее и выше электромагнитной структуры, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор правее и ниже электромагнитной структуры. Установите курсор на

любой элемент топологии, нажмите левую кнопку мышки и расположите топологию симметрично относительно стенок корпуса.

14. Щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу топологии (все элементы должны быть выделены) и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне в поле **Selected Material** введите **1/2oz Cu**, щелкнув по кнопке в правом конце этого поля. Щёлкнув по кнопке **Edit Material** в этом окне можно изменить отображаемый цвет материала. Нажмите **OK**. Полученная электромагнитная структура показана на рис. 2.11.

15. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 2.12.

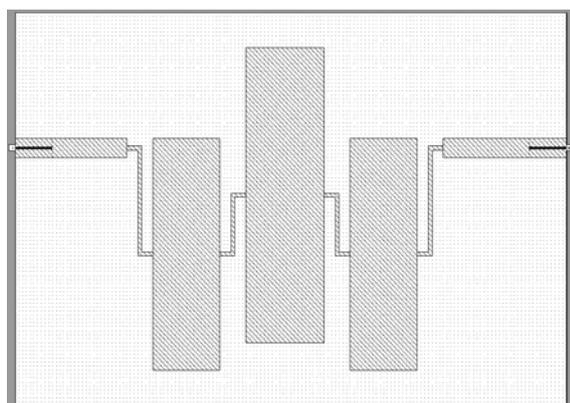


Рис. 2.11

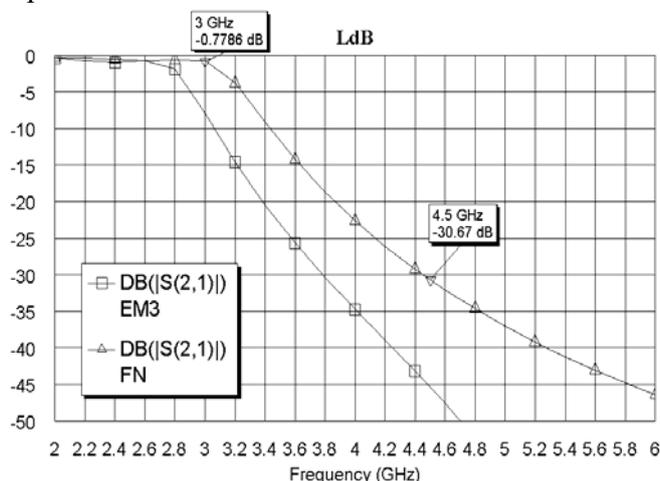


Рис. 2.12

2.1.5. Редактирование электромагнитной структуры.

Как видно из графиков, характеристику электромагнитной структуры для получения требуемых параметров необходимо сдвинуть в сторону верхних частот. Для этого уменьшим ширину емкостных проводников.

1. Установите курсор на имя электромагнитной структуры **EM3** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**. На рабочем поле проекта откроется окно с копией электромагнитной структуры, а в левом окне проекта в группе **EM Structures** появится имя скопированной структуры **Copy of EM3**. Щёлкните правой кнопкой мышки по этому имени и выберите **Rename EM Structure**. Переименуйте структуру в **EM3A**.
2. Дважды щёлкните по первому емкостному проводнику в скопированной структуре, установите курсор на ромбик посередине верхней стороны так, чтобы он отображался в виде двойной стрелки, нажмите кнопку мышки и сдвиньте эту сторону вниз на **dy: 0.2**. Затем установите курсор на ромбик посередине нижней стороны и сдвиньте эту сторону вверх на величину **dy: -0.2**. На такую же величину уменьшите размеры второго и третьего емкостных проводников.

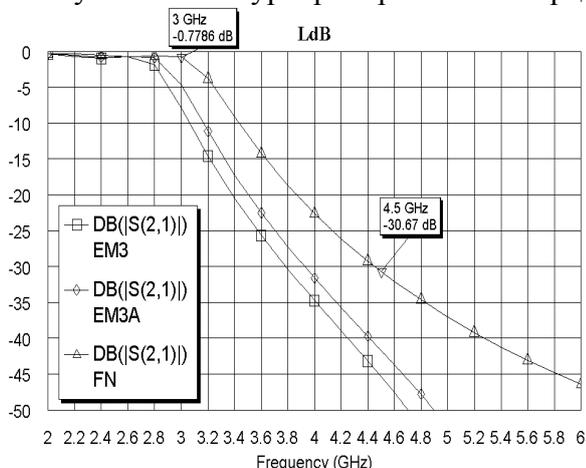


Рис. 2.13

3. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 2.13. Как видно из этого графика, необходимо и дальше уменьшать ширину емкостных проводников.

4. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени электромагнитной структуры **EM3** в левом окне проекта и выберите **Delete EM Structure**, чтобы удалить эту структуру.

- Скопируйте оставшуюся электромагнитную структуру **EM3A**, как описано в п. 3 и переименуйте её в **EM3**.
- Укоротите все емкостные проводники на 1 мм (по 0.5 мм с верхней стороны и нижней, как описано в п. 3). Откройте окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 2.14. Полученная характеристика уже удовлетворяет поставленным требованиям. Окончательная топология фильтра показана на рис. 2.15.

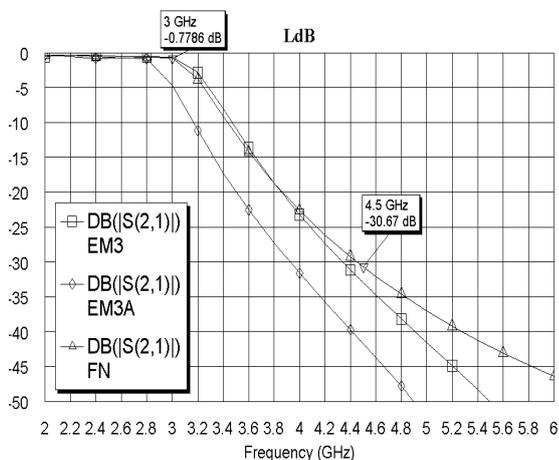


Рис.2.14

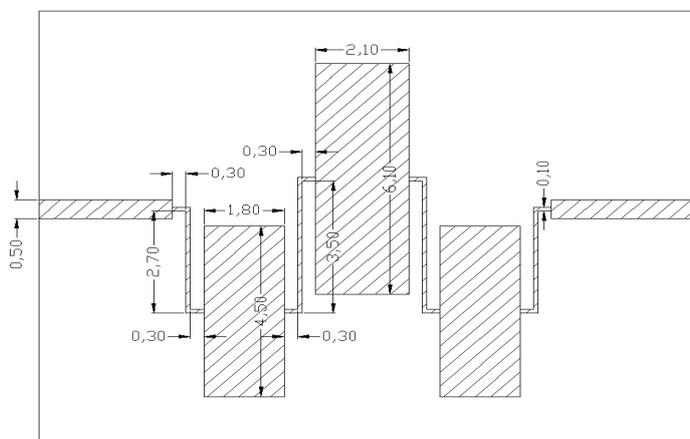


Рис. 2.15

2.2. Фильтр на емкостных секторах.

Требуется спроектировать фильтр с полосой пропускания до 5 ГГц с ослаблением не менее 30 дБ в диапазоне 8-14 ГГц на подложке из материала ФЛАН10 толщиной 0,5 мм.

2.2.1. Создание схемы.

- Создайте новый проект и сохраните его с именем **FN5**.
- Создайте схему с именем **Fil**.
- В левом окне проекта откройте вкладку **Elem**, раскройте группу **Microstrip** и щёлкните по подгруппе **Lines**.
- Найдите в нижней части левого окна элемент **MLIN**, перетащите его в окно схемы и щёлкните левой кнопкой мышки.
- Повторите п.4 и соедините второй элемент **MLIN** с первым.
- В левом окне проекта в группе **Microstrip** щёлкните по подгруппе **Other**. Найдите в нижней части левого окна элемент **MSRSTUB2**, перетащите его в окно схемы и соедините со вторым элементом **MLIN**.
- Щёлкните по одному из элементов **MLIN**, затем последовательно щёлкните по значкам **Copy** и **Paste** на панели инструментов и соедините скопированный элемент с элементом **MSRSTUB2**.
- Щёлкните по элементу **MSRSTUB2**, затем последовательно щёлкните по значкам **Copy** и **Paste** на панели инструментов, переместите курсор на поле схемы, щёлкните два раза правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированный элемент на 180 градусов, и соедините его с последним элементом **MLIN**.
- Скопируйте любой элемент **MLIN**, как описано выше, щёлкните три раза правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированный элемент на 270 градусов, и соедините его со вторым элементом **MSRSTUB2**.
- Щёлкните по второму элементу **MSRSTUB2**, скопируйте его и соедините с последним элементом **MLIN**.
- Нажмите клавишу **Shift** и, не отпуская клавиши, щёлкните по первому и затем по второму элементам **MLIN**, чтобы выделить оба эти элемента. Скопируйте эти элементы, щёлкните два раза правой кнопкой мышки, чтобы развернуть их на 180 градусов, и соедините с последним элементом **MSRSTUB2**.

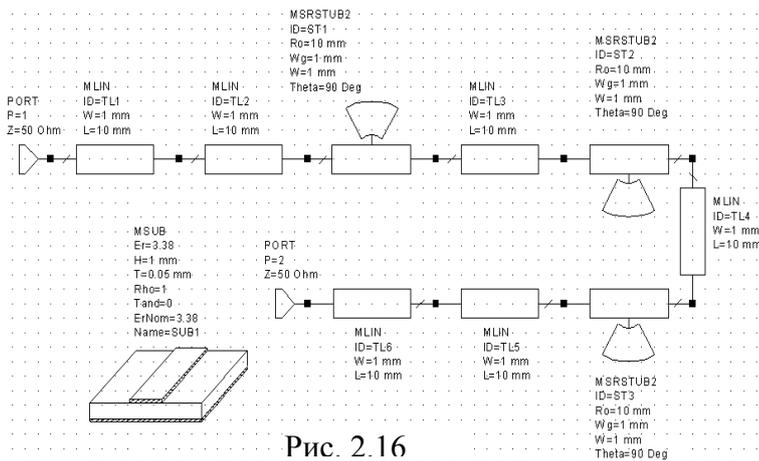


Рис. 2.16

12. Щёлкните по значку **Port** на панели инструментов и подключите его ко входу фильтра. Аналогично подключите порт к выходу фильтра.

13. Щёлкните по группе **Substrates** в левом окне проекта, найдите в нижней части левого окна элемент подложки **MSUB**, перетащите его в окно схемы и поместите на свободном месте в окне схемы.

Полученная схема показана на рис. 2.16.

2.2.2. Добавление переменных редактирование элементов схемы.

Ширину индуктивных проводников будем считать постоянной и равной 0,1 мм. Углы секторов и ширину их основания также будем считать постоянными и равными соответственно 60 градусов и 0,5 мм. Хотя, при необходимости, и эти параметры могут быть заданы для настройки.

1. Щёлкните по значку **Equation** на панели инструментов, поместите курсор на свободное место в схеме и щёлкните мышкой. В открывшемся поле ввода введите длину индуктивного проводника **LI1=1** и щёлкните мышкой на свободном месте в окне схемы. Аналогично введите переменные **LI2=1**, **R1=1** и **R2=1** (радиусы секторов).
2. Дважды щёлкните по первому элементу **MLIN** и в открывшемся окне свойств элемента введите **W=0.5 mm** и **L=3 mm**. Нажмите **OK**. Такие же параметры введите для последнего элемента **MLIN**.
3. Дважды щёлкните по второму элементу **MLIN** и введите **W=0.1 mm** и **L=LI1 mm**. Нажмите **OK**. Такие же параметры введите для предпоследнего элемента **MLIN**.
4. Дважды щёлкните по третьему элементу **MLIN** и введите **W=0.1 mm** и **L=LI2 mm**. Нажмите **OK**. Такие же параметры введите для четвёртого элемента **MLIN**.
5. Дважды щёлкните по первому элементу **MSRSTUB2** и введите **Ro=R1 mm**, **Wg=0.5 mm**, **W=0.1 mm** и **Theta=60 Deg**. Нажмите **OK**. Такие же параметры введите для третьего элемента **MSRSTUB2**.

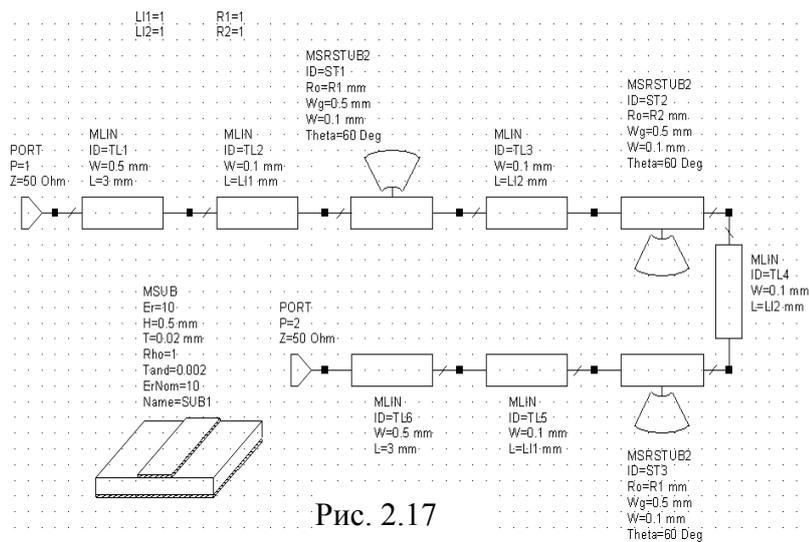


Рис. 2.17

6. Дважды щёлкните по второму элементу **MSRSTUB2** и введите **Ro=R2 mm**, **Wg=0.5 mm**, **W=0.1 mm** и **Theta=60 Deg**. Нажмите **OK**.

7. Дважды щёлкните по элементу **MSUB** и введите **Er=10**, **H=0.5 mm**, **T=0.02 mm**, **Tand=0.002** и **ErNom=10**.

Отредактированная схема показана на рис. 2.17.

2.2.3. Анализ схемы.

1. Откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта. Дважды щёлкните по **Project Options** и на вкладке **Frequencies** в поле **Start(GHz)** введите **1**, в поле **Stop(GHz)** введите **15** и в поле **Step(GHz)** введите **0.5**, нажмите **Apply** и **OK**.
2. Щёлкните по значку **New Graph**, введите имя графика **LdB** и нажмите **OK**.
3. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени графика **LdB** в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. Введите **2** в поле **To Port Index** и **1** в поле **From Port Index**, отметьте **dB**, нажмите **Apply** и **OK**.

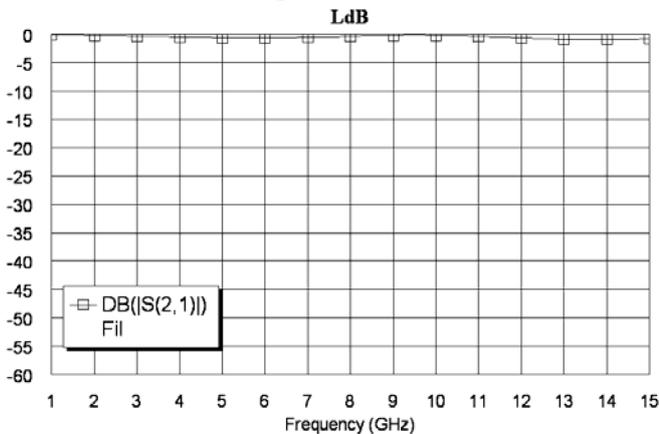


Рис. 2.18

На вкладке **Axes** отметьте ось **x**, снимите “галочку” в **Auto divs.** и в поле **Step** введите **1**. Нажмите **Apply**. Отметьте ось **Left 1**. Снимите “галочку” в **Auto limits** и в поле **Min** введите **-60**. Снимите “галочку” в **Auto divs.** и в поле **Step** введите **0.5**. Нажмите **Apply** и **OK**.

Полученный график показан на рис. 2.18.

2.2.4. Настройка схемы.

1. Сделайте активным окно схемы. Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов, установите курсор на переменную **LI1** и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы назначить переменную для настройки. Затем, перемещая курсор на остальные переменные и щёлкая мышкой, назначьте для настройки все переменные, после чего щёлкните на свободном месте схемы, чтобы отменить режим назначения переменных.

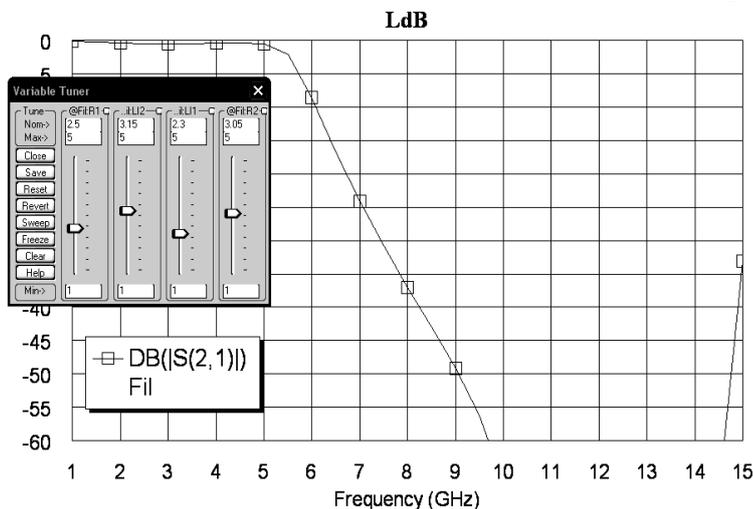


Рис. 2.19

Двигая движки блока настройки, добейтесь требуемой характеристики (рис. 2.19).

2. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов. Двигая движки блока настройки, добейтесь требуемой характеристики (рис. 2.19).
3. Закройте блок настройки и сделайте активным окно схемы. В этом примере переменные получили следующие значения: $LI1=2.3$, $LI2=3.15$, $R1=2.5$ и $R2=3.05$ (после округления до пяти сотых).

2.2.5. Создание и анализ электромагнитной структуры.

1. Выберите в меню команду **Options>Layout Options**. На вкладке **Layout** открывшегося окна (рис. 2.20) в поле **Grid spacing** введите **0.05**, а в поле **Database unit size** введите **0.001**. Нажмите **OK**.
2. Сделайте активным окно схемы. Щёлкните по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов. Выберите в меню команду **Edit>Select All** и затем **Edit>Snap**

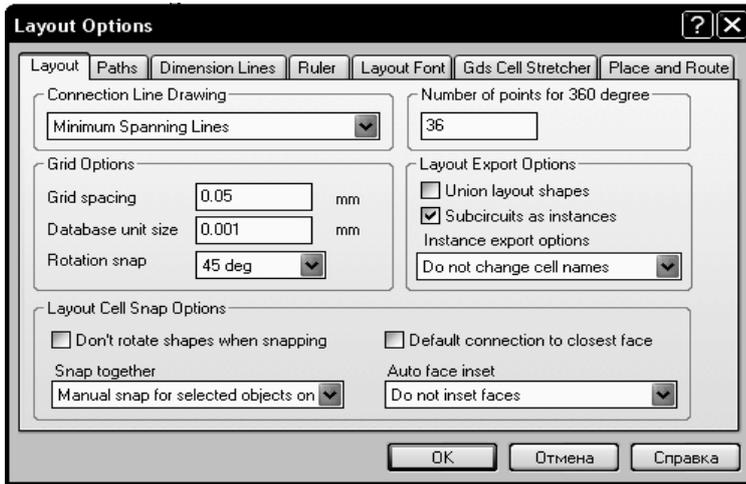


Рис. 2.20

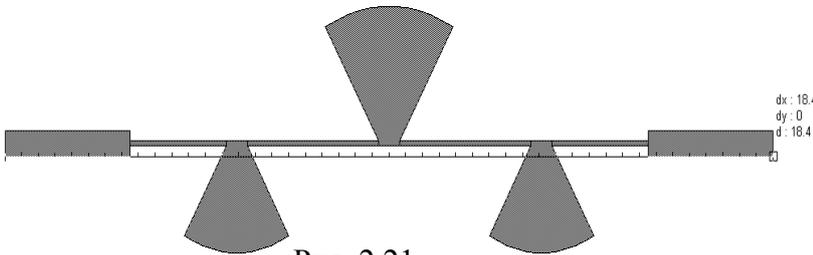


Рис. 2.21

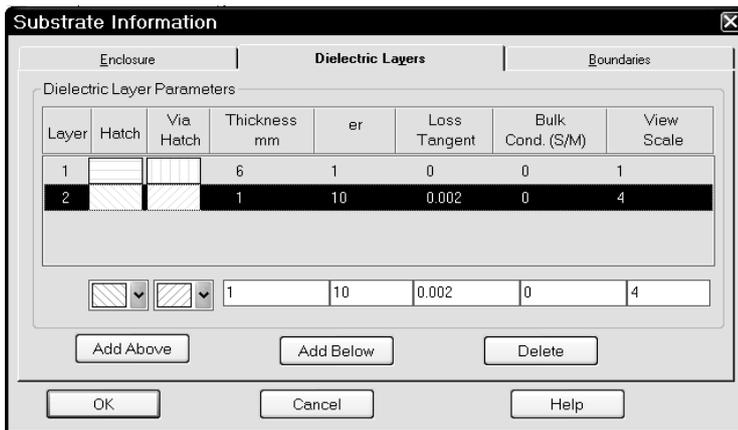


Рис. 2.22

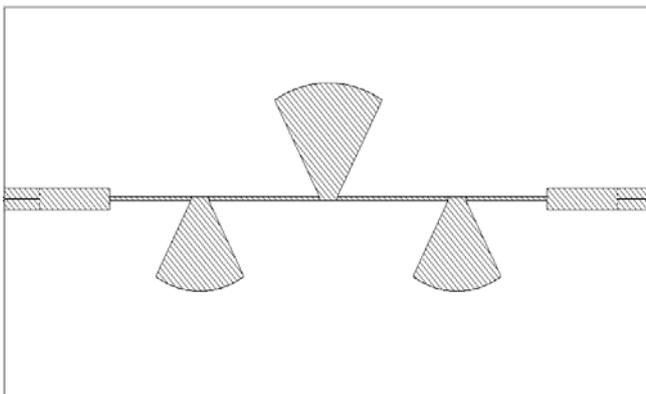


Рис. 2.23

Together, чтобы правильно отобразить все соединения элементов топологии. Щёлкните по значку **Measure** (Измерять) на панели инструментов. Установите курсор на нижний левый угол входного проводника, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор к нижнему правому углу выходного проводника, чтобы измерить длину топологии, которая определяет длину корпуса электромагнитной структуры.

Аналогично измерьте ширину топологии. Полученная топология показана на рис. 2.21.

3. Выделите все элементы топологии и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру с именем **FN5**.
4. Щёлкните по значку **Substrate Information**. На вкладке **Enclosure** открывшегося окна в поле **X-Dimension(mm)** введите **18.4**, в поле **X-Divisions** введите **180**, в поле **Y-Dimension(mm)** введите **9** и в поле **Y-Divisions** введите **90**. Размер клеток сетки по осям **X** и **Y** будет **0.1** мм. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя 1 введите толщину **6**, для слоя 2 введите толщину **0.5**, диэлектрическую проницаемость **10**, тангенс потерь **0.002** и масштаб отображения **4** (рис.2.22). Нажмите **OK**. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и поместите скопированную топологию по центру электромагнитной структуры.

5. Щёлкните мышкой по входному проводнику схемы, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов. Установите порт на входе фильтра и сдвиньте референсную

плоскость вправо на 1 мм. Аналогично установите порт на выходе фильтра. Полученная электромагнитная структура показана на рис. 2.23.

6. Сделайте активным окно графика и выполните анализ, щёлкнув по значку **Analyze** на

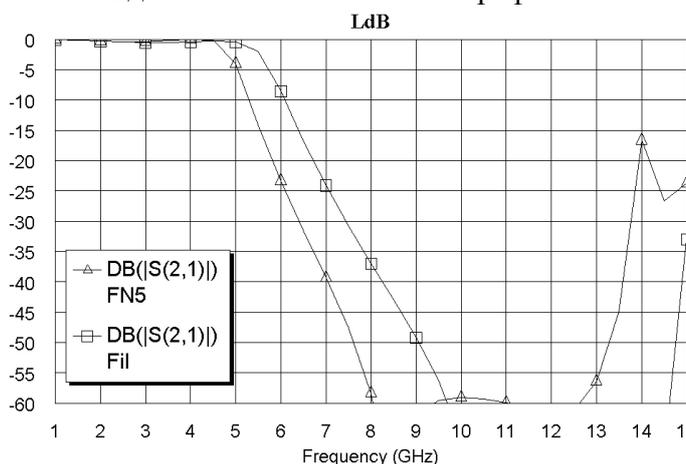


Рис. 2.24

панели инструментов. Полученный график показан на рис. 2.24. Из характеристики видно, что её нужно сдвинуть вверх по частоте примерно на 1 ГГц. Это можно сделать, уменьшив радиусы секторов. Однако в редакторе электромагнитной структуры это сделать довольно сложно. Поэтому вначале отредактируем элементы схемы.

Чтобы можно было сравнивать характеристики новых вариантов с прежними, сделаем копии электромагнитной структуры и схемы.

1. Установите курсор на имя электромагнитной структуры **FN5** в левом окне проекта. Нажмите левую кнопку мышки, переместите курсор на группу **EM Structures** и отпустите кнопку. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени скопированной структуры в левом окне проекта и выберите **Rename EM Structure** и переименуйте её в **FN5A**.
2. Сделайте активным окно схемы. Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов и, щёлкая по переменным, отмените их выбор для настройки. Установите курсор на имя схемы **Fil** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки, переместите курсор на группу **Circuit Schematics** и отпустите кнопку. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени скопированной схемы в левом окне проекта и выберите **Rename Schematic** и переименуйте её в **FilA**.

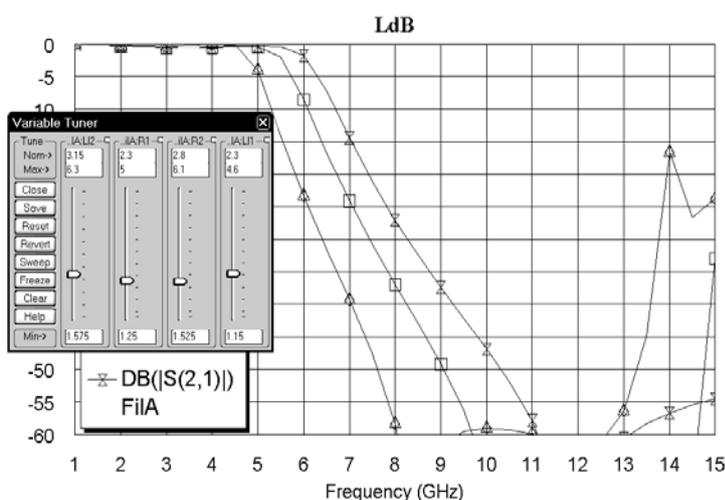


Рис. 2.25

3. Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов и, щёлкая по переменным, назначьте их для настройки.
4. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов и, двигая движки у переменных **R1** и **R2**, сдвиньте характеристику вверх по частоте примерно на 1 ГГц (рис. 2.25). Радиусы секторов

получили значения $R1=2.3$ и $R2=2.8$.

5. Закройте окно блока настройки и сделайте активным окно схемы **FilA**. Щёлкните по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов. Если в открывшемся окне топологии видны красные пунктирные линии, выберите в меню команду **Edit>Select All** и затем **Edit>Snap Together**. Выделите все элементы топологии и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
6. Сделайте активным окно электромагнитной структуры **FN5A**. Выделите всю топологию в этом окне и нажмите клавишу **Delete**. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и поместите скопированную топологию по центру электромагнитной структуры. Установите порты на входе и выходе фильтра. Обратите внимание, что референсные плоскости портов теперь устанавливаются автоматически.

7. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов.

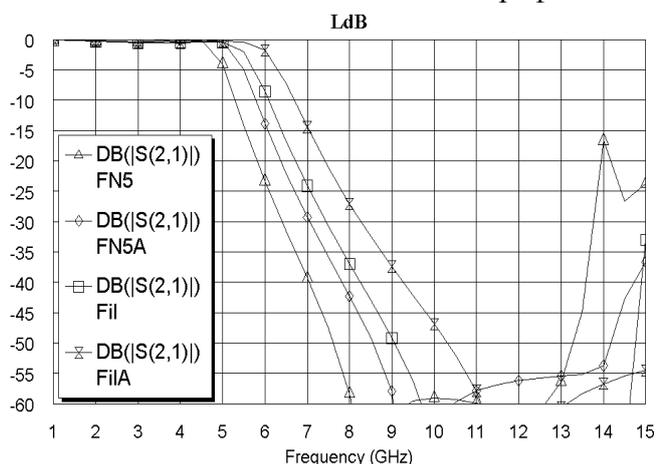


Рис. 2.26

lete Schematic. Аналогично удалите схему **FilA** и электромагнитную структуру **FN5**.

9. Чтобы можно было сравнить характеристики электромагнитной структуры при разных размерах клеток сетки, скопируйте электромагнитную структуру **FN5A** и переименуйте её в **FN5**. Щёлкните по значку **Substrate Information**.

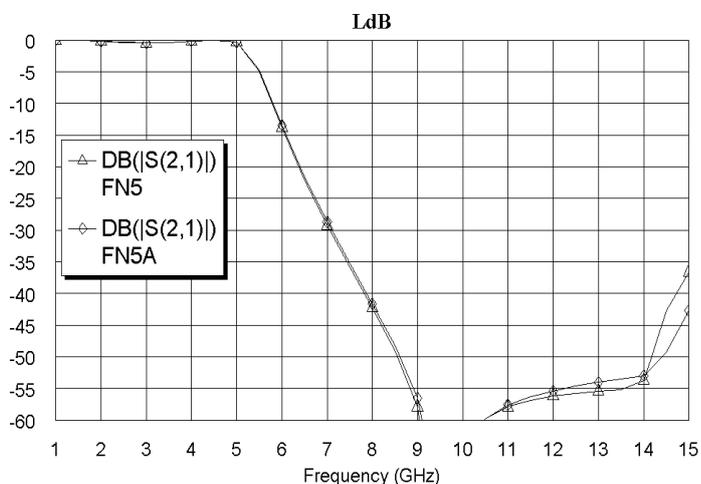


Рис. 2.27

существенно увеличилось. Из полученного графика (рис.2.27) видно, что различие между характеристиками при разных размерах клеток сетки незначительное и можно надеяться на достаточную точность выполненного анализа.

Полученная характеристика теперь удовлетворяет поставленным требованиям (рис. 2.26). Однако есть некоторые сомнения в точности выполненного анализа, т.к. стороны секторов наклонены по отношению к сетке. Чтобы оценить достоверность полученной характеристики, повторим анализ, сделав более мелкую сетку.

8. Удалим ненужные теперь схемы и электромагнитную структуру **FN5**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **Fil** и выберите **Delete Schematic**.

На вкладке **Enclosure** в поле **X-Divisions** введите **368** и в поле **Y-Divisions** введите **180**. Размер клеток сетки по осям **X** и **Y** будет 0.05 мм. Нажмите **OK**.

10. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Время анализа по сравнению с предыдущим случаем

3. Полосно-пропускающие фильтры

3.1. Фильтр на шлейфах с полосой пропускания 8 – 12 ГГц

Спроектировать фильтр на четвертьволновых замкнутых шлейфах с полосой пропускания от 8 до 12 ГГц, обеспечивающий подавление сигнала на частоте 6 ГГц не менее 35 дБ.

3.1.1. Создание схемы фильтра.

Для реализации фильтра выберем структуру с шестью резонаторами на замкнутых четвертьволновых шлейфах. Причём каждый резонатор будет состоять из двух шлейфов, расположенных по обе стороны от микрополосковой линии, чтобы шлейфы не были узкими. Расстояние между резонаторами также должно быть примерно равным четверти длины волны. Используя команду меню **Tools>TXLine** (см. пример 1.1), можно определить, что для поликора толщиной 0.5 мм на частоте 10 ГГц четверть длины волны равно примерно 2.8 мм.

1. Выберите в меню **File>New Project**, создайте новый проект и сохраните его, выбрав в меню **Save Project As**, под именем **F8-12**.
2. Щёлкните по значку **New Schematic** на панели инструментов и создайте схему с именем **Fil**.
3. Откройте вкладку **Elem** в левом окне проекта, раскройте группу **Microstrip** и щёлкните по подгруппе **Lines**.
4. В нижней части левого окна проекта найдите элемент **MLIN** и перетащите его в окно схемы.
5. Щёлкните по подгруппе **Junctions**, перетащите в окно схемы элемент **MCROSS\$** и соедините его с правым выводом элемента **MLIN**.

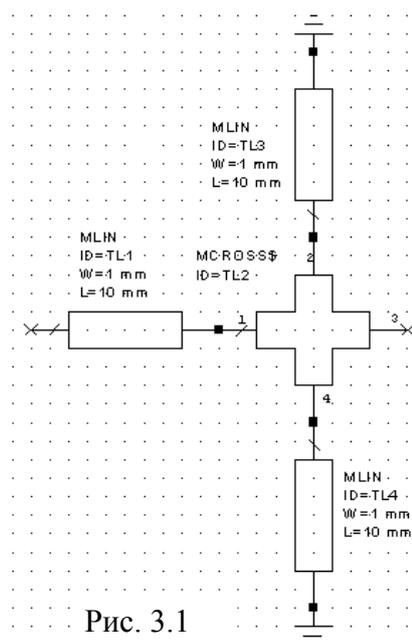


Рис. 3.1

6. Щёлкните по элементу **MLIN**, чтобы выделить его. Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов, щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированный элемент, и соедините его с плечом 2 элемента **MCROSS\$**.
7. Щёлкните по значку **Paste**, три раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированный элемент, и соедините его с плечом 4 элемента **MCROSS\$**.
8. Щёлкните по значку **Ground** на панели инструментов и соедините землю с нижним выводом нижнего элемента **MLIN**.
9. Снова щёлкните по значку **Ground** на панели инструментов, два раза щёлкните правой кнопкой мышки и соедините землю с верхним выводом верхнего элемента **MLIN**. Полученная схема первого резонатора показана на рис. 3.1.

10. Выделите все элементы созданной схемы и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
11. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и соедините скопированные элементы с плечом 3 последнего элемента **MCROSS\$**.
12. Повторите п. 11 четыре раза.
13. Выделите любой горизонтальный элемент **MLIN**, щёлкнув по нему мышкой, скопируйте его и соедините с плечом 3 последнего элемента **MCROSS\$**.
14. Щёлкните по значку **Port** на панели инструментов и соедините порт со входом фильтра. Аналогично подключите порт к выходу фильтра, щёлкнув два раза мышкой, чтобы развернуть его.

15. Щёлкните по подгруппе **Substrates** в левом окне проекта и перетащите в окно схемы элемент **MSUB**. Полученная схема показана на рис. 3.2.

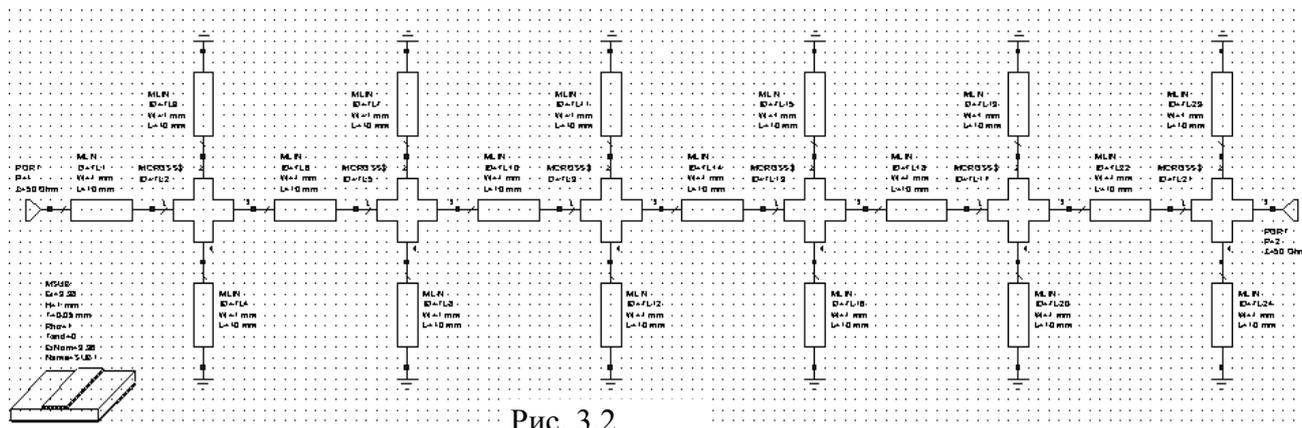


Рис. 3.2

3.1.2. Добавление переменных и редактирование элементов схемы.

1. Щёлкая по значку **Equation** на панели инструментов, добавьте переменные $LL1=2.8$, $LL2=2.8$, $LL3=2.8$, $LS1=2.8$, $LS2=2.8$, $LS3=2.8$, $WS1=0.5$, $WS2=0.5$ и $WS3=0.5$.
2. Дважды щёлкните по входному элементу **MLIN** и введите $W=0.5$ и $L=3$, нажмите **OK**. Аналогично отредактируйте выходной элемент **MLIN**.
3. Аналогично для элементов **MLIN** между первым и вторым, а также между последним и предпоследним резонаторами введите $W=0.5$ и $L=LL1$. Для элементов **MLIN** между вторым и третьим резонаторами, а также между четвёртым и пятым резонаторами введите $W=0.5$ и $L=LL2$. Для элемента **MLIN** между третьим и четвёртым резонаторами введите $W=0.5$ и $L=LL3$.
4. Для обоих шлейфов первого и последнего резонаторов введите $W=WS1$ и $L=LS1$, для второго и четвёртого резонаторов – $W=WS2$ и $L=LS2$, для третьего и четвёртого резонаторов – $W=WS3$ и $L=LS3$.
5. Дважды щёлкните по элементу **MSUB** и введите $Er=10.54$, $H=0.5$, $T=0.005$, $Tand=0.0001$ и $ErNom=10.54$. нажмите **OK**.

Первая половина схемы показана на рис. 3.3, остальная часть схемы симметрична этой половине.

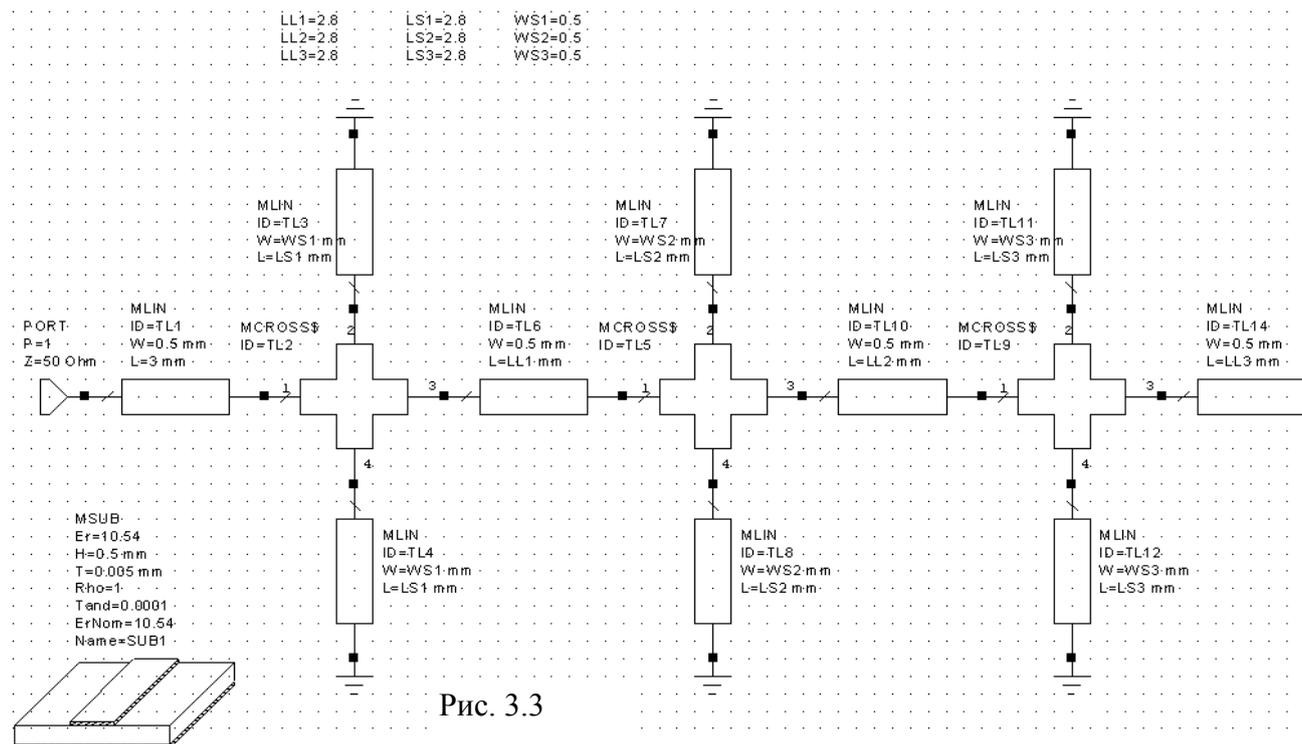


Рис. 3.3

3.1.3. Определение частот проекта, анализ и настройка схемы.

1. Откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта и дважды щёлкните по **Project Options**. В открывшемся окне опций проекта на вкладке **Frequencies** отметьте **Replace**, в поле **Start(GHz)** введите **4**, в поле **Stop(GHz)** введите **16** и в поле **Step(GHz)**, введите **0.5**. Нажмите **Apply** и **OK**.
2. Щёлкните по значку **New Graph** и создайте график с именем **LdB**. Щёлкните правой кнопкой по имени созданного графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. Отметьте **Port Parameters** и **S**. В поле **To Port Index** введите **2**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля, аналогично в поле **From Port Index** введите **1**, отметьте **dB** и нажмите **OK**.

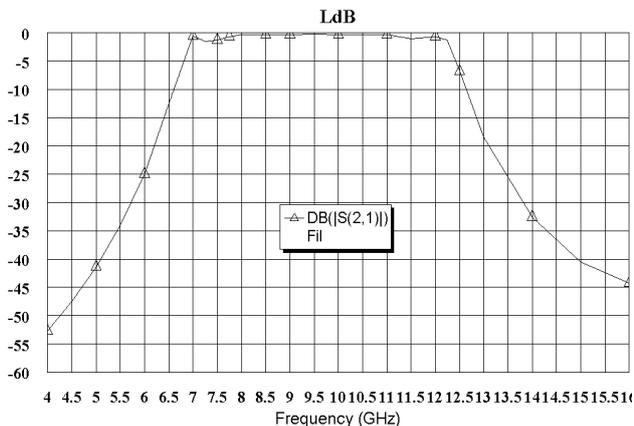


Рис. 3.4

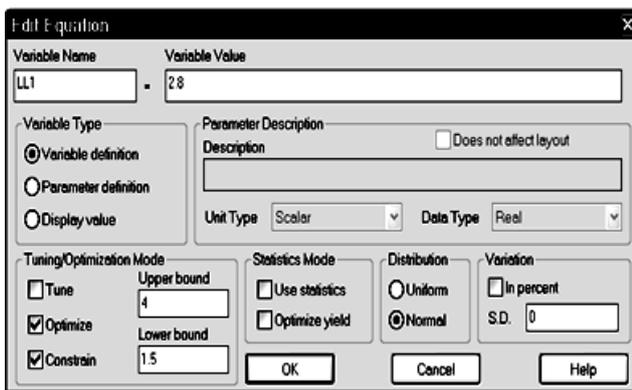


Рис. 3.5

3. На панели инструментов щёлкните по значку **Analyze**. Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и выберите **Properties**. В открывшемся окне свойств графика на вкладке **Axes** отметьте **x**, снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.5**. Отметьте **Left 1**, снимите “галочку” в **Auto limits**, в поле **Min** введите **-60**, в поле **Max** введите **0**. Снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **5**. На вкладке **Fonts** нажмите кнопку **Axis numbers** и в области **Размер** выберете **14**. Нажмите **OK**, затем **Apply** и **OK**. Чтобы точнее отобразить характеристику в переходной области, добавьте частоты **7.25**, **8.75** и **12.25**. Полученная характеристика шире требуемой (рис. 3.4).
4. Назначьте переменные для оптимизации. Для этого откройте окно схемы. Щёлкните по переменной **LL1** левой кнопкой мышки и затем правой кнопкой и выберите **Properties**.. В открывшемся окне (рис. 3.5) отметьте **Optimize** и **Constrain**. В поле **Upper bound** введите **4**, в поле **Lower bound** введите **1.5**. Нажмите **OK**.
5. Аналогично введите такие же параметры для переменных **LL2**, **LL3**, **LS1**, **LS2** и **LS3**. Для переменных **WS1**, **WS2** и **WS3** в поле **Upper bound** ведите **1**, в поле **Lower bound** – **0.3**.
6. Сделайте активным окно графика.
7. Установите цели оптимизации. Сначала установим цель в нижней полосе заграждения. Щёлкните правой кнопкой по **Optimizer Goals** и выберите **Add Opt Goal**. В открывшемся окне отметьте **Meas< Goal**. Снимите “галочку” в **Stop** и в поле **Max** введите **6 GHz**, в поле **Goal** введите **-35**, нажмите **OK**. Теперь установим цель в полосе пропускания. Снова щёлкните правой кнопкой по **Optimizer Goals** и выберите **Add Opt Goal**. Отметьте **Meas> Goal**. Снимите “галочки” в **Start** и **Stop**. В поле **Min** введите **8**, в поле **Max** введите **12**, в поле **Goal** введите **-0.5**. Нажмите **OK**. К крутизне верхнего ската характеристики требования не предъявляются. Цели оптимизации отобразятся на графике.
8. Выберите в меню **Simulate>Optimize**. В открывшемся окне выберите метод оптимизации **Random(Local)**, в поле **Maximum Iterations** введите **500** и нажмите **Start**.

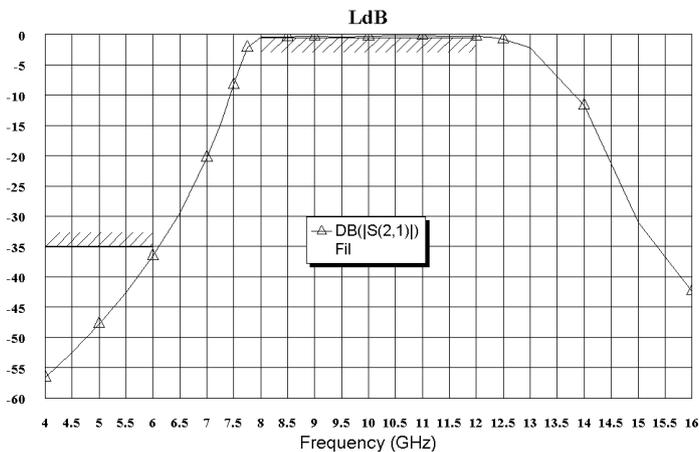


Рис. 3.6

Характеристика после оптимизации показана на рис. 3.6. Сделайте активным окно схемы. Переменные после оптимизации получили значения, показанные на рис. 3.7.

LL1=1.989	LS1=2.627	WS1=0.5726
LL2=2.511	LS2=2.674	WS2=0.5242
LL3=2.465	LS3=2.37	WS3=0.5598

Рис. 3.7

3.1.4. Создание и анализ электромагнитной структуры.

Выберем размер клеток сетки в электромагнитной структуре по оси X равным 0.1, а по оси Y – 0.05 мм. Соответственно округлим значения переменных: **LL1=2, LL2=2.5, LL3=2.5, WS1=WS2=WS3=0.5**. Что касается длины шлейфов, то она зависит от способа обеспечения заземления. Мы сделаем заземление с помощью узкой металлической полоски по краям платы и металлизацией боковых торцов платы. Очевидно, что в такой конструкции длина шлейфов от входной микрополоски до заземляющей будет несколько меньше рассчитанных. Примем в первом приближении длину всех шлейфов одинаковой и равной 2.5 мм. Исходя из этих размеров с учётом входных проводников, выберем размеры корпуса 20x5,9 мм с запасом для возможных изменений размеров топологии.

1. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру с именем **F8_12**.
2. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension(mm)** введите **20**, в поле **X-Divisions** введите **200**, в поле **Y-Dimension(mm)** введите **5.9**, в поле **Y-Divisions** введите **118**. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6**, для слоя **2** введите толщину **0.5**, диэлектрическую проницаемость **10.54**, тангенс потерь **0.0001** и масштаб просмотра **4** (рис. 3.8). Нажмите **OK**.

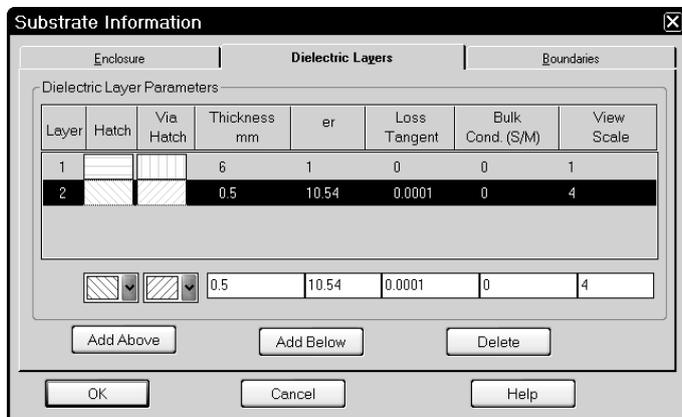


Рис. 3.8

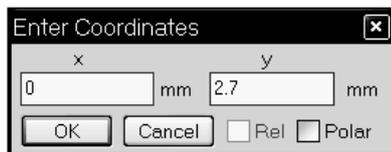


Рис. 3.9

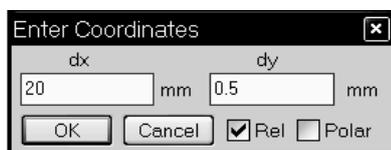


Рис. 3.10

3. Щёлкните по значку **Rectangle Conductor**, установите курсор на левый край электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне рис. 3.9 в поле **x** введите **0**, в поле **y** введите **2.7**. Нажмите **OK**. Снова нажмите клавишу **Tab** и в открывшемся окне рис. 3.10 в поле **dx** введите **20**, в поле **dy** введите **0.5**. Нажмите **OK**.
4. Снова щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов, поместите курсор на электромагнитную структуру и нажмите клавишу **Tab**. В поле **x** введите **3**, в поле **y** введите **2.7**. Нажмите **OK**. В поле **dx** введите **0.6**, в поле **dy** введите **-2.5**. Нажмите **OK**.

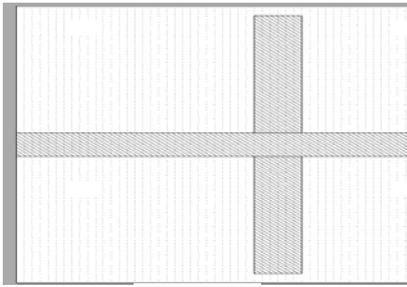


Рис. 3.11

5. Скопируйте полученный шлейф и подключите его к линии с противоположной стороны уже имеющегося шлейфа. Топология должна иметь вид, показанный на рис. 3.11.
6. Щёлкните мышкой по одному из шлейфов, нажмите клавишу **Shift** и щёлкните по второму шлейфу. Оба шлейфа должны быть выделены. Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
7. Щёлкая по значку **Paste** на панели инструментов, установите недостающие пять шлейфов, на расстояниях между шлейфами $LL1=2$, $LL2=2.5$, $LL3=2.5$, определённых ранее.

8. Создадим заземление для верхних шлейфов. Щёлкните по значку **Polygon Conductor** на панели инструментов, поместите курсор на верхний левый угол первого шлейфа и щёлкните мышкой. Переместите курсор вправо на верхний правый угол последнего шлейфа и щёлкните мышкой. Переместите курсор вверх до верхнего края корпуса и щёлкните мышкой. Переместите курсор влево до левого края первого шлейфа и дважды щёлкните мышкой.

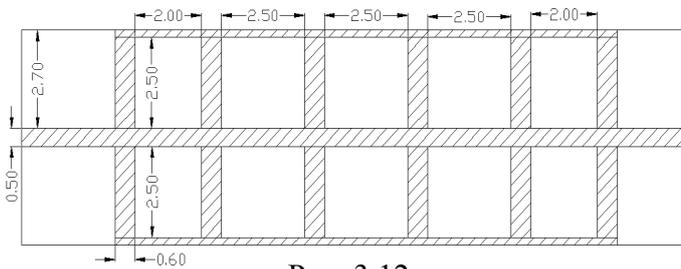


Рис. 3.12

10. Выделите входной проводник фильтра, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов, установите порт на входе фильтра и сдвиньте референсную плоскость порта на 1 мм вправо. Аналогично установите порт на выходе фильтра и сдвиньте его референсную плоскость порта на 1 мм влево.

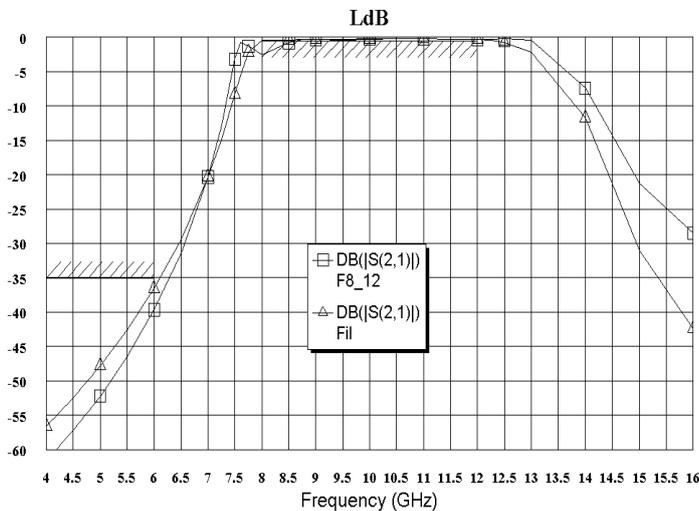


Рис. 3.13

9. Скопируйте созданный заземляющий проводник и заземлите нижние шлейфы. Полученная топология должна иметь вид, показанный на рис. 3.12.

11. Выделите все элементы топологии, выбрав в меню **Edit>Select All**. Щёлкните правой кнопкой мышки по какому-нибудь проводнику топологии и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне выберите материал **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.

12. Выполните анализ, щёлкнув по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.13.

3.1.5. Редактирование топологии.

Из графика видно, что полосу пропускания нужно уменьшить и убрать выброс в низкочастотной части полосы пропускания. Попробуем увеличить ширину двух средних шлейфов.

1. Установите курсор на имя электромагнитной структуры **F8_12** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**, отпустите кнопку. Переименуйте скопированную структуру в **F8_12A**.
2. Щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов и увеличьте структуру так, чтобы отобразить первые три резонатора. Дважды щёлкните по третьему верхнему шлейфу, установите курсор на синий ромб посередине левой стороны шлейфа, на-

жмите левую кнопку мышки и переместите эту сторону на $dx:-0.2$ влево (рис. 3.14).

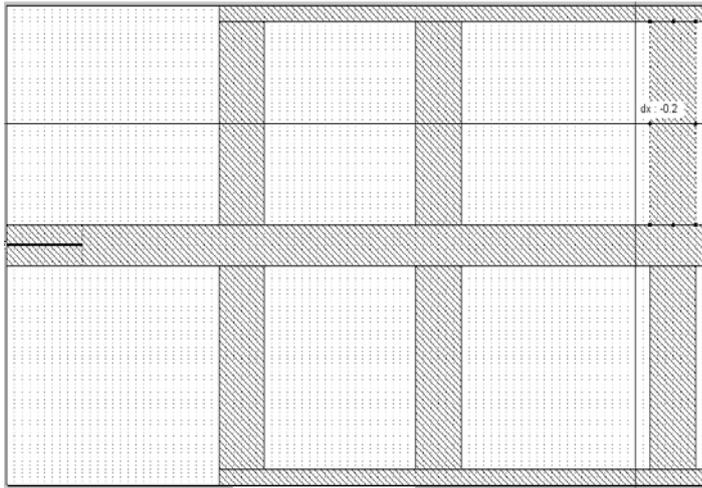


Рис. 3.14

фы влево на $dx:-0.2$.

4. Дважды щёлкните по верхнему заземляющему проводнику и сдвиньте его левую сторону на $dx:-0.2$. То же самое сделайте с нижним заземляющим проводником.

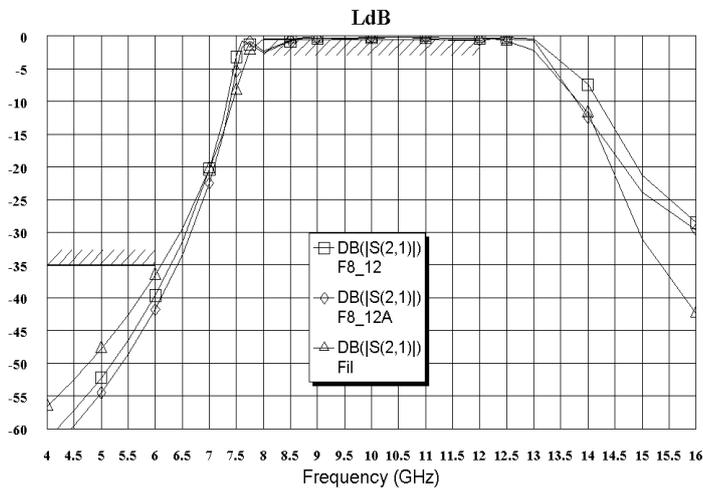


Рис. 3.15

полосы пропускания уменьшилась, но всё ещё остаётся шире требуемой и в низкочастотной части полосы пропускания остаётся выброс.

7. Удалите предыдущую структуру **F8_12**, щёлкнув правой кнопкой мышки по её имени в левом окне проекта и выбрав **Delete EM Structure**.

8. Скопируйте структуру **F8_12A**, как описано в п.1 и переименуйте её в **F8_12**.

9. Дважды щёлкните мышкой по первому верхнему шлейфу. Установите курсор на ромбик посередине верхней стороны шлейфа и сдвиньте эту сторону вниз на 0.25. Дважды щёлкните мышкой по первому нижнему шлейфу. Затем установите курсор на ромбик посередине нижней стороны шлейфа и сдвиньте эту сторону вверх на 0.25. Аналогично укоротите на 0.25 все шлейфы. Дважды щёлкните мышкой по верхнему заземляющему проводнику, установите курсор на ромбик посередине нижней стороны и сдвиньте эту сторону вниз на 0.25. Аналогично сдвиньте вверх на 0.25 верхнюю сторону нижнего заземляющего проводника. Выполните анализ, щёлкнув по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.16. Характеристика несколько сдвинулась вверх по частоте, и выброс в низкочастотной части полосы пропускания уменьшился.

Сделайте то же самое с третьим нижним шлейфом.

3. Чтобы сохранить прежнее расстояние между вторым и третьим шлейфами, нужно на такую же величину сдвинуть эти шлейфы влево. Установите курсор левее и выше первого верхнего шлейфа, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор правее и ниже второго нижнего шлейфа, чтобы выделить все эти шлейфы. Установите курсор на любой шлейф, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте шлей-

5. Аналогично увеличьте ширину шлейфов четвёртого резонатора, сдвинув их правую сторону вправо на 0.2, сдвиньте вправо шлейфы последних двух резонаторов на ту же величину и соответственно удлините оба заземляющих проводника.

6. Выполните анализ, щёлкнув по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.15. Ширина

10. Удалите предыдущую структуру **F8_12A**. Скопируйте оставшуюся структуру **F8_12** и переименуйте её в **F8_12A**. Чтобы ещё сузить полосу пропускания расширьте третьи и четвертые шлейфы на 0.1, как описано в пп.1-5 и выполните анализ. Рассчитанный график показан на рис. 3.17. Удалите предыдущую структуру **F8_12**.

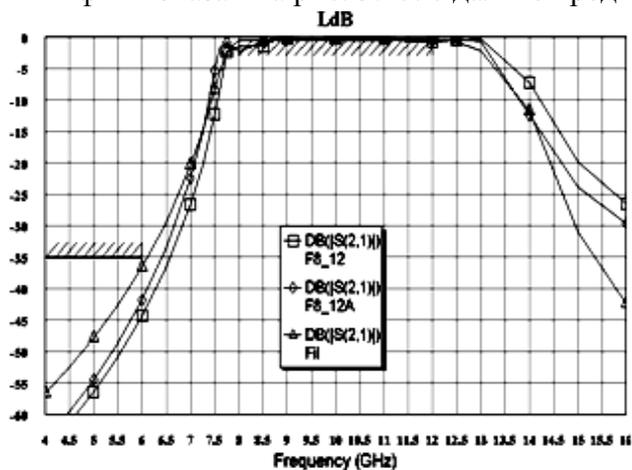


Рис. 3.16

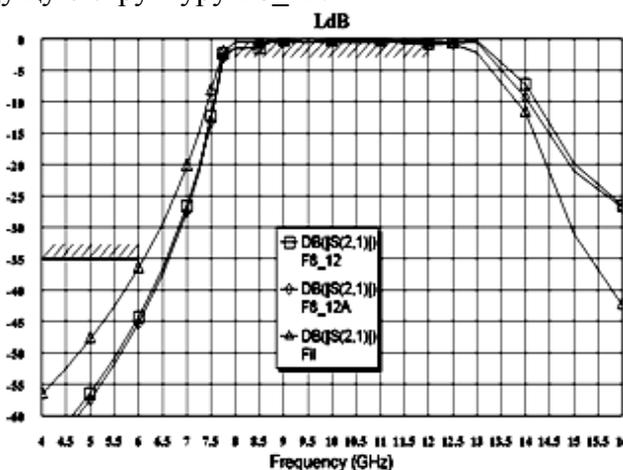


Рис. 3.17

11. В нашем случае характеристика довольно близка к требуемой и наблюдать за изменением характеристики в полосе пропускания на созданном графике довольно тяжело. В этом случае лучше перейти к графику стоячей волны, на котором изменения характеристики отображаются заметнее. Создадим такой график.

12. Щёлкните мышкой по значку **New Graph** и создайте график с именем **KstU**. Щёлкните

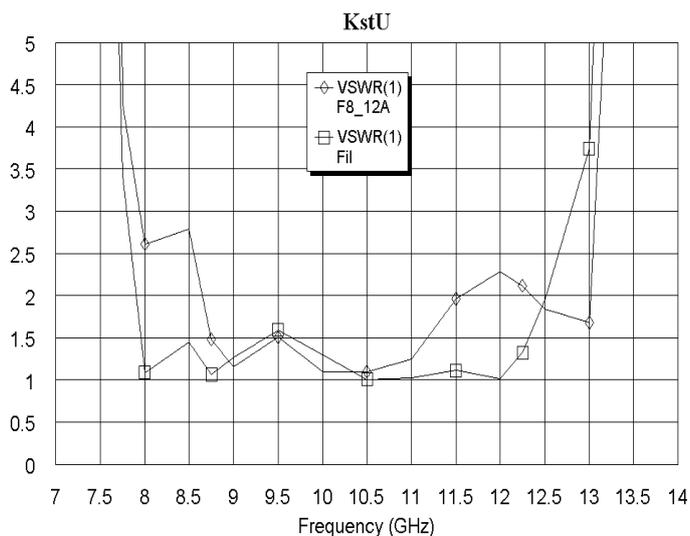


Рис. 3.18

правой кнопкой мышки по имени этого графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В области **Meas. Type** отметьте **Linear**, в области **Measurement** отметьте **VSWR**, в поле **Port Index** введите **1**, снимите “галочку” в **dB**, если она стоит и нажмите **Apply** и затем **OK**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните по полученному графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. На вкладке **Axes** открывшегося окна для оси x снимите “галочку” в **Auto limits**, в поле **Min** введите **7**, в поле **Max** введите **14**. Снимите “галочку” в **Auto divs** и в

поле **Step** введите **0.5**. Для оси **Left 1** снимите “галочку” в **Auto limits**, в поле **Min** введите **0**, в поле **Max** введите **5**. Снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.5**. Нажмите **Apply** и затем **OK**. График показан на рис. 3.18. Видно, что нужно улучшить согласование в полосе пропускания. Попробуем сделать это, увеличив расстояния между шлейфами и уменьшив ширину первого шлейфа.

13. Скопируйте электромагнитную структуру и переименуйте её в **F8_12**. Дважды щёлкните по первому верхнему шлейфу и сдвиньте его левую сторону вправо на 0.2. То же самое сделайте с первым нижним шлейфом. Аналогично уменьшите ширину последних шлейфов, сдвинув их правую сторону влево на 0.2. Выделите шлейфы трёх первых резонаторов и сдвиньте их на 0.1 влево. Выделите шлейфы двух первых резонаторов и сдвиньте их на 0.2 влево. Выделите шлейфы первого резонатора и сдвиньте их на 1.1 влево. Выделите шлейфы двух последних резонаторов и сдвиньте их на 0.2 вправо. Выделите шлейфы последнего резонатора и сдвиньте их на 1.1 вправо. При этом располо-

жение последних шлейфов выходит за референсную плоскость порта на выходе фильтра. Поэтому удлиним длину корпуса.

- Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов и на вкладке **Enclosure** введите длину корпуса 23 и количество клеток по оси X – 230. Выделите все элементы топологии и сдвиньте топологию вправо на 1.2, чтобы она расположилась симметрично относительно корпуса (при этом порты отображаются красным цветом, указывающем на ошибку). Дважды щёлкните по входному проводнику фильтра, установите курсор на ромб посередине левой стороны и сдвиньте эту сторону так, чтобы она совпала с левым краем корпуса (при этом порт не будет отображаться красным цветом). Аналогично совместите правую сторону входного проводника с правой стороной корпуса. Дважды щёлкните по верхнему заземляющему проводнику и продлите его правую и левую стороны до крайних шлейфов. То же самое сделайте с нижним заземляющим проводником. Топология должна иметь вид, показанный на рис. 3.19. Расстояния между резонаторами (от края фильтра к центру) равны 3.1, 2.7 и 2.6, а ширины шлейфов 0.4, 0.6 и 0.9.

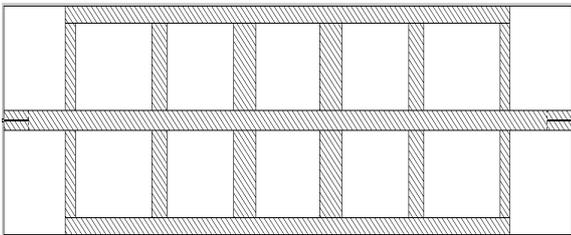


Рис. 3.19

Аналогично совместите правую сторону входного проводника с правой стороной корпуса. Дважды щёлкните по верхнему заземляющему проводнику и продлите его правую и левую стороны до крайних шлейфов. То же самое сделайте с нижним заземляющим проводником. Топология должна иметь вид, показанный на рис. 3.19. Расстояния между резонаторами (от края фильтра к центру) равны 3.1, 2.7 и 2.6, а ширины шлейфов 0.4, 0.6 и 0.9.

- Сделайте активным окно графика **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 3.20. Сделайте активным окно графика **LdB**, этот график показан на рис. 3.21.
- Полученная характеристика уже удовлетворяет поставленным требованиям, но её можно ещё улучшить.
- Удалите теперь не нужную схему из проекта. Для этого щёлкните правой кнопкой

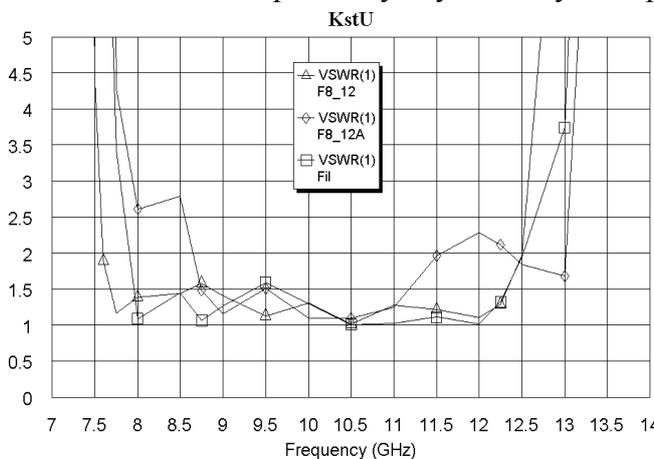


Рис. 3.20

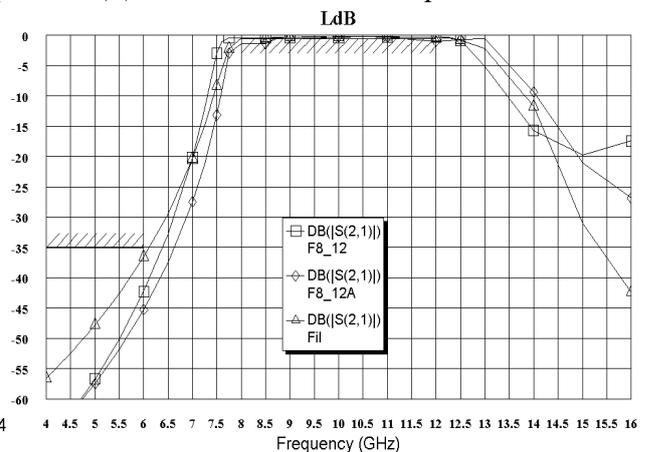


Рис. 3.21

мышки по имени схемы **Fil** в левом окне проекта и выберите **Delete Schematic**. Также удалите электромагнитную структуру **F8_12A** и цели оптимизации. Установите курсор на имя оставшейся структуры **F8_12** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**. Переименуйте скопированную структуру в **F8_12A**.

- Щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов и выделите левую часть фильтра (два резонатора), чтобы увеличить эту часть. Щёлкните по верхнему заземляющему проводнику и затем щёлкните по значку **Notch Conductor** (Выемка проводника). Установите курсор на нижний левый угол заземляющего проводника, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор на 0.1 вверх и на 1.9 вправо (рис. 3.22), отпустите кнопку мышки. Аналогично сделайте такие же выемки на левом и правом краях обоих заземляющих проводников. Дважды щёлкните по первому верхнему шлейфу и сдвиньте его верхнюю

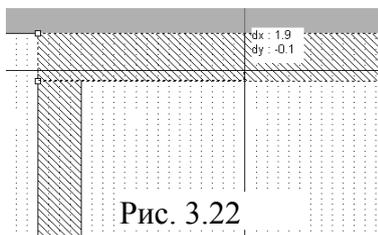


Рис. 3.22

Аналогично сделайте такие же выемки на левом и правом краях обоих заземляющих проводников. Дважды щёлкните по первому верхнему шлейфу и сдвиньте его верхнюю

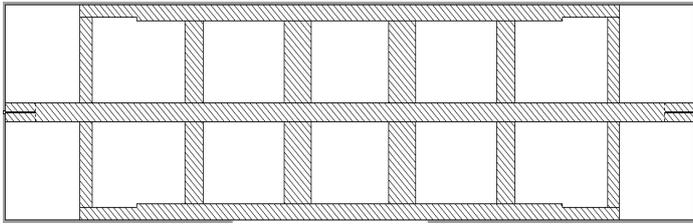


Рис. 3.23
KstU

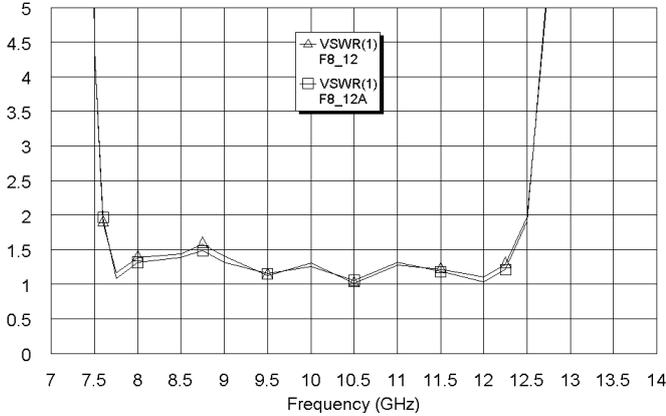


Рис. 3.24

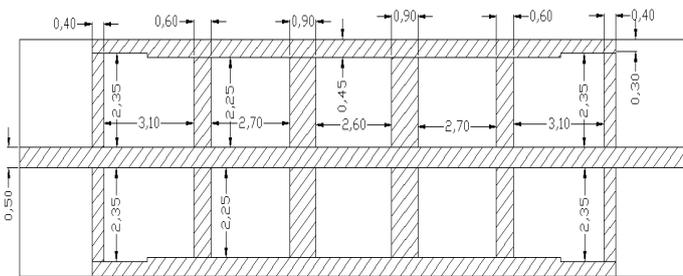


Рис. 3.25

сторону до соединения с верхним заземляющим проводником. Аналогично соедините все крайние шлейфы с заземляющими проводниками. Должна получиться структура, показанная на рис. 3.23.

19. Сделайте активным окно графика

KstU и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 3.24.

Синтезированная топология показана на рис. 3.25, а расчётная и экспериментальная характеристики вносимого ослабления фильтра показаны на рис. 3.26.

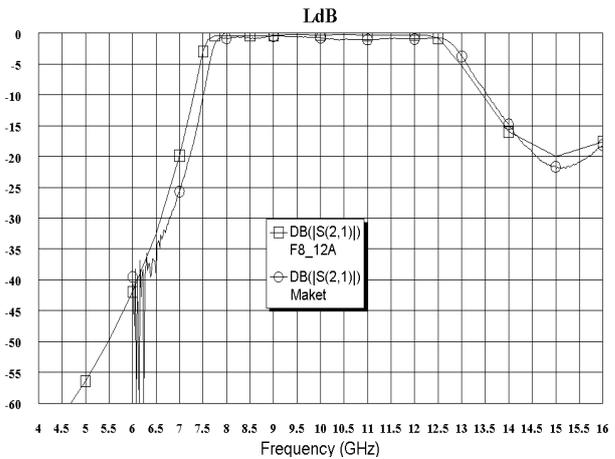


Рис. 3.26

3.2. Фильтр с боковыми электромагнитными связями с полосой пропускания 4 – 4.4 ГГц

3.2.1. Синтез фильтра.

Чтобы получить первое приближение для структуры фильтра воспользуемся мастером синтеза фильтров.

1. Создайте новый проект и сохраните его под именем **Fil4**.
2. Выберите в меню команду **Options>Layout Options**. На вкладке **Layout** открывшегося окна в поле **Grid spacing** введите **0.05**, а в поле **Database** введите **0.001**, нажмите **OK**.
3. На вкладке **Proj** раскройте группу **Wizards** и дважды щёлкните по **Filter Synthesis Wizard**. В открывшемся окне нажмите кнопку **Далее**. В следующем окне отметьте **Bandpass** и нажмите кнопку **Далее**. Отметьте аппроксимацию **Chebyshev** и нажмите кнопку **Далее**. В следующем окне **Bandpass Parameter Specifications** (рис. 3.27) введите порядок фильтра **N=5**, нижнюю частоту полосы пропускания **FL=4**, верхнюю частоту полосы пропускания **FH=4.4**, пульсации в полосе пропускания **PV=0.5**, сопротивление источника **RS=50** и сопротивление нагрузки **RL=50**, нажмите **Далее**. Отметьте тип структуры фильтра **Parallel Coupled Half-Wave Resonators** (Параллельно связанные полуволновые резонаторы) и нажмите **Далее**. В следующем окне **Bandpass Filter Constraints** (Рис. 3.28) отметьте **Odd Mode Center Resonator** (Нечётная мода центрального резонатора), введите импеданс нечётной моды **50**, минимальный зазор между резонаторами **0.01** и минимальную ширину резонато-

ров **0.2**, нажмите **Далее**. Выберите планарную физическую структуру **Microstrip** и

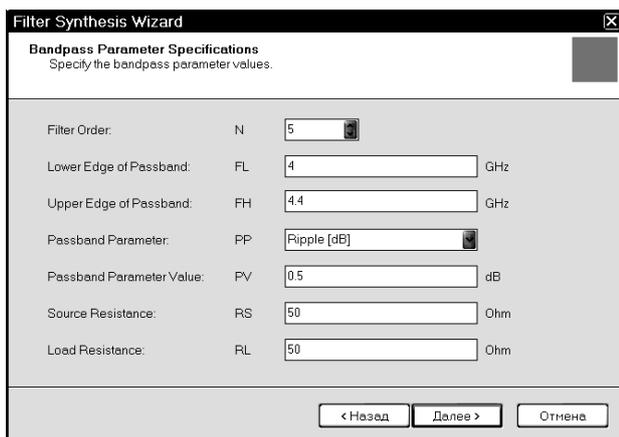


Рис. 3.27

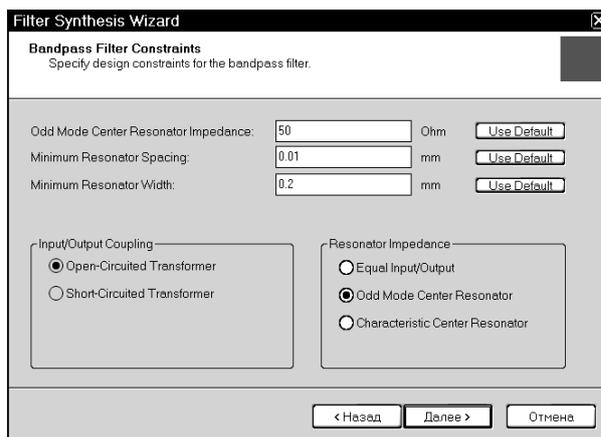


Рис. 3.28

нажмите **Далее**. В следующем окне **Microstrip Substrate Parameter Specifications** (рис. 3.29) в поля **Predefined Microstrip Substrate Selection** (Выбор predefined подложки микрополоски) и в **Microstrip Substrate Name** (Имя подложки микрополоски) введите **User Defined** (Определяется пользователем). Введите

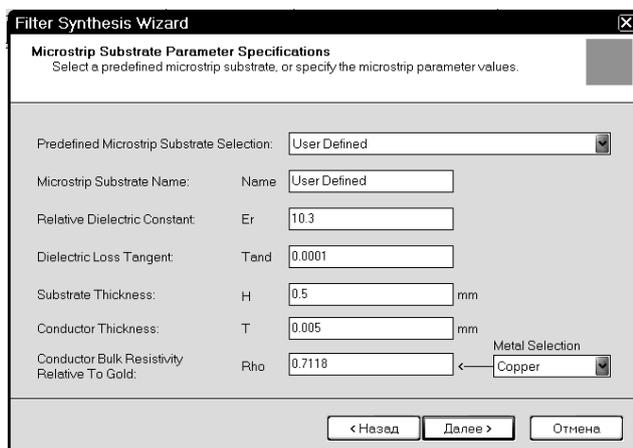


Рис. 3.29

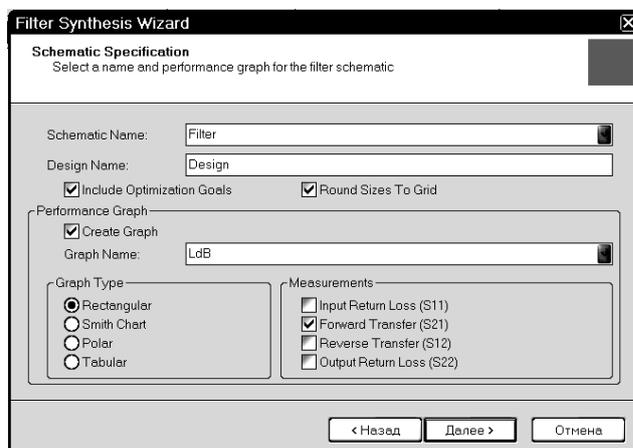


Рис. 3.30



Рис. 3.31

диэлектрическую проницаемость **$E_r=10.3$** , тангенс потерь **$T_{and}=0.001$** , толщину подложки **$H=0.5$** , толщину проводника **0.005**. В поле **Metal Selection** введите **Copper** (Медь, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля). Нажмите **Далее**. В следующем окне **Schematic Specification** (рис. 3.30) в поле **Schematic Name** введите **Filter**, в поле **Design Name** (Имя проекта) оставьте имя **Design** по умолчанию (это имя будет отображаться в группе **Filter Synthesis Wizard**), в поле **Graph Name** введите **LdB**. Отметьте **Include Optimization Goals** (Включить цели оптимизации), **Round Size To Grid** (Округлить до размера сетки), **Create Graph** (Создать график). В области **Graph Type** отметьте **Rectangular** и в области **Measurements** отметьте **Forward Transfer (S21)**. Нажмите **Далее**. В следующем окне нажмите **Готово**. В нашем случае выводится окно с сообщением об ошибке (рис. 3.31). Видимо, это связано с тем, что при заданных требованиях нарушаются пределы применимости имеющихся моделей линий или неоднородностей. В таком случае остаётся нажать **OK** и начать процесс синтеза фильтра сначала, изменив некоторые требования. Повторите синтез, изменив только требования к топологии проводников в окне **Bandpass Filter Constraints**, оставив их по умолчанию (рис. 3.32). На рабочем поле может открыться окно графика без характеристики, т.е. анализ не выполнялся, хотя схема мастером

В следующем окне нажмите **Готово**. В нашем случае выводится окно с сообщением об ошибке (рис. 3.31). Видимо, это связано с тем, что при заданных требованиях нарушаются пределы применимости имеющихся моделей линий или неоднородностей. В таком случае остаётся нажать **OK** и начать процесс синтеза фильтра сначала, изменив некоторые требования. Повторите синтез, изменив только требования к топологии проводников в окне **Bandpass Filter Constraints**, оставив их по умолчанию (рис. 3.32). На рабочем поле может открыться окно графика без характеристики, т.е. анализ не выполнялся, хотя схема мастером

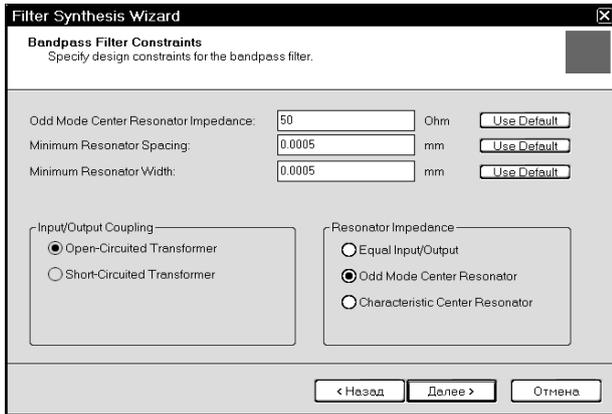


Рис. 3.32

синтеза создана. При попытке выполнить анализ, он не выполняется и выводится сообщение о том, что не заполнена база данных X-модели (рис. 3.33).



Рис. 3.33

3.2.2. Настройка схемы.

1. Сделайте активным окно схемы, дважды щёлкнув по имени схемы в левом окне проекта. Фрагмент схемы показан на рис. 3.34. Из схемы и сообщения об ошибке

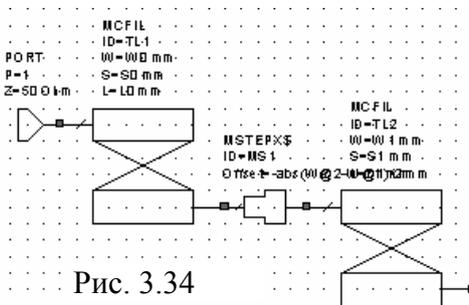


Рис. 3.34

(рис. 3.33) видна причина неудачи проведения анализа. Мастер синтеза использует в схеме X-модели скачка ширины полоски, очевидно для повышения точности анализа. Однако эта модель не заполнена. Поскольку схему мы используем в качестве первого приближения для создания в дальнейшем электромагнитной структуры, мы не будем заполнять X-модель, а заменим этот элемент другим.

2. Щёлкните мышкой по первому элементу **MSTEPX\$**, нажмите клавишу **Shift** и щёлкните по всем остальным элементам **MSTEPX\$**, чтобы выделить их. Нажмите клавишу **Delete**, чтобы удалить эти элементы.
3. Откройте вкладку **Elem** в левом окне проекта. Раскройте группу **Microscript** и щёлкните по подгруппе **Junctions**. В нижней части левого окна найдите элемент **MSTEPS\$**, перетащите его в окно схемы и установите на место первого удалённого элемента **MSTEPX\$**. Аналогично установите элементы **MSTEPS\$** на место всех остальных удалённых элементов **MSTEPX\$**. Полученная схема показана на рис. 3.35. Обратите внимание, что все размеры кратны размерам клеток сетки, которые мы установили в опциях топологии (**Layout Options**).

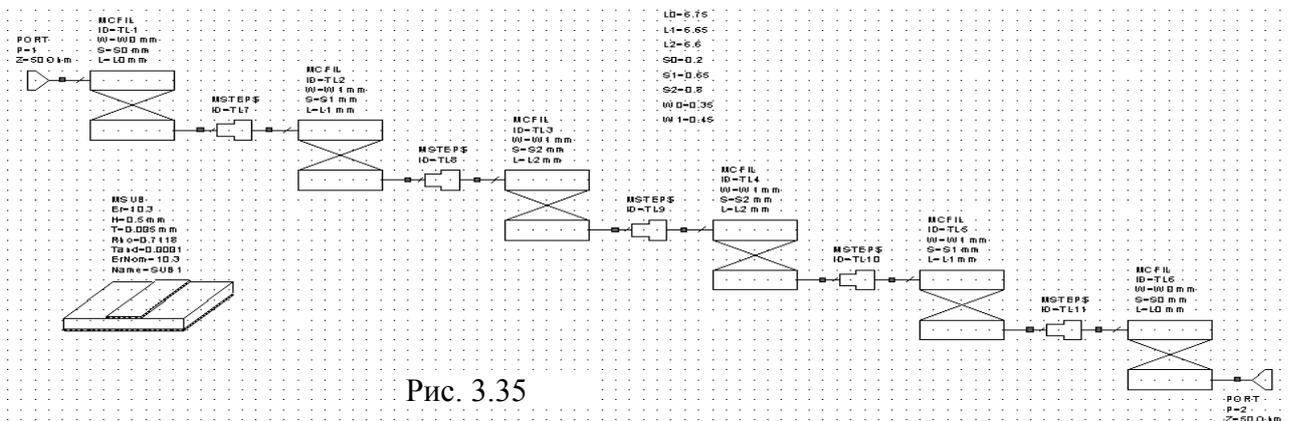


Рис. 3.35

4. Мастер синтеза автоматически определяет частоты только для созданной схемы. Чтобы просмотреть их, откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта, щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **Filter** в левом окне проекта и выберите **Options**. Обратите внимание, что “галочка” в **Use project defaults** (Использовать установки проекта) снята, т.е. установленные частоты будут использоваться только в

этой схеме. Мы установим частоты, которые будут использоваться для всего проекта. Установите “галочку” в **Use project defaults** и нажмите **OK**. Дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне проекта. В открывшемся окне опций на вкладке **Frequencies** в поле **Start(GHz)** введите **3.4**, в поле **Stop(GHz)** введите **5.4**, в поле **Step(GHz)** введите **0.1**. Нажмите **Apply**. Чтобы точнее отобразить характеристику в переходной области, введите дополнительные частоты. Отметьте **Add** и **Single point**. В поле **Point(GHz)** введите **3.95** и нажмите **Apply**. Аналогично введите **4.05**,

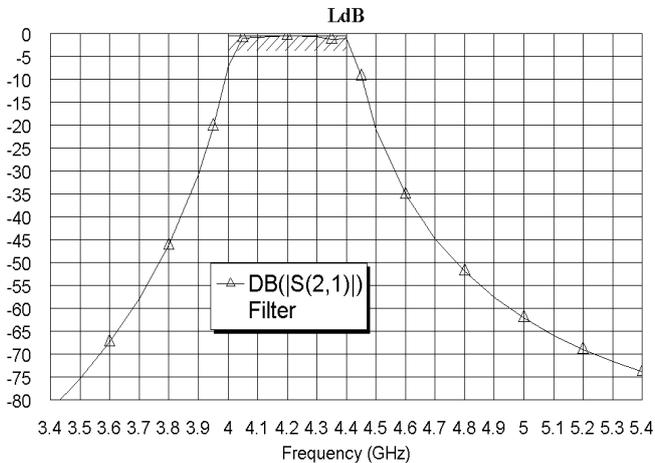


Рис. 3.36

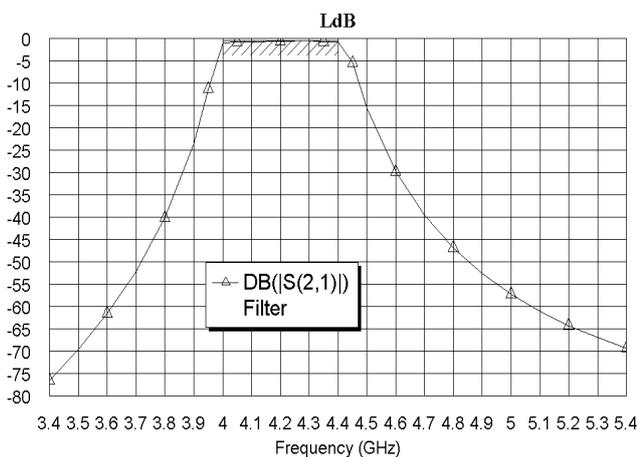


Рис. 3.37

L0=6.613
L1=6.702
L2=6.621
S0=0.1859
S1=0.5957
S2=0.7223
W0=0.3235
W1=0.4527

Рис. 3.38

дите максимум итераций **500**, нажмите **Start**. График после оптимизации имеет вид, показанный на рис. 3.37.

7. Сделайте активным окно схемы. Обратите внимание, что размеры элементов схемы после оптимизации уже не кратны размерам клеток сетки топологии (рис. 3.38). Это связано с тем, что при оптимизации на характер изменения значений переменных никаких ограничений не накладывается. Сохранить привязку к сетке можно, используя дискретную оптимизацию. Для этого необходимо в схему добавить дополнительные векторные переменные.

8. Щёлкните по значку **Equation** на панели инструментов, переместите курсор на свободное место в окне схемы, щёлкните левой кнопкой мышки и в открывшемся окошке ввода введите **LL=stepped(6,7,0.05)**. Эта запись означает, что переменная **LL** может изменять значения от **6** до **7** с шагом **0.05**. Аналогично введите переменные **WW= stepped(0.25,0.5,0.05)** и **SS= stepped(0.15,0.8,0.05)**. Дважды щёлкните по переменной **L0** и измените её значение на **L0=LL[13]**. Эта запись означает, что переменная **L0** получает значение тринадцатой переменной из вектора **LL**. Щёлкните левой кнопкой мышки на свободном месте окна схемы, чтобы отменить режим редактирования переменной. Справа от переменной появится её числовое значение,

4.35 и **4.45**, нажимая **Apply**. После окончания ввода нажмите **OK**.

5. Откройте окно графика **LdB**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните по полученному графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. На вкладке **Axes** для оси **x** снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.1**. Для оси **Left 1** снимите “галочку” в **Auto limits**, в поле **Min** введите **-80**, снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **5**. Нажмите **Apply** и **OK**. Полученный график показан на рис. 3.36. Обратите внимание, что мастер синтеза фильтров подготовил всё для проведения настройки и оптимизации.

6. В группе целей оптимизации (**Optimizer Goals**) в левом окне проекта удалите цель **Filter DB(|S(1,1)|)**, щёлкнув по ней правой кнопкой мышки, т.к. такой график мы не используем. Выполните оптимизацию. Для этого выберите в меню **Simulate>Optimize**. В открывшемся окне выберите метод оптимизации **Random(Lokal)** и вве-

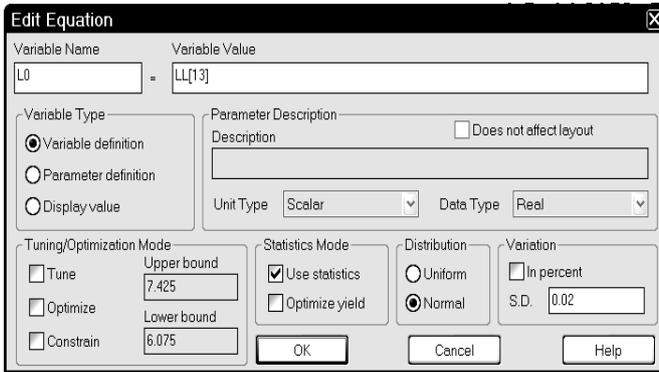


Рис. 3.43

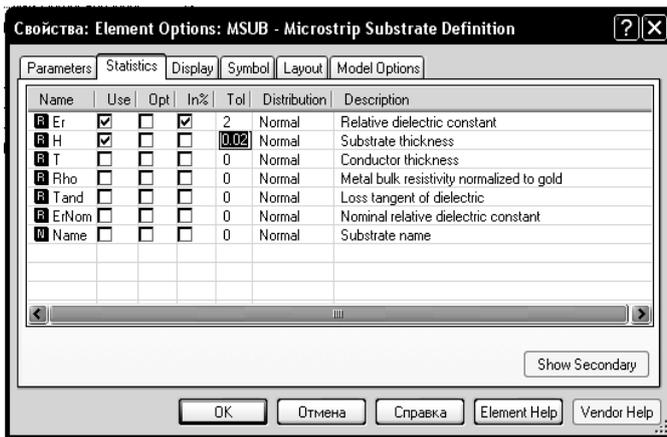


Рис. 3.44

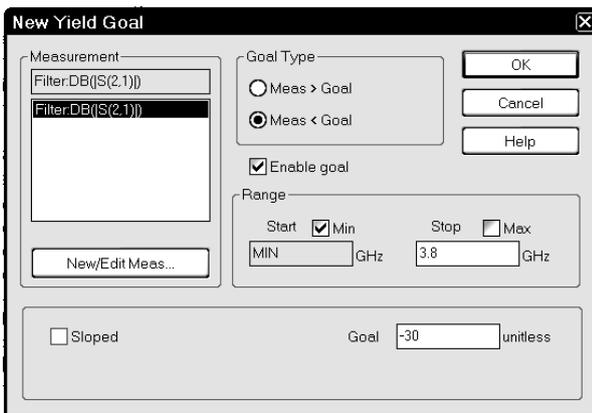


Рис. 3.45

Отметьте **Meas<Goal**. Снимите “галочку” в поле **Start Max**, и введите нижнюю частоту заграждения **3.8** ГГц. В поле **Goal start** введите **-30**. Нажмите **OK**. Снова щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Yield Goals**. Отметьте **Meas>Goal**. Снимите “галочку” в полях **Start Min** и **Start Max**, и введите соответственно нижнюю частоту заграждения **4** ГГц и верхнюю **4.4** ГГц. В поле **Goal start** введите **-1**. Нажмите **OK**.

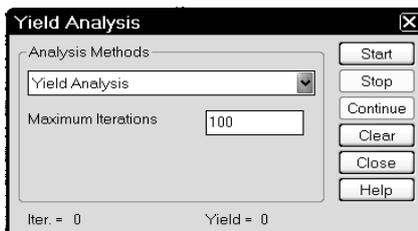


Рис. 3.46

Щёлкните правой кнопкой мышки по переменной **L0=LL[13]** и выберите **Properties**. В открывшемся окне установите “галочку” в **Use statistic** и снимите все остальные “галочки”, в поле **S.D.** введите допуск **0.02**, нажмите **OK** (рис.3.43). Аналогично назначьте для статистического анализа все переменные **L1, L2, S0, S1, S2, W0** и **W1**. Дважды щёлкните по элементу подложки **MSUB**. В открывшемся окне на вкладке **Parameters** в столбце **Value** напротив параметра **H** введите толщину подложки **0.48**. Откройте вкладку **Statistics**. На этой вкладке отметьте столбец **Use** напротив параметров **Er** и **H**. Напротив переменной **Er** отметьте столбец **In%**, чтобы задать допуск в процентах, и в столбце **Tol** (Tolerance – допуск) введите **2**. Напротив переменной **H** в столбце **Tol** введите **0.02** (рис. 3.44). Нажмите **OK**.

2. Сделайте активным окно графика и установите цели статистического анализа. Для этого щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Yield Goals** в левом окне проекта. Откроется диалоговое окно **New Yield Goal** (рис.3.45). Отметьте **Meas<Goal**. Снимите “галочку” в поле **Start Max**, и введите нижнюю частоту заграждения **3.8** ГГц. В поле **Goal start** введите **-30**. Нажмите **OK**. Снова щёлкните правой кнопкой мышки по группе **Yield Goals**. Отметьте **Meas>Goal**. Снимите “галочку” в полях **Start Min** и **Start Max**, и введите соответственно нижнюю частоту заграждения **4** ГГц и верхнюю **4.4** ГГц. В поле **Goal start** введите **-1**. Нажмите **OK**.

3. Щёлкните правой кнопкой мышки по графику. В открывшемся окне свойств графика на вкладке **Yield Data** отметьте **Show traces** (Показывать трассы) и **All traces** (Все трассы). Нажмите **Apply** и затем **OK**.

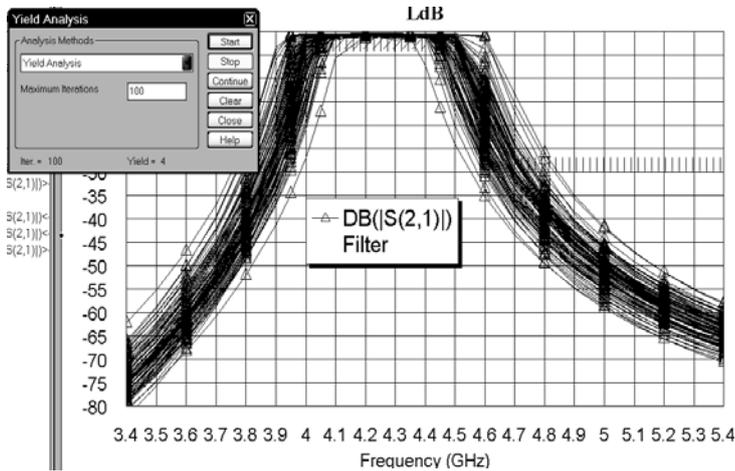


Рис. 3.47

ровать выше по частоте не меньше, чем на такую же величину. Чтобы убрать ненужные теперь трассы характеристик, щёлкните по кнопке **Clear** в окне рис. 3.46 и закройте это окно.

3.2.4. Создание электромагнитной структуры.

1. Сделайте активным окно схемы.
2. Щёлкните по значку **New Schematic Layout View**. Выберите в меню команду **Edit>Select All** и затем команду **Edit>Snap Together**. Выберите в меню команду **Options>Layout Options** и в открывшемся окне на вкладке **Dimension Lines** в поля **Font height** и **Arrow size** введите **1**, нажмите **OK**. Щёлкните по значку **Dimension Line**, установите курсор на левый край топологии, нажмите левую кнопку мышки,

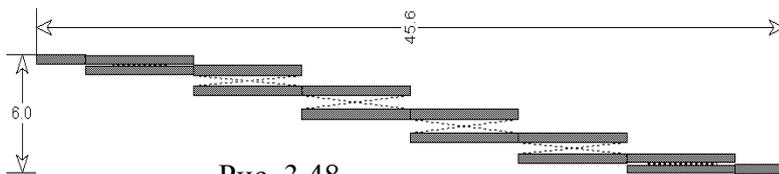


Рис. 3.48

переместите курсор на правый край топологии, отпустите кнопку, поместите размерную линию в положение, удобное для наблюдения и щёлкните левой кнопкой мышки. Аналогично измерьте ширину топологии. Полученная топология показана на рис. 3.48. Из рисунка видно, что длина электромагнитной структуры должна быть 45,6 мм. Ширину структуры выберем 8 мм.

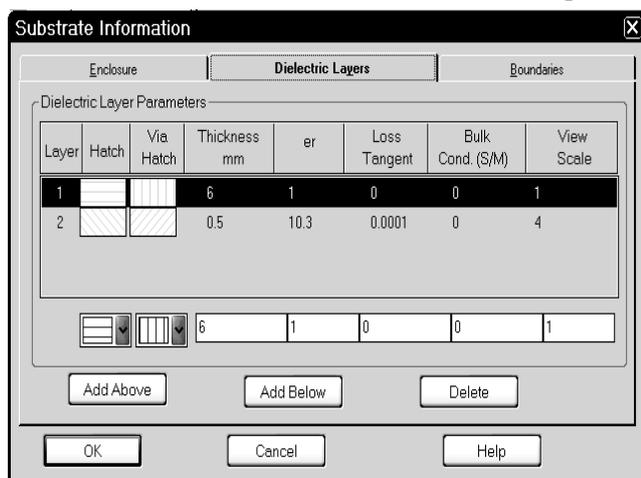


Рис.3.49

для слоя **2** введите толщину **0.5**, диэлектрическую проницаемость **10.3**, тангенс потерь **0.0001** и масштаб просмотра **4** (рис. 3.49). Нажмите **OK**.

4. Сделайте активным окно топологии схемы. Это окно не отображается в левом окне топологии, поэтому сделать его активным можно, щёлкнув по видимой части этого окна мышкой. Если окно не видно, упорядочьте расположение окон, например, вы-

4. Выполните статистический анализ, выбрав в меню команду **Simulate>Yield Analysis**. Откроется диалоговое окно **Yield Analysis** (рис. 3.46). В выпадающем списке **Analysis Methods** выберите **Yield Analysis**, в поле **Maximum Iteration** введите **100**. Нажмите **Start**. Полученный график показан на рис. 3.47. Из этого графика видно, что характеристика может смещаться вниз по частоте на 100 МГц, т.е. фильтр нужно спроектировать

переместите курсор на правый край топологии, отпустите кнопку, поместите размерную линию в положение, удобное для наблюдения и щёлкните левой кнопкой мышки.

3. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов и создайте структуру с именем **Fil4**. Щёлкните по значку **Substrate information** на панели инструментов. На вкладке **Enclosure** открывшегося окна в поле **X-Dimension(mm)** введите **45.6**, в поле **X-Divisions** введите **456**, в поле **Y-Dimension(mm)** введите **8** и в поле **Y-Divisions** введите **160**. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6**,

брав в меню **Window>Cascade**. Выделите все элементы топологии схемы, установив курсор мышки левее и выше топологии, нажав левую кнопку мышки и переместив курсор правее и ниже топологии. Или выбрав в меню **Edit>Select All**. Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов. Сделайте активным окно электромагнитной

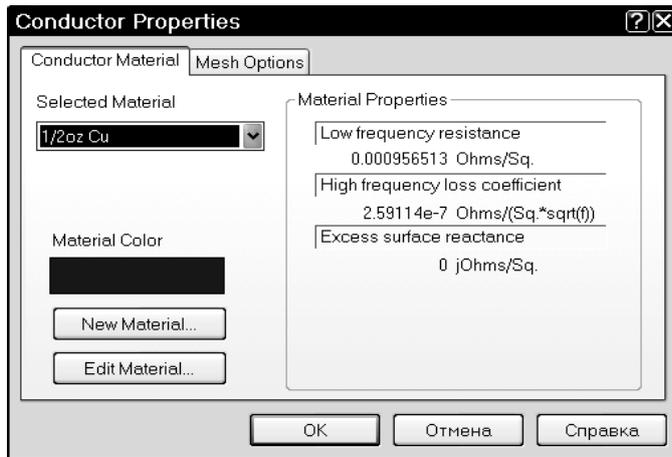


Рис. 3.50

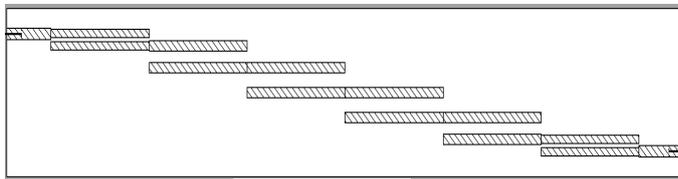


Рис. 3.51

выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне в поле **Select Material** введите **1/2oz Cu** (рис. 3.50) и нажмите **OK**. Полученная электромагнитная структура показана на рис.3.51.

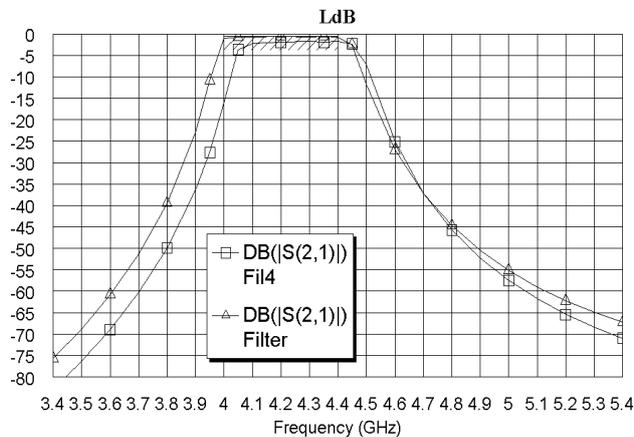


Рис. 3.52

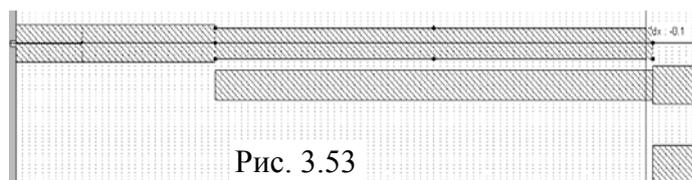


Рис. 3.53

ры **Fil4** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**. Переименуйте скопированную структуру в **Fil4A**.

- На скопированной структуре дважды щёлкните по верхнему проводнику первых связанных отрезков линии, установите курсор на ромб посередине правой стороны этого отрезка, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эту сторону влево на **dx:-0.1** (рис. 3.53). Дважды щёлкните по нижнему проводнику этих связанных

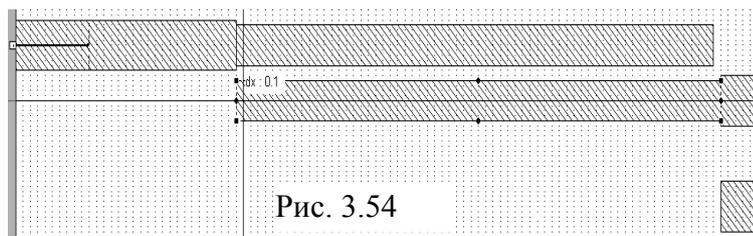
структуры, дважды щёлкнув мышкой по имени структуры **Fil4** в левом окне проекта. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и поместите скопированную топологию симметрично относительно корпуса так, чтобы левый и правый края топологии точно совпадали с левым и правым краями корпуса. Щёлкните мышкой по входному проводнику, чтобы выделить его, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра. Щёлкните по квадратику установленного порта, установите курсор на правую сторону этого квадрата, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте референсную плоскость порта на 1 мм вправо. Аналогично установите порт на выходе фильтра. Выделите все элементы топологии, щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу и

сдвиньте референсную плоскость порта на 1 мм вправо. Аналогично установите порт на выходе фильтра. Выделите все элементы топологии, щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу и

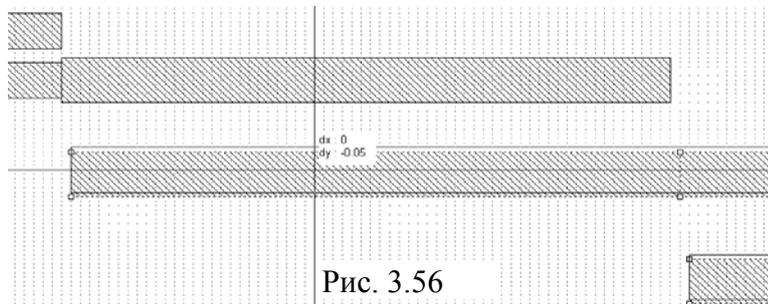
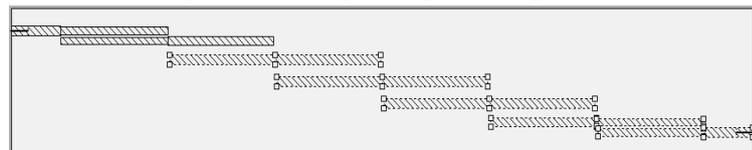
- Сделайте активным окно графика. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени кривой графика **Filter:DB(|S(2,1)|)** в левом окне проекта и выберите **Properties**. В поле **Data Source Name** открывшегося окна введите **All Sources** и нажмите **OK**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 3.52. Характеристика получилась несколько уже требуемой. Чтобы её расширить, нужно уменьшить зазоры в связанных отрезках линии, а чтобы сдвинуть вверх по частоте, нужно укоротить резонаторы.

- Установите курсор на имя электромагнитной структуры

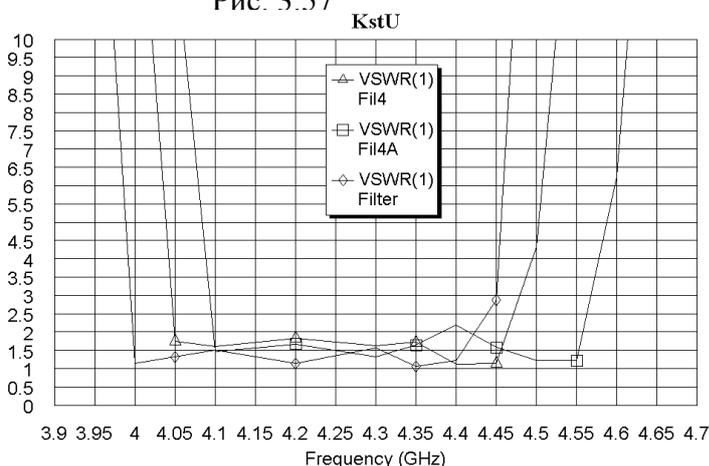
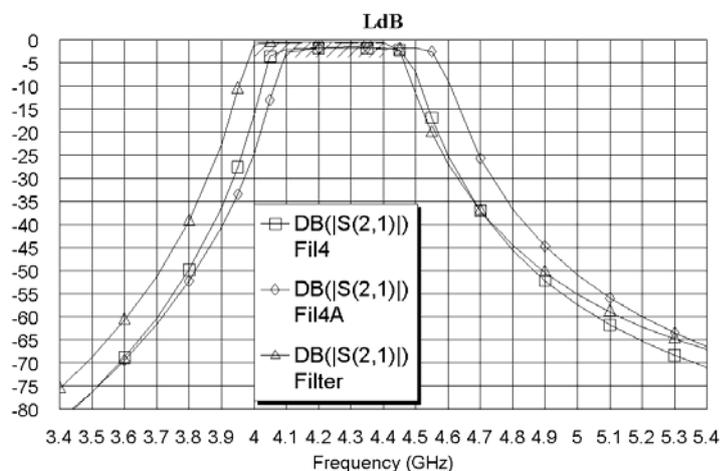
отрезков и сдвиньте его левую сторону вправо на **dx:0.1** (рис. 3.54). Аналогично укоротите проводники во всех связанных отрезках линии. Установите курсор левее и выше третьего проводника топологии, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор правее и ниже последнего проводника топологии, чтобы выделить все проводники, кроме двух первых (рис. 3.55). Установите курсор на любой выделенный проводник и сдвиньте проводники вверх на **dy:-0.05** (рис. 3.56), чтобы



уменьшить величину второго зазора на 0.05 мм. Аналогично уменьшите на 0.05 мм величину всех зазоров, кроме первого и последнего. Выделите все элементы топологии и сдвиньте всю топологию вниз на 0.1, чтобы сохранить её размещение симметрично относительно корпуса. Дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне



проекта и добавьте частоту 4.55 ГГц, чтобы точнее отобразить правую переходную область характеристики. Откройте окно графика. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 3.57.



- Щёлкните по значку **New Graph** и создайте график коэффициента стоячей волн с именем **KstU**. Щёлкните правой кнопкой по имени этого графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне отметьте **Linear** и **VSWR**, введите индекс порта **1**, снимите “галочку” в **dB** и нажмите **Apply** и **OK**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой по графику и выберите **Properties**. На вкладке **Axes** для оси x снимите “галочку” в **Auto limits**, в поле **Min** введите **3.9**, в поле **Max** введите **4.7**, снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.05**. Для оси **Left 1** снимите “галочку” в **Auto limits**, в поле **Min** введите **0**, в поле **Max** введите **10**,

снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.5**, нажмите **Apply** и **ОК**. График показан на рис. 3.58. Из проведённого анализа видно, что характеристика смещена вверх по частоте на 100 МГц, как и требовалось, и имеет запас по ширине полосы пропускания, однако желательно уменьшить KstU на частоте 4.4 ГГц.

- Удалите предыдущую структуру **Fil4**, щёлкнув по её имени в левом окне проекта и выбрав **Delete EM Structure**. Сделайте копию структуры **Fil4A** и переименуйте её в **Fil4**. Дважды щёлкните мышкой по верхнему проводнику первых связанных отрезков,

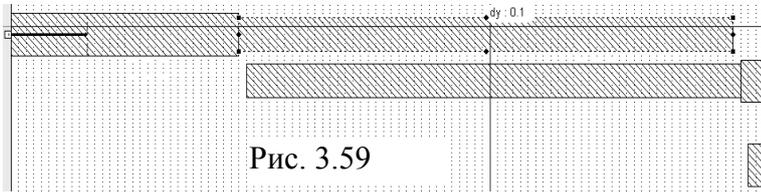


Рис. 3.59

установите курсор на ромбик посередине верхней стороны, нажмите левую кнопку мышки и переместите эту сторону на **dy:0.1** вниз (рис. 3.59).

Аналогично сместите нижнюю сторону нижнего проводника последних связанных отрезков линий вверх на **dy:-0.1**. Сделайте активным окно с графиком **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученная характеристика удовлетворяет предъявляемым требованиям. Удалите из проекта предыдущую структуру **Fil4A** и схему **Filter**. Смоделированная топология фильтра показана на рис. 3.60, а характеристики вносимого ослабления и коэффициента стоячей волны на рис. 3.61 и 3.62 соответственно.

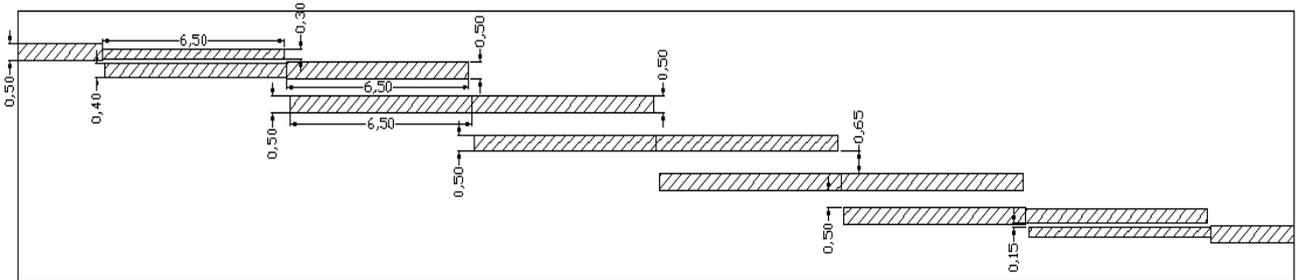


Рис. 3.60

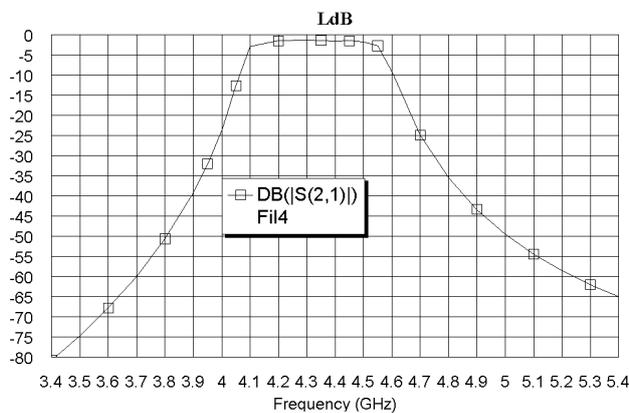


Рис. 3.61

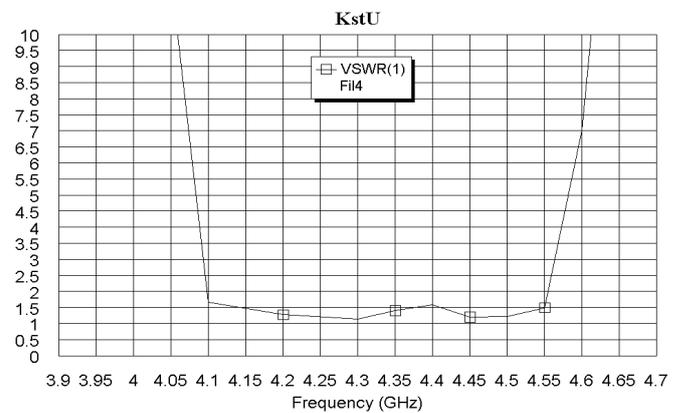


Рис. 3.62

3.3. Фильтр с полуволновыми электромагнитными связями с полосой пропускания 9,5 – 10,5 ГГц.

Требуется смоделировать фильтр с полуволновыми электромагнитными связями между резонаторами и с кондуктивными связями между крайними резонаторами и подводящими линиями (рис. 3.63). Полоса пропускания 9,5 – 10,5 ГГц и на частотах загораживания 8,5 и 11,5 ГГц ослабления должно быть не менее 40 дБ.

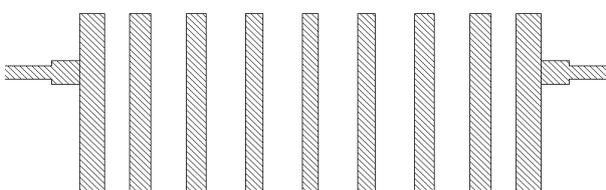


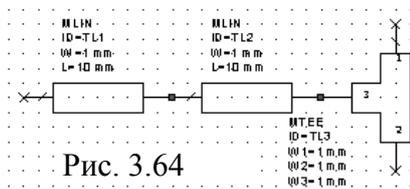
Рис. 3.63

Полоса пропускания 9,5 – 10,5 ГГц и на частотах загораживания 8,5 и 11,5 ГГц ослабления должно быть не менее 40 дБ.

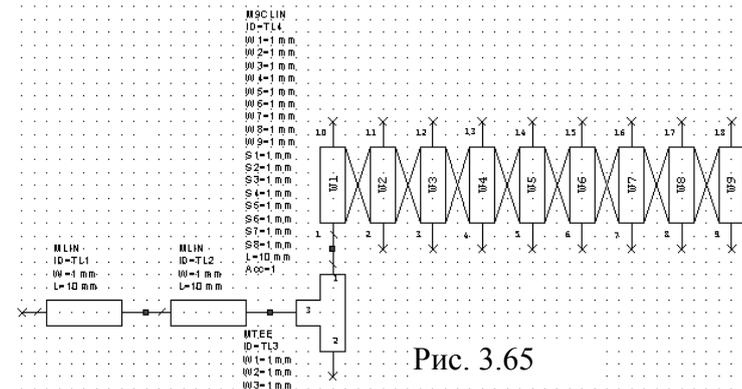
3.3.1. Создание схемы.

В первом приближении может быть создана следующая схема.

1. Создайте новый проект и сохраните его под именем **F95-105**.
2. Щёлкните по значку **New Schematic** на панели инструментов и создайте схему с именем **Fil**.

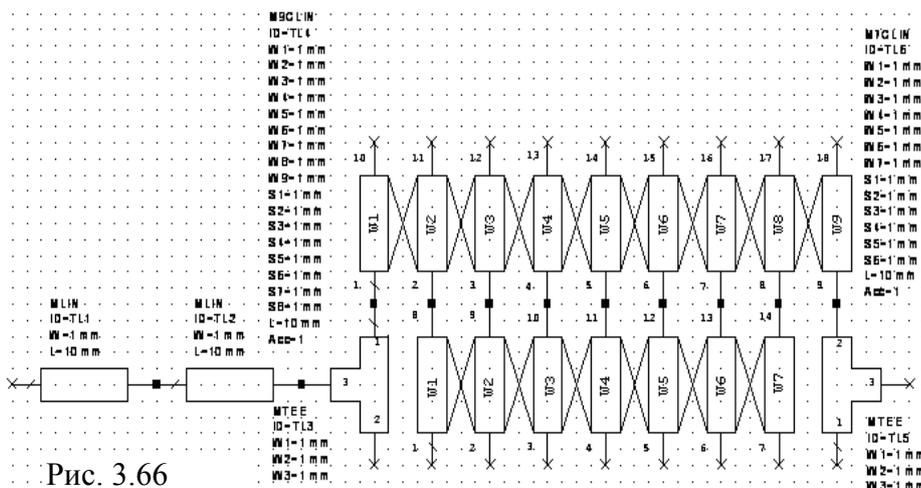


3. В левом окне проекта откройте вкладку **Elem** и выберите подгруппу **Lines** в группе **Microstrip**.
4. Перетащите в поле схемы элемент **MLIN**, затем перетащите второй такой же элемент и соедините его с первым.
5. Раскройте подгруппу **Junctions**, перетащите в поле схемы элемент **MTEE**, щёлкните три раза правой кнопкой мышки, чтобы развернуть его, и соедините плечо 3 этого элемента с правым концом второго элемента **MLIN** (рис. 3.64).



нуть его, и соедините плечо 1 этого элемента с плечом 1 элемента **MTEE** (рис. 3.65).

7. Щёлкните по элементу **MTEE**, чтобы выделить его. Щёлкните по значкам **Copy** и **Paste** на панели инструментов, переместите курсор в окно схемы, щёлкните два раза



правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированный элемент, и соедините его плечо 2 с плечом 9 последнего отрезка в элементе связанных линий.

8. Перетащите в окно схемы элемент **M7CLIN** и соедините его с

элементом **M9CLIN** между двумя элементами **MTEE** (рис. 3.66).

9. Перетащите в окно схемы элемент **M9CLIN**, щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть его, и соедините с нижней частью схемы.
10. Нажмите клавишу **Shift**, щёлкните мышкой по первому элементу **MLIN** и затем по второму, чтобы выделить их. Скопируйте выделенные элементы и соедините их с плечом 3 последнего элемента **MTEE**.
11. Раскройте подгруппу **Other**, перетащите элемент **MOPEN** в схему, щёлкните правой кнопкой мышки и соедините этот элемент с плечом 10 верхнего элемента **M9CLIN**. Щёлкните по значку **Copy** и затем, щёлкая по значку **Paste**, подключите элемент **MOPEN** ко всем остальным плечам верхнего элемента **M9CLIN**. Аналогично подключите элементы **MOPEN** ко всем плечам нижнего элемента **M9CLIN**.
12. Щёлкните по значку **Port** на панели инструментов и подключите порт ко входу схемы. Снова щёлкните по значку **Port**, два раза щёлкните правой кнопкой мышки и подключите порт к выходу схемы.

13. Щёлкните по группе **Substrates** в левом окне проекта и перетащите элемент **MSUB** в окно схемы. Должна получиться схема, показанная на рис. 3.67.

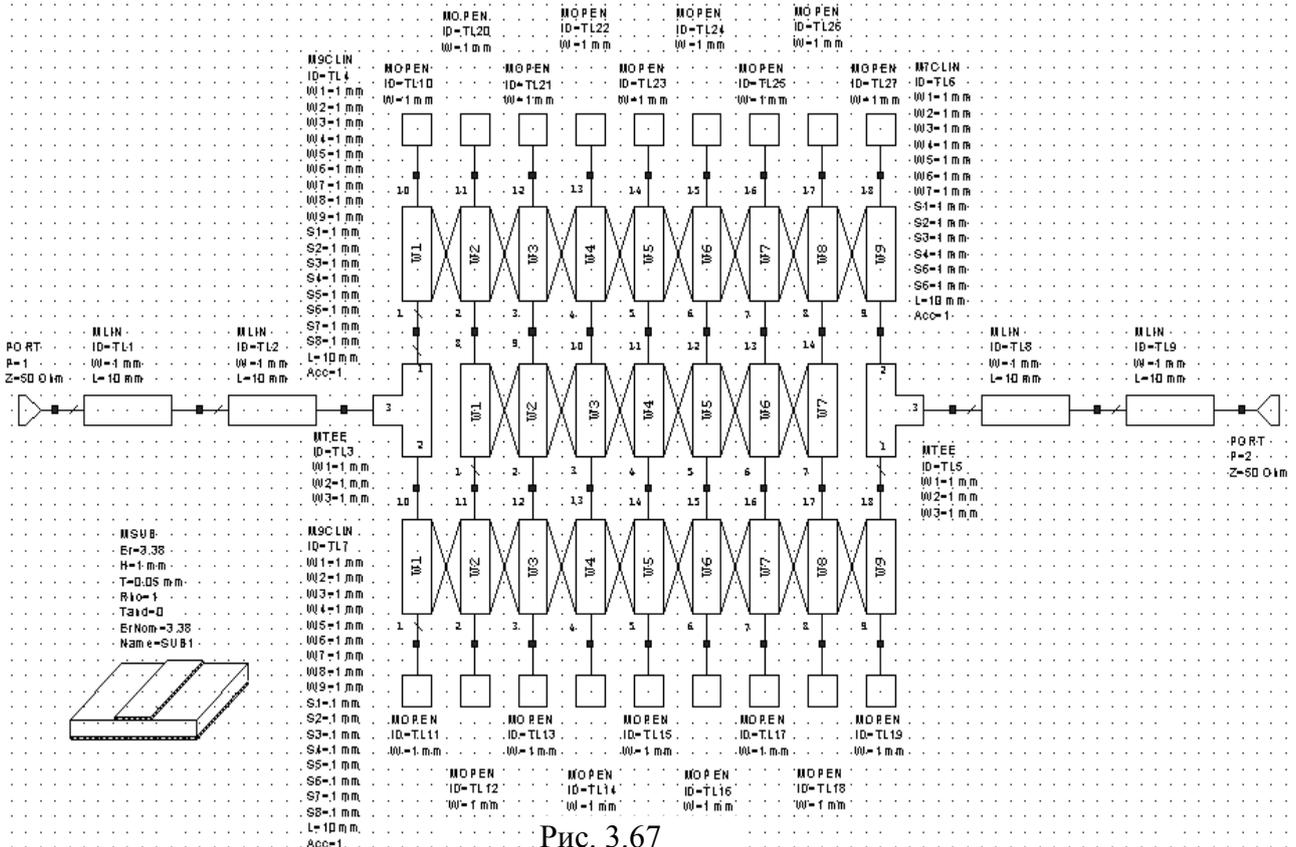


Рис. 3.67

3.3.2. Добавление переменных и редактирование элементов схемы.

1. Добавьте переменные для связанных отрезков линий. Для этого щёлкните по значку **Equation** на панели инструментов и введите переменную $W1=0.45$. Аналогично добавьте переменные $W2=0.45$, $W3=0.45$, $W4=0.45$ и $W5=0.45$. Затем добавьте $S1=1$, $S2=1$, $S3=1$ и $S4=1$. Введите переменную для полной длины полуволновых резонаторов $L=5.6$ (примерно половина длины волны на подложке с $E_r=10.45$ толщиной 0.5 мм на частоте 10 ГГц). Введите расстояния от верхнего разомкнутого конца крайних резонаторов до точки подключения кондуктивной связи. Это расстояние в первом приближении будем считать равным примерно одной трети от длины резонатора: $L1=1.8$. Введите переменную для расстояния от нижнего разомкнутого конца крайних резонаторов до точки подключения кондуктивной связи. Оно будет равно $L2=L-L1-WT$. Добавьте переменные для согласующих отрезков на входе и выходе фильтров $WT=0.45$ и $LT=0.5$.
2. Дважды щёлкните по первому элементу **MLIN** и введите параметры $W=0.45$ и $L=3$. Эти же значения параметров введите для последнего элемента **MLIN**. Дважды щёлкните по второму элементу **MLIN** и введите параметры $W=WT$ и $L=LT$, эти же значения параметров введите для предпоследнего элемента **MLIN**.
3. Дважды щёлкните по верхнему элементу **M9CLIN** и введите параметры $W1=W1$, $W2=W2$, $W3=W3$, $W4=W4$, $W5=W5$, $W6=W4$, $W7=W3$, $W8=W2$, $W9=W1$, $S1=S1$, $S2=S2$, $S3=S3$, $S4=S4$, $S5=S4$, $S6=S3$, $S7=S2$, $S8=S1$ и $L=L1$. Эти же значения параметров введите для нижнего элемента **M9CLIN**, только значение длины введите $L=L2$.
4. Дважды щёлкните по элементу **M7CLIN** и введите параметры $W1=W2$, $W2=W3$, $W3=W4$, $W4=W5$, $W5=W4$, $W6=W3$, $W7=W2$, $S1=S2$, $S2=S3$, $S3=S4$, $S4=S4$, $S5=S3$, $S6=S2$ и $L=WT$.
5. Для элементов **MOPEN** введите соответствующие параметры $W=W1$, $W=W2$, $W=W3$, $W=W4$, $W=W5$, $W=W4$, $W=W3$, $W=W2$ и $W=W1$.
6. Дважды щёлкните по первому элементу **MTEE** и введите $W1=W1$, $W2=W1$, $W3=WT$. Такие же параметры введите для последнего элемента **MTEE**.

7. Дважды щёлкните по элементу **MSUB** и введите параметры $\epsilon_r=10.54$, $H=0.5$, $T=0.005$, $T_{and}=0.0001$ и $\epsilon_{rNom}=10.54$. Окончательная схема показана на рис. 3.68.

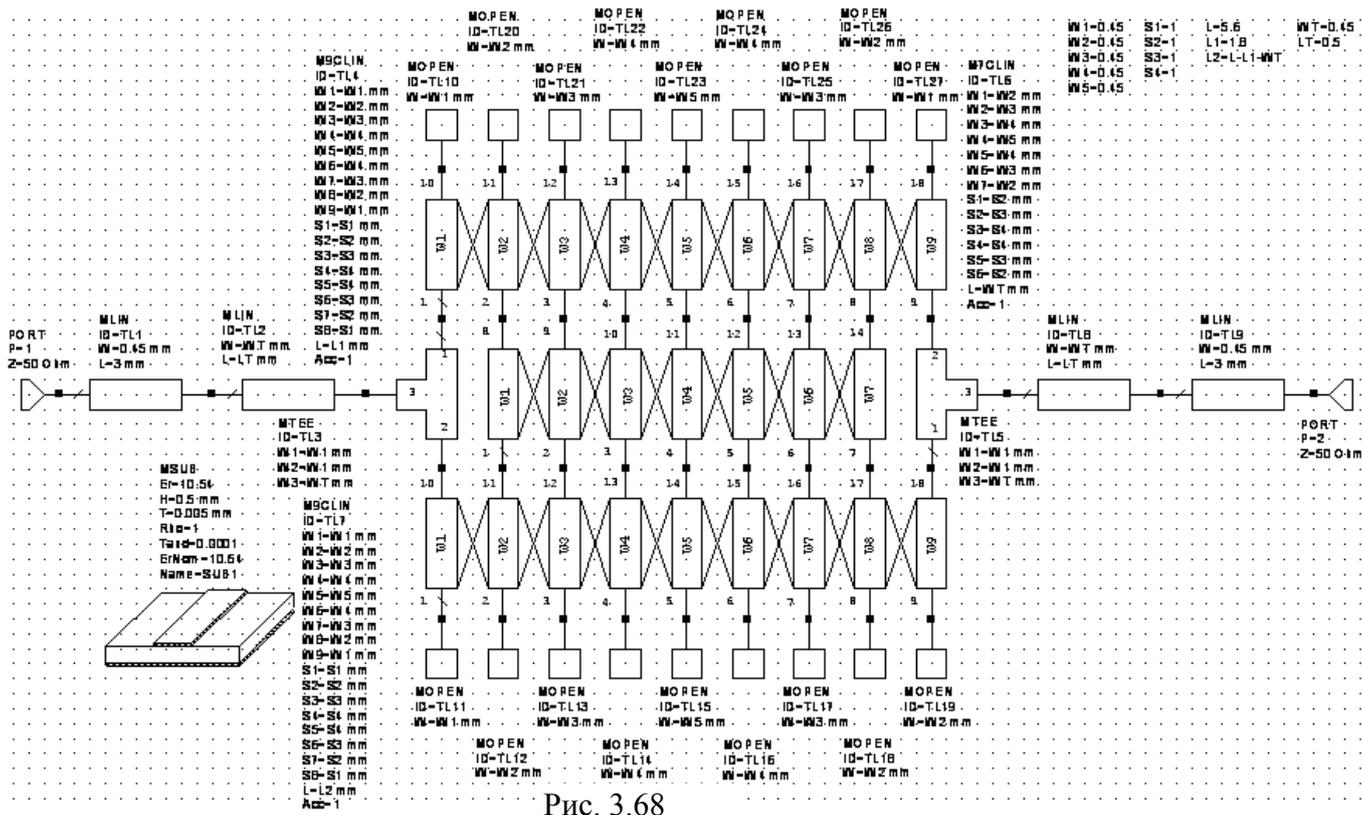


Рис. 3.68

3.3.3. Добавление частот, анализ и настройка схемы.

1. В левом окне проекта откройте вкладку **Proj**. Дважды щёлкните по **Project Options** в этом окне и введите частоты от 8 до 12 с шагом 0.25. Нажмите **Apply** и **OK**.
2. Сделайте активным окно схемы. Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов, устанавливая курсор на переменные и щёлкая мышкой, назначьте для настройки все переменные, кроме $L2=L-L1-LT$, щёлкните мышкой на свободном месте поля схемы.
3. Щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов и создайте график с именем **LdB**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени созданного графика в левом окне проекта и добавьте измеряемую величину **S21** в **dB**, нажмите **Apply** и **OK**.

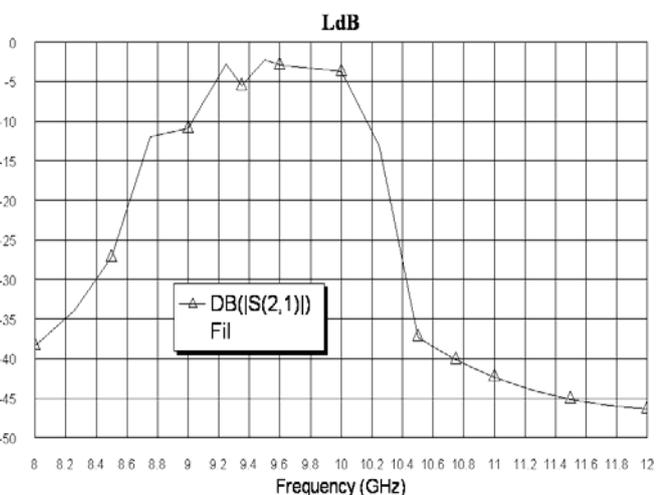


Рис. 3.69

4. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой по графику и выберите **Properties**. В открывшемся окне **Rectangular Plot Properties** на вкладке **Axes** для оси x снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите шаг по частоте **0.2**. Для оси **Left 1** снимите “галочку” в **Auto limits**, введите в поле **Min** введите **-50** и в поле **Max** введите **0**, снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **5**. На вкладке **Fonts** щёлкните по кнопке **Axis numbers**, в открывшемся окне **Шрифт** выберите шрифт **Arial**, начертание **обычный** и размер **14**, нажмите **OK**. В окне **Rectangular Plot Properties** нажмите **Apply** и **OK**. Полученный график показан на рис. 3.69.

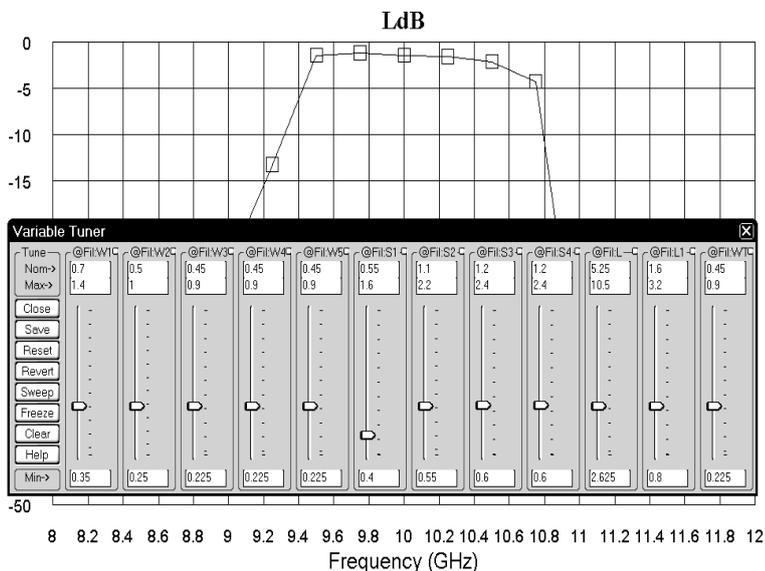


Рис. 3.70

5. Щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов и, двигая движки переменных на блоке настройки, добейтесь требуемой характеристики (рис. 3.70).

В результате настройки переменные получили следующие значения: $L=5.25$, $L1=1.6$, $W1=0.7$, $W2=0.5$, $W3=W4=W5=0.45$, $S1=0.55$, $S2=1.1$, $S3=S4=1.2$, $WT=0.45$ и $LT=0.5$.

3.3.4. Создание электромагнитной структуры.

1. Выберите в меню команду **Options>Layout Options**. В открывшемся окне на вкладке **Layout** в поле **Grid spacing** (Интервал сетки) введите **0.05 mm** и в поле **Database unit size** введите **0.001 mm**. На вкладке **Dimension Lines** в поля **Font height** и **Arrow size** введите **0.5 mm**, в поле **Precision** (Точность, т.е. число знаков после запятой) введите 2.

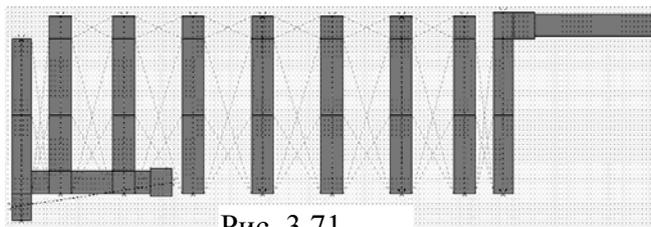


Рис. 3.71

2. Сделайте активным окно схемы. Выберите в меню команду **New Schematic Layout View**, чтобы отобразить топологию схемы. Возможный вариант отображения схемы показан на рис. 3.71.
3. Выделите все элементы топологии, установив курсор мышки левее и выше топологии, нажав кнопку мышки и переместив курсор правее и ниже топологии, или выбрав в меню команду **Edit>Select All**.

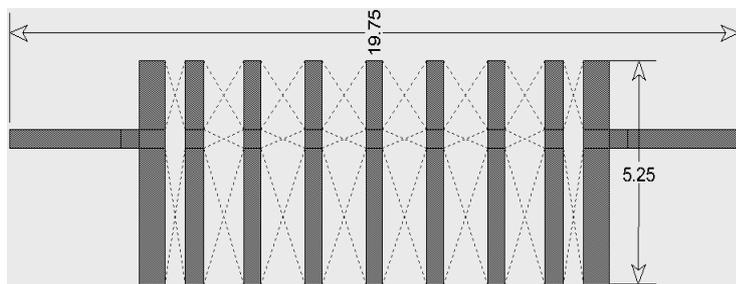


Рис. 3.72

Выберите в меню команду **Edit>Snap Together** или щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов. Исправленная топология показана на рис. 3.72.

4. Выберите в меню команду **Dimension Line**. Установите курсор мышки на верхний левый угол входного проводника, нажмите кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор на верхний правый угол выходного проводника и отпустите кнопку, установите размер длины топологии удобным для наблюдения и щёлкните левой кнопкой мышки (рис. 3.72). Аналогично установите размер ширины топологии. Исходя из полученных размеров, выберем размер платы 19.75×7 .

5. Выберите в меню команду **New EM Structure** и создайте структуру с именем **F95_105**.

- Выберите в меню команду **Substrate Information**. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension(mm)** введите **19.75**, в поле **X-Divisions** введите **395**, в поле **Y-Dimension(mm)** введите **7** и в поле **Y-Divisions** введите **140**. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6**. Для слоя **2** введите толщину **0.5**, диэлектрическую проницаемость **10.54**, тангенс потерь **0.0001** и масштаб просмотра **4** (рис. 3.73). Нажмите **OK**.

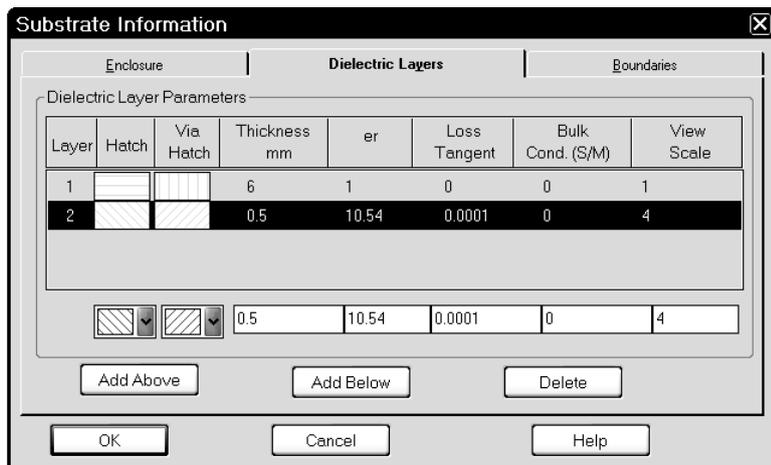


Рис. 3.73

ру симметрично относительно корпуса так, чтобы крайние стороны входного и выходного проводников точно совпадали с левым и правым краями корпуса (рис.3.74).

- Щёлкните по входному проводнику, чтобы выделить его. Щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра. Щёлкните по квадратику установленного порта, установите курсор на правую сторону этого квадрата, нажмите кнопку мышки и сдвиньте референсную плоскость вправо на 1 мм. Аналогично установите порт на выходе фильтра. Выделите всю топологию, щёлкните правой кнопкой по

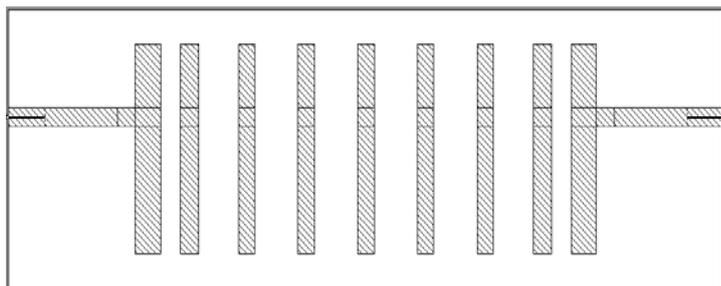


Рис. 3.74

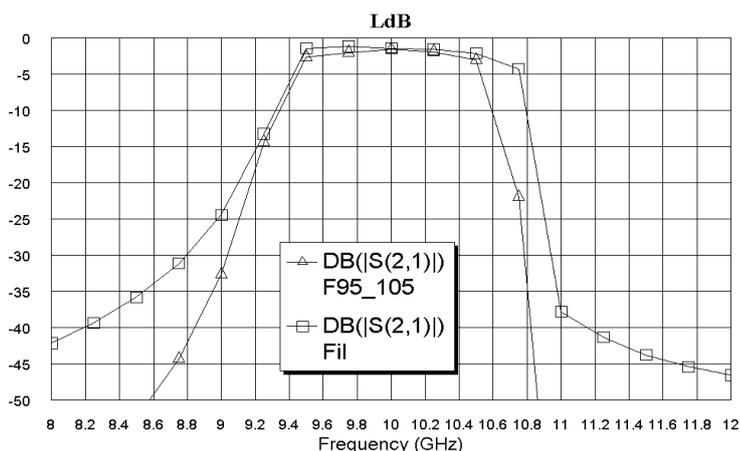


Рис. 3.75

характеристику в переходной области.

- Дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне проекта. На вкладке **Frequencies** отметьте **Add** и **Single point**. В поле **Point(GHz)** введите **9.35** и нажмите **Apply**. Аналогично добавьте частоты **10.65** и **10.85**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов.
- Установите курсор на имя электромагнитной структуры **F95_105** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**.

любому элементу топологии и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне выберите материал **1/2oz Cu**, нажмите **OK**. Полученная топология показана на рис.3.74.

- Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученная характеристика показана на рис. 3.75. Характеристика сдвинута вниз по частоте, т.е. нужно укоротить резонаторы. Кроме того добавим частотных точек, чтобы точнее отобразить

характеристику в переходной области.

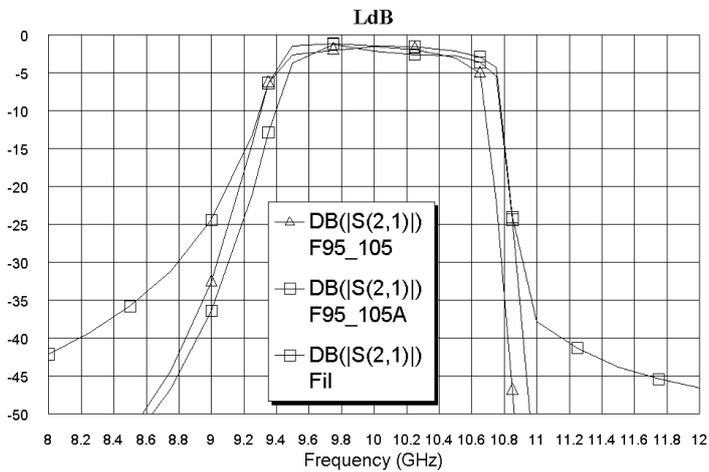


Рис. 3.76

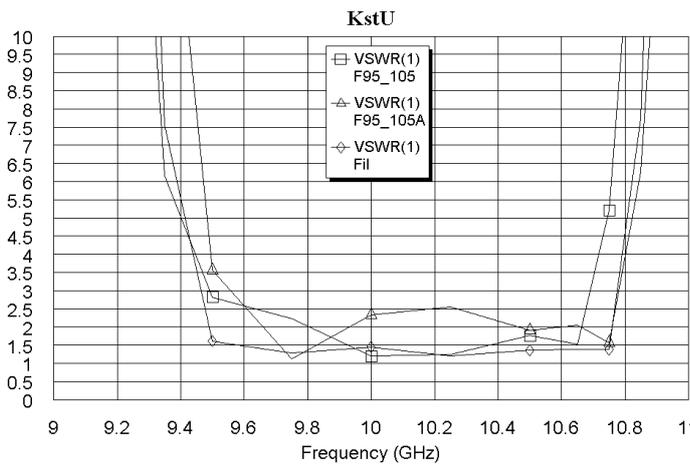


Рис. 3.77

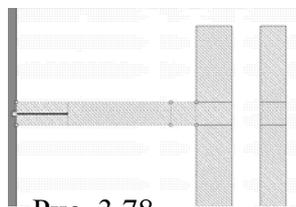


Рис. 3.78

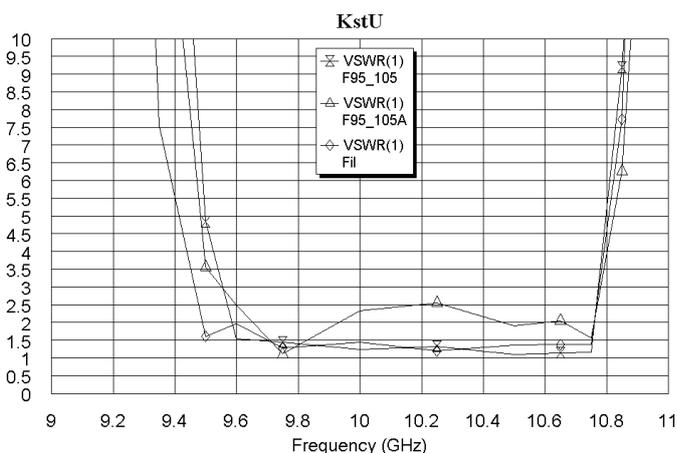


Рис. 3.79

по двум входным отрезкам линий, чтобы выделить их (рис. 3.78). Установите курсор на любой выделенный проводник и сдвиньте выделенные проводники на **0.2** вверх. В **Project Options** добавьте частоту **9.6** ГГц, как описано выше. Сделайте активным окно графика **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 3.79. Характеристика имеет сдвиг вверх по частоте и полоса пропускания несколько шире требуемой при выполнении требований на частотах за-

Щёлкните правой кнопкой мышки по имени скопированной структуры **Copy of F95_105**, выберите **Rename EM Structure** и переименуйте её в **F95_105A**.

13. Дважды щёлкните по верхней части первого резонатора, установите курсор на ромбик посередине верхней стороны и сместите её вниз на **0.05**. Аналогично укоротите все остальные резонаторы. Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика показана на рис. 3.76.

14. Для дальнейшей отработки топологии лучше перейти к графику стоячей волны. Щёлкните по значку **New Graph** и создайте график с именем **KstU**. Щёлкните правой кнопкой мышки по этому имени в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В области **Meas. Type** выберите **Linear**, в области **Measurement** выберите **VSWR**, в поле **Data Source Name** введите **All Source**, в поле **Port Index** установите **1**, снимите “галочку” в **dB**, нажмите **Apply** и **OK**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой по графику и выберите **Properties**. Для оси x снимите “галочки” в **Auto limits** и **Auto divs**. В поле **Min** введите **9**, в поле **Max** введите **11**, в поле **Step** введите **0.2**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **Auto limits** и **Auto divs**. В поле **Min** введите **0**, в поле **Max** введите **10**, в поле **Step** введите **0.5**. График **KstU** показан на рис. 3.77.

15. Уточним точку подключения кондуктивной связи. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени структуры **F95_105** в левом окне проекта и удалите эту структуру. Создайте копию оставшейся структуры **F95_105A**, как описано выше, и переименуйте скопированную структуру в **F95_105**. Нажмите клавишу **Shift** и щёлкните

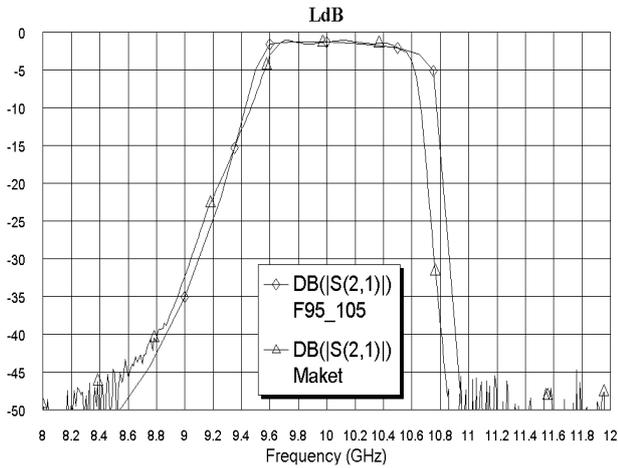


Рис. 3.80

топология показаны на рис. 3.80 и 3.81.

граждения, что обеспечивает необходимый запас для настройки. На этом моде-

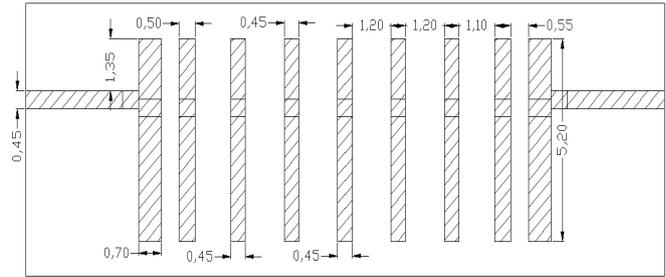


Рис. 3.81

лирование можно считать законченным. Характеристика ослабления (расчётная и экспериментальная) и смоделированная

3.4. Шпилечный фильтр с полосой пропускания 4.3 – 4.8 ГГц.

ГГц.

Спроектировать шпилечный фильтр с полосой пропускания от 4.3 до 4.8 ГГц, ослабление в диапазоне от 5.2 до 7.4 должно быть не менее 40 дБ. Структура фильтра показана на рис. 3.82. В мастере синтеза фильтров Microwave Office подобных структур нет. Поэтому, чтобы получить первое приближение параметров топологии нужно воспользоваться программой NuHertz Filter, интегрированной в Microwave Office, или обратиться к соответствующей литературе, или действовать следующим образом. Будем считать, что фильтр состоит из полуволновых резонаторов с укороченными связями, которые свёрнуты в шпильку. Воспользовавшись встроенным инструментом TXLine (команда меню Tool>TXLine) определим, что длина полуволнового отрезка на частоте 4.55 ГГц при подложке толщиной 0.5 мм и диэлектрической проницаемости 10.3 равна примерно 12.5 мм. Выберем расстояние между проводниками внутри шпильки 1.5 мм (ширина шпильки). Тогда длина шпильки должна быть примерно 5.5 мм. Электромагнитной связью внутри шпильки будем пренебрегать. Теперь можно создавать электрическую схему фильтра.

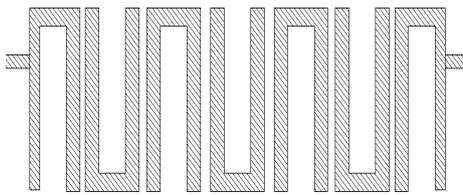


Рис. 3.82

укороченными связями, которые свёрнуты в шпильку. Воспользовавшись встроенным инструментом TXLine (команда меню Tool>TXLine) определим, что длина полуволнового отрезка на частоте 4.55 ГГц при подложке толщиной 0.5 мм и диэлектрической проницаемости 10.3 равна примерно 12.5 мм. Выберем расстояние между проводниками внутри шпильки 1.5 мм (ширина шпильки). Тогда длина шпильки должна быть примерно 5.5 мм. Электромагнитной связью внутри шпильки будем пренебрегать. Теперь можно создавать электрическую схему фильтра.

3.4.1. Создание электрической схемы.

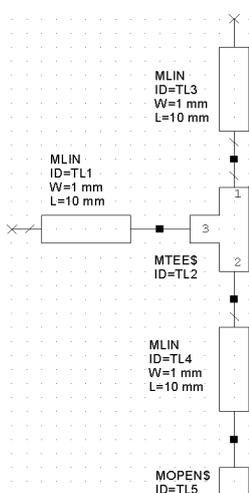


Рис. 3.83

1. Создайте новый проект и сохраните его под именем **Fil43-48**.
2. Щёлкните по значку **New Schematic** на панели инструментов и создайте схему с именем **Fil**.
3. Откройте вкладку **Elem** в левом окне проекта и раскройте группу **Microstrip**.
4. Щёлкните по подгруппе **Lines** и перетащите элемент **MLIN** в окно схемы. Щёлкните по подгруппе **Junctions**, перетащите элемент тройника **MTEES** в окно схемы, три раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть этот элемент, и подключите его плечом **3** к элементу **MLIN**.
5. Выделите элемент **MLIN**, щёлкнув по нему мышкой, скопируйте его, щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть, и подключите к плечу **1** элемента **MTEES**. Аналогично подключите элемент **MLIN** к плечу **2** элемента **MTEES**.
6. Щёлкните по подгруппе **Other**, перетащите элемент **MOPENS** в окно схемы, три раза щёлкните правой кнопкой мышки и подключите этот элемент к нижнему элементу **MLIN** (рис. 3.83).

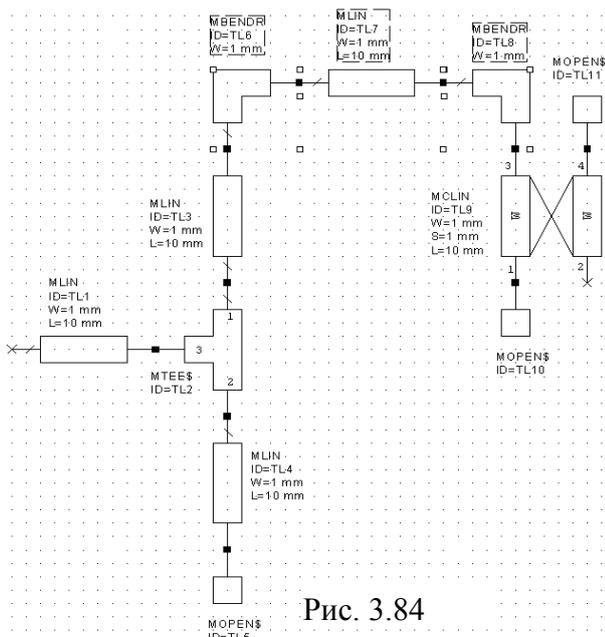


Рис. 3.84

7. Щёлкните по подгруппе **_Obsolite** (Устаревшие), перетащите элемент **MBENDR**, щёлкните правой кнопкой мышки и подключите этот элемент с верхним элементом **MLIN (ID=TL3)**.
8. Скопируйте первый элемент **MLIN (ID=TL1)** и подключите его к элементу **MBENDR**.
9. Из левого окна проекта снова перетащите элемент **MBENDR** и подключите этот элемент к последнему элементу **MLIN (ID=TL7)**.
10. Щёлкните по подгруппе **Coupled Lines**, перетащите элемент **MCLIN** в окно схемы, щёлкните правой кнопкой мышки и подключите его к последнему элементу **MBENDR (ID=TL8)**. Скопируйте элемент **MOPENS\$** и подключите его к плечам 1 и 4 элемента **MCLIN** (рис. 3.84).

11. Нажмите клавишу **Shift** и, щёлкая мышкой по элементам, выделите элементы **MBENDR (ID=TL6)**, **MLIN (ID=TL7)** и **MBENDR (ID=TL8)** (рис. 3.84). Скопируйте эти элементы, щёлкните два раза правой кнопкой мышки и подключите их к плечу 2 элемента **MCLIN**.

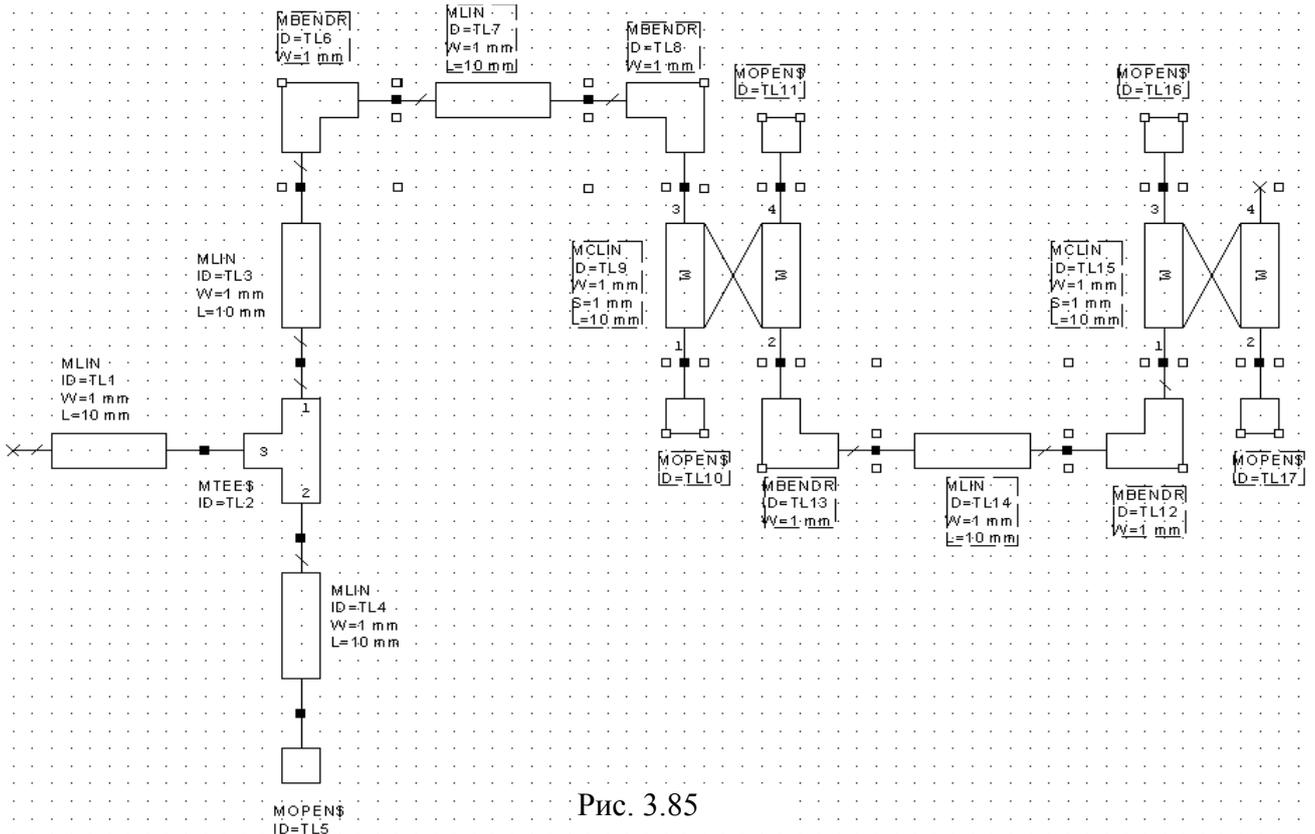


Рис. 3.85

12. Скопируйте элемент **MCLIN** и подключите его к последнему элементу **MBENDR**.
13. Скопируйте элемент **MOPENS\$** и подключите его к плечам 2 и 3 последнего элемента **MCLIN** (рис. 3.85).
14. Нажмите клавишу **Shift** и, щёлкая мышкой по элементам, выделите элементы с **ID=TL6** по **ID=TL17** (рис. 3.85) и скопируйте их, щёлкнув по значку **Copy** на панели инструментов.
15. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и подключите скопированные элементы к плечу 4 последнего элемента **MCLIN**.

16. Повторите п.15 ещё раз.
17. Нажмите клавишу **Shift** и, щёлкая мышкой по элементам, выделите элементы **MBENDR (ID=TL6)**, **MLIN (ID=TL7)** и **MBENDR (ID=TL8)**, как в п.11. Скопируйте эти элементы и подключите их к плечу 2 последнего элемента **MCLIN**.
18. Нажмите клавишу **Shift** и, щёлкая мышкой по элементам, выделите два элемента **MLIN (ID=TL3 и ID=TL4)** и элемент **MOPENS (ID=TL5)**, подключенные к элементу **MTEES (ID=TL2)**, и скопируйте их. Подключите скопированные элементы к последнему элементу **MBENDR (ID=TL8)**.
19. Скопируйте элемент **MTEES (ID=TL2)**, и включите его в разрыв между двумя последними элементами **MLIN (ID=TL45 и ID=TL46)**, два раза щёлкнув правой кнопкой мышки, чтобы развернуть.
20. Скопируйте первый элемент **MLIN (ID=TL1)** и подключите его к плечу 3 последнего элемента **MTEES (ID=TL48)**.
21. Щёлкните по значку **Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра. Аналогично установите порт на выходе схемы.
22. Щёлкните по подгруппе **Substrates** в левом окне проекта и перетащите элемент подложки **MSUB** в окно проекта. Полученная схема показана на рис. 3.86.

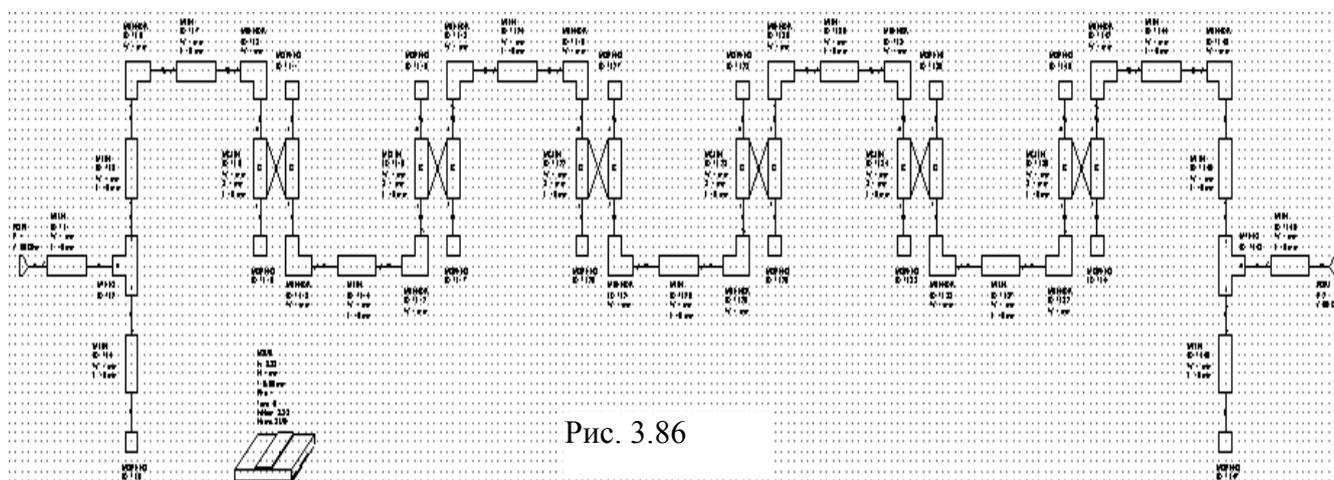


Рис. 3.86

3.4.2. Добавление переменных, редактирование элементов и анализ схемы.

1. Щёлкая по значку **Equation** на панели инструментов, добавьте следующие переменные: **W1=0.45** (ширина проводников крайних шпилек, к которым подключается кондуктивная связь с портами), **WS=0.45** (ширина проводников, соединяющих связанные отрезки), **WR1=0.45**, **WR2=0.45**, **WR3=0.45** (ширина проводников в связанных отрезках), **LR=5.5** (длина связанных отрезков), **LS1=1.5**, **LS2=1.5**, **LS3=1.5**, **LS4=1.5** (длина отрезков между связанными линиями), **L1=1.8** (длина верхнего отрезка до кондуктивной связи), **L2=LR-L1-0.45** (длина нижнего отрезка от кондуктивной связи), **S1=0.5**, **S2=0.5**, **S3=0.5** (величина зазора в связанных линиях).
2. Дважды щёлкните по первому элементу **MLIN (ID=TL1)** и введите параметры **W=0.45** и **L=3**. Такие же параметры введите для последнего элемента **MLIN (ID=TL49)**.
3. Для элемента **MLIN (ID=TL3)**, подключенного к плечу 1 входного тройника, введите **W=W1** и **L=L1**. Такие же параметры введите для элемента **MLIN (ID=TL45)**, подключенного к плечу 1 выходного тройника.
4. Для элемента **MLIN (ID=TL4)**, подключенного к плечу 2 входного тройника, введите **W=W1** и **L=L2**. Такие же параметры введите для элемента **MLIN (ID=TL46)**, подключенного к плечу 1 выходного тройника.
5. Для элемента **MLIN (ID=TL7)**, соединяющего входные проводники с первым элементом связанных линий **MCLIN (ID=TL9)**, введите **W=WS** и **L=LS1**. Такие же параметры введите для элемента **MLIN (ID=TL44)**, соединяющего выходные проводники с последним элементом связанных линий **MCLIN (ID=TL35)**.

6. Для элемента **MLIN** (**ID=TL11**), соединяющего первый элемент **MCLIN** (**ID=TL9**) со вторым элементом **MCLIN** (**ID=TL15**), введите **W=WS** и **L=LS2**. Такие же параметры введите для элемента **MLIN** (**ID=TL37**), соединяющего предпоследний элемент **MCLIN** (**ID=TL34**) с последним элементом **MCLIN** (**ID=TL35**).
7. Для элемента **MLIN** (**ID=TL24**), соединяющего второй элемент **MCLIN** (**ID=TL15**) с третьим элементом **MCLIN** (**ID=TL22**), введите **W=WS** и **L=LS3**. Такие же параметры введите для элемента **MLIN** (**ID=TL36**), соединяющего четвёртый элемент **MCLIN** (**ID=TL23**) с пятым элементом **MCLIN** (**ID=TL34**).
8. Для элемента **MLIN** (**ID=TL25**), соединяющего третий элемент **MCLIN** (**ID=TL22**) с четвёртым элементом **MCLIN** (**ID=TL23**), введите **W=WS** и **L=LS4**.
9. Для первого элемента **MCLIN** (**ID=TL9**) введите **W=WR1**, **S=S1** и **L=LR**. Такие же параметры введите для последнего элемента **MCLIN** (**ID=TL35**).
10. Для второго элемента **MCLIN** (**ID=TL15**) введите **W=WR2**, **S=S2** и **L=LR**. Такие же параметры введите для предпоследнего элемента **MCLIN** (**ID=TL34**).
11. Для третьего элемента **MCLIN** (**ID=TL22**) введите **W=WR3**, **S=S3** и **L=LR**. Такие же параметры введите для четвёртого элемента **MCLIN** (**ID=TL23**).
12. Для всех элементов **MBENDR** введите **W=WS**.
13. Для элемента **MSUB** введите **Er=10.3**, **H=0.5**, **T=0.005**, **Tand=0.0001** и **ErNom=10.3**.

Первая половина окончательной схемы показана на рис. 3.87, вторая половина симметрична первой.

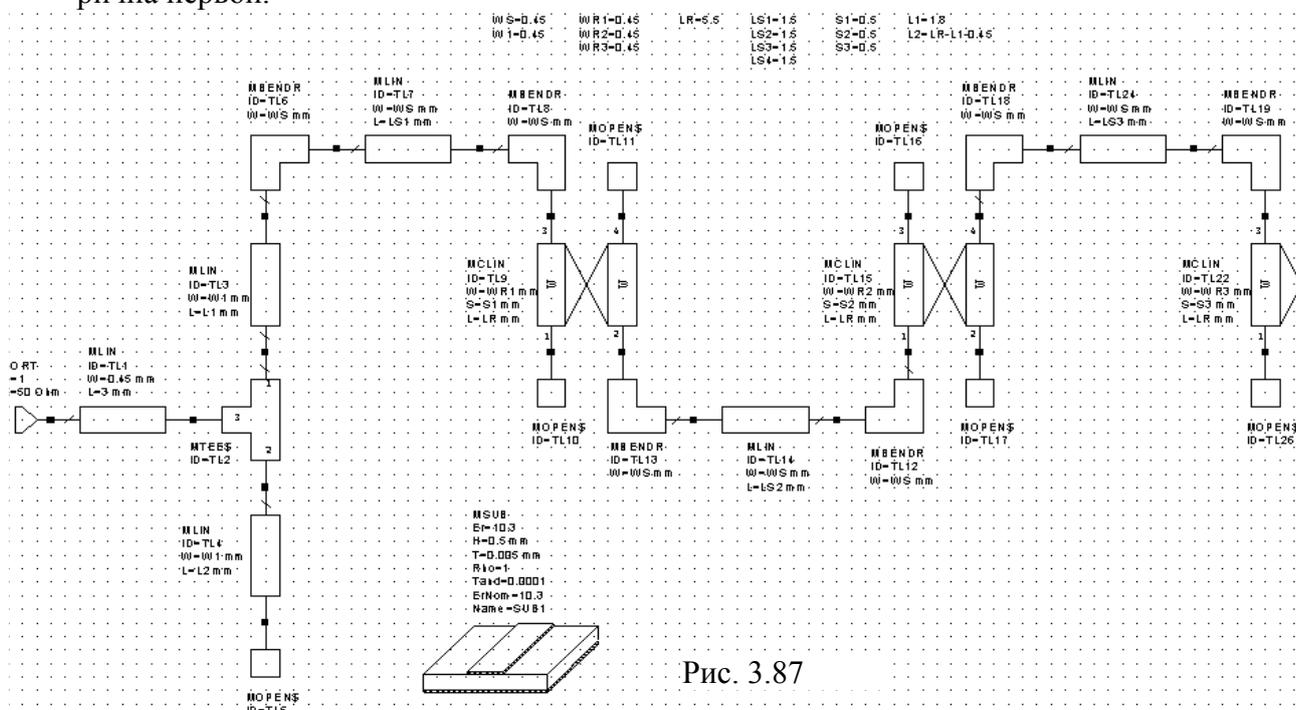


Рис. 3.87

14. Откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта и дважды щёлкните по **Project Options**.

В открывшемся окне опций проекта на вкладке **Frequencies** отметьте **Replace**, в поле **Start(GHz)** введите **3.9**, в поле **Stop(GHz)** введите **5.2**, в поле **Step(GHz)** введите **0.1**. Добавьте частоты **4.25** и **4.85**. Нажмите **Apply** и **OK**.

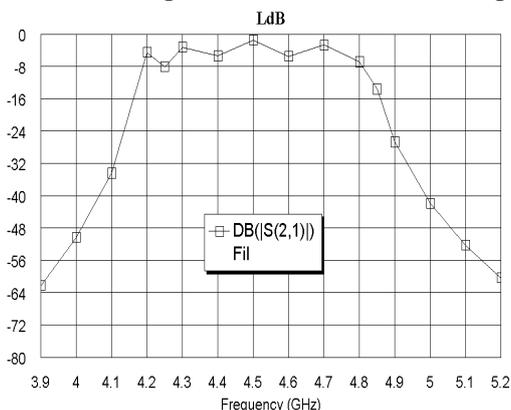


Рис. 3.88

15. Щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов и создайте график с именем **LdB**. Щёлкните правой кнопкой по имени графика **LdB** в левом поле проекта и выберите **Add Measurement**. В области **Meas. Type** разверните группу **Linear** и отметьте **Port Parameters**. В области **Measurement** отметьте **S**. В поле **Data Source Name** введите **All Sources**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля. В поле **To Port Index** введите **2**, в поле **From Port Index** введите **1**, от-

метьте **dB**, нажмите **Apply** и **OK**.

- Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и выберите **Properties**. Для оси **x** снимите “галочку” **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.1**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” **Auto limits** и **Auto divs**. В поле **Min** введите **-80**, в поле **Step** введите **2**. Нажмите **Apply** и **OK**. График показан на рис. 3.88. После выполнения анализа может появиться окно, предупреждающее, что элемент **MBENDR** устаревший и рекомендуется использовать элемент **MBENDA**. Закройте это окно и не обращайтесь внимания.

3.4.3. Настройка схемы.

В нашем случае назначить для настройки сразу все переменные не получится, т.к. в блок настройки можно включить до 12 переменных. Из графика видно, что резонансная частота выше требуемой и полоса пропускания шире. Поэтому включим в блок настройки длину и ширину резонаторов, и величину зазоров.

- Сделайте активным окно схемы. Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов. Устанавливая курсор на переменные и, щёлкая мышкой, назначьте для настройки следующие переменные: **WR1, WR2, WR3, LR, LS1, LS2, LS3, LS4, S1, S2** и **S3**.
- Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов. Двигая движки переменных на блоке настройки, добейтесь характеристики, близкой к требуемой. Затем сделайте активным окно схемы. Исключите из настройки переменные **WR1, WR2, WR3** и добавьте переменные **WS, W1** и **L1**, как описано в п.1. Сделайте активным окно графика и снова, двигая движки на блоке настройки, добейтесь улучшения характеристики. Возможно, эту процедуру придётся повторить несколько раз. Когда характеристика будет близка к требуемой, можно перейти к графику коэффициента стоячей волны. Для этого щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов и создайте график с именем **KstU**. Затем щёлкните правой кнопкой мышки по имени этого графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне в области **Meas. Type** отметьте **Linear**, в области **Measurement** отметьте **VSWR**, в поле **Port Index** введите **1** и снимите “галочку” в **dB**. Нажмите **Apply** и **OK**.
- Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Затем щёлкните правой кнопкой мышки по графику и выберите **Properties**. Для оси **x** снимите “галочки” **Auto limits** и **Auto divs**, в поле **Min** введите **4.2**, в поле **Max** введите **5** и в поле **Step** введите **0.05**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” **Auto limits** и **Auto divs**. В поле **Min** введите **0**, в поле **Max** введите **10** и в поле **Step** введите **0.5**. Нажмите **Apply** и **OK**.

Графики ослабления и КСВн после настройки показаны на рис. 3.89 и 3.90 соответственно. Эти графики получены при следующих значениях переменных: **WS=0.5, W1=0.45, WR1=0.5, WR2=0.6, WR3=0.6, LR=5.2, LS1=0.8, LS2=1.55, LS3=1.55, LS4=1.6, S1=0.2, S2=0.45, S3=0.5** и **L1=1.9**.

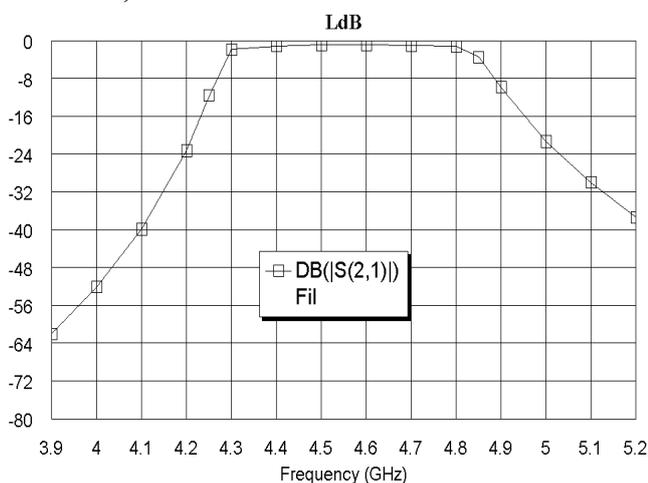


Рис. 3.89

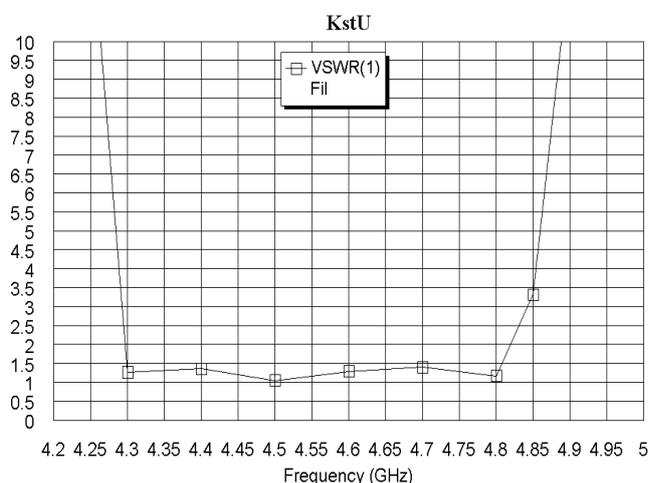


Рис. 3.90

3.4.4. Создание и анализ электромагнитной структуры.

Выберите в меню команду **Options>Layout Options**. На вкладке **Layout** открывшегося окна в поле **Grid spacing** введите **0.05** и в окне **Database unit size** введите **0.001**, нажмите

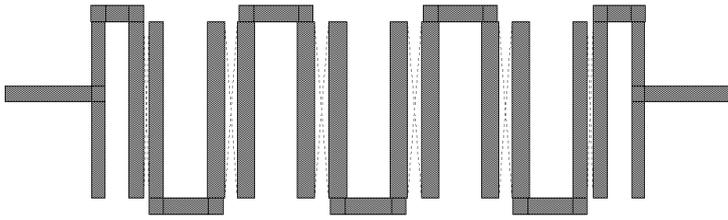


Рис. 3.91

3.91. В этом примере мы создадим электромагнитную структуру непосредственно в редакторе электромагнитной структуры, несколько изменив топологию и сократив количество топологических элементов.

Измерив длину и ширину топологии в окне топологии схемы, определим, что для размещения топологии фильтра нужен корпус размером 25x8 мм.

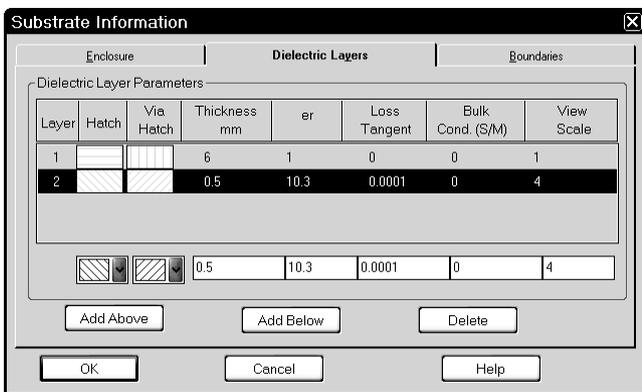


Рис. 3.92

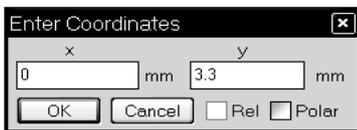


Рис. 3.93

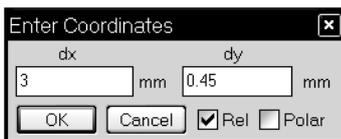


Рис. 3.94

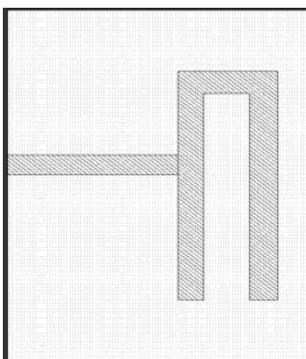


Рис. 3.95

5. Щёлкните по резонатору мышкой, чтобы выделить его, щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Поместите скопированный резонатор на свободном месте в поле электромагнитной структуры и два раза щёлкните правой

OK. Сделайте активным окно схемы и щёлкните по значку **New Schematic Layout View**. В открывшемся окне топологии схемы выделите все элементы топологии и щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов. Топология схемы, созданная Microwave Office показана на рис.

1. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру с именем **Fil43_48**.

2. Щёлкните по значку **Substrate Information**. На вкладке **Enclosure** открывшегося окна в поле **X-Dimension(mm)** введите **25**, в поле **X-Divisions** введите **500**, в поле **Y-Dimension(mm)** введите **8** и в поле **Y-Divisions** введите **160**. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6**, для слоя **2** введите толщину

0.5, диэлектрическую проницаемость **10.3**, тангенс потерь **0.0001** и масштаб отображения **4** (рис. 3.92), нажмите **OK**.

3. Щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов. Нажмите клавишу **Tab**, в поле **x** введите **0**, в поле **y** введите **3.3** (рис. 3.93), нажмите **OK** и затем клавишу **Tab**, в поле **dx** введите **3**, в поле **dy** введите **0.45** (рис. 3.94), нажмите **OK**.

4. Щёлкните по значку **Polygon Conductor**, поместите курсор на свободном месте в нижней части окна электромагнитной структуры и щёлкните мышкой. Затем перемещайте курсор, щёлкая мышкой после каждого перемещения, на **5.2** вверх, на **1.75** вправо, на **5.2** вниз, на **0.5** влево, на **4.7** вверх, на **0.8** влево, на **4.7** вниз и дважды щёлкните мышкой. Установите курсор на полученный резонатор, нажмите левую кнопку мышки и соедините резонатор с входным проводником. Щёлкнув по значку **Measure** на панели инструментов, измерьте расстояние от верхней части резонатора до входного проводника и сдвиньте резонатор так, чтобы это расстояние было равно **1.9**. Должна получиться структура, показанная на рис. 3.95.

кнопкой мышки, чтобы развернуть его. Дважды щёлкните левой кнопкой мышки по скопированному резонатору. Установите курсор на ромбик посередине левой стороны этого резонатора, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эту стону влево на 0.1, чтобы ширина левого проводника шпильки была равна 0.6. Установите курсор на ромбик посередине правой стороны резонатора, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эту стону вправо на 0.15, чтобы ширина правого проводника шпильки также была равна 0.6. Установите курсор на ромбик посередине правой стороны правого проводника шпильки, и сдвиньте эту стону вправо на 0.75, затем аналогично сдвиньте вправо на 0.75

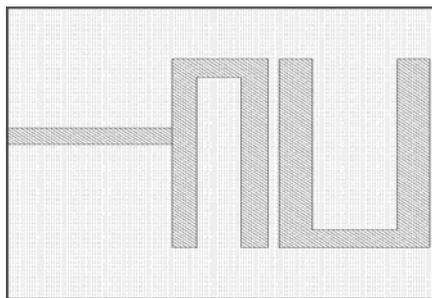


Рис. 3.96

левую сторону правого проводника шпильки. Расстояние между проводниками шпильки должно получиться равным 1.55. Установите курсор мышки на отредактированный резонатор, нажмите левую кнопку мышки и поместите этот резонатор рядом с первым на расстоянии 0.2 мм (рис. 3.96).

6. Выделите второй резонатор, скопируйте его и, щёлкнув два раза правой кнопкой мышки, поместите его рядом со вторым резонатором на расстоянии 0.45 мм.
7. Снова щёлкните по значку **Paste** и поместите четвёртый резонатор рядом с третьим на расстоянии 0.5 мм. Дважды щёлкните по этому резонатору, установите курсор мышки на ромбик посередине крайней правой стороны правого проводника шпильки, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эту сторону вправо на 0.05 мм. Аналогично сдвиньте левую сторону правого проводника шпильки на 0.05 мм. Расстояние между проводниками шпильки должно быть 1.6 мм.
8. Далее резонаторы должны располагаться симметрично относительно центра фильтра. Поэтому можно действовать следующим образом. Щёлкните по третьему резонатору, скопируйте его и поместите справа от четвёртого резонатора на расстоянии 0.5 мм.
9. Щёлкните по второму резонатору, скопируйте его и поместите справа от пятого резонатора на расстоянии 0.45 мм.
10. Щёлкните по первому резонатору, скопируйте его, сделайте зеркальную копию и поместите справа от шестого резонатора на расстоянии 0.2 мм.
11. Щёлкните по входному проводнику, скопируйте его и подключите к последнему резонатору на таком же расстоянии от верха резонатора, как и входной проводник. Выходной проводник будет выходить за пределы корпуса, поэтому дважды щёлкните по нему левой кнопкой мышки, установите курсор на ромбик посередине правой стороны и сдвиньте эту стону влево до границы корпуса. Должна получиться топология, показанная на рис. 3.97.

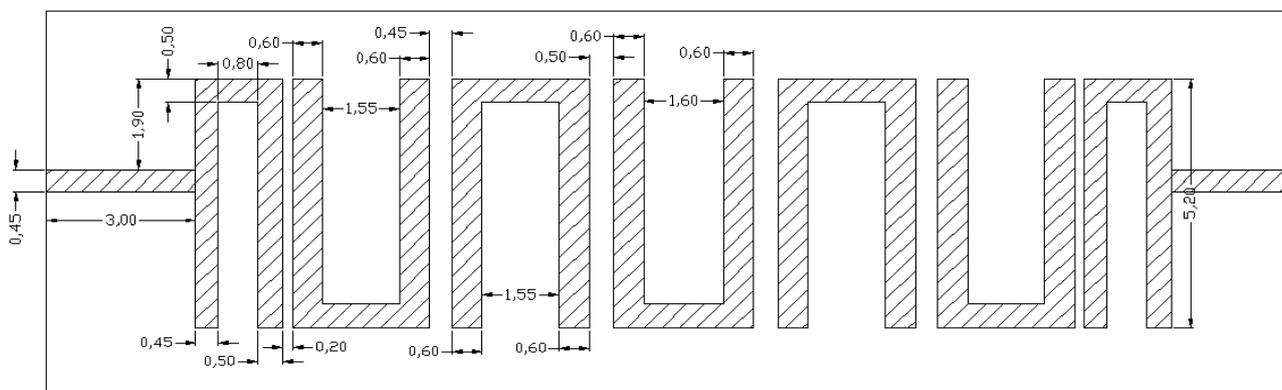


Рис. 3.97

12. Щёлкните мышкой по входному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра, щёлкните по квадратику порта, установите курсор на правую сторону порта, нажмите левую кнопку мышки и

сдвиньте референсную площадь на 1 мм вправо. Аналогично установите порт на выходе фильтра и сдвиньте референсную площадь на 1 мм влево.

13. Выделите все элементы топологии. Для этого установите курсор мышки левее и выше топологии, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор по диагонали правее и ниже топологии так, чтобы в образовавшийся прямоугольник попали все элементы топологии, отпустите кнопку. Или

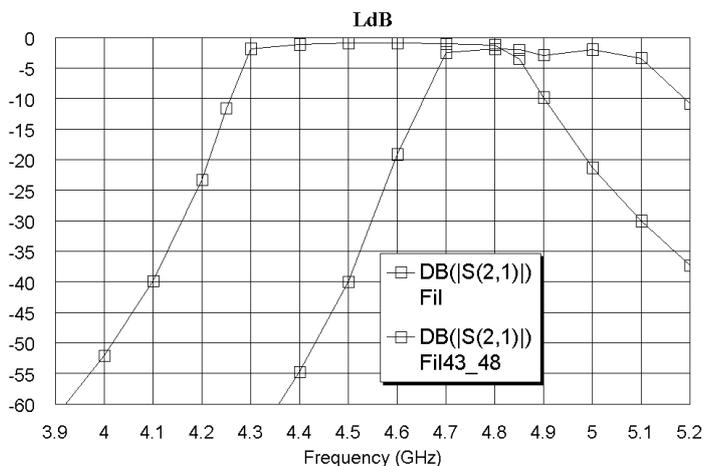


Рис. 3.98

длите 3.9, в поле **Max** введите 5.2, снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите 0.1. Для оси **Left 1** снимите “галочку” в **Auto limits**, в поле **Min** введите -60, в поле **Max** введите 0, снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите 5. Нажмите **Apply** и **OK**. График ослабления показан на рис. 3.98.

3.4.6. Редактирование топологии.

Полученная характеристика сдвинута вверх по частоте. Поэтому необходимо удлинить резонаторы.

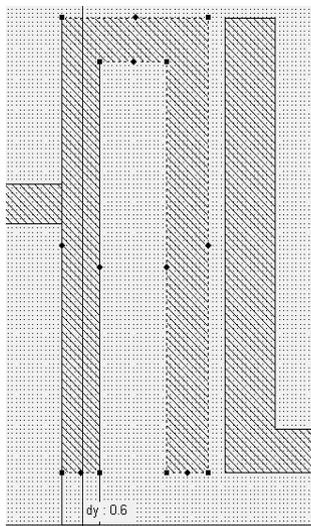


Рис. 3.99

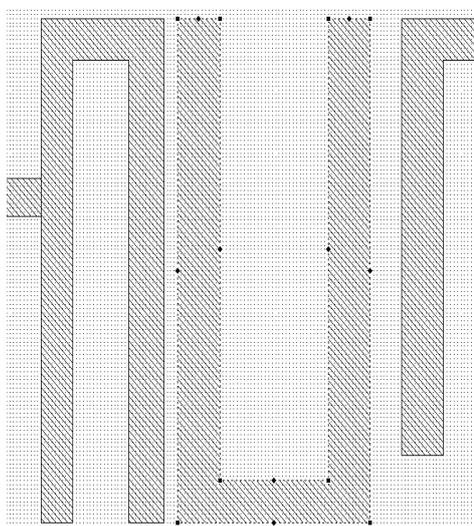


Рис. 3.100

стороны левого проводника шпильки, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эту сторону на 0.6 вниз (рис. 3.99). Аналогично сдвиньте на 0.6 нижнюю сторону правого проводника первого резонатора.

3. Установите курсор на второй резонатор, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте этот резонатор вниз на 0.6 мм. Дважды щёлкните по второму резонатору левой кнопкой мышки и удлините его проводники на 0.6 вверх (рис. 3.100).
4. Аналогично удлините все резонаторы фильтра.

Или выберите в меню команду **Edit>Select All**. Щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу топологии и выберите **Mesh/Material Properties**. В поле **Selected Material** введите **1/2oz Cu**, нажмите **OK**.

14. Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните по полученному графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. Для оси **x** снимите “галочку” в **Auto limits**, в поле **Min** введите

1. Установите курсор на имя электромагнитной структуры **Fil43_48** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени скопированной структуры **Copy of Fil43_48** и переименуйте её в **Fil43_48A**.

2. Дважды щёлкните по первому резонатору. Установите курсор на ромбик посередине нижней

5. Выделите все элементы топологии, установите курсор на любой элемент, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте всю топологию вверх на 0.3 мм, чтобы сохранить её симметричное положение относительно корпуса.

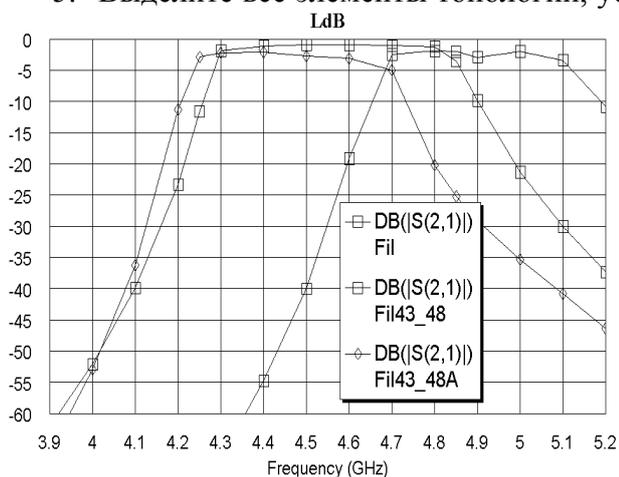


Рис. 3.101

Сначала щёлкните правой кнопкой мышки по имени структуры **Fil43_48** в левом окне проекта и удалите эту структуру, выбрав **Delete EM Structure**. Создайте копию структуры **Fil43_48A**, как описано в п.1 и переименуйте её в **Fil43_48**.

8. Установите курсор левее и выше первого резонатора, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор правее и ниже третьего резонатора, чтобы выделить эти резонаторы. Или нажмите клавишу **Shift** и щёлкните мышкой по этим резонаторам. Установите курсор на один из этих резонаторов, нажмите левую кнопку мышки и переместите и переместите три резонатора на 0.1 вправо. Аналогично выделите два первых резонатора и сдвиньте их на 0.1 вправо. Аналогично сдвиньте на 0.1 сначала три последних резонатора и затем два последних влево. Дважды щёлкните по входному проводнику, установите курсор на ромбик посередине правой стороны этого проводника и сдвиньте её

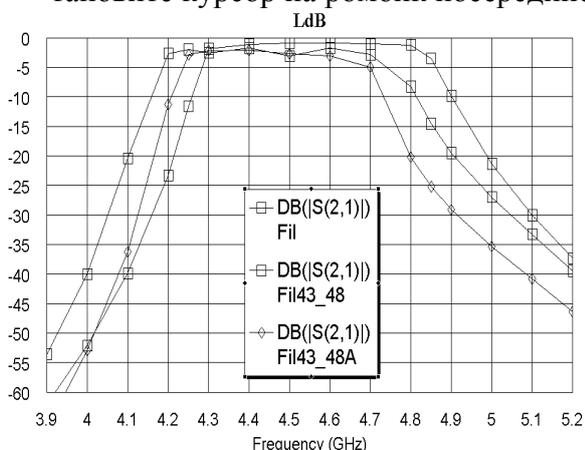


Рис. 3.102

вправо на 0.2 до соединения с первым резонатором. Аналогично удлините выходной проводник до его соединения с последним резонатором.

9. Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика показана на рис. 3.102.

10. Удалите предыдущую структуру **Fil43_48A**. Из графика видно, что теперь характеристику нужно сдвинуть вверх по частоте. Укоротим резонаторы, но попробуем это сделать, укоротив не длину шпилек, а их ширину. Создайте копию структуры **Fil43_48** и переименуйте её в **Fil43_48A**. Дважды щёлкните по четвёртому резонатору и сдвиньте обе стороны левого проводника этого резонатора на 0.2 мм вправо и затем сдвиньте обе стороны правого проводника на 0.2 мм влево так, чтобы расстояние между этими проводниками было равно 1.2 мм. Выделите три первых резонатора и сдвиньте их на 0.2 мм вправо, чтобы сохранить величину зазора. Дважды щёлкните по третьему резонатору и сдвиньте обе стороны левого проводника вправо на 0.35 мм так, чтобы расстояние между проводниками было равно 1.2 мм. Выделите два первых резонатора и сдвиньте их на 0.35 мм вправо. Дважды щёлкните по второму резонатору и сдвиньте обе стороны левого проводника вправо на 0.35 мм так, чтобы расстояние между проводниками было равно 1.2 мм. Выделите первый резонатор и сдвиньте его на 0.35 мм вправо. Дважды щёлкните по первому резонатору и сдвиньте обе стороны его левого проводника влево на 0.4 мм так, чтобы расстояние между проводниками было равно 1.2 мм. Дважды щёлкните по входному проводнику и сдвиньте его правую сторону до соединения с первым резонатором. Аналогично отредактируйте

правую часть топологии так, чтобы она была симметрична левой. Также сделаем ширину горизонтальных проводников в шпильках равной ширине вертикальных проводников (0.6 мм). Дважды щёлкните по второму резонатору и сдвиньте верхнюю сторону горизонтального проводника на 0.1 мм вверх. Дважды щёлкните по третьему резонатору и сдвиньте нижнюю сторону горизонтального проводника на 0.1 мм вниз. Аналогично отредактируйте все резонаторы кроме первого и последнего. Откройте окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика показана на рис. 3.103. Удалите предыдущую структуру **Fil43_48**. Теперь можно перейти к дальнейшему редактированию структуры по графику **KstU** (рис. 3.104). Характеристика имеет широкую полосу пропускания и хорошее согласование в полосе пропускания.

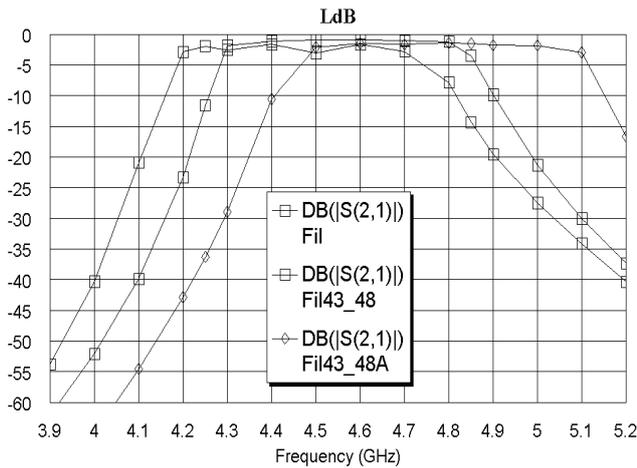


Рис. 3.103

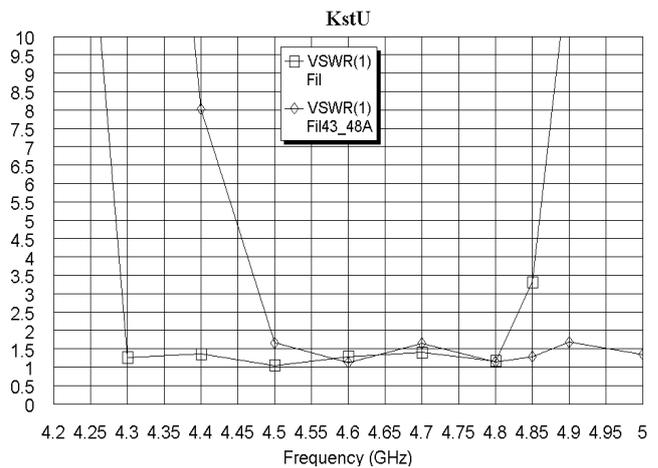


Рис. 3.104

Очевидно, на следующем шаге нужно увеличить величину зазоров, чтобы уменьшить ширину полосы пропускания. Выполняя дальнейший подбор размеров топологии, можно получить топологию с размерами, указанные на рис. 3.105. Графики ослабления и КСВн показаны соответственно на рис. 3.106 и 3.107.

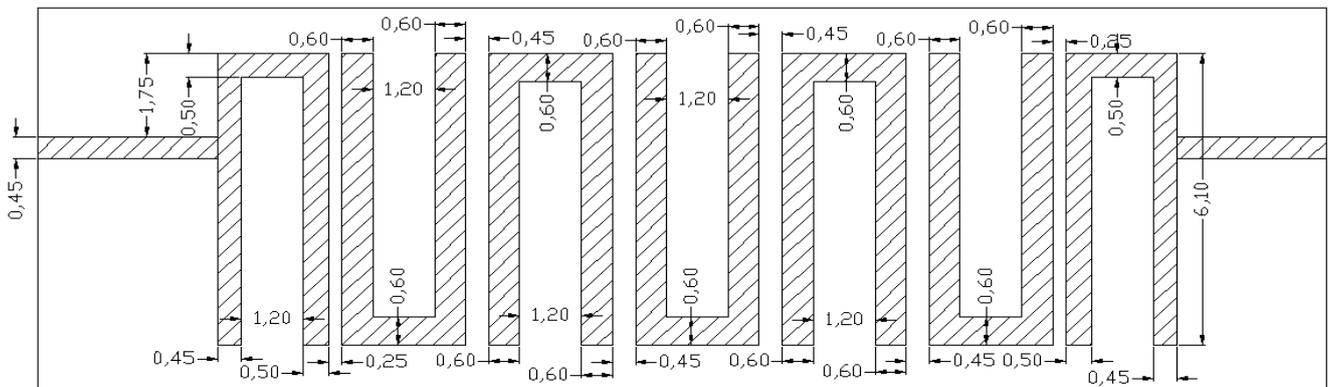


Рис. 3.105

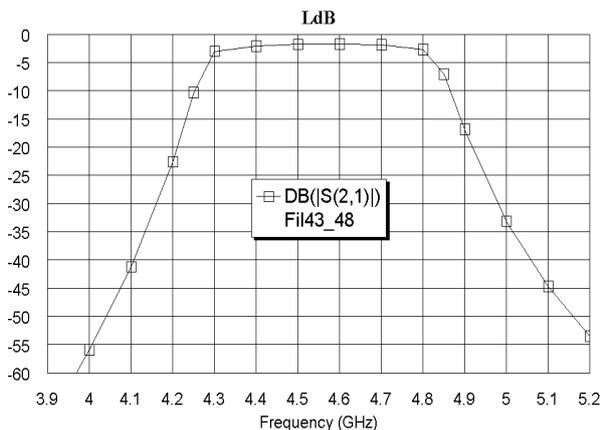


Рис. 3.106

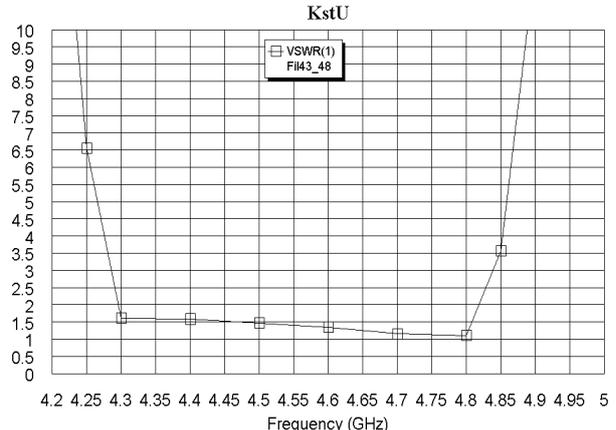


Рис. 3.107

Характеристика удовлетворяет требованиям в полосе пропускания, но, вероятно, не будет удовлетворять требованиям на верхней частоте полосы запираения из-за её близости ко второй полосе пропускания фильтра. Чтобы проверить это, добавьте в проект частоты полосы заграждения. Удалите из проекта уже не нужную схему **Fil**. Дважды щёлкните по **Project Options**, на вкладке **Frequencies** отметьте **Add**, в поле **Start(GHz)** введите **5.4**, в поле **Stop** введите **7.4**, в поле **Step** введите **0.2**, нажмите **Apply** и **OK**. Чтобы иметь возможность точнее наблюдать изменения характеристики в полосе пропускания, сохраним имеющийся график ослабления с фиксированными свойствами, а для более широкого диапазона создадим новый график. Щёлкните по значку **New Graph** и создайте график с именем **LdBZ**. Щёлкните по

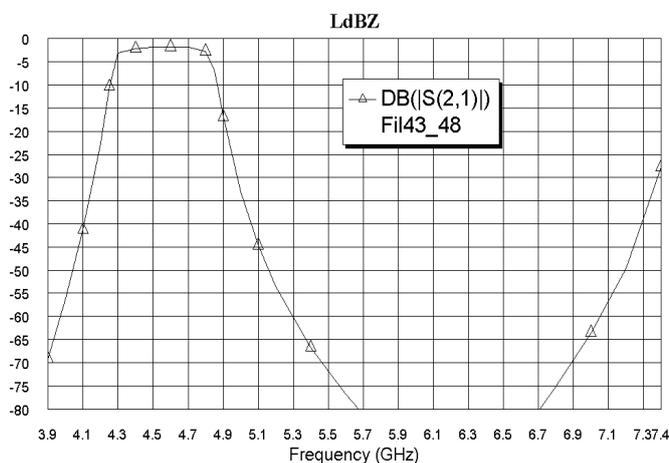


Рис. 3.108

имени этого графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В области **Meas. Type** отметьте **Port Parameters** в подгруппе **Linear**, в области **Measurement** отметьте **S**, в поле **To Port Index** введите **2**, в поле **From Port Index** введите **1**, отметьте **dB**, нажмите **Apply** и **OK**. Щёлкните по значку **Analyze**. Щёлкните по графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. Для оси **x** снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** введите **0.2**. Для оси **Left 1** снимите “галочку” в **Auto limits** и **Auto divs**, в поле **Min** введите **-80**, в поле **Max** введите **0**, в поле **Step** введите **5**. На вкладке **Fonts** нажмите кнопку **Axis number**, в

области **Размер** введите размер шрифта **14**, нажмите **OK** и затем нажмите **Apply** и **OK**. Полученный график показан на рис. 3.108. Чтобы увеличить ослабление на правом краю диапазона заграждения, добавим к топологии заграждающий фильтр на этот участок диапазона.

3.4.7. Моделирование заграждающего фильтра.

В качестве заграждающего фильтра используем два четвертьволновых разомкнутых шлейфа на расстоянии четверти волны. С помощью **TXLine** (команда меню **Tools>TXLine**) определим, что четверть волны на частоте 7.4 ГГц равна примерно 3.8 мм.

1. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру с именем **FZ**. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. На вкладке **Enclosure** открывшегося окна в поле **X-Dimension (mm)** введите **11**, в поле **X-Divisions** введите **220**, в поле **Y-Dimension (mm)** введите **8**, в поле **Y-Divisions** введите **160**. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6**, для слоя **2** введите толщину **0.5**, диэлектрическую проницаемость **10.3**, тангенс потерь **0.0001** и масштаб отображения **4**, нажмите **OK**.
2. Щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов, поместите курсор на левый край созданной электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В поле **x** введите **0** и в поле **y** введите **3.8**, нажмите **OK**. Снова нажмите клавишу **Tab**. В поле **dx** введите **11** и в поле **dy** введите **0.45**, нажмите **OK**.
3. Чтобы не увеличивать ширину платы, шлейфы свернём. Щёлкните по значку **Polygon Conductor** на панели инструментов, переместите курсор в окно электромагнитной структуры, щёлкните левой кнопкой мышки, затем перемещайте курсор, щёлкая мышкой, следующим образом: вниз на 1.45, вправо на 3.15, вверх на 0.45, влево на 2.7, вверх на 1 и здесь дважды щёлкните мышкой. Подключите созданный шлейф к нижней стороне входного проводника на расстоянии 3 мм от входа структуры. Щёлкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов, два раза щёлкните правой кнопкой мышки, чтобы развернуть скопированный шлейф и подключите его к верхней стороне входного проводника на расстоянии 3.8 мм от первого шлейфа. Щёлкните по входному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов, установите порт на входе фильтра и сдвиньте референсную плоскость порта на

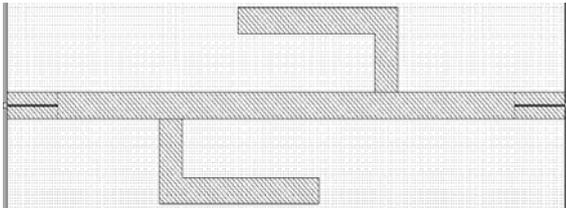


Рис. 3.109

1 мм вправо. Аналогично установите порт на выходе фильтра. Должна получиться топология, показанная на рис. 3.109. Выделите все элементы топологии, щёлкните по любому элементу правой кнопкой мышки, выберите **Mesh/Material Properties** и выберите материал **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.

4. Сделайте активным окно графика **LdBZ** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График ослабления показан на рис. 3.110. Сделайте активным окно графика **KstU** (рис. 3.111). Характеристику заграждающего фильтра можно считать приемлемой, но можно и несколько улучшить согласование в полосе пропускания.

4. Сделайте активным окно графика **LdBZ** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График ослабления показан на рис. 3.110. Сделайте активным окно графика **KstU** (рис. 3.111). Характеристику заграждающего фильтра можно считать приемлемой, но можно и несколько улучшить согласование в полосе пропускания.

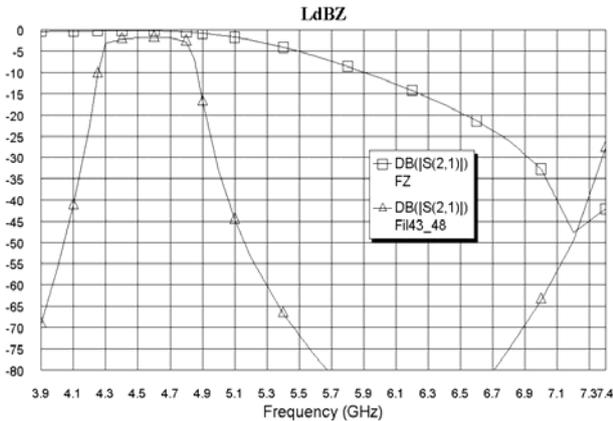


Рис. 3.110

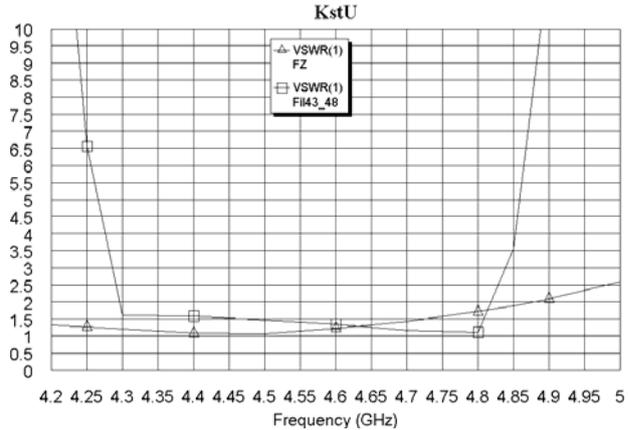


Рис. 3.111

5. Откройте окно электромагнитной структуры **FZ**. Установите курсор на верхний шлейф, нажмите левую кнопку мышки и переместите этот шлейф влево на 0.2, уменьшив расстояние между шлейфами до 3.6 мм. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Графики ослабления и КСВн показаны соответственно на рис. 3.112 и 3.113.

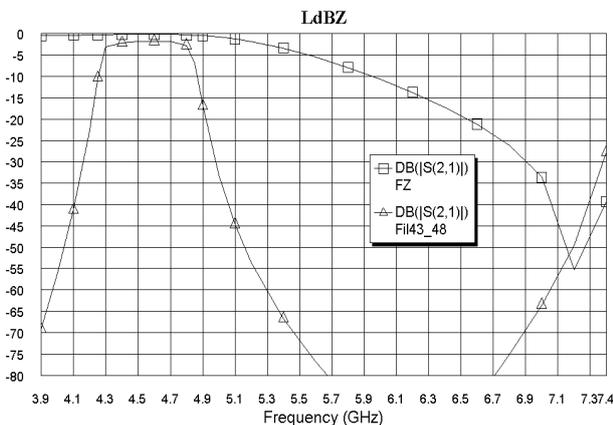


Рис. 3.112

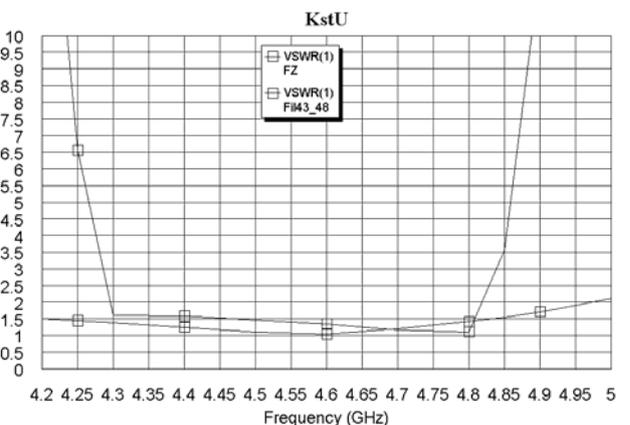


Рис. 3.113

3.4.8. Создание и редактирование структуры фильтра с заграждением.

1. Установите курсор на имя полосового фильтра **Fil43_48** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures** и переименуйте созданную копию структуры в **Fil43_48Z**.
2. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов, на вкладке **Enclosure** открывшегося окна в поле **X-Dimension (mm)** введите **30**, в поле **X-Divisions** введите **600**, нажмите **OK**.
3. Щёлкните по значку **View All** на панели инструментов, чтобы отобразить всю структуру. Щёлкните по значку **View Area** на панели инструментов и выделите правую часть

структуры, чтобы её увеличить. Дважды щёлкните по выходному проводнику, установите курсор на ромбик посередине правой стороны этого проводника, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эту сторону вправо до правого края корпуса.

4. Сделайте активным окно структуры **FZ**. Нажмите клавишу **Shift** и щёлкните поочередно по заграждающим шлейфам, чтобы выделить их. Щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
5. Сделайте активным окно структуры **Fil43_48Z**, щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и установите скопированные шлейфы на расстоянии 1 мм от последнего резонатора полосового фильтра. Структура должна выглядеть, как показано на рис. 3.114.

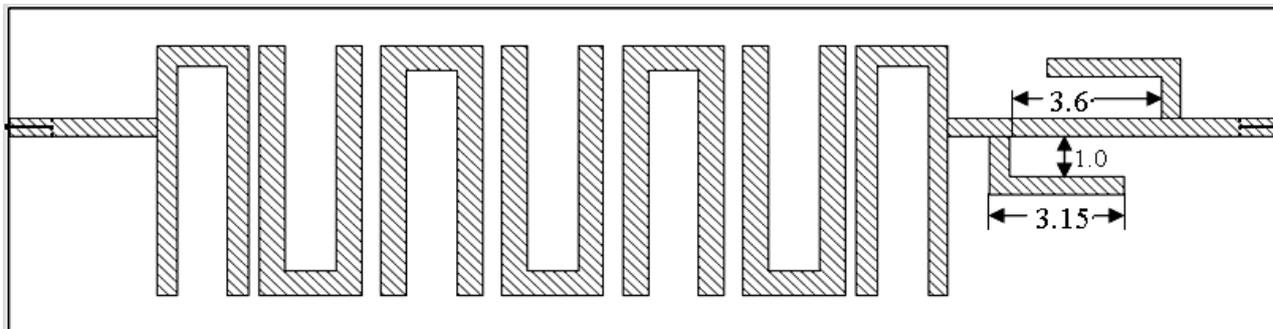


Рис. 3.114

6. Сделайте активным окно графика **LdBZ** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График (рис. 3.115) показывает хорошее совпадение характеристики с заданными требованиями. На рис. 3.116 показан график расчётной характеристики вносимого ослабления и измеренной характеристики макета.

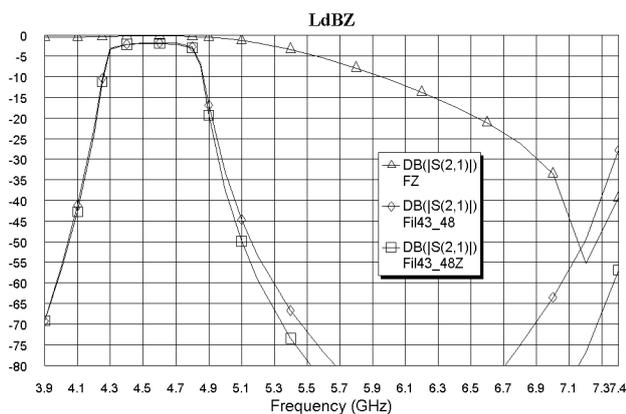


Рис. 3.115

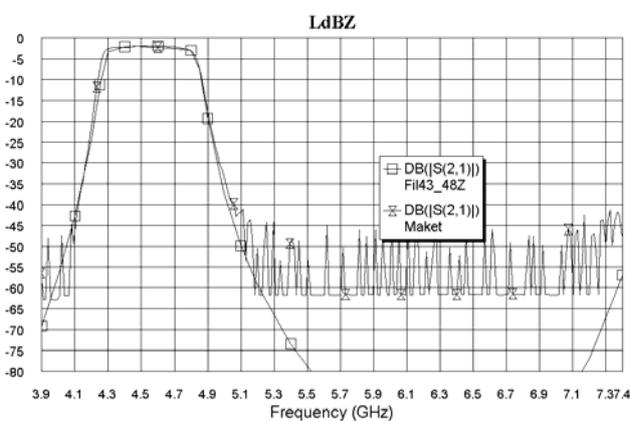


Рис. 3.116

3.5. Шпилечный фильтр с полосой пропускания 875 – 1125

МГц.

Требуется спроектировать 5-ти резонаторный фильтр с полосой пропускания от 875 до 1125 МГц. Фильтр должен иметь минимальные размеры и по возможности малую ширину платы.

Чтобы получить малые габариты платы, для подложки будем использовать материал с диэлектрической проницаемостью 100, толщину подложки возьмём равной 1 мм. Чтобы проводники не были слишком тонкими, выберем их ширину предварительно 0.5 мм. С помощью TXLine определим, что такая ширина проводников соответствует примерно 21.5 Ом, а длина половины длины волны равна примерно 19.2 мм. Для согласования с 50-омной линией выберем кондуктивную связь крайних резонаторов с входным и выходным проводниками и определим её параметры так, чтобы одновременно выполнялась и роль трансформатора сопротивлений. Чтобы удовлетворить требование малой ширины платы, свернём резонаторы в виде, показанном на рис 3.117. Создать схему такого фильтра довольно сложно. Кроме того, многие элементы схем при такой диэлектрической проницаемости или не работают, или не

гарантируют результаты анализа. Поэтому сразу приступим к созданию электромагнитной структуры.

3.5.1. Создание электромагнитной структуры.

Создадим топологию свёрнутого резонатора из отрезка линии шириной 0.5 мм как показано на рис. 3.117 так, чтобы его полная длина была равна примерно 19.2 мм. Ширина резонатора получилась 4.4 мм. Величину зазора предварительно выберем равной 0.2 мм, длину входных и выходных проводников выберем равной 3 мм. При этих размерах длина платы для 5-ти резонаторного фильтра получается равной 28.8 мм. Ширину платы выберем равной 7 мм.

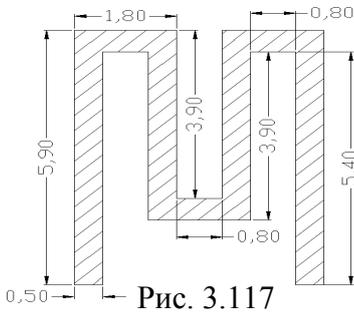


Рис. 3.117

1. Создайте новый проект и сохраните его с именем **F875-1125**.
2. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру с именем **F875_1125**.
3. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов.

На вкладке **Enclosure** отрывшегося окна в поле **X-Dimension (mm)** введите

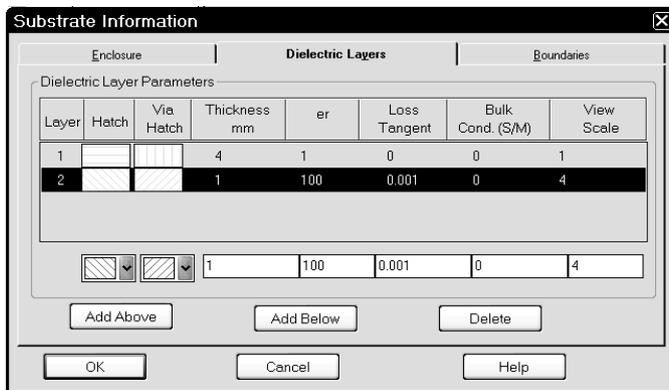


Рис. 3.118

28.8, в поле **X-Divisions** введите **576** (размер сетки по оси X будет 0.05 мм), в поле **Y-Dimension (mm)** введите **7**, в поле **Y-Divisions** введите **70** (размер сетки по оси Y будет 0.1 мм). На вкладке **Dielectric Layer** для слоя **1** введите толщину слоя **4**. Для слоя **2** введите толщину слоя **1**, диэлектрическую проницаемость **100**, тангенс потерь **0.001** и масштаб отображения **4** (рис. 3.118). Нажмите **OK**.

4. Щёлкните по значку **Rectangle**

Conductor, переместите курсор в окно электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В поле **x** открывшегося окна введите **0**, а в поле **y** введите **3.2**, нажмите **OK** и снова клавишу **Tab**. В поле **dx** открывшегося окна введите **3**, а в поле **dy** введите **0.5**, нажмите **OK**.

5. Щёлкните по значку **Polygon Conductor**, поместите курсор на свободном месте внизу

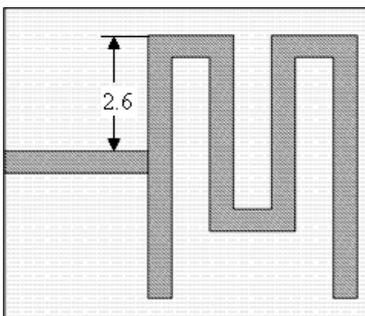


Рис. 3.119

и щёлкните мышкой. Затем перемещайте курсор, щёлкая мышкой после каждого перемещения, на 5.9 вверх, на 1.8 вправо, на 3.9 вниз, на 0.8 вправо, на 3.9 вверх, на 1.8 вправо, на 5.9 вниз, на 0.5 влево, на 5.4 вверх, на 0.8 влево, на 3.9 вниз, на 1.8 влево, на 3.9 вверх, на 0.8 влево, на 5.4 вниз и здесь дважды щёлкните мышкой. Поместите курсор на созданный резонатор, сдвиньте его так, чтобы расстояние от верхней границы корпуса до резонатора было 0.6 мм, и соедините резонатор со входным проводником. Созданная топология должна быть такой, как показано на рис. 3.119.

6. Щёлкните мышкой по резонатору и затем щёлкните по значкам **Copy** и **Paste** на панели инструментов. Переместите курсор в окно топологии, дважды щёлкните мышкой, чтобы развернуть резонатор, и поместите его рядом с первым резонатором на расстоянии 0.2 мм.
7. Снова щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и поместите скопированный резонатор рядом со вторым на расстоянии 0.2 мм.
8. Аналогично добавьте ещё два резонатора.

9. Щёлкните мышкой по входному проводнику, скопируйте его и подключите к последнему резонатору на таком же расстоянии от верха резонатора, как и входной проводник (2.6 мм).
10. Щёлкните мышкой по входному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов, установите порт на входе фильтра и, щёлкнув по порту мышкой, переместите его референсную плоскость вправо на 1 мм. Аналогично установите порт на выходе фильтра.
11. Выделите все элементы топологии, щёлкните правой кнопкой мышки по любому топологическому элементу и выберите **Mesh/Material Properties**. В поле **Select Material** открывшегося окна введите **1/2oz Cu**, нажмите **OK**. Должна получиться топология, показанная на рис. 3.120.

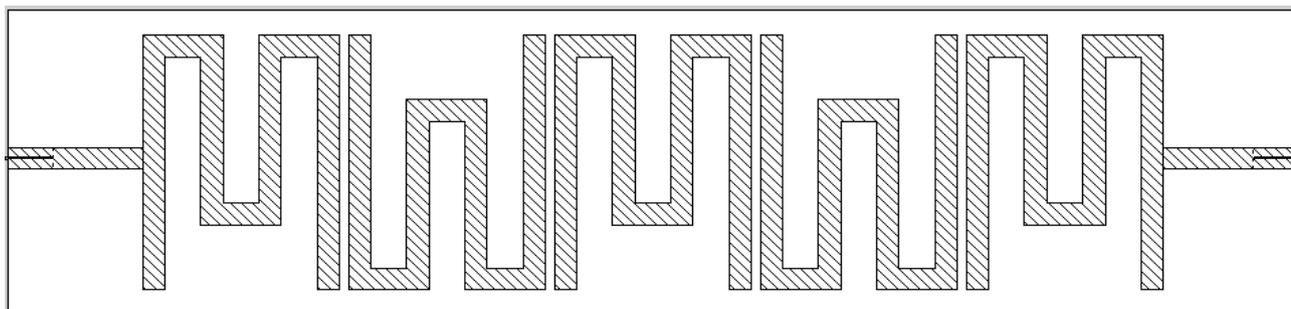


Рис. 3.120

3.5.2. Определение частот, создание графика и выполнение анализа.

1. Дважды щёлкните по **Project Options**, в открывшемся окне на вкладке **Frequencies** в поле **Start(GHz)** введите **0.6**, в поле **Stop(GHz)** введите **1.4** и в поле **Step(GHz)** введите **0.05**, нажмите **Apply** и **OK**.
2. Щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов и создайте график **LdB**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени созданного графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне отметьте **Port Parameters** и **S**, в поле **To Port Index** введите **2**, в поле **From Port Index** введите **1**, установите “галочку” в **dB**, нажмите **Apply** и **OK**.

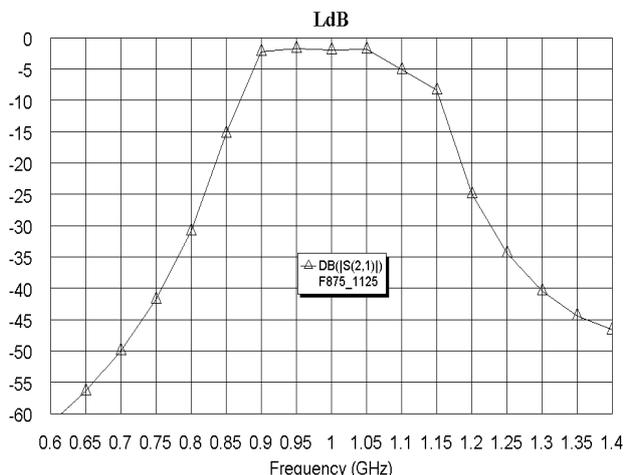


Рис. 3.121

3. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой по графику и выберите **Properties**. Для оси x снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**, в поле **Min** введите **0.6**, в поле **Max** введите **1.4** и в поле **Step** введите **0.05**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **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**. График характеристики ослабления показан на рис. 3.121.

4. Характеристика получилась довольно близкой к требуемой. Перейдём к графику коэффициента стоячей волны. Щёлкните по значку **New Graph** и создайте график с именем **KstU**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени этого графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне отметьте **Linear** и **VSWR**, в поле **Port Index** введите **1**, снимите “галочку” в **dB**, нажмите **Apply** и **OK**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой по графику и выберите **Properties**. Для оси x снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**, в поле **Min** введите **0.8**, в поле **Max** введите **1.2** и в поле **Step** введите **0.05**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**,

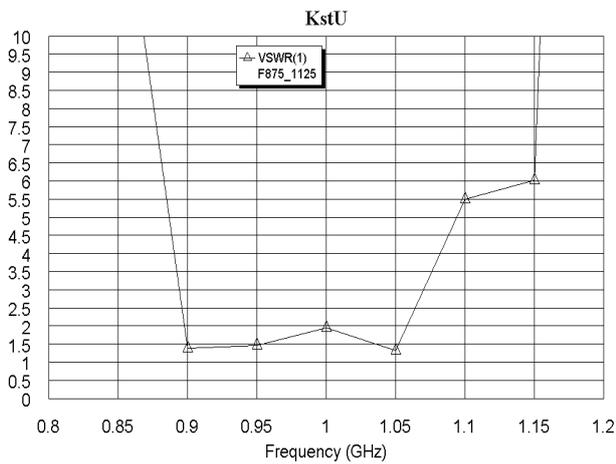


Рис. 3.122

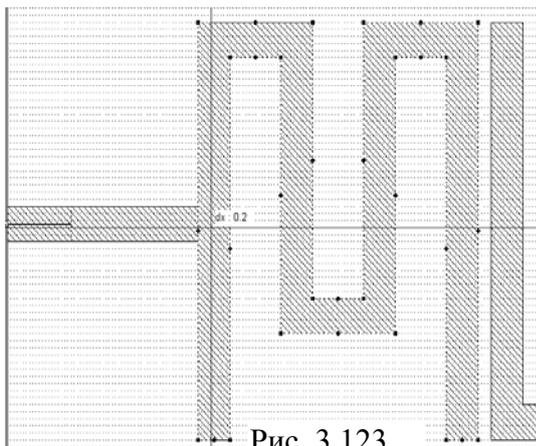


Рис. 3.123

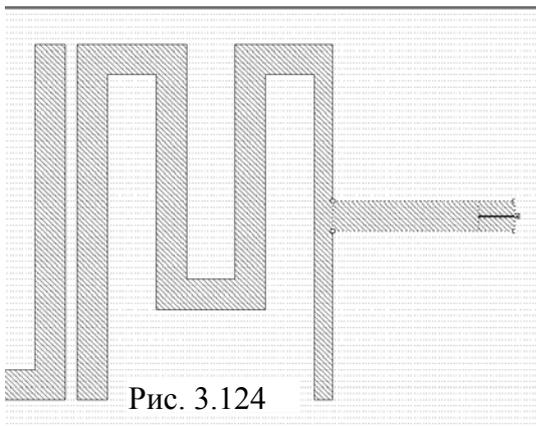


Рис. 3.124

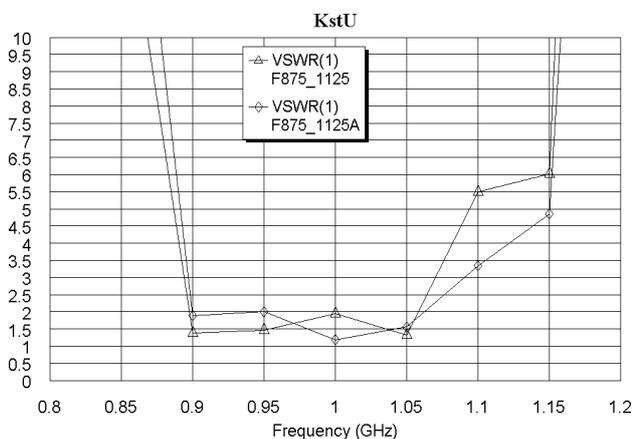


Рис. 3.125

ментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.125.

в поле **Min** введите **0**, в поле **Max** введите **10** и в поле **Step** введите **0,5**. Нажмите **Apply** и **OK**. График КСВн показан на рис. 3.122.

- Изменим параметры элементов кондуктивной связи. Установите курсор на имя электромагнитной структуры **F875-1125** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**. Переименуйте копию структуры в **F875-1125A**. Дважды щёлкните по первому резонатору, установите курсор на ромбик посередине левой стороны левого проводника первого резонатора, нажмите левую кнопку мышки и переместите эту сторону на **0.2** вправо (рис. 3.123). Поскольку входной проводник является частью трансформатора сопротивлений, изменение его длины также будет влиять на характеристику. Мы пока оставим его длину без изменений. Чтобы соединить входной проводник с первым резонатором, сделаем следующее. Установите курсор мышки левее и выше первого резонатора, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор правее и ниже правой стороны корпуса, чтобы выделить все элементы топологии, кроме входного проводника. Установите курсор на любой выделенный элемент топологии, нажмите левую кнопку мышки и переместите все выделенные проводники влево на 0.2 мм до соединения их с входным проводником. Дважды щёлкните по последнему резонатору, установите курсор на ромбик посередине правой стороны правого проводника последнего резонатора, нажмите левую кнопку мышки и переместите эту сторону на **0.2** влево. Установите курсор на выходной проводник, нажмите левую кнопку мышки и переместите этот проводник на 0.2 влево до соединения с последним резонатором (рис. 3.124). Чтобы выходной порт фильтра был расположен на правой стороне корпуса, уменьшим соответственно длину корпуса. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. На вкладке **Enclosure** отрывшегося окна в поле **X-Dimension (mm)** введите **28.4**, в поле **X-Divisions** введите **568**, нажмите **OK**. Сделайте активным окно графика **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инстру-

6. Удалите предыдущую структуру **F875_1125**, создайте копию оставшейся структуры **F875_1125A** и переименуйте копию в прежнее имя **F875_1125**. Нажмите

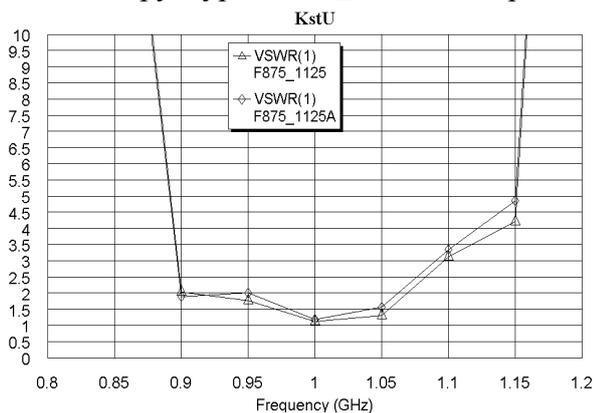


Рис. 3.126

скопированной структуре уменьшим зазоры между первым и вторым резонаторами, а также между последним и предпоследним. Остальные зазоры увеличим. Установите

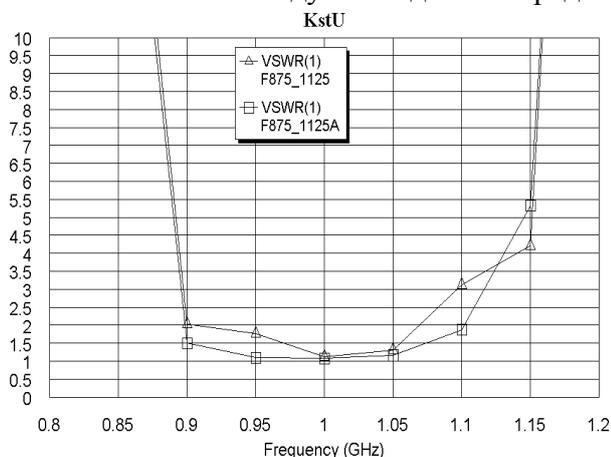


Рис. 3.127

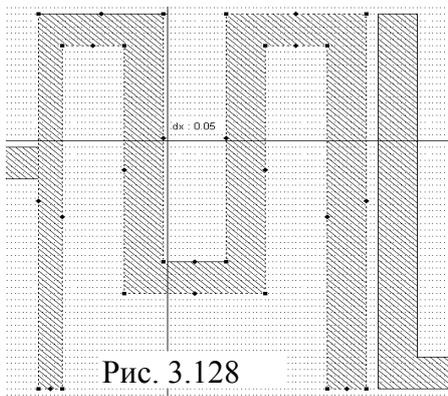


Рис. 3.128

курсор на первый резонатор, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте этот резонатор вправо на 0.05. Аналогично сдвиньте последний резонатор влево на 0.05. Нажмите клавишу **Shift** и щёлкните по первому и второму резонаторам, установите курсор на один из них, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эти резонаторы влево на 0.05. Аналогично сдвиньте предпоследний и последний резонаторы вправо на 0.05. Сделайте активным окно графика **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.127.

8. Уменьшим длину крайних резонаторов. Удалите предыдущую структуру **F875_1125**, создайте копию оставшейся структуры **F875_1125A** и переименуйте её в прежнее имя **F875_1125**. Дважды щёлкните по первому резонатору, установите курсор на ромб посередине правой стороны второго вертикального проводника первого резонатора и сдвиньте эту сторону на 0.05 вправо (рис. 3.128). Затем также сдвиньте левую сторону этого проводника. Аналогично сдвиньте обе стороны первого вертикального проводника этого резонатора вправо на 0.05. Таким же образом укоротите последний резонатор, сдвинув его последние вертикальные проводники влево на 0.05. Выделите все элементы топологии, кроме входного проводника, и сдвиньте их влево на 0.05, чтобы соединить с входным проводником. Щёлкните по выходному проводнику и сдвиньте его влево, чтобы соединить с последним резонатором. Щёлкните по значку **Substrate Information** и укоротите корпус, введя размер **28.3** по оси **X** и количество клеток сетки **566** по этой оси. Чтобы точнее отобразить характеристику в полосе пропускания, увеличим число частотных точек. Дважды щёлкните мышкой по **Project Options** в левом окне проекта. На вкладке **Frequencies** отметьте **Add**, в поле **Start(GHz)** введите **0.875**, в поле **Stop(GHz)** введите **1.125** и в поле **Step(GHz)** введите **0.05**, нажмите **Apply** и **OK**. Сделайте активным окно

клавишу **Shift** и щёлкните по входному и выходному проводникам, чтобы выделить их. Установите курсор на один из этих проводников и сдвиньте их на 0.5 вверх. Сделайте активным окно графика **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.126.

7. Удалите предыдущую структуру **F875_1125A**, создайте копию оставшейся структуры **F875_1125** и переименуйте её в прежнее имя **F875_1125A**. В скопированной структуре уменьшим зазоры между первым и вторым резонаторами, а также между последним и предпоследним. Остальные зазоры увеличим. Установите курсор на первый резонатор, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте этот резонатор вправо на 0.05. Аналогично сдвиньте последний резонатор влево на 0.05. Нажмите клавишу **Shift** и щёлкните по первому и второму резонаторам, установите курсор на один из них, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эти резонаторы влево на 0.05. Аналогично сдвиньте предпоследний и последний резонаторы вправо на 0.05. Сделайте активным окно графика **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на пане-

ли инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.127.

ли инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.127.

3. На вкладке **Proj** раскройте группу **Wizards** и дважды щёлкните по **Filter Synthesis Wizard**. В открывшемся окне нажмите кнопку **Далее**. В следующем окне отметьте **Bandpass** и нажмите кнопку **Далее**. Отметьте аппроксимацию **Chebyshev** и нажмите кнопку **Далее**. В следующем окне **Bandpass Parameter Specifications** (рис. 3.132) введите порядок фильтра **N=7**, нижнюю частоту полосы пропускания **FL=0.865**, верхнюю частоту полосы пропускания **FH=0.880**, пульсации в полосе пропускания **PV=0.5**, сопротивление источника **RS=50** и сопротивление нагрузки **RL=50**, нажмите **Далее**. Отметьте тип структуры фильтра **Intrdigital Resonators** (Встречноштыревые резонаторы)

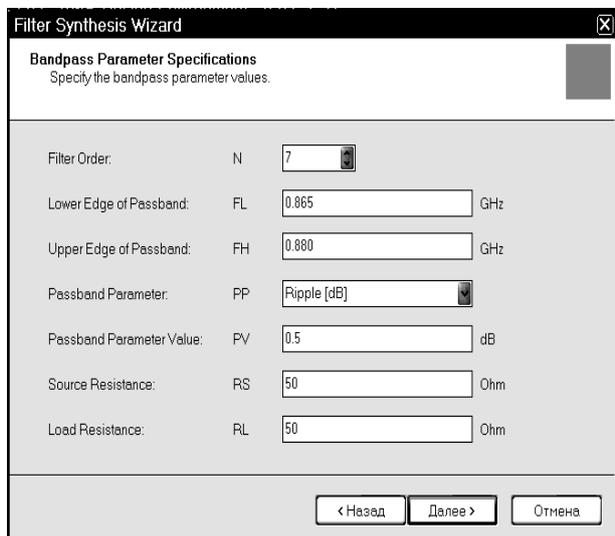


Рис. 3.132

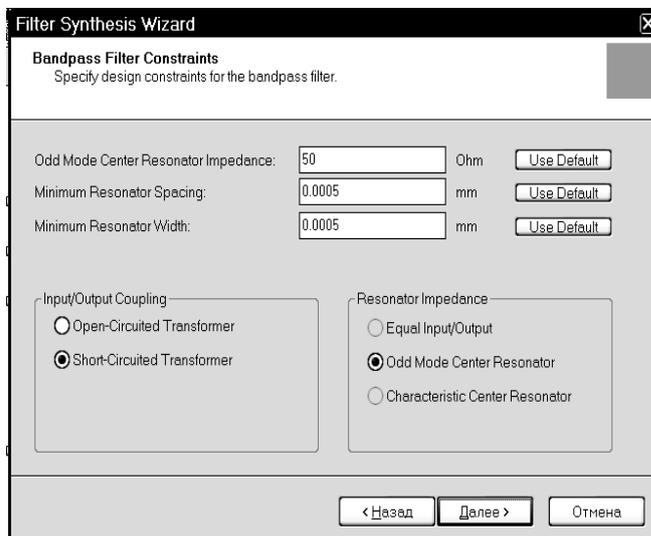


Рис. 3.133

и нажмите **Далее**. В следующем окне **Bandpass Filter Constraints** (рис. 3.133) отметьте **Odd Mode Center Resonator** (Нечётная мода центрального резонатора), введите импеданс нечётной моды **50**, отметьте **Short-Circuited Transformer** (Короткозамкнутый трансформатор), нажмите **Далее**. Выберите планарную физическую структуру **Microstrip** и нажмите **Далее**. В следующем окне **Microstrip Substrate Parameter Specifications** (рис. 3.134) в поля **Predefined Microstrip Substrate Selection** (Выбор predefined подложки микрополоски) и в **Microstrip Substrate Name** (Имя подложки микрополоски) оставьте по умолчанию **User Defined** (Определяется пользователем). Введите диэлектрическую проницаемость **Er=10.22**, тангенс потерь **Tand=0.0001**, толщину подложки **H=1**, толщину проводника **0.005**. В поле **Metal Selection** введите **Copper**

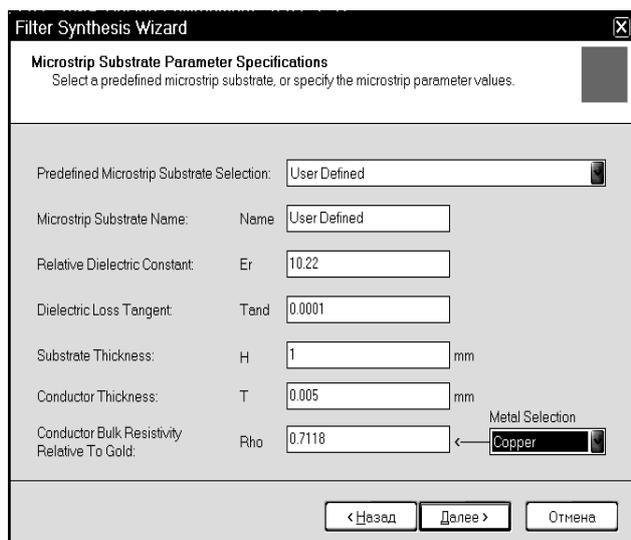


Рис. 3.134

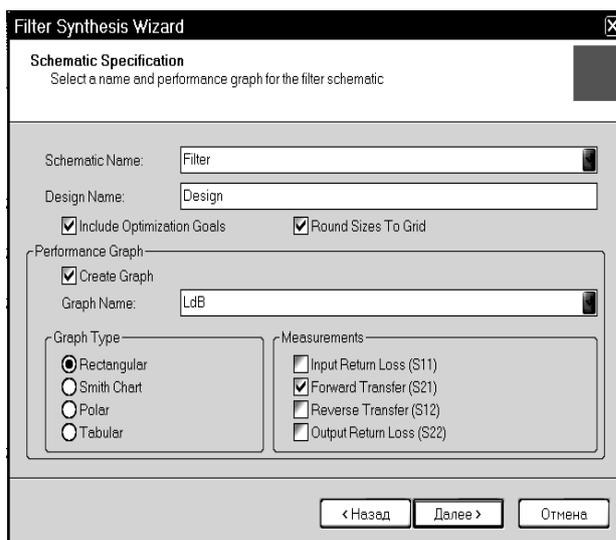


Рис. 3.135

(Медь, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля). Нажмите **Далее**. В следующем окне **Schematic Specification** (рис. 3.135) в поле **Schematic Name** введите **Filter**, в поле **Design Name** (Имя проекта) оставьте имя **Design** по умолчанию (это имя будет отобра-

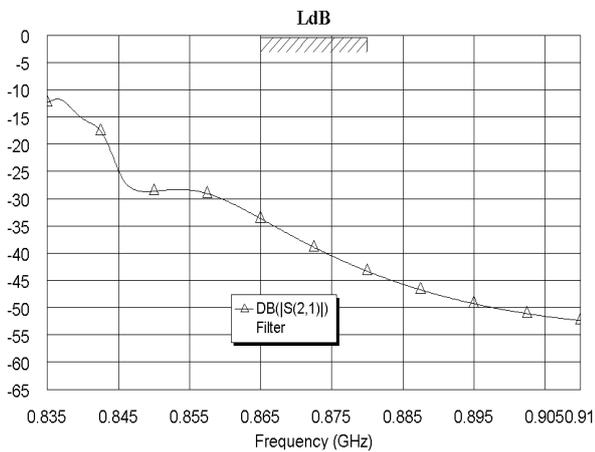


Рис. 3.136

в **Auto divs**, и в поле **Step** введите **0.01**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **Auto limits** и **Auto divs**, в поле **Min** введите **-65**, в поле **Max** введите **0**, в поле **Step** введите **5**. Нажмите **Apply** и **ОК**. График характеристики вносимого ослабления схемы фильтра, созданной мастером синтеза, показана на рис. 3.136.

3.6.2. Настройка схемы фильтра.

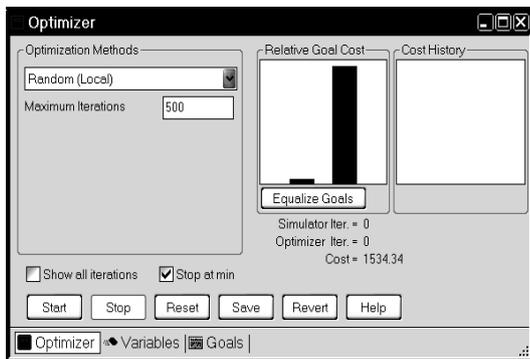


Рис. 3.137

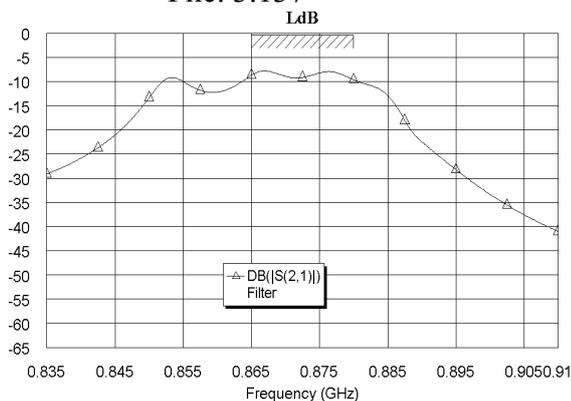


Рис. 3.138

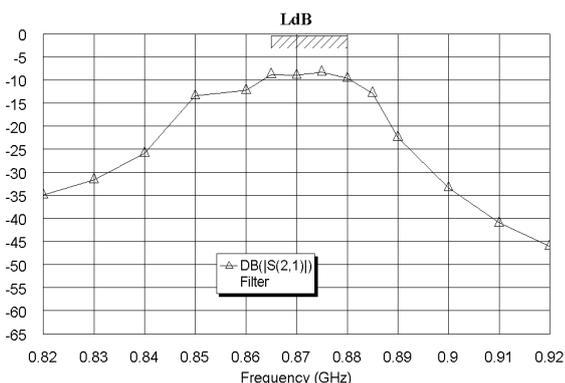


Рис. 3.139

жаться в группе **Filter Synthesis Wizard**), в поле **Graph Name** введите **LdB**. Отметьте **Include Optimization Goals** (Включить цели оптимизации), **Round Size To Grid** (Округлить до размера сетки), **Create Graph** (Создать график). В области **Graph Type** отметьте **Rectangular** и в области **Measurements** отметьте **Forward Transfer (S21)**. Нажмите **Далее**. В следующем окне нажмите **Готово**.

4. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой мышки по графику и выберите **Properties**. В открывшемся окне свойств графика на вкладке **Axes** для оси x снимите “галочку”

Характеристика синтезированного фильтра далека от желаемой, но мастер синтеза подготовил всё для проведения оптимизации и настройки. Сначала попробуем выполнить оптимизацию.

1. Выберите в меню команду **Simulate>Optimize**. В открывшемся окне (рис. 3.137) выберите метод оптимизации **Random(Local)**, в поле **Maximum Iterations** введите **500** и нажмите **Start**. Характеристика, полученная после оптимизации, показана рис. 3.138.

2. Для дальнейшего приближения к требуемой характеристике воспользуемся инструментом настройки схемы. Изменим установленный мастером диапазон частот. Дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне проекта и установите диапазон частот от **0,82** до **0,92** с шагом **0,01** ГГц. Чтобы отобразить характеристику в полосе пропускания точнее, добавьте частоты **0,865**, **0,875** и **0,885**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **Filter** в левом окне проекта и выберите **Options**. В открывшемся окне на вкладке **Frequencies** отметьте **Use project defaults**, чтобы при анализе схемы использовались частоты проекта. Нажмите **ОК**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.139. Сделайте активным окно схемы. В схеме, созданной мастером синтеза, добавлены переменные (рис. 3.140) так, что ширины средних резонаторов и зазоры между ними остаются одинаковыми

$L0=32.86$
 $S0=1.043$
 $S1=4.509$
 $W0=0.825$
 $W1=0.81$
 Рис. 3.140

при оптимизации и настройке. Возможно, это явилось одной из причин неудачи оптимизации. Добавим в схему следующие переменные: $W2=0.8$, $W3=0.8$, $W4=0.8$, $S2=4.5$ и $S3=4.5$. Дважды щёлкните по элементу **M9CLIN**. В открывшемся окне свойств этого элемента введите $W2=W1$, $W3=W2$, $W4=W3$, $W5=W4$, $W6=W3$, $W7=W2$, $W8=W1$, $S2=S1$, $S3=S2$, $S4=S3$, $S5=S3$, $S6=S2$ и $S7=S1$. Нажмите **OK**. Щёлкните по значку **Tune Tool** на

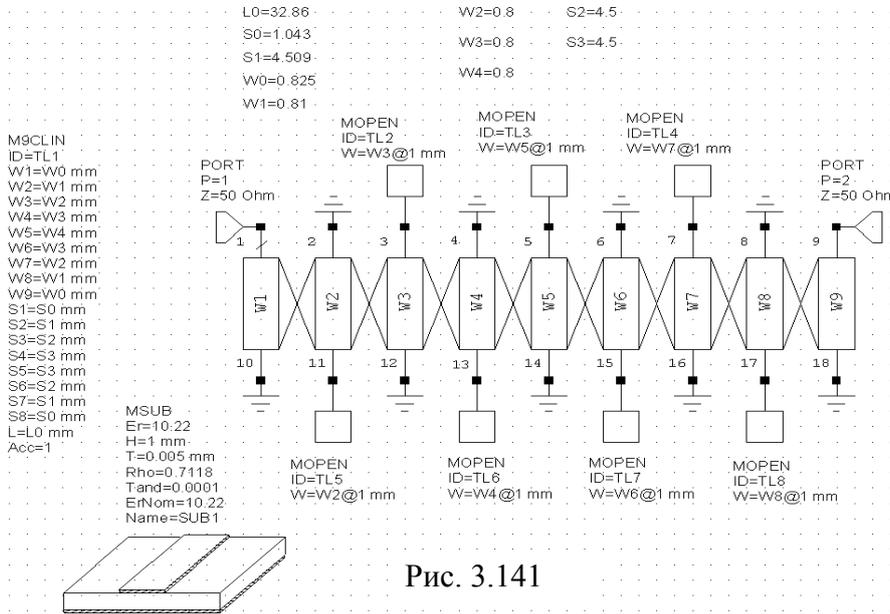


Рис. 3.141

панели инструментов и, щёлкая по вновь добавленным переменным, назначьте их для настройки. Отредактированная схема показана на рис. 3.141. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze**. Можно добавленные переменные назначить для оптимизации и попробовать повторить оптимизацию. Мы воспользуемся блоком настройки.

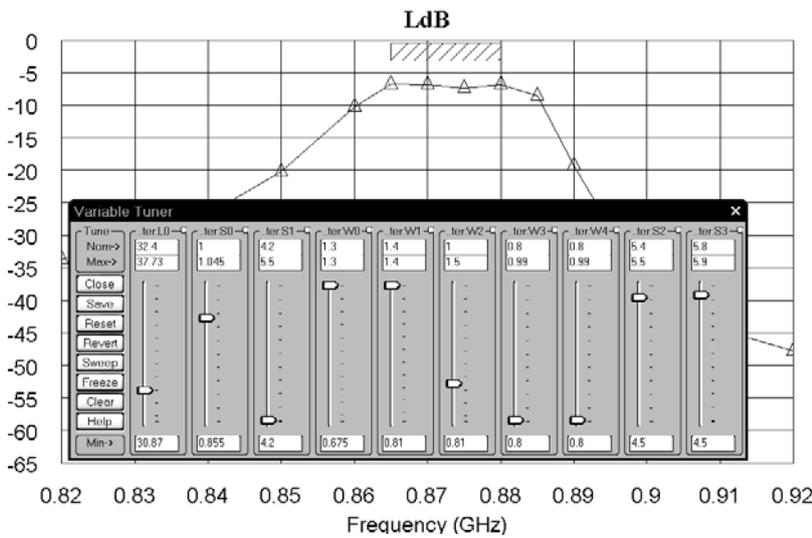


Рис. 3.142

3. Щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов. Двигая движки переменных на блоке настройки, добейтесь приемлемой характеристики (рис.3.142). В результате настройки переменные получили следующие значения: $L0=32.4$, $S0=1$, $S1=4.2$, $S2=5.4$, $S3=5.8$, $W0=1.3$, $W1=1.4$, $W2=1.0$, $W3=0.8$, и $W4=0.8$.

4. Сделайте активным окно схемы и щёлкните по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов, чтобы отобразить топологию схемы (рис.143).

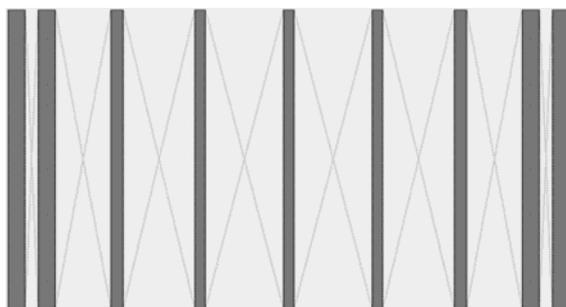


Рис. 3.143

Измерив расстояния между соответствующими крайними точками топологии с помощью инструмента **Measure**, получим размер топологии 42.6×32.4 .

3.6.3. Создание и редактирование электромагнитной структуры.

Электромагнитную структуру будем создавать в редакторе электромагнитной структуры. При этом вместо входного и выходного возбуждающих проводников будем использовать кондуктивную связь. Исходя из измеренных размеров топологии, возьмём корпус длиной 44 мм и шириной 34 мм.

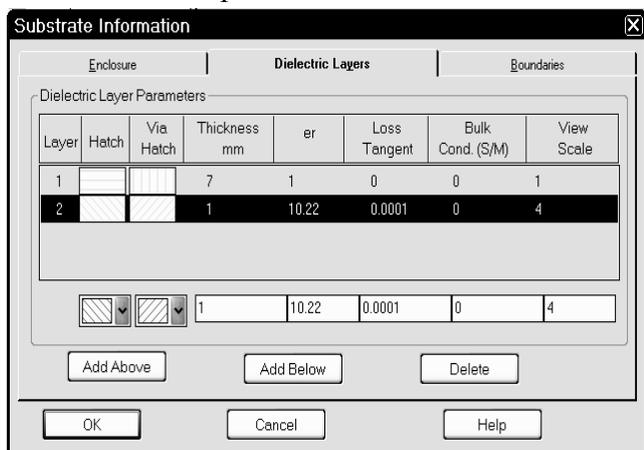


Рис. 3.144

- Щёлкните по значку **New TM Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру с именем **F865_880**.
- Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension(mm)** введите **44**, в поле **X-Divisions** введите **220** (по оси X размер клеток сетки 0.2), в поле **Y-Dimension(mm)** введите **34**, в поле **Y-Divisions** введите **340** (по оси Y размер клеток сетки 0.1). На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину слоя **7**; для слоя **2** введите толщину слоя **1**, диэлектрическую проницаемость **10.22**, тангенс потерь **0.0001**, масштаб просмотра **4** (рис 3.144), Нажмите **OK**.
- Щёлкните по значку **Polygon Conductor** на панели инструментов. Установите курсор на верхнюю сторону корпуса электромагнитной структуры вблизи левой стороны и щёлкните левой кнопкой мышки. Затем перемещайте курсор и щёлкайте мышкой после каждого перемещения следующим образом: вниз на 32.4, вправо на 1.4, вверх на 31.4, вправо на 10.6, вниз на 31.4. вправо на 0.8, вверх на 31.4, вправо на 12.4, вниз на 31.4, вправо на 0.8, вверх на 31.4, вправо на 10.6, вниз на 31.4, вправо на 1.4, вверх на 32.4 и здесь дважды щёлкните мышкой. Щёлкните по значку **Polygon Conductor** на панели инструментов. Установите курсор на нижнюю сторону корпуса электромагнитной структуры между первым и вторым стержнями и щёлкните левой кнопкой мышки. Затем перемещайте курсор и щёлкайте мышкой после каждого перемещения следующим образом: вверх на 32.4, вправо на 1.0, вниз на 31.4, вправо на 12.0, вверх на 31.4, вправо на 0.8, вниз на 31.4, вправо на 12.0, вверх на 31.4, вправо на 1.0, вниз на 32.4 и здесь дважды щёлкните мышкой. Установите курсор на любой штырь последней штыревой структуры и сдвиньте её по оси X так, чтобы зазор между первым и вторым штырями был равен 4.2 мм. Выберите в меню команду **Edit>Select All** и сдвиньте всю созданную топологию по оси X так, чтобы от левого края она была на расстоянии 3 мм.
- Т.к. фильтр узкополосный, то связь крайних резонаторов с входным и выходным проводниками должна быть достаточно слабой, т.е. эти проводники должны быть подключены ближе к заземлённым концам крайних резонаторов. Щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов. Переместите курсор на электромагнитную структуру и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне введите в поле **x** введите **0**, в поле **y** введите **4.5**, нажмите **OK** и снова клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **dx** введите **3**, в поле **dy** введите **1**, нажмите **OK**. Скопируйте созданный проводник и подключите созданную копию к последнему резонатору на расстоянии 4.5 мм от верхней границы корпуса. Выделите все элементы топологии, щёлкните правой кнопкой мышки по любому проводнику и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне в выпадающем списке **Selected Material** выберите **1/2oz Cu** и нажмите **OK**. Щёлкните по входному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов, установите порт на входе фильтра и сдвиньте его референсную плоскость на 1 мм вправо. Аналогично установите порт на выходе фильтра и сдвиньте его референсную плоскость на 1 мм влево.

5. Сделайте активным окно графика.

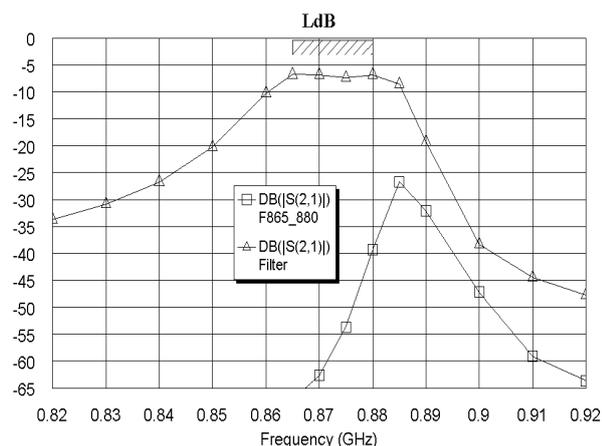


Рис. 3.145

графика ясно, что нужно увеличить связи между резонаторами, т.е. уменьшить зазоры между резонаторами.

6. Установите курсор на имя электромагнитной структуры в левом окне проекта и, нажав левую кнопку мышки, переместите курсор на группу **EM Structures**. Переименуйте созданную копию структуры в **F865_880A**. Дважды щёлкните по третьему резонатору. Установите курсор на ромбик посередине правой стороны этого резонатора и сдвиньте её вправо на 1 мм. Затем установите курсор на ромбик посередине левой стороны этого резонатора и сдвиньте его также вправо на 1 мм. Таким образом, мы уменьшили зазор между третьим и четвёртым резонаторами на 1 мм, сохранив ширину резонатора. Дважды щёлкните по второму резонатору и сдвиньте его вправо на 2 мм, уменьшив зазор между вторым и третьим резонаторами на 1 мм. Дважды щёлкните по первому резонатору и сдвиньте его вправо на 3 мм. Аналогично сдвиньте влево пятый резонатор на 1 мм, шестой резонатор на 2 мм и седьмой резонатор на 3 мм. Дважды щёлкните по входному проводнику, установите курсор на ромбик посередине правой стороны и сдвиньте эту сторону вправо до соединения с первым резонатором. Аналогично соедините выходной проводник с последним резонатором. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.146, характеристика приближается к требуемой.

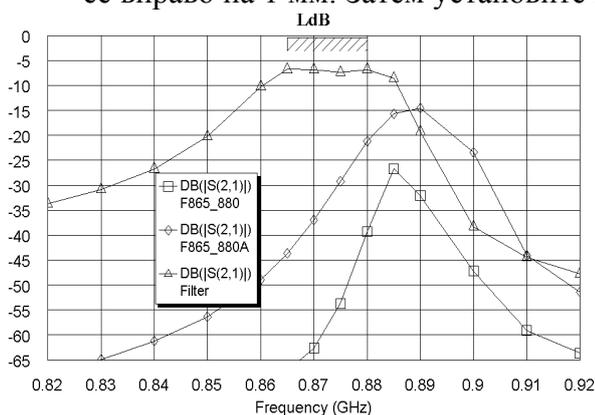


Рис. 3.146

курсор на ромбик посередине правой стороны и сдвиньте эту сторону вправо до соединения с первым резонатором. Аналогично соедините выходной проводник с последним резонатором. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.146, характеристика приближается к требуемой.

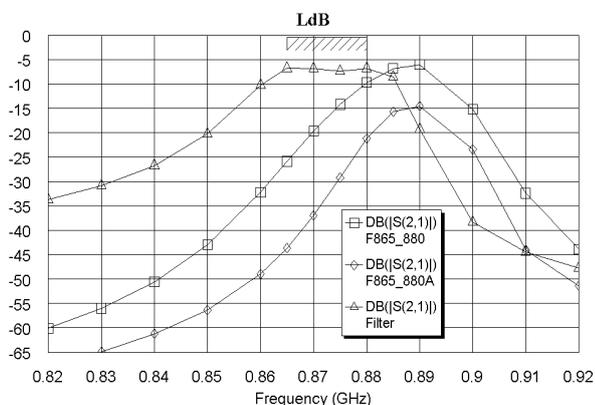


Рис. 3.147

крайними резонаторами. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.147.

Щёлкните по имени характеристики **Filter:DB(S(2,1))** в левом окне проекта и выберите **Properties**. В открывшемся окне в поле **Data Source Name** введите **All Sources**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.145. Полученная характеристика очень далека от характеристики, полученной для схемы в линейном моделировании. Видимо, это объясняется тем, что модель при слабых связях, которые требуются для узкополосных фильтров, имеет большую погрешность и, кроме того, схема не совсем точно отражает созданную электромагнитную структуру. Из

Аналогично сдвиньте влево пятый резонатор на 1 мм, шестой резонатор на 2 мм и седьмой резонатор на 3 мм. Дважды щёлкните по входному проводнику, установите курсор на ромбик посередине правой стороны и сдвиньте эту сторону вправо до соединения с первым резонатором. Аналогично соедините выходной проводник с последним резонатором. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.146, характеристика приближается к требуемой.

7. Удалите предыдущую структуру **F865_880**, создайте копию оставшейся структуры **F865_880A** и переименуйте её в прежнее имя **F865_880**. Сдвиньте вправо третий резонатор на 1 мм, второй на 1.8 мм и первый на 2.2 мм так, чтобы зазор между первым и вторым резонаторами был равен 2.8 мм, между вторым и третьим – 3.6 мм и между третьим и четвёртым – 3.8 мм. Аналогично сдвиньте влево пятый, шестой и седьмой резонаторы. Удлините входной и выходной проводники до соединения с

8. Изменим ширину резонаторов. Удалите предыдущую структуру **F865_880A**, создайте копию оставшейся структуры **F865_880** и переименуйте её в прежнее имя **F865_880A**. Дважды щёлкните по среднему (четвёртому) резонатору, установите курсор на ромбик

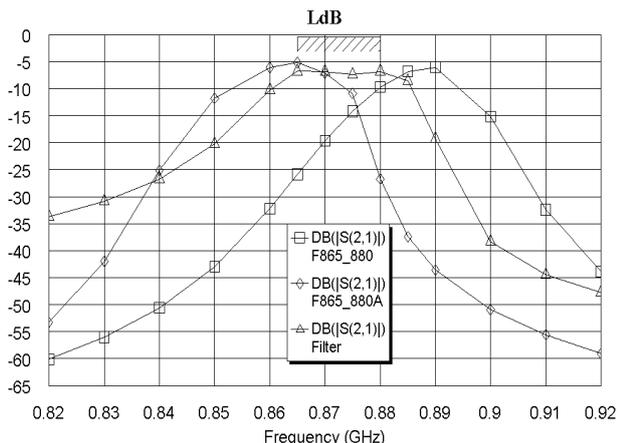


Рис. 3.148

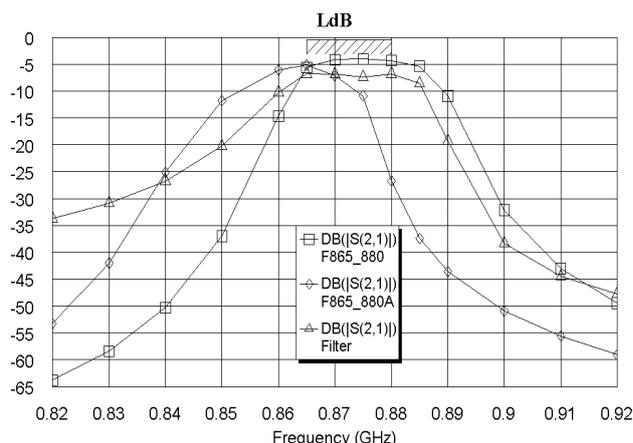


Рис. 3.149

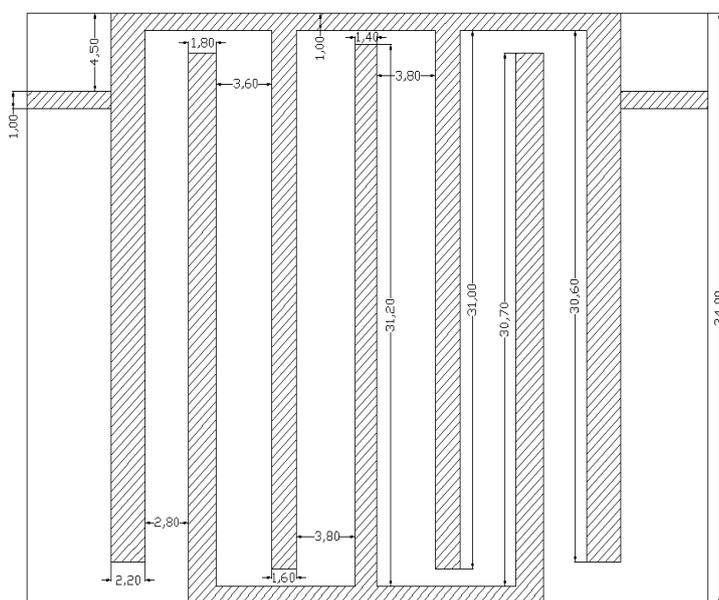


Рис. 3.150

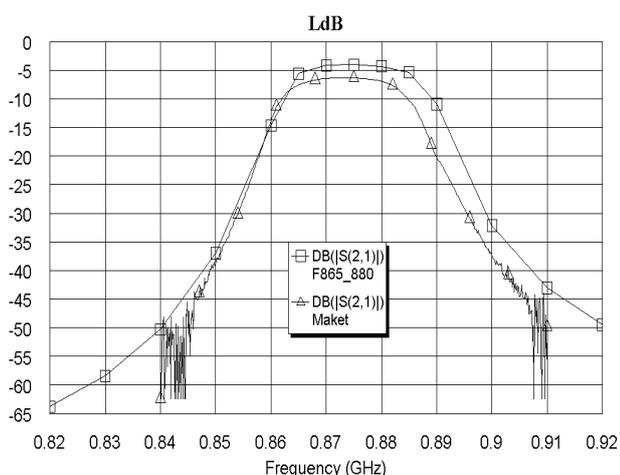


Рис. 3.151

ный и экспериментальный графики показаны на рис. 3.151.

Замечание. Поскольку фильтр узкополосный, при изготовлении шаблона макета все резонаторы фильтра были укорочены на 0.2 мм, чтобы иметь запас для настройки.

посередине левой стороны и сдвиньте её влево на 0.6 мм, чтобы ширина этого резонатора была равна 1.4 мм. Аналогично сделайте ширину третьего и пятого резонаторов равной 1.6 мм, второго и шестого – 1.8 мм, первого и седьмого – 2.2 мм. Теперь раздвиньте резонаторы так, чтобы зазоры между ними были равны установленным ранее. Соответственно измените длину входного и выходного проводников, чтобы восстановить соединение этих проводников с крайними резонаторами. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов.

График показан на рис. 3.148.

9. Удалите предыдущую структуру **F865_880**, создайте копию оставшейся структуры **F865_880A** и переименуйте её в прежнее имя **F865_880**. Укоротим длину резонаторов. Дважды щёлкая по резонаторам, укоротите первый и последний резонаторы на 0,8 мм, второй и шестой – на 0,7 мм, третий и пятый на 0,4 мм и четвёртый на 0,2 мм. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.149, его уже можно считать удовлетворительным. Смоделированная топология фильтра показана на рис. 3.150, а расчёт-

3.7. Встречноштыревой фильтр с полосой пропускания 925 – 960 МГц.

Спроектировать фильтр с полкой пропускания от 925 до 960 МГц. При отстройке от граничных частот на величину полосы пропускания ослабление должно быть не менее 40 дБ.

Этот фильтр по предъявляемым требованиям и по частоте близок к фильтру, описанному в разделе 3.6 и его можно моделировать точно так же, как описано в указанном разделе. Однако мы будем считать, что фильтр раздела 3.6 уже смоделирован и возьмём его в качестве первого приближения.

3.7.1 Редактирование смоделированной топологии.

1. Загрузите проект **F865-880**, выбрав в меню **File>Open Project**. Затем выберите в меню **File>Save Project As** и сохраните проект под именем **F925-960**.
2. Щёлкните правой кнопкой по имени электромагнитной структуры **F865_880** в левом окне проекта и переименуйте её в **F925_960**.
3. Дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне проекта. В открывшемся окне на вкладке **Frequencies** отметьте **Replace**, в поле **Start(GHz)** введите **0.9**, в поле **Stop(GHz)** введите **1**, в поле **Step(GHz)** введите **0.01**, нажмите **Apply** и **OK**.
4. Воспользовавшись инструментом **Tools>TXLine**, определим, что четверть длины волны в заданной полосе пропускания равна примерно 30.4 мм. Сделайте активным окно электромагнитной структуры. Щёлкнув мышкой по значку **Measure** и измерив длину резонаторов, определим, что их нужно укоротить примерно на 1 мм. Дважды щёлкнув

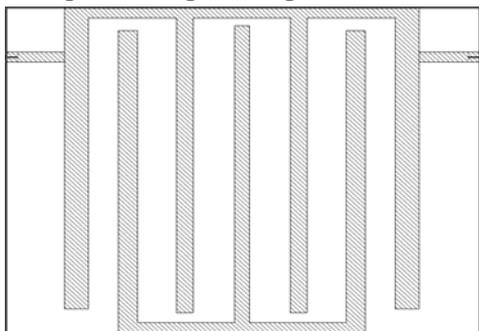


Рис.3.152

мышкой по резонаторам, укоротите все резонаторы на 1 мм. Установите курсор на нижний заземляющий проводник, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте этот проводник с подключёнными к нему резонаторами вверх на 1 мм. Щёлкните мышкой по значку **Substrate Information**. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **Y-Dimension (mm)** уменьшите размер на 1 мм (размер должен получиться **33**), в поле **Y-Divisions** соответственно введите **330**, нажмите **OK**. Должна получиться топология, показанная на рис. 3.152.

5. Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Из графика (рис. 3.153) видно, что резонаторы укорочены недостаточно.

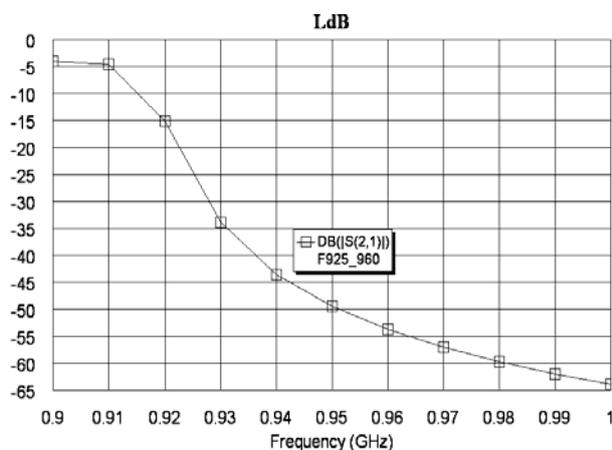


Рис.3.153

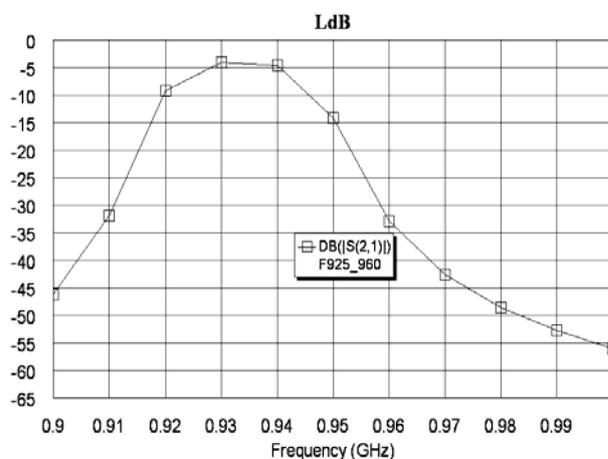


Рис.3.154

6. Сделайте активным окно электромагнитной структуры, укоротите все резонаторы ещё на 1 мм, сдвиньте нижний заземляющий проводник с резонаторами на 1 мм вверх. Затем уменьшите размер **Y-Dimension (mm)** тоже на 1 мм и соответственно измените количество клеток в поле **Y-Divisions**. Выполните анализ. Характеристика (рис. 3.154)

близка к заданной полосе пропускания, но её нужно расширить и сдвинуть вверх по частоте. Т.е. нужно уменьшить зазоры между резонаторами и укоротить резонаторы.

- Уменьшим все зазоры на 0.6 мм. Дважды щёлкните по третьему резонатору, установите курсор мышки на ромб посередине правой стороны, нажмите кнопку мышки и сдвиньте эту сторону вправо на 0.6 мм, затем также сдвиньте левую сторону этого резонатора, чтобы его ширина не изменилась. Дважды щёлкните по второму резонатору и сдвиньте его вправо на 1.2 мм. Аналогично сдвиньте первый резонатор вправо на 1,8

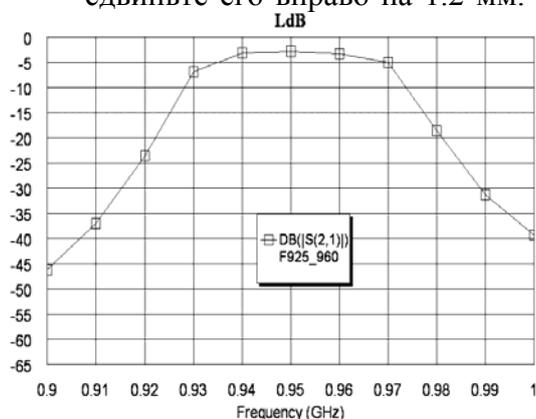


Рис.3.155

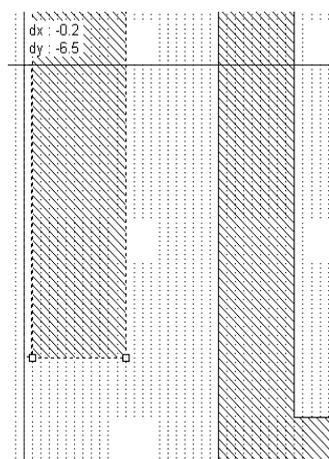


Рис.3.156

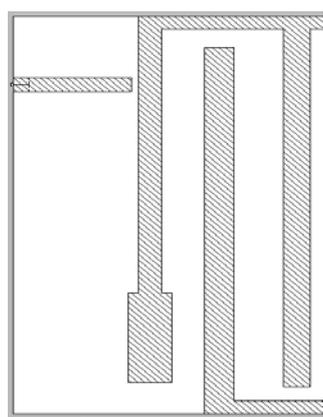


Рис.3.157

мышки и сдвиньте курсор вправо на 0.2 и вверх на 6.5. Дважды щёлкните мышкой по первому резонатору, установите курсор на ромб посередине левой стороны узкой части резонатора и сдвиньте эту сторону на 0.4 мм вправо. Аналогично сдвиньте влево на 0.4 мм правую сторону узкой части резонатора. Первый резонатор должен иметь вид, показанный на рис. 3.157. Его ширина в узкой части равна 1,4 мм, а в широкой части – 2.6 мм.

мм. Таким же образом сдвиньте влево последние три резонатора. Укоротите все резонаторы на 0.6 мм. Соедините входной и выходной проводники с крайними резонаторами. Сдвиньте нижний заземляющий проводник вместе с подключёнными к нему резонаторами на 0.6 мм вверх. Щёлкните мышкой по значку **Substrate Information** на панели инструментов и уменьшите размер **Dimension (mm)** тоже на 0.6 мм и соответственно измените количество клеток в поле **Y-Divisions**.

- Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученная характеристика (рис. 3.155) удовлетворяет поставленным требованиям и расположена несколько выше по частоте, что обеспечивает запас для настройки.

Габаритные размеры платы с топологией фильтра получают равными 44x31,4. С целью более эффективного использования стандартных подложек размером 48x60 потребуем, чтобы на одной подложке размещалась топология двух фильтров. При этом ширина электромагнитной структуры (т.е. размер по оси Y) должны быть несколько меньше 30 мм. Для выполнения этого требования резонаторы сделаем ступенчатыми.

- Установите курсор на имя электромагнитной структуры в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени полученной копии структуры и переименуйте её в **F925_960A**.
- Щёлкните мышкой по значку **Substrate Information** на панели инструментов. На вкладке **Enclosure** в поле **Y-Dimension (mm)** введите **29**, в поле **Y-Divisions** введите **290**, нажмите **OK**.
- Уменьшите длину всех резонаторов на 2.4 мм. Затем сдвиньте нижний заземляющий проводник вместе с подключёнными к нему резонаторами на 2,4 мм вверх.
- Щёлкните мышкой по первому резонатору, затем щёлкните по значку **Notch Conductor** на панели инструментов. Установите курсор на нижний левый угол резонатора, нажмите кнопку мышки и сдвиньте курсор влево на 0.2 и вверх на 6.5 (рис. 3.156). Снова щёлкните по значку **Notch Conductor**, установите курсор на нижний правый угол резонатора, нажмите кнопку

5. Аналогично отредактируйте все резонаторы и удлините входной и выходной проводники до соединения с крайними резонаторами.

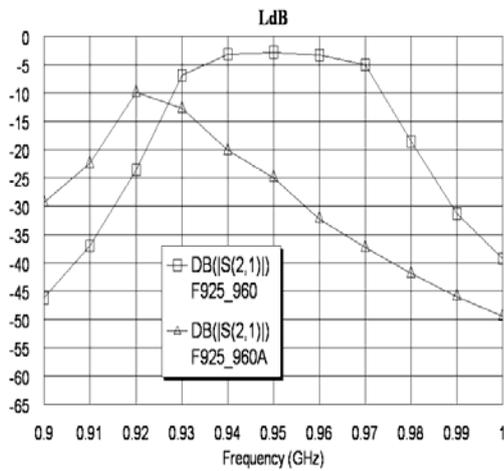


Рис.3.158

Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 3.158.

6. Из полученной характеристики видно, что её нужно сдвинуть вверх и расширить, т.е. нужно уменьшить зазоры между резонаторами и повысить резонансную частоту. Изменять резонансную частоту резонаторов можно, изменяя соотношение размеров между индуктивной и емкостной частями резонаторов. Путём подбора размеров топологии можно получить электромагнитную структуру, показанную на рис. 3.159. Характеристика этой структуры – на рис. 3.160.

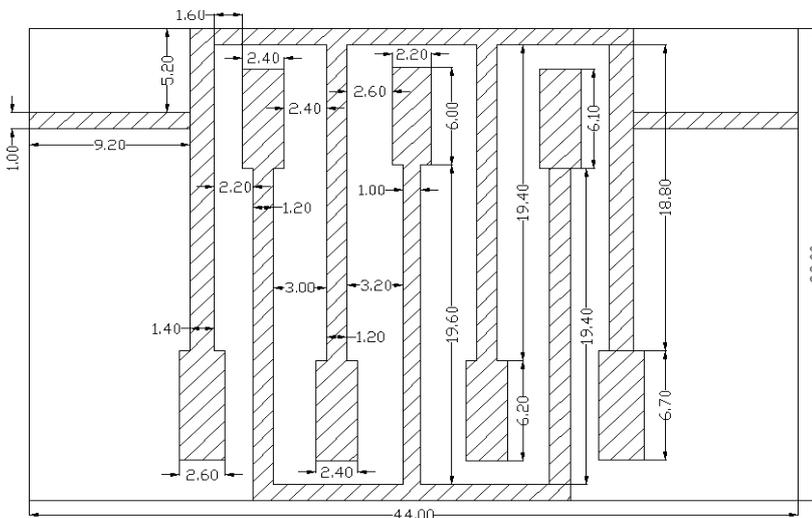


Рис.3.159

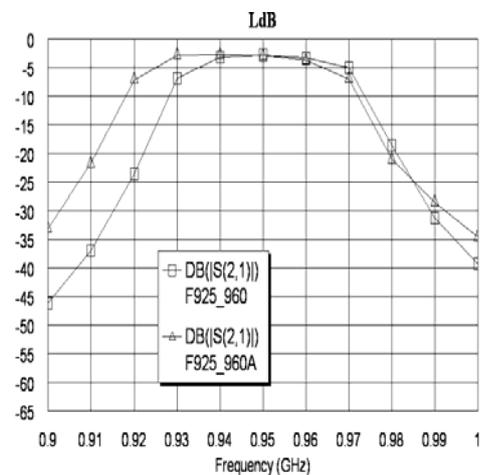


Рис.3.160

Она получилась шире требуемой. Сузить полосу можно, уменьшая зазоры между резонаторами. Или уменьшить расстояние до верхней крышки. В этом случае обычно в большей мере сдвигается вверх по частоте нижний скат характеристики, что и требуется в нашем случае. Откройте окно структуры **F925_960A**. Щёлкните мышкой по значку

Substrate Information на панели инструментов.

На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** измените толщину на 5 мм.

7. Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Полученный график показан на рис. 3.161.

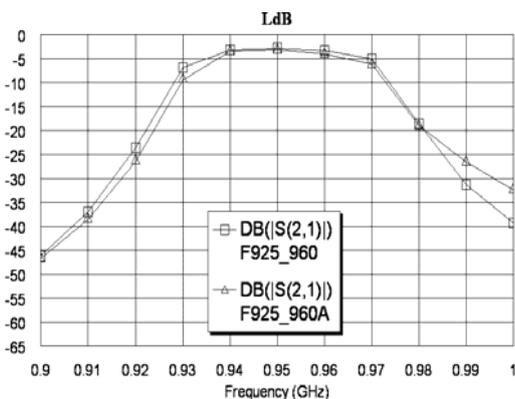


Рис.3.161

Характеристика удовлетворяет требованиям в полосе пропускания, но недостаточное ослабление на частотах заграждения. Поэтому добавим в электромагнитную структуру ещё два резонатора. Добавлять резонаторы нужно в центре структуры. Размеры добавляемых резонаторов и зазоры должны быть такими же, что имеет средний резонатор. Это не должно сильно повлиять на характеристику в полосе пропускания, хотя потери увеличатся. Затем размеры средних резонаторов можно подкорректировать, если потребуется.

Входной и выходной проводники нашей структуры имеют большие размеры. Их можно уменьшить и за счёт этого разместить топологию с добавленными резонаторами в том же корпусе или даже уменьшить его длину. Удалите структуру **F925_960** и переименуйте оставшуюся структуру **F925_960A** в **F925_960**.

1. Сделайте активным окно электромагнитной структуры. Дважды щёлкните по входному проводнику и укоротите его, сместив правую сторону влево так, чтобы длина входного проводника была равна 3 мм. Аналогично укоротите выходной резонатор. Выделите все резонаторы и сдвиньте их влево до соединения с входным проводником. Сдвиньте последние три резонатора вправо на 8.4 мм.

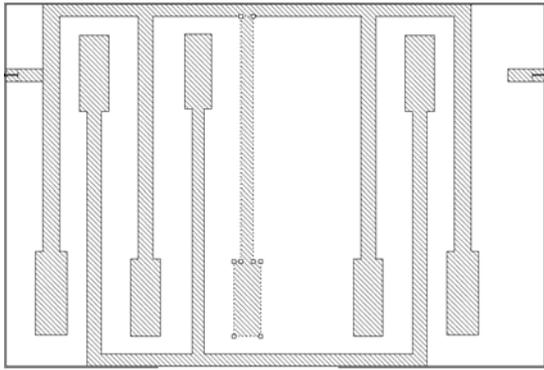


Рис.3.162

вниз, на 0.6 влево, на 6.0 вниз, на 2.2 вправо, на 6.0 вверх, на 0.6 влево, на 19.6 вверх и здесь дважды щёлкните мышкой. Топология будет иметь вид, показанный на рис. 3.162. Щёлкните по добавленному резонатору правой кнопкой мышки и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне выберите материал **1/2oz Cu**. Установите курсор на добавленный резонатор, нажмите левую кнопку мышки и, сдвинув его вправо или влево, сделайте зазор между четвертым и пятым резонаторами таким же, как и между третьим и четвертым.

3. Скопируйте добавленный резонатор, два раза щёлкните правой кнопкой мышки и подключите его к нижнему заземляющему проводнику. Затем сдвиньте его так, чтобы зазор между пятым и шестым резонаторами был равен зазору между четвертым и пятым резонаторами. Пользуясь инструментом **Measure**, убедитесь, что все симметричные элементы топологии фильтра имеют одинаковые размеры. Полученную топологию фильтра можно сдвинуть так, чтобы она располагалась симметрично относительно корпуса, а входной и выходной проводники имели одинаковую или примерно одинаковую длину. Можно также изменить длину корпуса при необходимости.
4. Чтобы точнее отобразить характеристику в полосе пропускания, дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне проекта и добавьте частоты 0.925, 0.935 и 0,965. Выполните анализ.

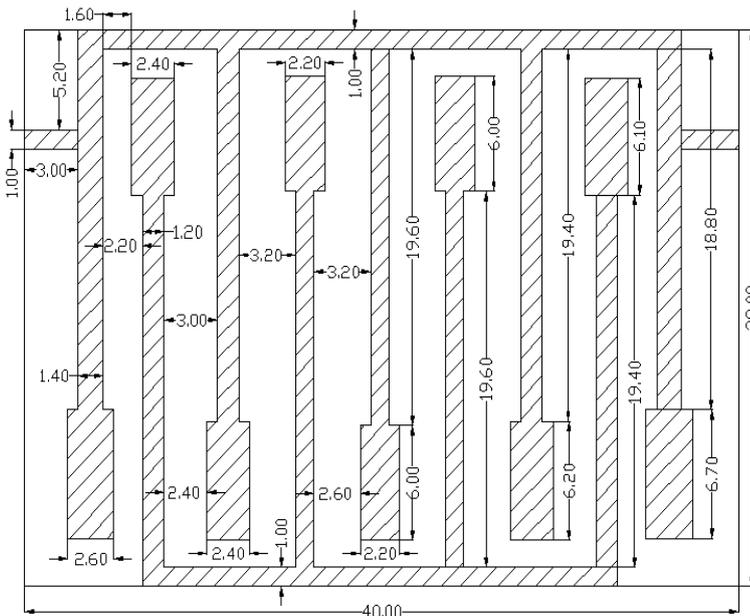


Рис.3.163

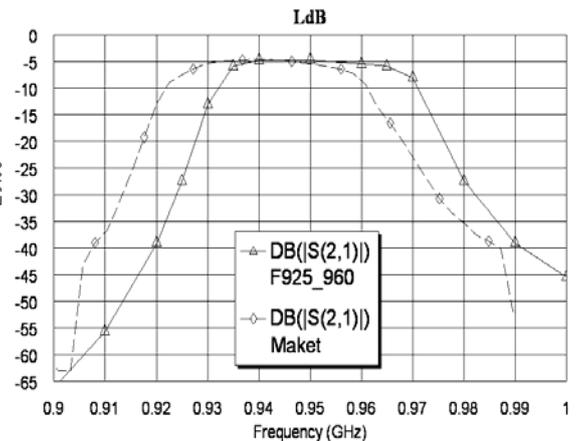


Рис.3.164

Окончательная топология показана на рис. 3.163. На рис. 3.164 показаны расчётная характеристика (сплошная линия) и характеристика макета после настройки (пунктирная линия).

3.8. Встречноштыревой фильтр с полосой пропускания 5 – 7 ГГц.

Требуется спроектировать фильтр с полосой пропускания от 5 до 7 ГГц. В полосе частот от 8 до 19 ГГц ослабление должно быть не менее 40 дБ.

3.8.1. Синтез фильтра.

Для синтеза фильтра воспользуемся мастером синтеза Microwave Office. Поскольку крутизна скатов требуется высокой, синтезируем фильтр с 9-ю резонаторами.

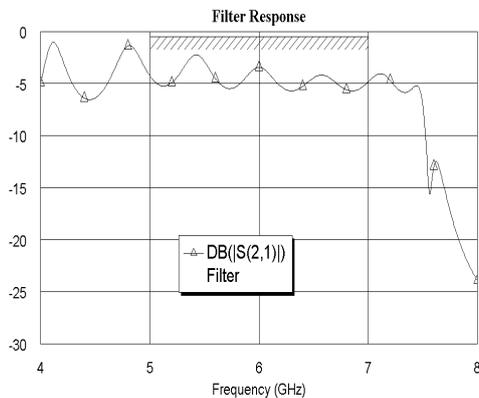


Рис. 3.165

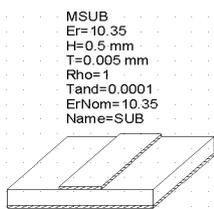


Рис. 3.166

1. Создайте новый проект и сохраните его под именем **F5-7**.
2. Раскройте группу **Wizards** и дважды щёлкните по подгруппе **Filter Synthesis Wizard**.
3. В открывающихся окнах последовательно выберите **Bandpass**, **Chebyshev**, количество резонаторов **N=9**, нижняя частота полосы пропускания **FL=5**, верхняя частота полосы пропускания **FH=7**, **Interdigital Resonators**, **Short-Circuited Transformer**, **Microstrip**, **Name=Fil**, **Er=10.35**, **Tand=0.0001**, **H=0.5**, **T=0.005**, выберите материал **Copper**, снимите “галочку” в **Input Return Loss (S11)**.
4. Щёлкните по значку **Analyze**. Полученный график показан на рис. 3.165. Как видно из полученной характеристики, мастеру синтеза на удалось синтезировать фильтр с характеристикой, близкой к требуемой. Можно попытаться настроить фильтр, используя блок настройки, или создать свою схему, отличную от созданной Мастером синтеза. Мы сделаем второе, создав схему фильтра с кондуктивной связью.

5. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени схемы **Fil** в левом окне проекта и выберите **Delete Schematic**. Аналогично удалите созданные мастером график, цели оптимизации и подгруппу фильтра **Design** в группе **Filter Synthesis Wizard**.

6. Элемент подложки поместим в **Global Definitions** (Глобальные определения), откуда она будет доступна для всех схем в проекте, которые могут потребоваться. Дважды щёлкните по **Global Definitions** в левом окне проекта. Откройте вкладку **Elem** в левом окне проекта, щёлкните мышкой по **Substrates** и перетащите в правое окно элемент **MSUB**. Дважды щёлкните по этому элементу и введите **Er=10.35**, **H=0.5**, **T=0.005**, **Tand=0.0001** и **ErNom=10.35**, нажмите **OK** (рис. 3.166).

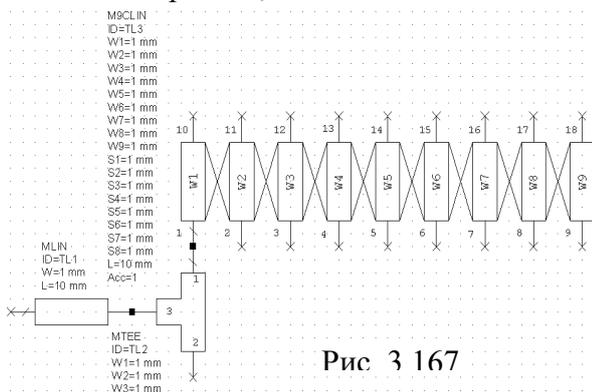


Рис. 3.167

7. Щёлкните по значку **New Schematic** и создайте схему с именем **Fil**.
8. Раскройте группу **Microstrip**, щёлкните левой кнопкой по **Lines** и перетащите в окно схемы элемент **MLIN**. В левом окне проекта щёлкните по **Junctions**, перетащите в окно схемы элемент **MTEE**, разверните его, щёлкая правой кнопкой мышки, и подключите плечо 3 этого элемента к **MLIN**. В левом окне проекта щёлкните по **Coupled Lines**, перетащите в окно схемы элемент **M9CLIN**, разверните его и подключите плечо 1 этого элемента к плечу 1 элемента **MTEE**. Должна получиться схема, показанная на рис. 3.167.

9. Нажмите клавишу **Shift** и щёлкните по элементам **MLIN** и **MTEE**. Щёлкните по значкам **Copy** и **Paste** на панели инструментов, разверните скопированные элементы на 180 градусов и подключите к плечу 9 элемента **M9CLIN**. Аналогично скопируйте элемент **M9CLIN** и подключите его плечом 10 к плечу 2 первого элемента **MTEE**. Перетащите

в окно схемы элемент **M7CLIN** и подключите его между элементами **M9CLIN**. Должна получиться схема, показанная на рис. 3.168.

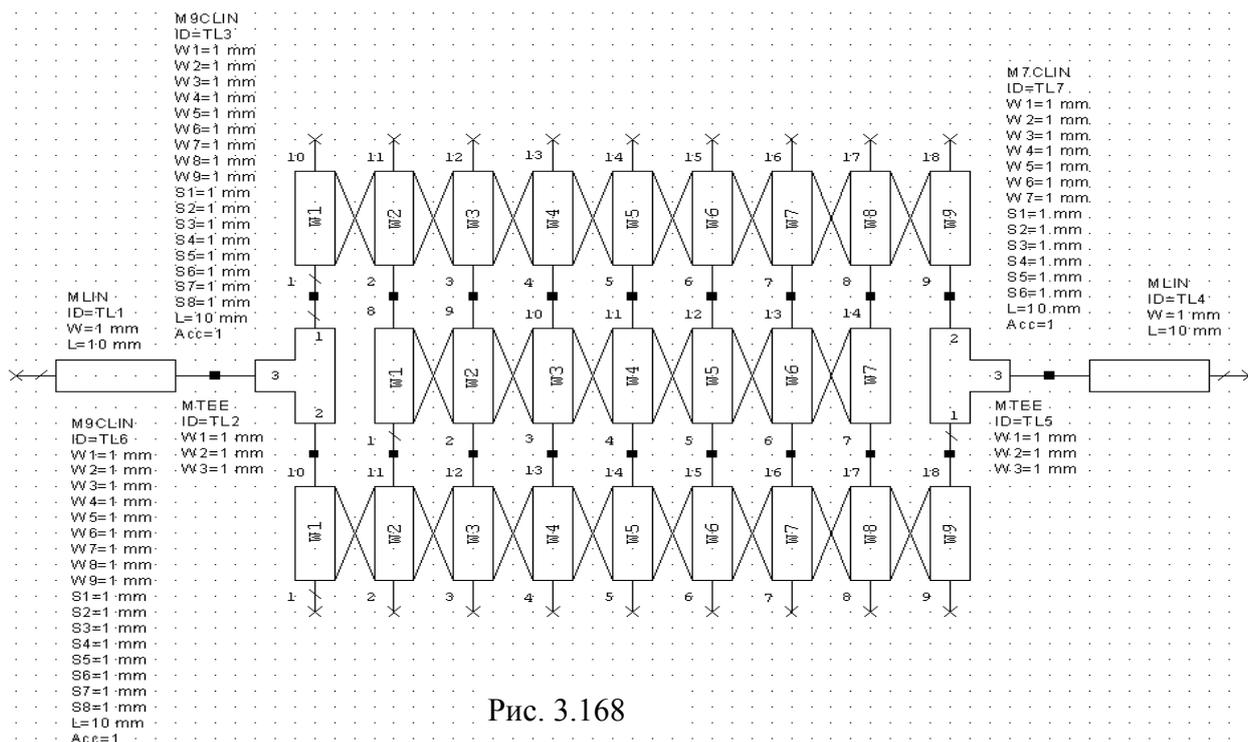


Рис. 3.168

10. Щёлкните по подгруппе **Other** в левом окне проекта и, перетаскивая элемент **MOPEN** в окно схемы, подключите его к нечётным плечам верхнего и нижнего элементов **M9CLIN**.
11. Щёлкая по значку **Ground**, подключите землю к чётным плечам верхнего и нижнего элементов **M9CLIN**.
12. Щёлкая по значку **Port**, установите порты на входе и выходе схемы. Окончательная схема показана на рис. 3.169.

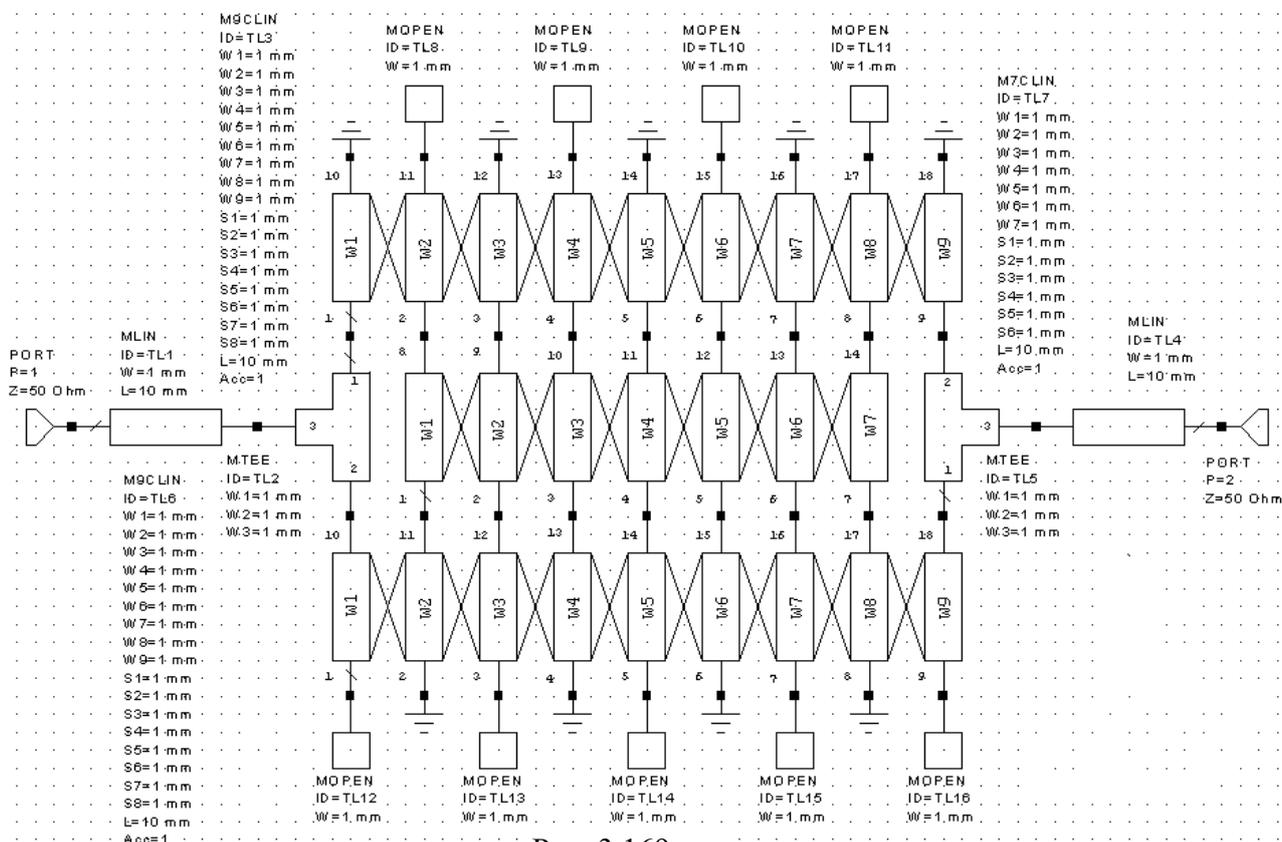


Рис. 3.169

3.8.2. Добавление переменных и редактирование схемы.

- Щёлкните по значку **Equation** на панели инструментов и введите переменную **LR=4.7** (длина резонаторов, равная примерно четверти длины волны на частоте 6 ГГц), **L1=1.8** (расстояние от заземлённого конца крайних резонаторов до точки подключения кондуктивной связи), **L2=LR-L1-0.5**, **W1=0.5**, **W2=0.5**, **W3=0.5**, **W4=0.5**, **W5=0.5**, **S1=0.2**, **S2=0.2**, **S3=0.2**, **S4=0.2**.
- Дважды щёлкните по первому элементу **MLIN** и введите **W=0.5** и **L=3**. Такие же параметры введите для последнего элемента **MLIN**.
- Дважды щёлкните по верхнему элементу **M9CLIN** и введите **W1=W1**, **W2=W2**, **W3=W3**, **W4=W4**, **W5=W5**, **W6=W4**, **W7=W3**, **W8=W2**, **W9=W1**, **S1=S1**, **S2=S2**, **S3=S3**, **S4=S4**, **S5=S4**, **S6=S3**, **S7=S2**, **S8=S1** и **L=L1**. Такие же параметры введите для нижнего элемента **M9CLIN**, только длину введите **L=L2**.
- Дважды щёлкните по элементу **M7CLIN** и введите **W1=W2**, **W2=W3**, **W3=W4**, **W4=W5**, **W5=W4**, **W6=W3**, **W7=W2**, **S1=S2**, **S2=S3**, **S3=S4**, **S4=S4**, **S5=S3**, **S6=S2** и **L=0.5**.
- Дважды щёлкните по элементу **MTEE** и введите **W1=W1**, **W2=W1** и **W3=0.5**. Такие же параметры введите для последнего элемента **MTEE**.
- Дважды щёлкая по элементам **MOPEN**, введите для каждого из них значение параметра **W**, такое же, как у подключённого плеча элемента **M9CLIN**. Отредактированная схема показана на рис. 3.170.

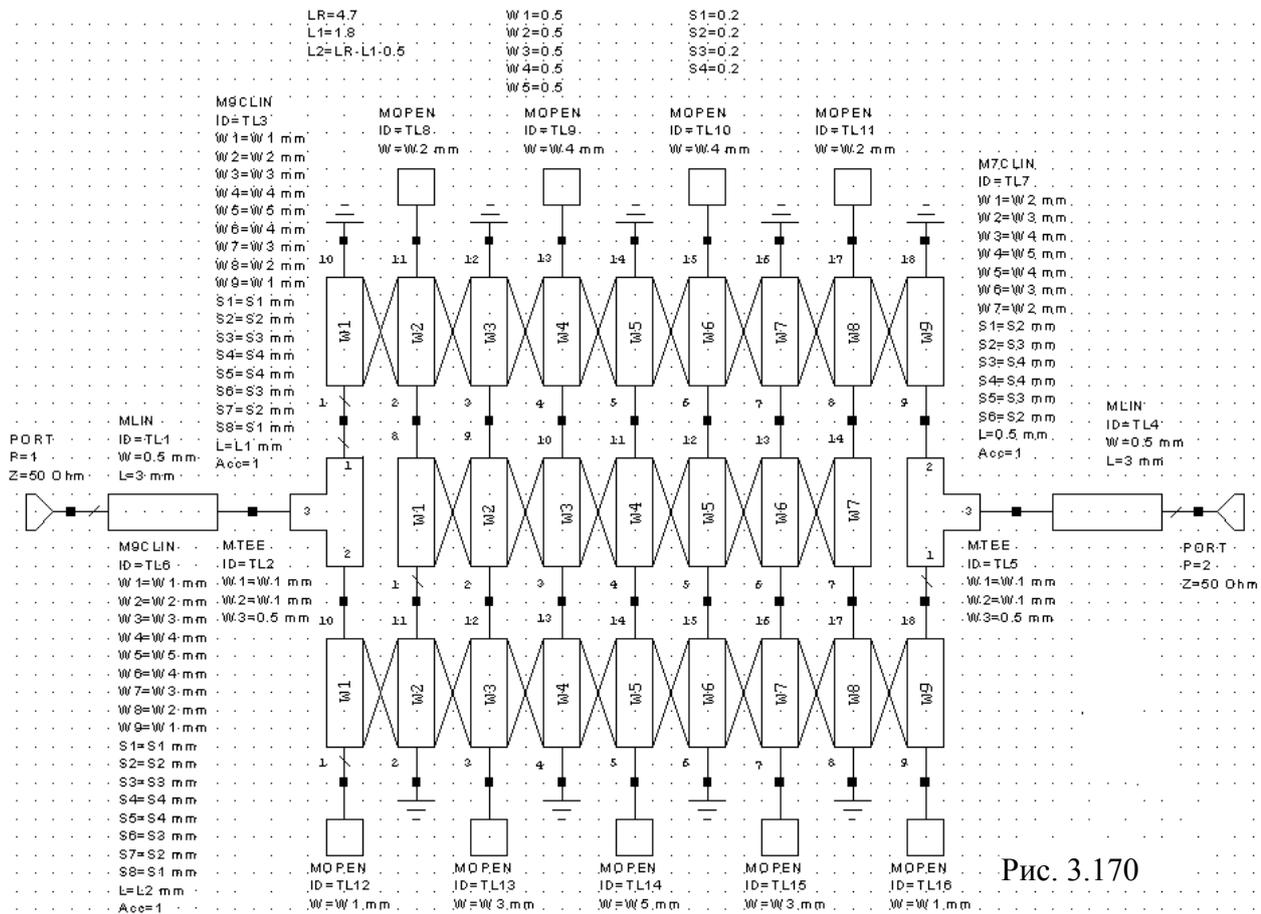


Рис. 3.170

3.8.3. Анализ и настройка схемы.

- Откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта. Дважды щёлкните по **Project Options**. На вкладке **Frequencies** в поле **Start(GHz)** введите **4**, в поле **Stop(GHz)** введите **8**, в поле **Step(GHz)** введите **0.25**, нажмите **Apply** и **OK**.
- Щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов и создайте график с именем **LdB**. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени созданного графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне отметьте **Port Parameters**

и S , в поле **To Port Index** введите **2**, в поле **From Port Index** введите **1**, отметьте **dB**, нажмите **Apply** и **OK**.

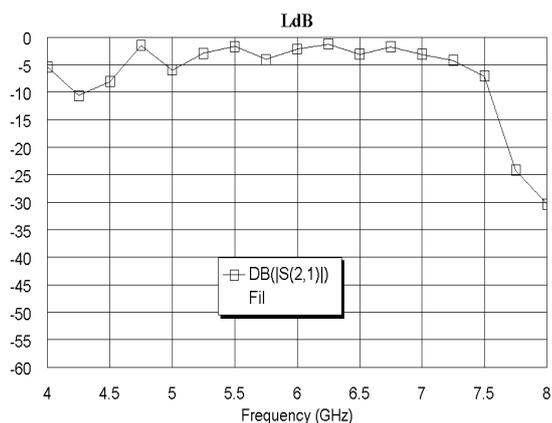


Рис. 3.171

3. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните по графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. На вкладке **Axes** открывшегося окна для оси x снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**, в поле **Min** введите **4**, в поле **Max** введите **8**, в поле **Step** введите **0.5**. 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**. Полученный график показан на рис. 3.171.

4. Сделайте активным окно схемы. Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов, переместите курсор в окно схемы и, щёлкая по переменным, назначьте для настройки все переменные, кроме **L2**.

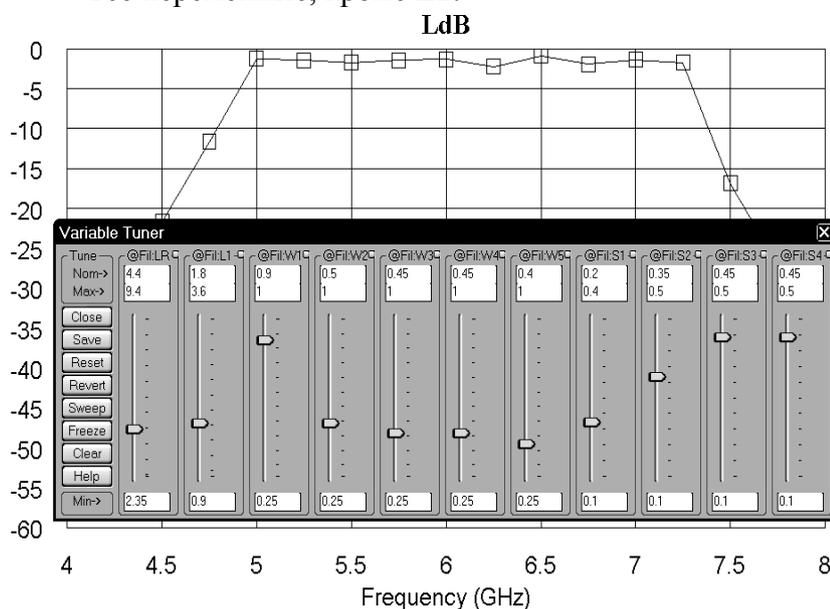


Рис. 3.172

5. Сделайте активным окно графика. Щёлкните по значку **Tune** и, двигая движки переменных на блоке настройки, добейтесь приемлемой характеристики (рис. 3.172). Округлите полученные значения переменных до пяти сотых. Это можно сделать или в окне схемы, или на блоке настройки, отредактировав значения в строке **Nom->** блока настройки. Переменные получили значения (после округления): $LR=4.4$, $L1=1.8$, $W1=0.9$, $W2=0.5$, $W3=0.45$, $W4=0.45$, $W5=0.4$, $S1=0.2$, $S2=0.35$, $S3=0.45$ и $S4=0.45$.

$W3=0.45$, $W4=0.45$, $W5=0.4$, $S1=0.2$, $S2=0.35$, $S3=0.45$ и $S4=0.45$.

3.8.4. Создание электромагнитной структуры.

1. Сделайте активным окно схемы и щёлкните по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов. Затем выделите все элементы топологии, выбрав в меню команду **Edit>Select All**, и щёлкните по значку **Snap Together** на панели инструментов. Полученная топология схемы показана на рис. 3.173. Щёлкая по значку **Measure** на панели инструментов, определим размер топологии 13.9×4.4 мм.

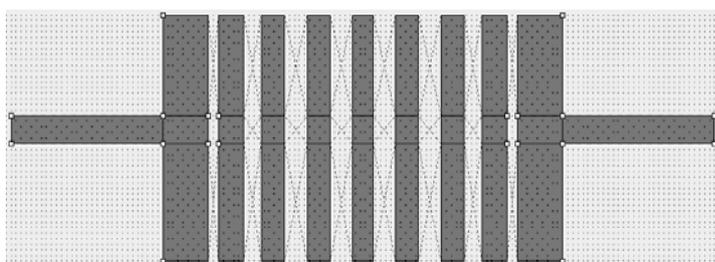


Рис. 3.173

2. Электромагнитную структуру создадим в редакторе электромагнитной структуры. Выберем ширину заземляющих проводников 0.8 мм и зазор между резонаторами и заземляющими проводниками 0.3 мм. Тогда ширина корпуса должна быть равна $4.4 + 2 \cdot 0.8 + 0.3 = 6.3$ мм. Щёлкните по значку **New EM Structure** и создайте электромагнитную структуру с именем **F5_7**.

- Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension(mm)** введите **13.9**, в поле **X-Divisions** введите **278**, в поле **Y-Dimension(mm)** введите **6.3**, в поле **Y-Divisions** введите **126**. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину слоя **6** мм. Для слоя **2** введите толщину слоя **0.5**, диэлектрическую проницаемость **10.35**, тангенс потерь **0.0001**, масштаб отображения **4** (рис. 3.174), нажмите **OK**.

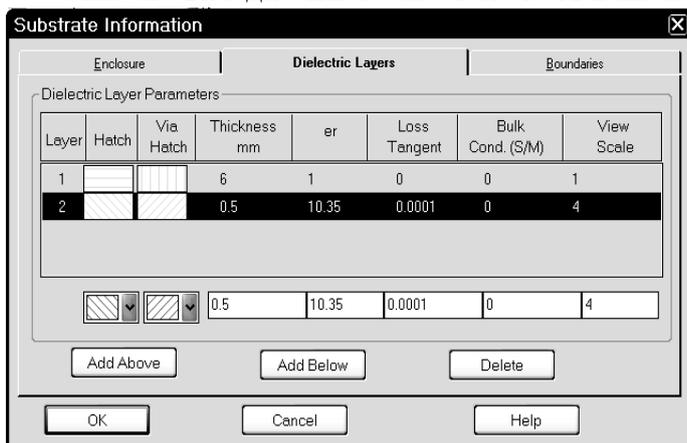


Рис. 3.174

В открывшемся окне в поле **x** введите **3**, в поле **y** введите **0**, нажмите **OK** и затем клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **dx** введите **7.9**, в поле **y** введите **0.8**, нажмите **OK**.

- Щёлкните по значку **Rectangle Conductor**, поместите курсор в поле электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **x** введите **4.1**, в поле **y** введите **6.3**, нажмите **OK** и затем клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **dx** введите **5.7**, в поле **dy** введите **-0.8**, нажмите **OK**.
- Щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов, поместите курсор в поле электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **x** введите **3**, в поле **y** введите **0.8**, нажмите **OK** и затем клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **dx** введите **0.9**, в поле **dy** введите **4.4**, нажмите **OK**. Щёлкните по значкам **Copy** и **Paste** на панели инструментов (созданный резонатор должен быть выделен). Подключите скопированный резонатор к правому краю верхнего заземляющего проводника.

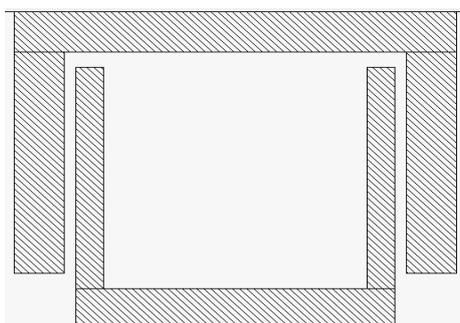


Рис. 3.175

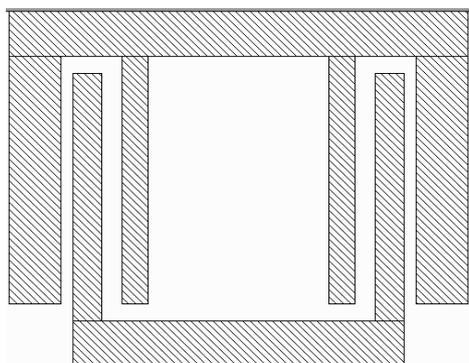


Рис. 3.176

Щёлкните по значкам **Copy** и **Paste** на панели инструментов. Подключите скопированный резонатор левее предпоследнего резонатора на расстоянии **0.35** мм. Должна получиться топология, показанная на рис. 3.176.

- Снова щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и подключите резонатор к нижнему заземляющему проводнику на расстоянии **0.45** мм правее третьего резонатора. Повторите этот шаг и подключите резонатор к нижнему заземляющему проводнику

- Щёлкните по значку **Rectangle Conductor**, поместите курсор в поле электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **x** введите **4.1**, в поле **y** введите **5.5**, нажмите **OK** и затем клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **dx** введите **0.5**, в поле **dy** введите **-4.4**, нажмите **OK**. Скопируйте созданный резонатор и подключите его к правому краю нижнего заземляющего проводника. Должна получиться топология, показанная на рис. 3.175.

- Щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов, поместите курсор в поле электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **x** введите **4.1**, в поле **y** введите **5.5**, нажмите **OK** и затем клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **dx** введите **0.5**, в поле **dy** введите **-4.4**, нажмите **OK**. Скопируйте созданный резонатор и подключите его к правому краю нижнего заземляющего проводника. Должна получиться топология, показанная на рис. 3.175.
- Щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов, поместите курсор в поле электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **x** введите **4.95**, в поле **y** введите **0.8**, нажмите **OK** и затем клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **dx** введите **0.45**, в поле **dy** введите **4.4**, нажмите **OK**. Щёлкните по значкам

на таком же расстоянии от третьего резонатора справа. Снова повторите этот шаг и подключите резонатор к верхнему заземляющему проводнику на расстоянии 0.45 мм правее четвертого резонатора. Дважды щёлкните по этому резонатору, установите курсор на ромбик посередине его правой стороны, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте эту сторону влево на 0.05 мм.

- Щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов, поместите курсор в поле электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab**. В отрывшемся окне в поле **x** введите **0**, в поле **y** введите **1.8**, нажмите **OK** и затем клавишу **Tab**. В отрывшемся

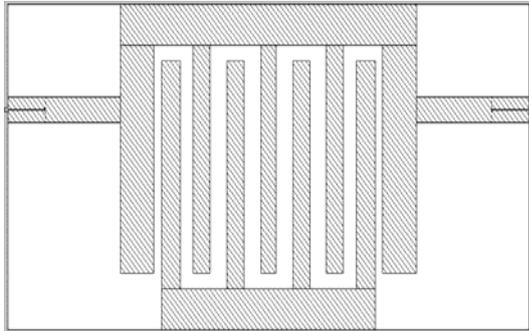


Рис. 3.177

курсор отображался в виде двойной стрелки, и сдвиньте референсную плоскость порта на 1 мм вправо. Аналогично установите порт на выходе фильтра. Созданная топология должна быть такой, как показано на рис. 3.177.

окне в поле **dx** введите **3**, в поле **dy** введите **0.5**, нажмите **OK**. Скопируйте созданный входной проводник и подключите его к последнему резонатору на расстоянии 1.8 мм от верхнего края электромагнитной структуры.

- Щёлкните по входному проводнику, чтобы выделить его. Затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на входе фильтра. Щёлкните мышкой по квадратику порта, установите курсор на правую сторону квадрата так, чтобы

3.8.5. Анализ и редактирование электромагнитной структуры.

- Установите курсор левее и выше электромагнитной структуры, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор правее и ниже электромагнитной структуры, чтобы выделить все элементы топологии. Щёлкните по любому элементу

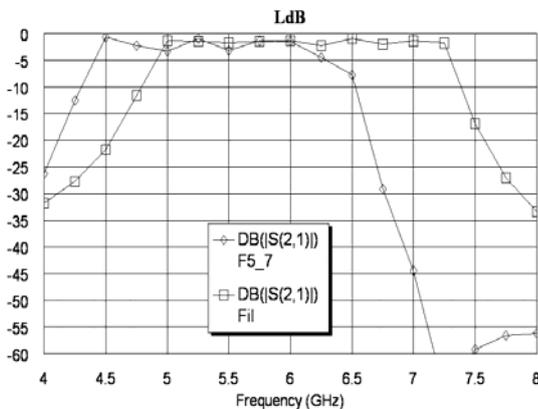


Рис. 3.178

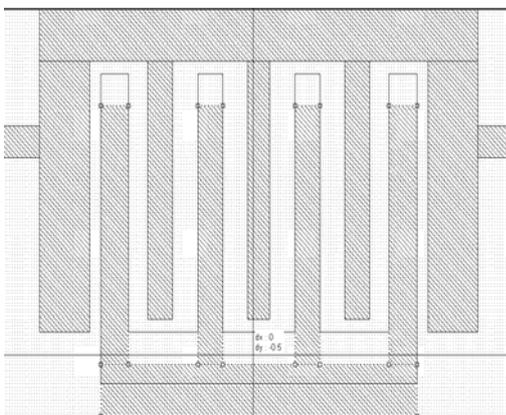


Рис. 3.179

топологии правой кнопкой мышки и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне в выпадающем списке **Selected Material** выберите **1/2oz Cu** и нажмите **OK**.

- Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.178.

- Чтобы сдвинуть характеристику вверх по частоте, укоротим резонаторы. Сделайте активным окно электромагнитной структуры.

Дважды щёлкните по первому резонатору, установите курсор на ромбик посередине нижней стороны резонатора, нажмите левую кнопку мышки, и сдвиньте эту сторону на 0.2 мм вверх. На столько же укоротите длину последнего резонатора. Аналогично укоротите все внутренние резонаторы на 0,4 мм. Нажмите клавишу **Shift** и, щёлкая мышкой по нижнему заземляющему проводнику и резонаторам, соединённым с этим проводником (рис. 3.179), выделите указанные топологические элементы. Установите курсор на любой выделенный элемент и, нажав левую кнопку мышки, переместите все выделенные элементы вверх на 0.4 мм. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов.

На вкладке **Enclosure** открывшегося окна в поле **Y-Dimension(mm)** введите **5.9**, в поле **Y-Divisions** введите **118**, нажмите **ОК**.

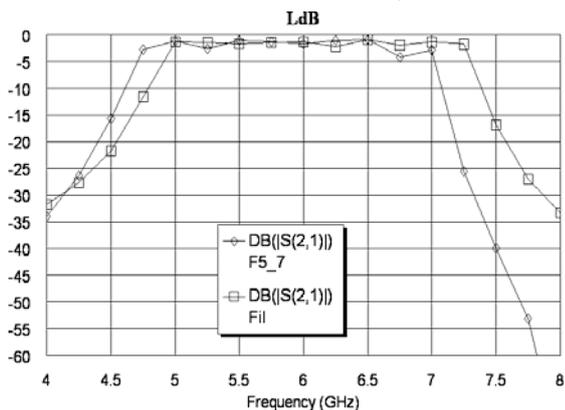


Рис. 3.180

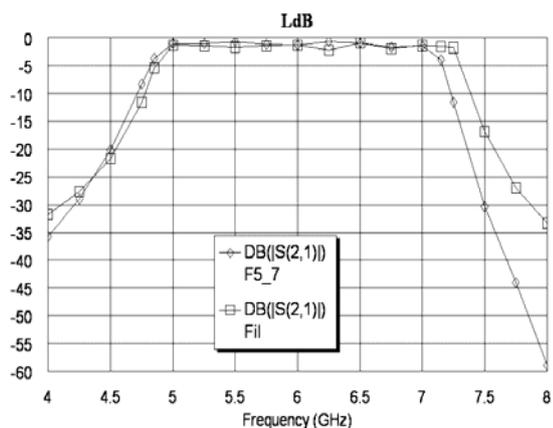


Рис. 3.181

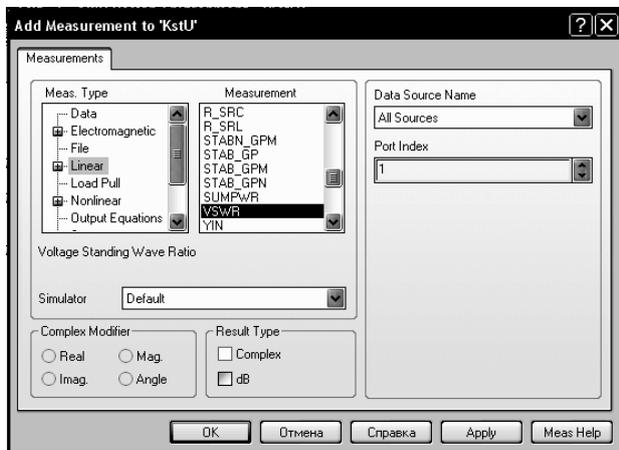


Рис. 3.182

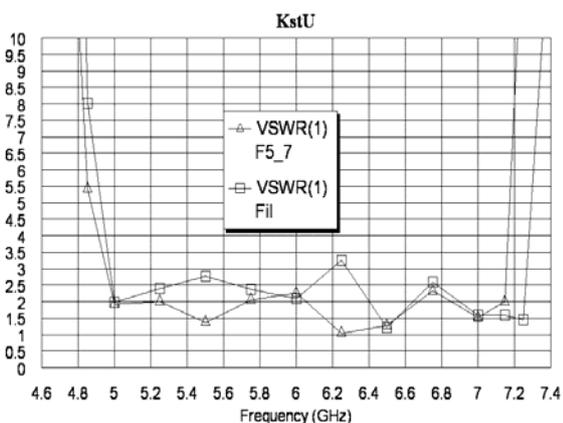


Рис. 3.183

4. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.180.

5. Сделайте активным окно электромагнитной структуры. Укоротите, как описано выше, следующие резонаторы: второй и восьмой резонаторы на 0.25, третий, четвёртый, шестой и седьмой на 0.1. Выделите, как описано в п.3 нижний заземляющий проводник и резонаторы, соединённые с ним, и сдвиньте их вверх на 0.1. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. На вкладке **Enclosure** открывшегося окна в поле **Y-Dimension(mm)** введите **5.8**, в поле **Y-Divisions** введите **116**, нажмите **ОК**.

6. Сделайте активным окно графика и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Чтобы лучше отобразить график в переходной области, можно добавить ещё пару частот. Дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне проекта. В открывшемся окне на вкладке **Frequencies** отметьте **Add** и **Single point**, в поле **Point(GHz)** введите **4.85** и нажмите **Apply**. Затем в это поле введите **7.15**, нажмите **Apply** и **ОК**.

Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.181.

7. Создайте график коэффициента отражённой волны. Для этого щёлкните по значку **New Graph** на панели инструментов и создайте график с именем **KstU**. Щёлкните по имени созданного графика в левом окне проекта и выберите **Add Measurement**. В области **Meas. Type** отметьте **Linear**, в области **Measurement** отметьте **VSWR**, в поле **Port Index** введите **1**, снимите “галочку” в **dB**, нажмите **Apply** и **ОК** (рис. 3.182).

Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой мышки по полученному графику и выберите **Properties**. В открывшемся окне для оси x снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**, в поле **Min** введите **4.6**, в поле **Max** введите **7.4**, в поле **Step** введите **0.2**. Для оси **Left 1** снимите “галочки” в **Auto limits** и в **Auto divs**, в поле **Min** введите **0**, в поле **Max** введите **10**, в поле **Step** введите **0.5**. Нажмите **Apply** и **ОК**. Полученный график показан на рис. 3.183.

Полученные характеристики в основном удовлетворяют требованиям в заданной полосе пропускания, однако согласование фильтра можно ещё улучшить. Обратите внимание, в отличие от всех ранее приводимых примеров, в этом примере моделирования фильтра мы редактировали одну и ту же топологию, не создавая её копий. Это можно делать, если есть уверенность, что отредактированная структура будет лучше предыдущей. Что нужно сделать теперь для улучшения согласования, определить не просто. Поэтому создадим копию структуры, чтобы можно было сравнивать получаемые результаты с предыдущими.

8. Установите курсор на имя структуры в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**. Щёлкните по имени копии структуры правой кнопкой мышки, выберите **Rename EM Structure** и переименуйте её в **F5_7A**.
9. Дважды щёлкните мышкой по пятому резонатору, установите курсор на ромбик посередине левой стороны и сдвиньте эту сторону на 0.05 мм вправо, сделав ширину среднего резонатора 0.35 мм. Выделите первые четыре резонатора, нажав клавишу **Shift** и щёлкая по ним мышкой. Сдвиньте эти резонаторы вправо на 0.05 так, чтобы расстояние между четвёртым и пятым резонаторами было равно 0.45 мм. Дважды щёлкните по четвёртому резонатору, установите курсор на ромбик посередине левой стороны и сдвиньте эту сторону на 0.05 мм вправо, сделав ширину среднего резонатора 0.4 мм. Выделите первые три резонатора и сдвиньте эти резонаторы вправо на 0.1 так, чтобы расстояние между третьим и четвёртым резонаторами было равно 0.4 мм. Дважды щёлкните по шестому резонатору, установите курсор на ромбик посередине правой стороны и сдвиньте эту сторону на 0.05 мм влево, сделав ширину этого резонатора 0.4 мм. Выделите седьмой, восьмой и девятый резонаторы, сдвиньте эти резонаторы на 0.1 влево, чтобы расстояние между шестым и седьмым резонаторами было равно 0.4 мм. Дважды щёлкните по верхнему заземляющему проводнику и сдвиньте его левую сторону вправо до первого резонатора, затем сдвиньте правую сторону влево до последнего резонатора. То же самое сделайте с нижним заземляющим проводником, совместив его крайние стороны со вторым и предпоследним резонаторами. Дважды щёлкните по входному проводнику и соедините его правую сторону с первым резонатором, затем соедините выходной проводник с последним резонатором. Сделайте активным окно графика **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.184. Согласование можно ещё улучшить, если сделать следующее.

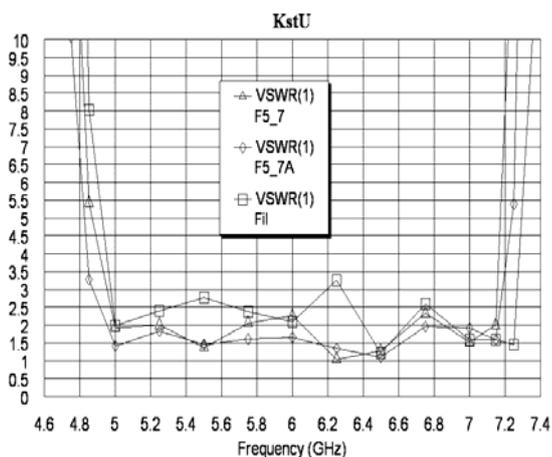


Рис. 3.184

Щёлкните по входному проводнику и соедините его правую сторону с первым резонатором, затем соедините выходной проводник с последним резонатором. Сделайте активным окно графика **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Рассчитанный график показан на рис. 3.184. Согласование можно ещё улучшить, если сделать следующее.

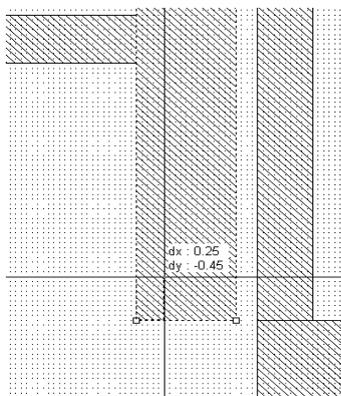


Рис. 3.185

10. Удалите предыдущую структуру **F5_7**, создайте копию оставшейся структуры **F5_7A** и переименуйте её в **F5_7**. Выделите входной и выходной проводники, нажав клавишу **Shift** и щёлкая по ним мышкой. Сдвиньте эти проводники вниз на **0.05**. Выделите первый резонатор, щёлкнув по нему мышкой. Щёлкните по значку **Notch Conductor** (Выемка проводника), установите курсор на нижний левый угол проводника, нажмите левую кнопку мышки, переместите курсор на **0.45** вверх и на **0.25** вправо (рис. 3.185), отпустите кнопку. Аналогично сделайте выемку на последнем резонаторе со стороны выхода. Выделите второй резонатор. Щёлкните по значку **Notch Conductor**. Установите курсор на верхней стороне этого резонатора на расстоянии **0.15** мм от левой стороны резонатора, нажмите левую кнопку мышки, переместите курсор на **0.1** вниз и на **0.2** вправо.

Должна получиться выемка, показанная на рис. 3.186. Аналогичную выемку сделайте на предпоследнем резонаторе. Сделайте активным окно графика **KstU** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Удалите больше ненужные схему **Fil** и электромагнитную структуру **F5_7A**.

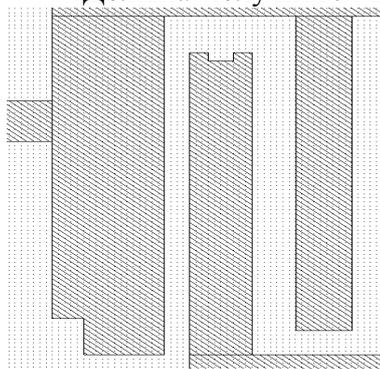


Рис. 1.186

Окончательная топология фильтра показана на рис. 3.187. График характеристики ослабления на рис. 3.188, а график коэффициента стоячей волны на рис. 3.189.

Характеристики созданной электромагнитной структуры удовлетворяют заданным требованиям в полосе пропускания. Чтобы просмотреть характеристику в полосе заграждения, дважды щёлкните по **Project Options** в левом окне проекта. В от-

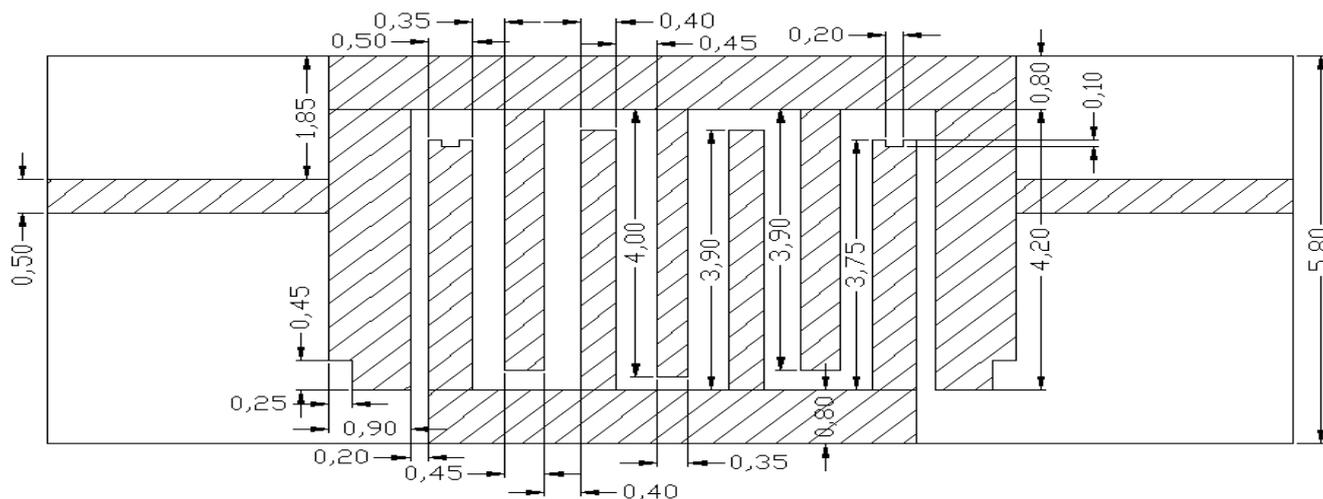


Рис. 3.187

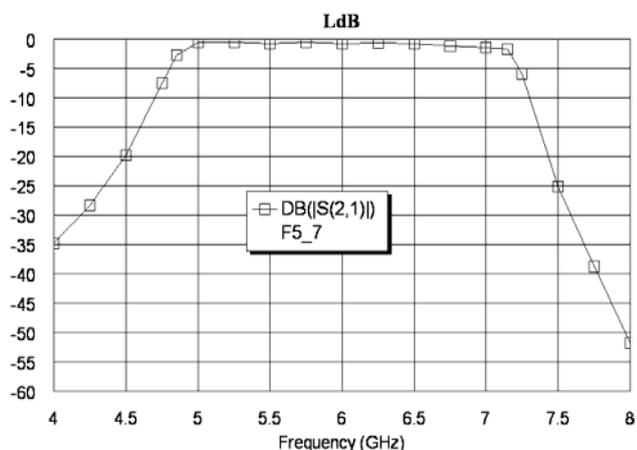


Рис. 3.188

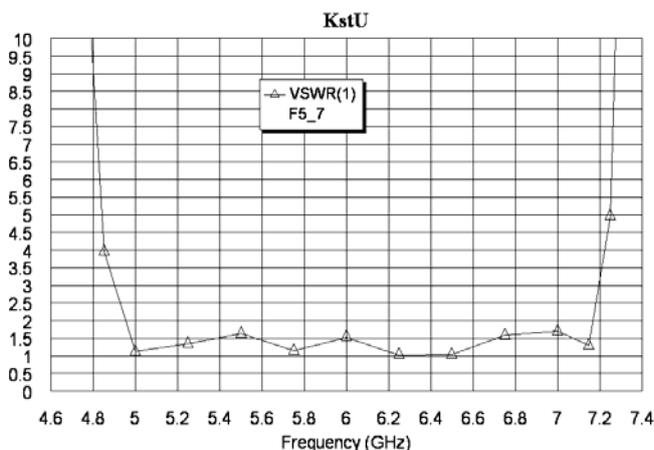


Рис. 3.189

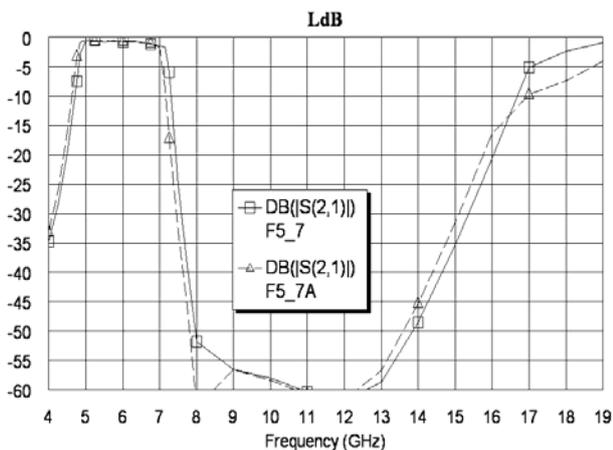


Рис. 3.190

крывшемся окне на вкладке **Frequencies** отметьте **Add**, в поле **Start(GHz)** введите **9**, в поле **Stop(GHz)** введите **19**, в поле **Step(GHz)** введите **1**, нажмите **Apply** и **OK**. Сделайте активным окно графика **LdB**, щёлкните по графику правой кнопкой мышки и выберите **Properties**. В открывшемся окне на вкладке **Axes** для оси x в поле **Max** введите **19**, в поле **Step** введите **1**, нажмите **Apply** и **OK**. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Из полученного графика (рис. 3.190, сплошная линия) видно, что следующая полоса пропускания фильтра

попадает в заданную полосу заграждения и её нужно подавить. Следует также иметь в виду, что при увеличении частоты увеличивается и диэлектрическая проницаемость, т.е. вторая полоса пропускания будет начинаться на частоте более низкой. Чтобы убедиться в этом, создайте копию электромагнитной структуры и переименуйте её в **F5_7A**. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов и на вкладке **Dielectric Layers** для слоя **2** измените диэлектрическую проницаемость на **10.75**. Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика показана на рис. 3.190 пунктирной линией. Эта характеристика более точна в верхней части диапазона. Удалите структуру **F5_7A**.

3.8.6. Проектирование фильтра нижних частот.

1. Щёлкните по значку **New Schematic** на панели инструментов и создайте схему с именем **Fn**.
2. Откройте вкладку **Elem** в левом окне проекта. Раскройте группу **Microstrip**, и щёлкните по подгруппе **Lines**. Перетащите элемент **MLIN** в окно схемы. Затем перетащите ещё один такой же элемент и соедините его с первым.

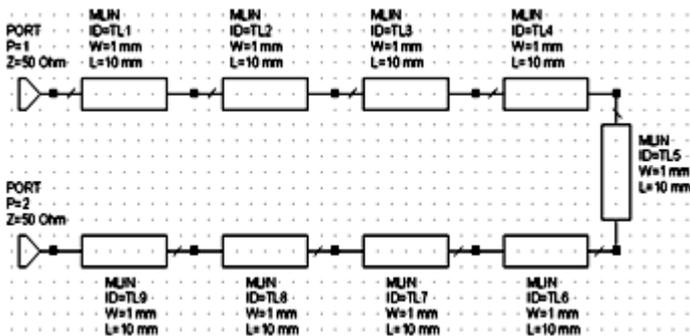


Рис. 3.191

Выделите четыре первых элемента, скопируйте их, щёлкните два раза правой кнопкой мышки и подключите скопированные элементы к последнему элементу схемы.

3. Щёлкните по значку **Port** на панели инструментов и подключите порт ко входу схемы. Аналогично подключите порт к выходу схемы. Должна получиться схема, показанная на рис. 3.191.
4. Добавьте к схеме следующие переменные, щёлкая по значку **Equation** на панели инструментов: **LI1=1**, **LI2=1** (длины индуктивностей), **LC1=1**, **LC2=1** (длины емкостей), **WC1=1** и **WC2=1** (ширины емкостей).
5. Дважды щёлкните по первому элементу **MLIN** и введите параметры **W=0.5** и **L=3**. Такие же параметры введите для последнего элемента **MLIN**.
6. Дважды щёлкните по второму элементу **MLIN** и введите параметры **W=0.1** и **L=LI1**.

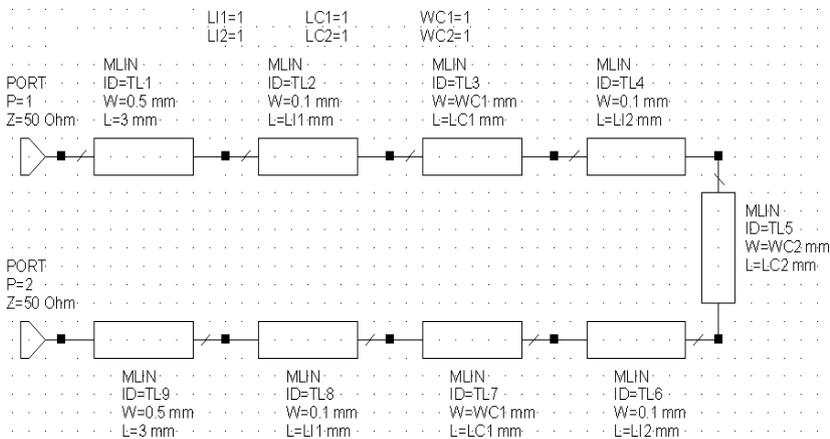


Рис. 3.192

Такие же параметры введите для шестого элемента **MLIN**.

Перетащите элемент **MLIN** в окно схемы. Затем перетащите ещё один такой же элемент и соедините его с первым. Выделите оба элемента, скопируйте их, щёлкнув по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов, и подключите к первым двум элементам. Снова перетащите элемент **MLIN** в окно схемы, щёлкните три раза правой кнопкой мышки, чтобы развернуть его, и подключите к последнему элементу схемы.

Такие же параметры введите для предпоследнего элемента **MLIN**.

7. Дважды щёлкните по третьему элементу **MLIN** и введите параметры **W=WC1** и **L=LC1**. Такие же параметры введите для седьмого элемента **MLIN**.
8. Дважды щёлкните по четвертому элементу **MLIN** и введите параметры **W=0.1** и **L=LI2**.

9. Дважды щёлкните по пятому элементу **MLIN** и введите параметры $W=WC2$ и $L=LC2$. Отредактированная схема показана на рис. 3.192.
10. Щёлкните по значку **Tune Tool** на панели инструментов и, щёлкая по переменным, назначьте все переменные для настройки.
11. Откройте вкладку **Proj** в левом окне проекта. Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.193.

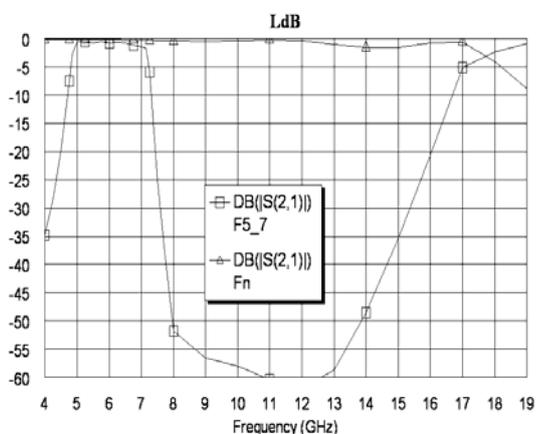


Рис. 3.193

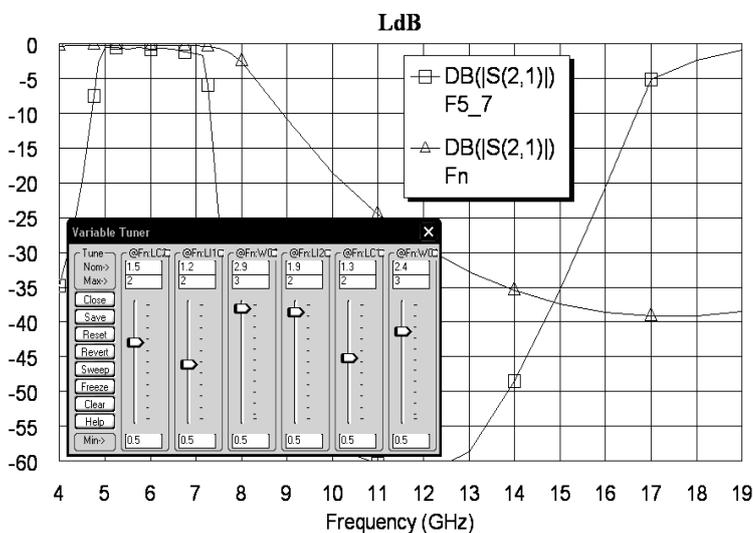


Рис. 3.194

12. Щёлкните по значку **Tune** на панели инструментов и, двигая движки переменных на блоке настройки, добейтесь подходящей характеристики фильтра нижних частот (рис. 3.194). Переменные получили значения: $LI1=1.2$, $LI2=1.9$, $LC1=1.3$, $LC2=1.5$, $WC1=2.4$ и $WC2=2.9$.

13. Сделайте активным окно схемы **Fn** и щёлкните по значку **New Schematic Layout View** на панели инструментов. Топология схемы показана на рис. 3.195. Щёлкнув по значку

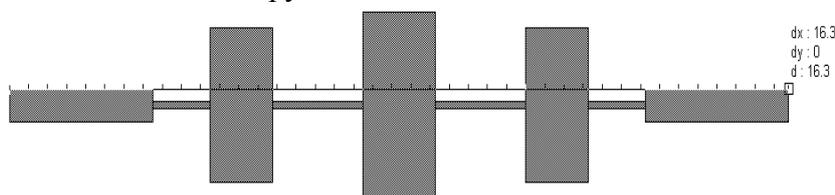


Рис. 3.195

Measure на панели инструментов, определим длину топологии 16.3 мм.

14. Выделите все элементы топологии и щёлкните по значку **Copy** на

панели инструментов.

15. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру с именем **FilN**.

16. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension(mm)** введите **16.3**, в поле **X-Divisions** введите **326**, в поле **Y-Dimension(mm)** введите **5.8**, в поле **Y-Divisions** введите **116**. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6** мм. Для слоя **2** введите толщину **0.5**, диэлектрическую проницаемость **10.35**, тангенс потерь **0.0001**. Нажмите **OK**.

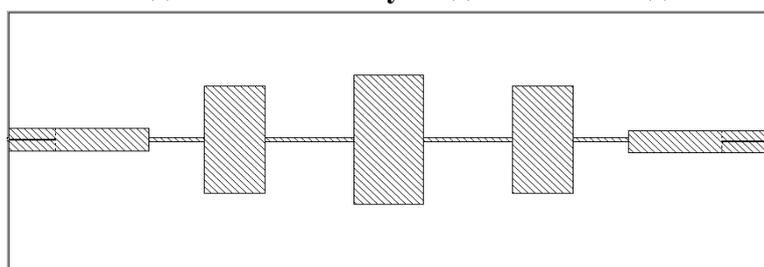


Рис. 3.196

17. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и вставьте скопированную топологию в электромагнитную структуру так, чтобы её края точно совпадали с краями корпуса.

Щёлкните по входному проводнику топологии, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов, установите порт на входе фильтра и сдвиньте его референсную плоскость вправо на 1 мм. Аналогично установите порт на выходе фильтра и сдвиньте

его референсную плоскость влево на 1 мм. Выделите все элементы топологии, щёлкните правой кнопкой мышки по любому элементу и выберите **Mesh/Material Properties**. В открывшемся окне на вкладке **Conductor Material** в выпадающем списке **Selected Material** выберите **1/2oz Cu** и нажмите **OK**. Должна получиться структура, показанная на рис. 3.196.

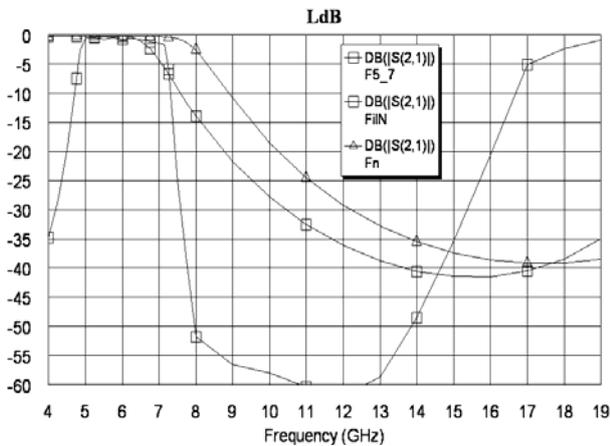


Рис. 3.197

ную сторону на 0.3 мм вверх. Ширина первого емкостного проводника должна стать равной 1,8 мм. Точно так же укоротите ширину последнего емкостного проводника.

20. Дважды щёлкните по второму емкостному проводнику. Сдвиньте его верхнюю сторону вниз на 0.2 мм, а нижнюю сторону – на 0.2 мм вверх. Ширина этого емкостного проводника должна стать равной 2,5 мм. Установите курсор на ромб посередине левой стороны этого проводника и сдвиньте его вправо на 0.5 мм. Выделите первый емкостной проводник и два первых индуктивных, нажав клавишу **Shift**, и щёлкая по проводникам мышкой, сдвиньте эти проводники вправо до соединения со средним емкостным проводником. Дважды щёлкните по входному проводнику и, установив курсор на середину его правой стороны, сдвиньте эту сторону вправо до соединения с первым индуктивным проводником.

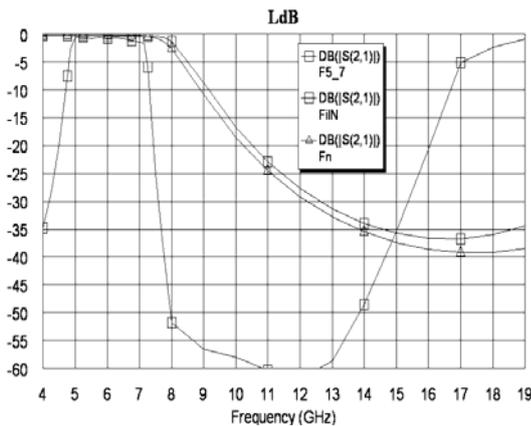


Рис. 3.198

21. Сделайте активным график **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График показан на рис. 3.198. Его можно считать удовлетворительным.

3.8.7. Добавление фильтра нижних частот к полосовому и анализ.

1. Сделайте активным окно электромагнитной структуры **FilN**. Выделите все проводники топологии, кроме входного. Для этого установите курсор левее первого индуктивного проводника и выше всех проводников, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор правее выходного проводника и ниже всех проводников так, чтобы все проводники, кроме входного, попали в образующийся прямоугольник. Отпустите кнопку мышки и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.
2. Сделайте активным окно электромагнитной структуры **F5_7**. Чтобы следить за влиянием добавленного фильтра нижних частот на характеристику в полосе пропускания, создайте копию этой электромагнитной структуры. Для этого установите курсор на имя структуры **F5_7** в левом окне проекта, нажмите левую кнопку мышки и переместите курсор на группу **EM Structures**. Переименуйте созданную копию структуры в **F5_7N**.
3. В созданной структуре щёлкните мышкой по порту **2** и удалите этот порт, нажав клавишу **Delete**. Дважды щёлкните по выходному проводнику, установите курсор на сере-

дину его правой стороны и сдвиньте эту сторону влево так, чтобы длина выходного проводника была равна 0.5 мм.

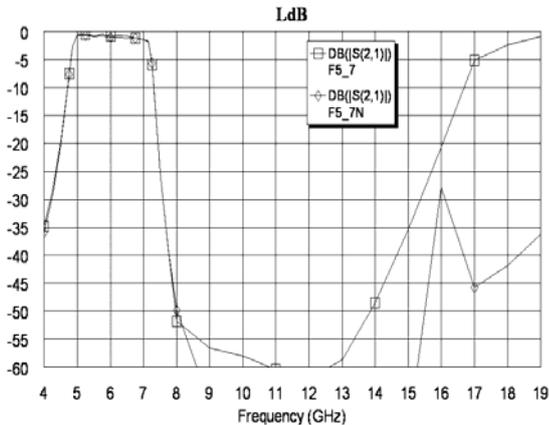


Рис. 3.199

инструментов и добавьте порт к выходному проводнику.

5. Сделайте активным окно графика **LdB**. Удалите из проекта схему **Fn** и электромагнитную структуру **FilN**, щёлкая по их именам правой кнопкой мышки, чтобы не затемнять график ненужными больше характеристиками. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика показана на рис. 3.199. Подавление в верхней части диапазона получилось недостаточным. Добавим заграждающий фильтр.

3.8.8. Проектирование заграждающего фильтра.

1. Используя встроенный инструмент **Tools>TXLine**, определим, что длина четверть-волновых отрезков при диэлектрической проницаемости 10.75 и толщине подложки 0.5 мм на частоте 18 ГГц равна примерно 1.5 мм.
2. Щёлкните по значку **New EM Structure** на панели инструментов и создайте электромагнитную структуру и именем **Fz**.
3. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension(mm)** введите **8.5**, в поле **X-Divisions** введите **170**, в поле **Y-Dimension(mm)** введите **5.8**, в поле **Y-Divisions** введите **116**. На вкладке **Dielectric Layers** для слоя **1** введите толщину **6**. Для слоя **2** введите толщину **0.5**, диэлектрическую проницаемость **10.75** и тангенс потерь **0.0001**, Нажмите **OK**.
4. Щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов, переместите курсор на электромагнитную структуру и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **x** введите **0**, в поле **y** введите **2**, нажмите **OK** и затем снова клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **dx** введите **8.5**, в поле **dy** введите **0.5**, нажмите **OK**.
5. Снова щёлкните по значку **Rectangle Conductor** на панели инструментов, переместите курсор на электромагнитную структуру и нажмите клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **x** введите **3**, в поле **y** введите **2.5**, нажмите **OK** и затем снова клавишу **Tab**. В открывшемся окне в поле **dx** введите **0.5**, в поле **dy** введите **1.5**, нажмите **OK**.
6. Скопируйте полученный резонатор и подключите его к нижней стороне общей линии на расстоянии 1.5 мм от первого.

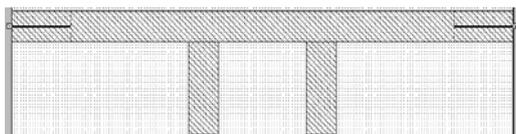


Рис. 3.200

4. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и подключите скопированную топологию к выходному проводнику. Щёлкнув правой кнопкой в окне электромагнитной структуры и выбрав **Measure**, измерьте длину всей получившейся топологии, она равна 24.1 мм. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension(mm)** введите **24.1**, в поле **X-Divisions** введите **482**, нажмите **OK**. Щёлкните мышкой по выходному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов

и добавьте порт к выходному проводнику.

5. Сделайте активным окно графика **LdB**. Удалите из проекта схему **Fn** и электромагнитную структуру **FilN**, щёлкая по их именам правой кнопкой мышки, чтобы не затемнять график ненужными больше характеристиками. Щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика показана на рис. 3.199. Подавление в верхней части диапазона получилось недостаточным. Добавим заграждающий фильтр.

7. Щёлкните мышкой по общему проводнику и затем, щёлкая по значку **Edge Port** на панели инструментов, установите порты на входе и выходе фильтра и сдвиньте их референсные плоскости на 1 мм внутрь электромагнитной структуры.

8. Выделите все элементы топологии, щёлкните правой кнопкой мышки по любому из выделенных элементов, выберите **Mesh/Material Properties** и назначьте проводникам материал **1/2oz Cu**. Должна получиться структура, показанная на рис. 3.200.
9. Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. График вносимого ослабления показан на рис. 3.201, а график коэффициента

отражения на рис. 3.202. Из графиков видно, что нужно улучшить согласование заграждающего фильтра в полосе пропускания.

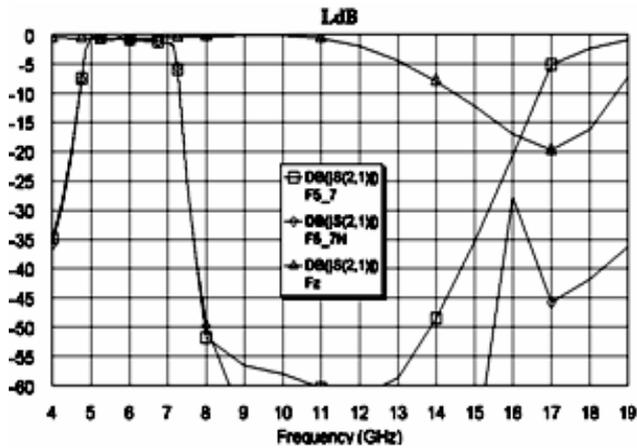


Рис. 3.201

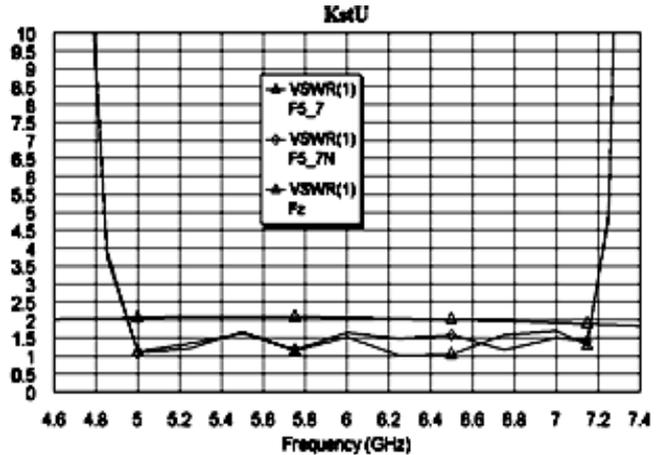


Рис. 3.202

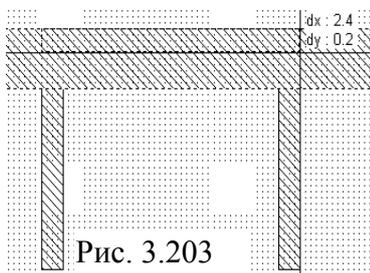


Рис. 3.203

10. Сделайте активным окно электромагнитной структуры заграждающего фильтра **Fz**. Дважды щёлкните по первому резонатору, установите курсор на ромбик посередине правой стороны этого резонатора и сдвиньте эту сторону влево на 0.3 мм. Дважды щёлкните по второму резонатору, установите курсор на ромбик посередине левой стороны этого резонатора и сдвиньте эту сторону вправо на 0.3 мм. Ширина резонаторов будет 0.2 мм. Установите

курсор на первый резонатор, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте этот резонатор вправо на 0.1 мм, чтобы расстояние между резонаторами было равно 2 мм. Щёлкните по общему проводнику, затем щёлкните по значку **Notch Conductor**, установите курсор на верхнюю границу общего проводника напротив левой стороны первого резонатора,

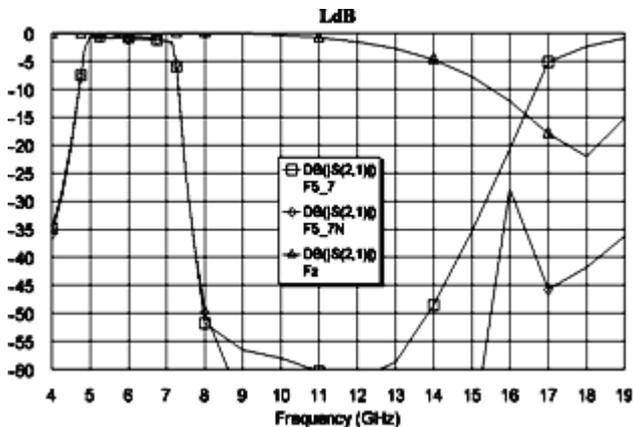


Рис. 3.204

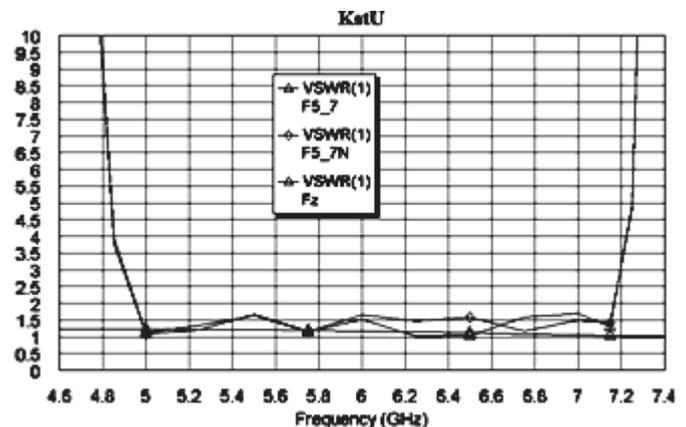


Рис. 3.205

нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте курсор на 0.2 мм вниз и вправо до правой стороны второго резонатора (рис. 3.203).

11. Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze**. График вносимого ослабления показан на рис. 3.204, а график коэффициента отражения на рис. 3.202. Эти характеристики можно считать приемлемыми.

3.8.9. Добавление заграждающего фильтра к полосовому и анализ.

1. Сделайте активным окно электромагнитной структуры **Fz**.
2. Щёлкните правой кнопкой мышки по имени этой структуры в левом окне проекта и выберите **Toggle Enable** (Переключатель блокировки), чтобы заблокировать выполнение анализа этой структуры.

- Щёлкните мышкой по квадратику порта **1** и нажмите клавишу **Delete**, чтобы удалить этот порт. Аналогично удалите другой порт.

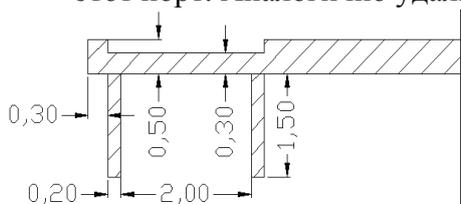


Рис. 3.206

- Дважды щёлкните по входному проводнику, установите курсор на ромб посередине левой стороны этого проводника и сдвиньте эту сторону вправо так, чтобы длина входного проводника была равна 0.3 мм. Должна получиться топология, показанная на рис. 3.206. Выделите всю эту топологию и щёлкните по значку **Copy** на панели инструментов.

- Сделайте активным окно электромагнитной структуры **F5_7N**. Щёлкните мышкой по квадратику выходного порта **2** и удалите его. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension** введите **27**, в поле **X-Divisions** введите **540**, нажмите **OK**. Дважды щёлкните по последнему (выходному) проводнику топологии, установите курсор на ромб посередине правой стороны этого проводника и сдвиньте его влево так, чтобы длина этого проводника была равна 0.2 мм. Щёлкните по значку **Paste** на панели инструментов и подключите скопированную топологию к выходному проводнику фильтра. Правый край скопированной топологии должен точно совпасть с правым краем корпуса. В противном случае измените длину выходного проводника так, чтобы его правый край совпадал с краем корпуса. Щёлкните по выходному проводнику, затем щёлкните по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт на выходе фильтра.

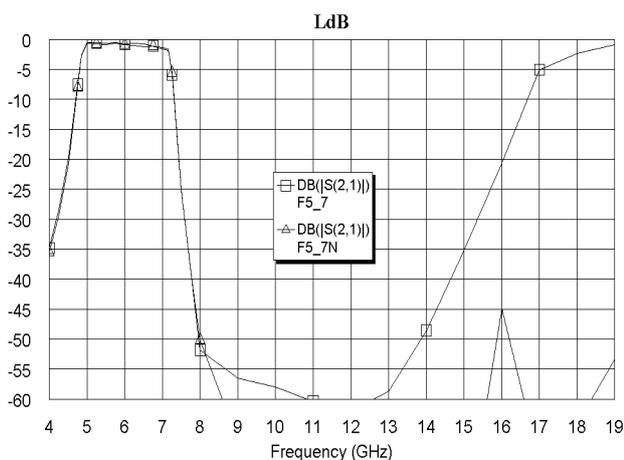


Рис. 3.207

- Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Характеристика показана на рис. 3.207. Эта характеристика удовлетворяет предъявляемым требованиям, однако имеется выброс на частоте 16 ГГц, довольно близко доходящий до предельно допустимого значения. Этот выброс можно уменьшить, точнее подобрав расстояние между фильтрами, и тем самым увеличить запас по величине ослабления в диапазоне заграждения.

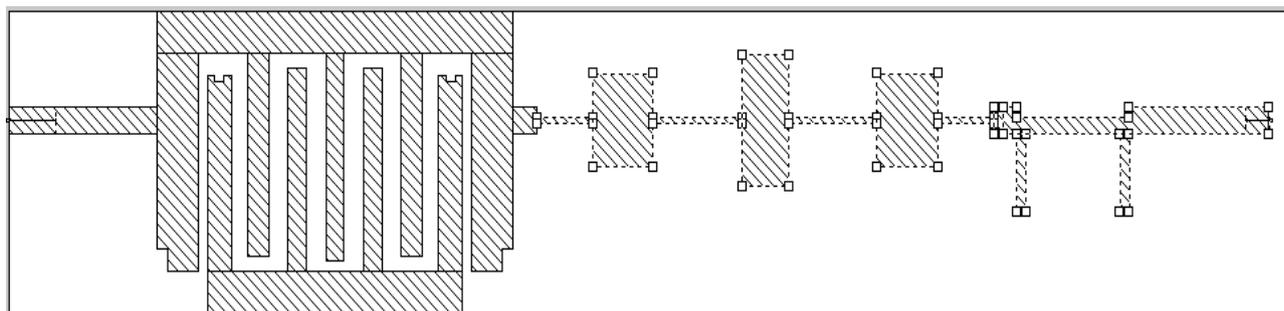


Рис. 3.208

- Сделайте активным окно электромагнитной структуры **F5_7N**. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** в поле **X-Dimension** введите **27.5**, в поле **X-Divisions** введите **550**, нажмите **OK**. Выделите все элементы топологии фильтра нижних частот и заграждающего фильтра вместе с выходным проводником (рис. 3.208). Установите курсор на любой выделенный элемент топологии, нажмите левую кнопку мышки и сдвиньте выделенную топологию вправо на 0.15 мм. Дважды щёлкните по проводнику между полосовым фильтром и фильтром нижних частот, сдвиньте правую сторону этого проводника вправо до

соединения с фильтром нижних частот. Выделите элементы топологии заграждающего фильтра, нажав клавишу **Shift** и щёлкая по элементам мышкой (рис. 3.209). Сдвиньте эти элементы вправо на 0,3 мм.

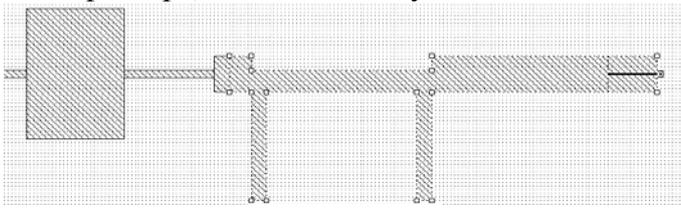


Рис. 3.209

Сдвиньте эти элементы вправо на 0,3 мм. Дважды щёлкните по выходному проводнику и сдвиньте его левую сторону влево до соединения с заграждающим фильтром, а правую - вправо до края электромагнитной структуры.

Сделайте активным окно графика **LdB** и щёлкните по значку **Analyze** на панели инструментов. Расчётная характеристика показана на рис. 3.210. Характеристика макета, измеренная на P2M-18 – на рис. 3.211. Окончательная топология на рис. 3.212.

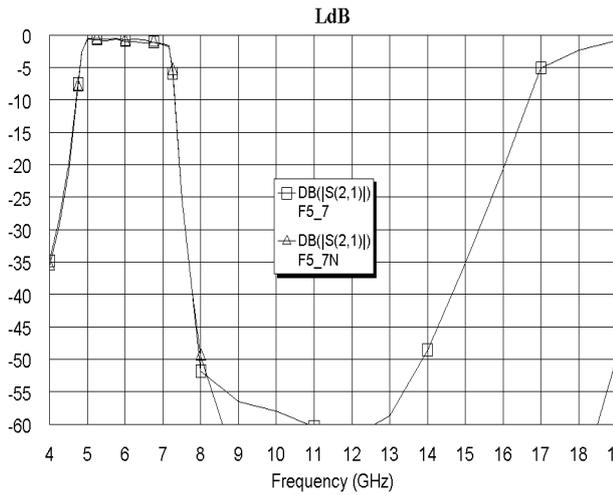
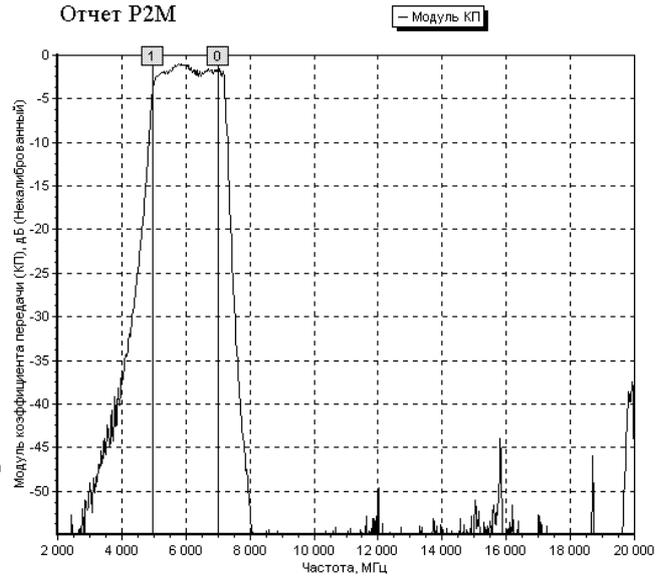


Рис. 3.210



Частота, МГц	Модуль КП, дБ	Маркеры
4977,444	-3,984	1
7007,519	-1,997	0

Рис. 3.211

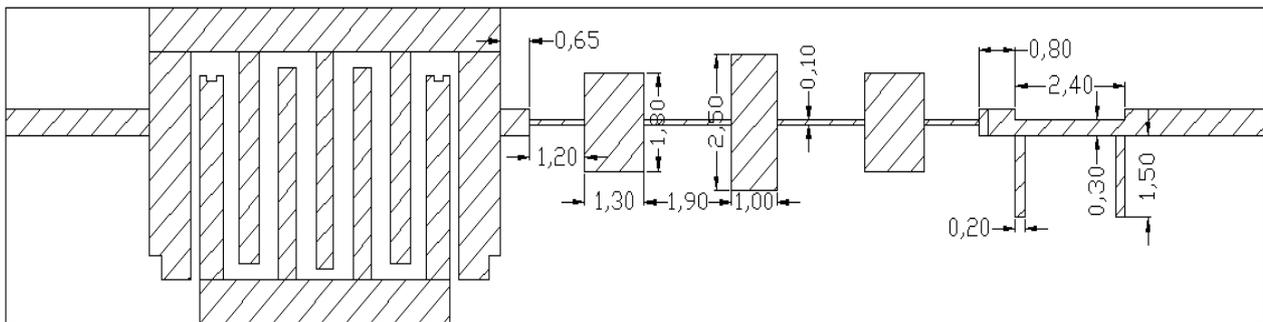


Рис. 3.212

Литература

1. Д.Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1, «Связь», Москва, 1971.
2. Д.Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 2, «Связь», Москва, 1972.
3. Г. Ханзел. Справочник по расчёту фильтров. «Советское радио», Москва, 1974.
4. Фильтры и цепи СВЧ. Пер. с англ. Л.В. Алексеева, А.Е. Знаменского, В.С. Полякова. «Связь», Москва, 1976.
5. Е.Д. Лоткова. Фильтры на шпилечных резонаторах. Техника средств радиосвязи, серия Техника радиосвязи, выпуск 1, 1978.
6. В.Д. Разевиг, Ю.В. Потапов, А.А. Курушин. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. «СОЛОН-ПРЕСС», Москва, 2003.