

А.В. Фатеев

**Применение ПО CST Microwave Studio
для расчёта микроволновых антенн и
устройств СВЧ**

Учебное пособие

Рекомендовано Сибирским региональным отделением
учебно-методического объединения высших учебных
заведений РФ по образованию в области радиотехники,
электроники, биомедицинской техники и автоматизации
для межвузовского использования в качестве учебного пособия
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки специалистов
«Радиоэлектронные системы и комплексы» – 210601.65
и магистров «Радиотехника» – 210400.68

2014

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники

Фатеев А.В.

**Применение ПО CST Microwave Studio
для расчёта микроволновых антенн и устройств СВЧ**

Учебное пособие

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
специалистов 210601.65 – Радиозлектронные системы и комплексы
и магистров 210400.68 – Радиотехника

2014

УДК 621.3.049.77.029:681.3.06

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент кафедры РЭТЭМ Томского
государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Лоцилов А.Г.

канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой радиотехники
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Саломатов Ю.П.

Фатеев А.В.

Применение ПО CST Microwave Studio для расчёта микроволновых антенн и устройств СВЧ: Учебное пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 121 с.

Излагаются основы работы с системой электродинамического проектирования CST Microwave Studio. Приведены примеры моделирования антенн и устройств СВЧ. Рассмотрены особенности обработки результатов проектирования.

Учебное пособие предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по направлениям подготовки специалистов 210601.65 – Радиоэлектронные системы и комплексы и магистров 210400.68 – Радиотехника, и включает учебные материалы по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны».

© Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2014

© Фатеев А.В., 2014

Введение.....	4
1. Введение в CST Microwave Studio	5
О программе.....	5
Основные действия и настройки для создания САД модели.....	8
Создание объектов	13
Свойства объектов.....	16
Свойства материалов	17
Преобразование объекта.....	19
Привязки объекта	22
Примеры использования привязок.....	23
Использование кривых	28
2. Настройки для электромагнитного расчёта	34
Назначение портов устройства	37
Разбиение сетки.....	41
3. Пример моделирования коаксиального изгиба	44
Запуск CST Microwave Studio	45
Задание множителей размерностей.....	45
Определение основного материала	45
Создание модели объекта.....	46
Установка портов	55
Задание частотного диапазона.....	58
Настройка граничных условий и симметрии	58
Визуализация сетки.....	62
Анализ мод портов	66
Анализ S-параметров	69
Адаптивное разбиение сетки.....	71
Анализ электромагнитного поля на различных частотах	76
Параметризация модели и автоматическая оптимизация	82
4. Пример расчета антенны	98
Литература	119

Введение

В настоящее время многие разработчики антенн и устройств СВЧ используют специализированные системы электродинамического проектирования. В основе работы подобных программных продуктов лежит численное решение уравнений Максвелла в интегральной или дифференциальной форме. Основополагающий метод решения, несомненно, влияет на эффективность и точность, с которыми могут быть смоделированы те или иные высокочастотные компоненты и устройства.

Учебное пособие состоит из четырёх разделов. Первый раздел даёт общее представление и пользовательском интерфейсе программы. Во втором разделе описаны основные инструменты для создания модели устройства и настройках программы. Последующие два раздела посвящены расчёту антенны и коаксиального перехода и приведены возможности постобработки результатов, которые дают наглядное понимание о работе устройства и распространению электромагнитных полей в нем.

Цель учебного пособия – дать студентам основные понятия из области моделирования техники антенн и устройств СВЧ, помочь овладеть основными инструментами расчёта и принципами построения антенных систем. Современный радиоспециалист должен ориентироваться в этих вопросах, должен знать возможности современных систем электродинамического моделирования, а в конкретной ситуации суметь правильно создать модель, рассчитать и спроектировать требуемое устройство.

1. Введение в CST Microwave Studio

О программе

CST Microwave Studio является одним из пакетов программ от CST Studio Suite:

- CST MICROWAVE STUDIO является программой для трёхмерного волноводов и антенн до оптических элементов. Программа позволяет решить задачу несколькими методами и даёт большую точность расчёта. Диапазон, длин волн в котором программа наиболее эффективно работает – от коротковолнового до нанометрового
- CST EM STUDIO представляет инструмент анализа и проектирования статических и низкочастотных структур. Области применения включают в себя соленоиды, трансформаторы, задачи электромагнитной совместимости, генераторы, электромеханические измерительные головки, моторы, датчики и экранирующие конструкции. Имеется возможность анализа электро- и магнитостатических полей, вихревых и поверхностных токов.
- CST PARTICLE STUDIO является пакетом для проектирования и анализа трехмерных электронных пушек, катодных лучевых трубок, магнетронов. Он включает несколько программных продуктов CST STUDIO моделирующих движущие носители зарядов, а также учитывает температурные процессы.
- CST PCB STUDIO – пакет для исследования распространения радио сигналов в печатных платах, в том числе решая задачи электромагнитной совместимости (EMC) и электромагнитных помех (EMI).
- CST CABLE STUDIO предназначена для анализа трассировки, влияний и совместимости связанных линий, включая коаксиальные кабели, одиночные провода, витые пары и сложные совокупности кабелей.
- CST MPHYSICS STUDIO – специализированный пакет для термодинамического и механического моделирования.

- **CST CABLE STUDIO** – специализированный пакет для моделирования электромагнитных эффектов в кабелях, позволяющий оптимизировать вес и размер одиночных проводов, витых пар, а также сложных жгутов с неограниченным числом проводников. Программа позволяет оценивать напряжения в разных точках кабелей, токи через определённые проводники, S-параметры, импедансы, а также взаимные наводки проводников друг на друга.
- **CST BOARDCHECK** – специализированный пакет, позволяющий выполнять импорт проектов печатных плат, выполненных в различных системах проектирования, и выявлять в них возможные проблемы электромагнитной совместимости по набору заданных ограничений.
- **CST DESIGN STUDIO** – это универсальная платформа для управления всем процессом разработки сложной системы, начиная с электрических компонент и заканчивая радиосистемой. Она проводит косимуляцию проекта, рассчитанного всеми пакетами CST Studio.

В основе программы CST Microwave Studio лежит разработанный компанией CST метод аппроксимации для идеальных граничных условий (РВА), удачно дополняющий хорошо зарекомендовавший себя метод определённых интегралов (FI), работающим во временной области. В любом методе, связанном с моделированием конечных элементов, все поверхности разбиваются на небольшие элементы. Если модель СВЧ устройства задана только прямыми плоскостями, то число анализируемых элементов разбиения невелико, и расчет проводится относительно быстро. При использовании в СВЧ устройствах криволинейных поверхностей, для их аппроксимации требуется намного большее количество элементов разбиения, что приводит к значительным временным затратам при анализе. Комбинация методов РВА и FI, предложенная компанией CST, позволила быстро решать задачи моделирования сложных СВЧ устройств с криволинейными поверхностями.

Типичными устройствами, моделируемыми с помощью пакета CST Microwave Studio, являются:

- волноводные и микрополосковые направленные ответвители
- мощности;
- делители и сумматоры мощности;
- волноводные, микрополосковые и диэлектрические фильтры;
- одно- и многослойные микрополосковые структуры;
- различные линии передачи;
- коаксиальные и многовыводные соединители;
- коаксиально-волноводные и коаксиально-полосковые переходы;
- оптические волноводы и коммутаторы;
- различные типы антенн - рупорные, спиральные, планарные.

Основные характеристики пакета CST Microwave Studio.

- Расчёт S-параметров в широком диапазоне частот.
- Мощный встроенный язык написания макросов VBA, поддержка технологии связывания и встраивания объектов (OLE).
- Быстрое и точное решение во временной области, полученное с помощью метода определенных интегралов.
- Значительное увеличение производительности благодаря использованию метода аппроксимации для идеальных граничных условий (РВА).
- Построение анализируемой структуры на базе ACIS.
- Импорт и экспорт структур в форматах SAT, IGET и STL.
- Различные режимы возбуждения структуры с помощью внешних и внутренних портов.
- Расчёт собственных мод портов
- Автоматический расчёт импедансов портов.
- Анимационное отображение полей.
- Отображение полученных результатов по мере выполнения расчета.
- Мощный оптимизатор.

- Расчеты поля антенн в дальней зоне (двух- и трехмерное представление поля, усиление, расчет угловой ширины основного и боковых лепестков диаграммы направленности).

Основные действия и настройки для создания CAD модели

При открытии программы CST Studio Suite (рис. 1), она позволяет выбрать два варианта запуска необходимого пакета:

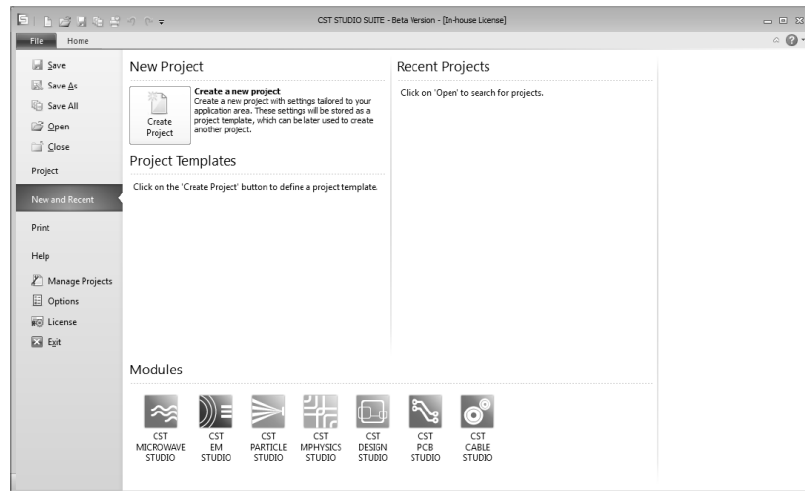


Рисунок 1. Интерфейс программы CST Studio Suite

1. Воспользоваться мастером конфигурации. Для этого необходимо выбрать Create Project (см. рис.2) и, следуя подсказкам, можно задать предустановки и выбрать наиболее подходящий метод расчёта.

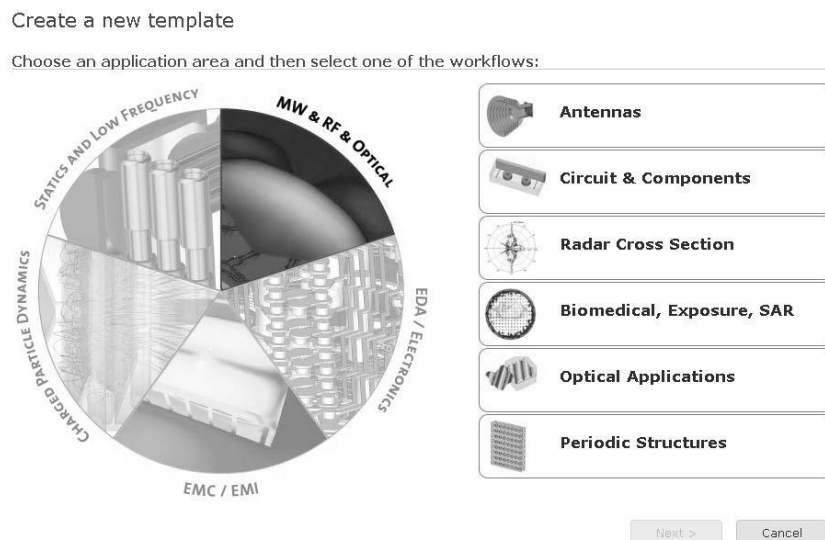


Рисунок 2. Окно мастера конфигурации

2. Либо выбрать модуль CST Microwave Studio.

Основной интерфейс программы состоит из нескольких окон:

1. Navigation Tree – дерево проекта,
2. Ribbon – элементы управления,
3. Drawing Plan – окно отображения CAD модели или результатов расчёта,
4. Parameter list – окно параметров объектов,
5. Messages and progress – окно сообщений.

На рисунке 3 представлено изображение главного окна CST Microwave Studio.

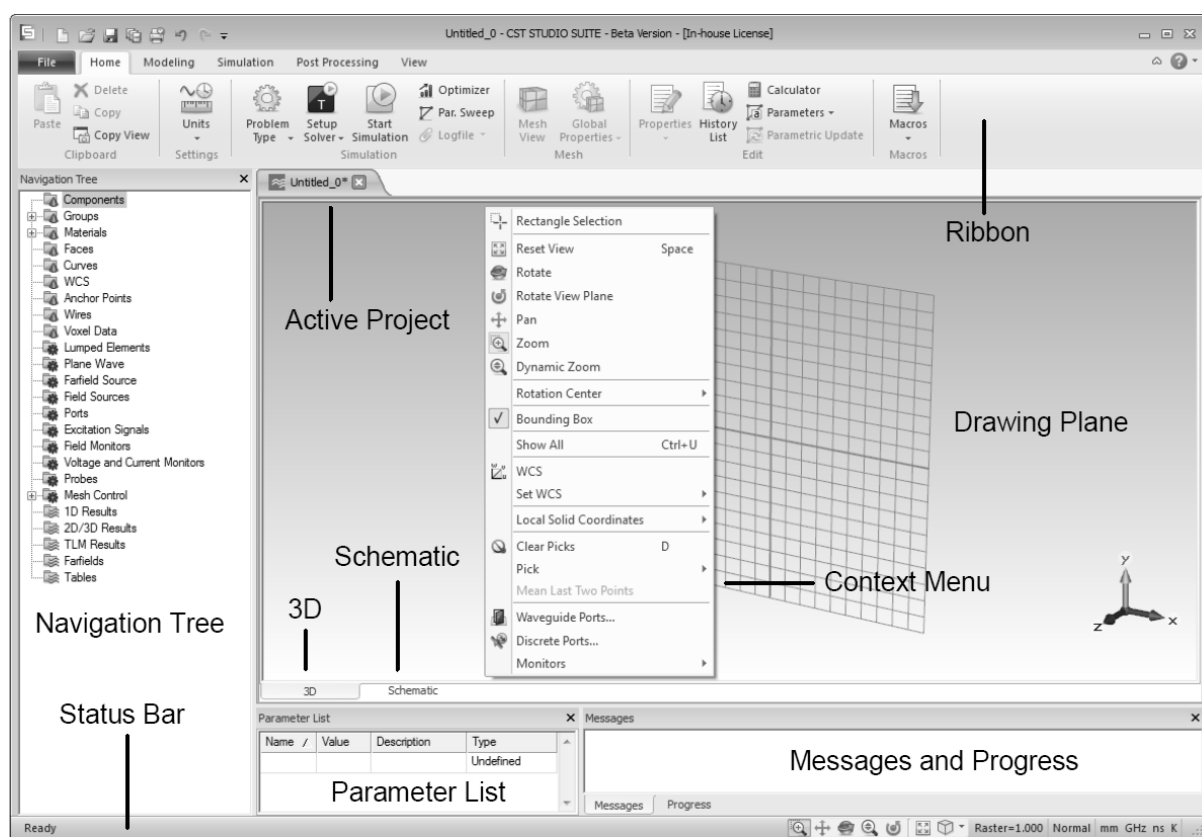


Рисунок 3. Интерфейс программы CST Microwave Studio

Как можно заметить, интерфейс CST Microwave Studio (MWS) не отличается от интерфейсов любых других CAD программ, с помощью которых можно создавать 3D-модели объектов.

Элементы управления разбиты на тематические вкладки (рис. 4), с помощью которых можно последовательно управлять всем интерфейсом программы.

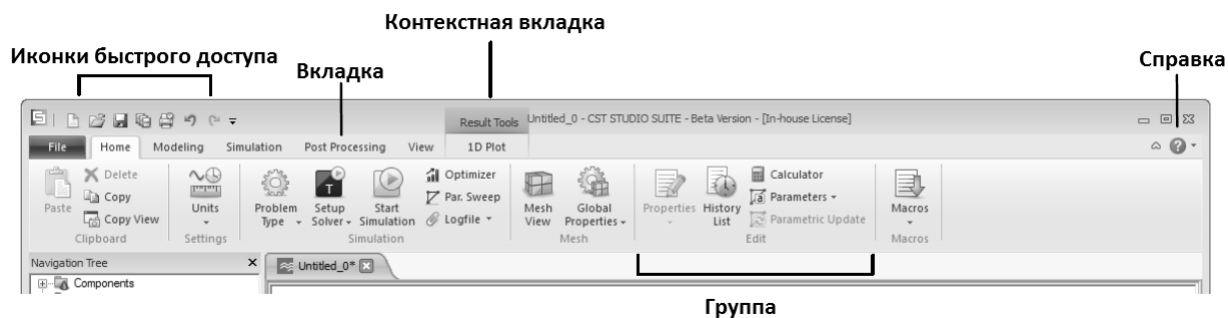


Рисунок 4. Элементы управления

Вкладки выстроены в логическую последовательность работы с проектом: базовые (Home), создание объектов (Modeling), настройки для расчёта (Simulation), постобработка результатов расчёта (Post Processing), настройка отображения объектов (View).

Начало проектирования в MWS связано с базовыми настройками вкладки Home. Здесь необходимо установить множители размерностей (Units) для частоты, длины и времени. Например, это гигагерцы, миллиметры и наносекунды, или килогерцы, сантиметры, миллисекунды. Далее выбрать метод расчёта (Setup Solver) [1]:

- Transient Solver, основанный на методе конечных разностей во временной области (FDTD), может провести расчёт проектируемого устройства в широком диапазоне частот после расчёта единственной переходной характеристики (в отличие от частотного метода, который требует анализ во многих частотных точках). Этот метод очень эффективен для решения многих СВЧ устройств, переходов, линий передачи, антенн (рис. 5) и т.д. Очень важная особенность решения во временной области – пропорциональная зависимость требуемых вычислительных ресурсов от размеров структуры. Решение во временной области времени может стать неэффективным из-за медленно спадающих во времени сигналов – откликов или при решении низкочастотных задач, когда размер структуры намного меньше длины волны.



Рисунок 5. Пример антенной решётки

- Frequency Solver, основанный на методе конечных разностей (FEM), позволяет проводить расчёты резонансных устройств (рис. 6), периодических сред, сред с потерями, объектов со сложной формой поверхности, невзаимных устройств (рис. 6) и т.д.

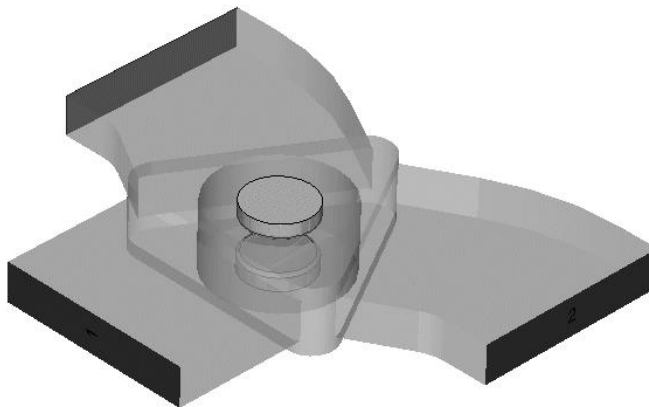


Рисунок 6. Модель волноводного циркулятора

- Eigenmode Solver основан на двух методах: 1. Расширенного метода подпространств Крылова (ASK), позволяющий наиболее быстро находить собственные моды резонансных экранированных структур без потерь; 2. Метод Якоби-Девидсона (JDM), позволяющий находить собственные моды

и собственные добротности резонансных экранированных структур с потерями (рис. 7).

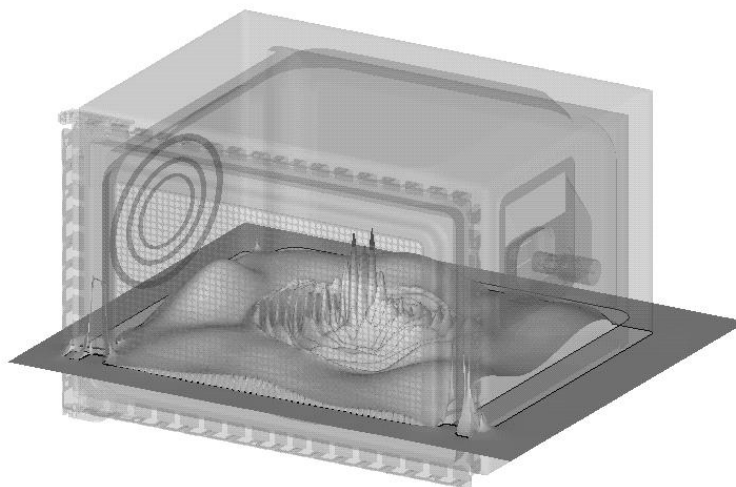


Рисунок 7. Модель микроволновой печи с распределением электрического поля на резонансной частоте.

- Integral Equation Solver, основанный на методе интегральных уравнений и используется для решения задач: оптимизации эффективной поверхности рассеивания (ЭПР) летательных аппаратов и кораблей, решения проблем электромагнитной совместимости радиотехнических систем с учётом влияния корпуса аппарата на эффективность связи. Оба этих направления характеризуются электрическими размерами аппаратов, которые, как правило, составляют сотни длин волн. Это позволяет выполнить электродинамический анализ трёхмерных структур больших электрических размеров (рис. 8).



Рисунок 8. Модель автомобиля с диаграммой направленности КВ антенны
Следующим шагом проектирования в MWS, является создание объектов устройства, используя вкладку Modeling.

Создание объектов

Модель устройства в MWS можно создать несколькими способами:

1. Импортируя готовую модель из сторонней CAD программы (например AutoCAD), используя команду *Import*. Список поддерживаемых форматов приведён на рис. 9

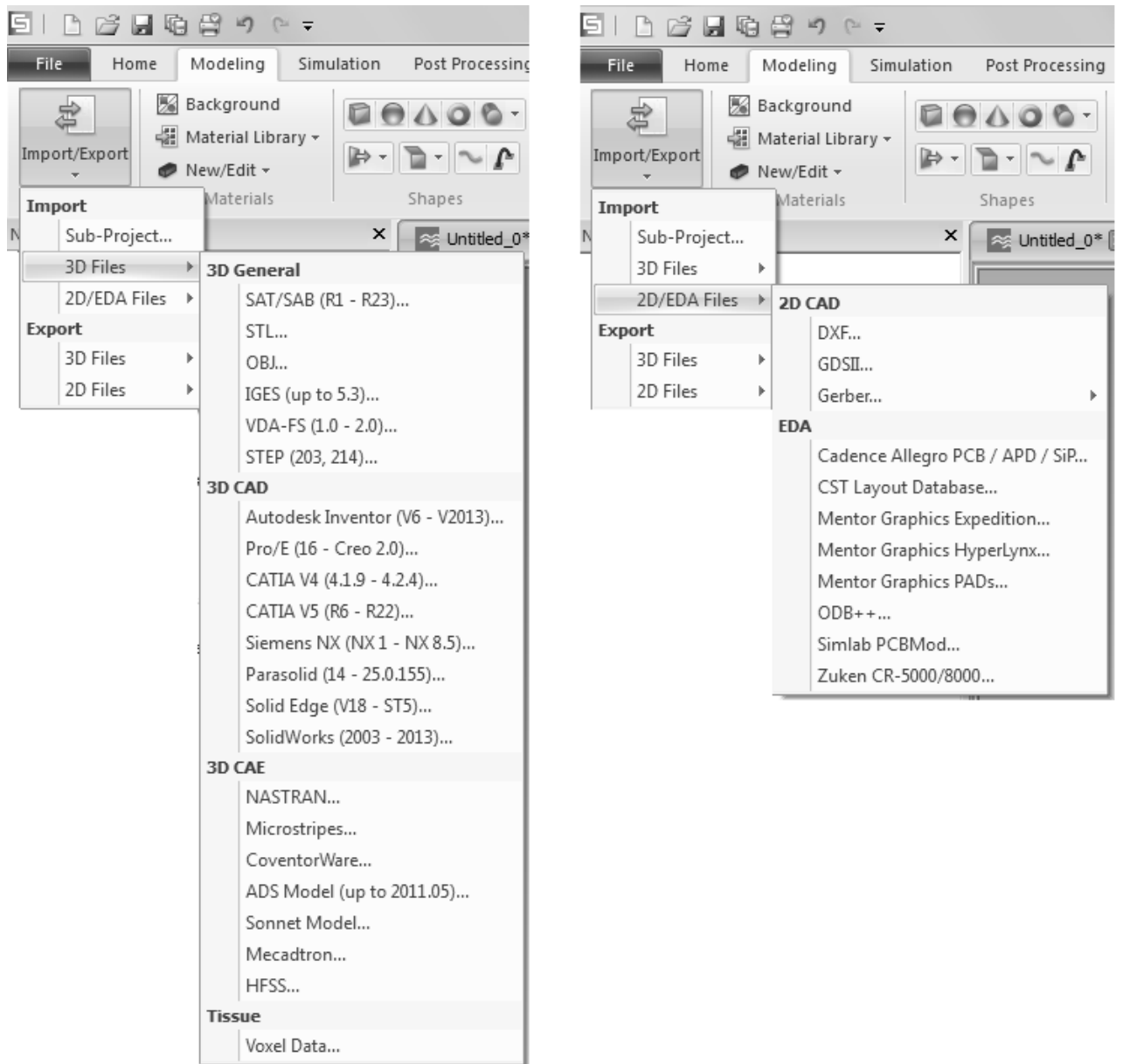


Рисунок 9. Импорт моделей

2. Получить составную модель из комбинации элементов стандартной формы, представленных на рис. 10.

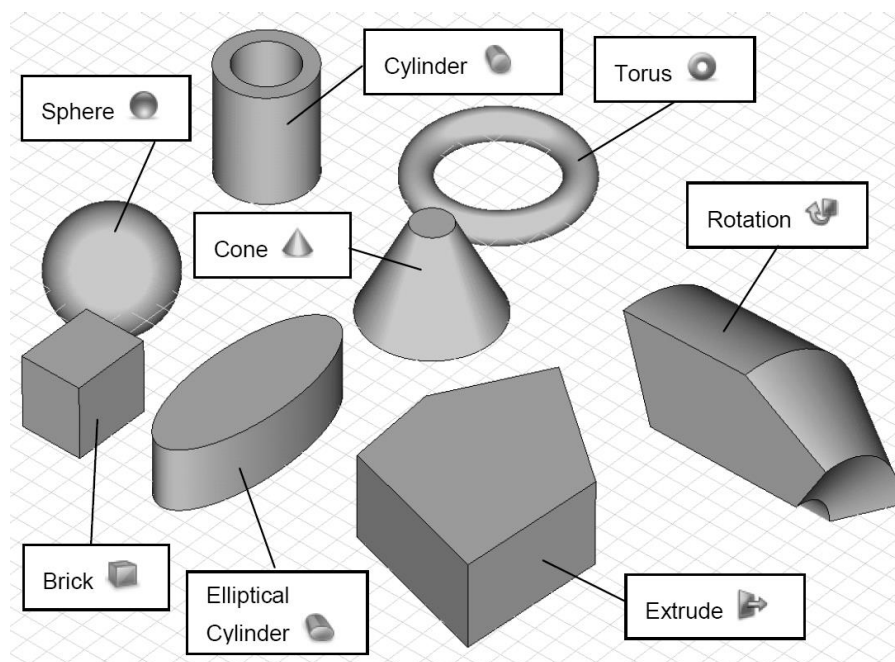


Рисунок 10. Элементы стандартной формы

3. При необходимости, можно создать сложные объекты криволинейной формы на основе описания аналитической функции. К примеру, экспоненциальный волноводный переход, или параболическая антенна. Для этого используется группа элементов *Curves*.

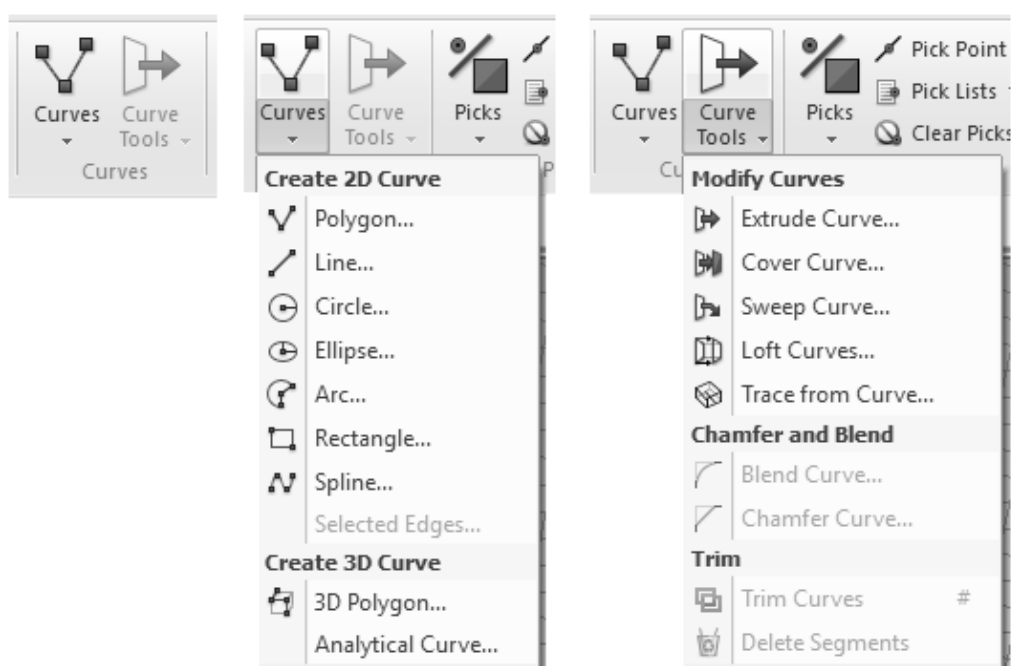


Рисунок 11. Элементы группы *Curves*

Свойства объектов

Создание объекта осуществляется путём выбора формы и вызова его свойств (вызывается нажатием кнопки *Esc* на клавиатуре). После этого откроется следующее диалоговое окно (рис. 12):

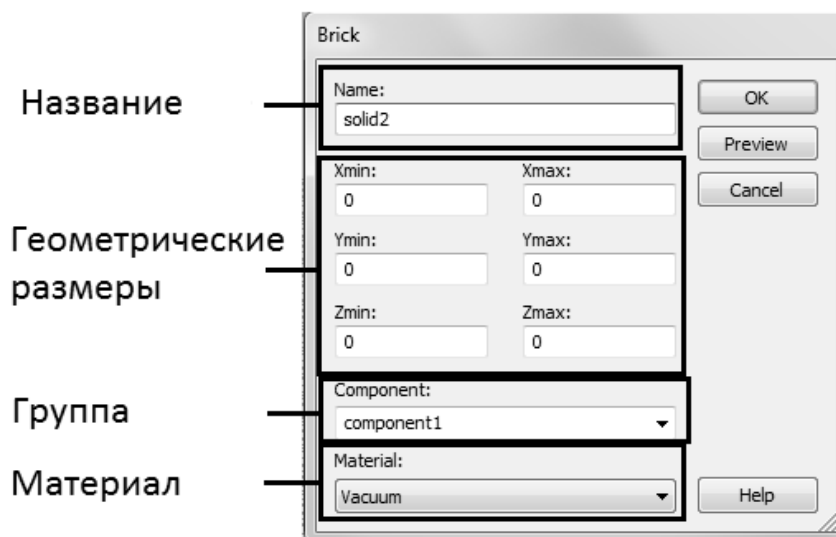


Рисунок 12. Окно свойств объекта

В этом окне задаётся название объекта. По умолчанию присваиваются названия *solid1*, *solid2* и так далее. Затем задаются геометрические размеры с учётом множителя размерности длины, который был задан во вкладке *Home > Units*, принадлежность группе объектов. Принадлежность объектов к группе, позволяет структурировать сложную конструкцию и оптимизировать время работы с проектом. В заключение, необходимо задать из какого материала будет выполнен объект. По умолчанию присваивается материал *Vacuum*, с параметрами относительной диэлектрической и магнитной проницаемостей равными 1. В падающем меню можно выбрать материал *PEC* – идеальный проводник, - загрузить из библиотеки материалов или создать материал. Также присутствует кнопки предпросмотра, справки, отмены операции и подтверждения создания операции.

Для изменения названия или материала объекта необходимо выделить его, а затем выполнить команду *Edit (правой кнопкой мыши) - Rename* или *Change Material*.

Свойства материалов

При выборе команды создание нового материала (*New material*), появляется новое окно, где можно задать его имя, тип материала, цвет и прозрачность (рис.13). Дополнительно, кроме электрических свойств, можно задать температурные, механические и физические свойства материала.

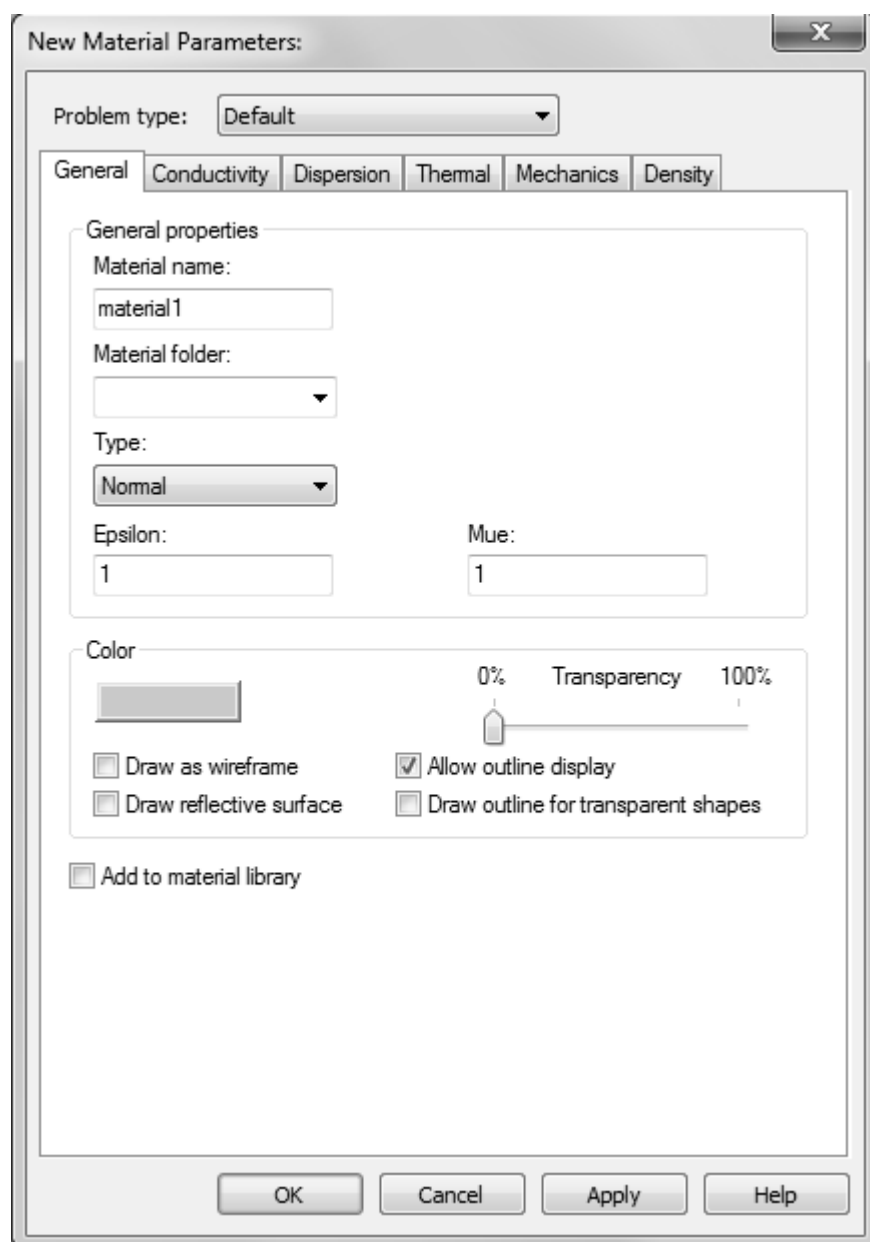


Рисунок 13. Окно свойств материала

Настройки материала разделены на типы:

1. Type PEC (Perfect electrically conducting): идеальный проводник с возможностью задания свойств покрытия идеального проводника.
2. Type Normal: Изотропный материал, для которого задаются относительные магнитные и диэлектрические проницаемости. Дополнительно можно задать свойства проводимости и дисперсии.
3. Type Anisotropic: Анизотропный материал с аналогичными Type Normal настройками
4. Type Lossy metal: Металл с потерями, для которого задаются электрическая проводимость и магнитная проницаемость материала. Дополнительно можно указать покрытие материала. Рекомендуется использовать такой тип материала на высоких частотах для учёта «скин-эффекта».
5. Type Nonlinear: Тип материала с нелинейной относительной магнитной проницаемостью, определяемой таблично заданной зависимостью напряжённости магнитной индукции от магнитного поля. Рекомендуется использовать такой тип материала на низких частотах.
6. Type Corrugated wall: Гофрированный материал применяется в случае сокращения детализации поверхности создаваемого объекта. В большинстве случаев, точное решение электромагнитного поля в области гофрирования не продляет интереса, тогда достаточно заменить гофрированную конструкцию объекта на однородную с советующим материалом. При этом можно учесть потери в металле на гофрированной поверхности.
7. Type Ohmic sheet: Тип материала, описывающий поверхностное сопротивление. Здесь можно задавать как активную, так и реактивную части поверхностного сопротивления с размерностью [Ом/квadrat].
8. Type Surface impedance (table): Табличное задание зависимости активного и реактивного поверхностного сопротивления от частоты.

9. Type Thin panel: Листовой материал, состоящий из одного или нескольких слоёв материала, и задаётся указанием толщины и материала каждого составляющего слоя. Материалы слоёв могут быть дисперсионные и иметь высокую проводимость.
10. Type Wire mesh: Представляет собой сетку из тонкой проволоки, которая используется для экранирования.
11. Type Shielded cable: Экранирующий материал в виде оплётки коаксиального кабеля.
12. Type Temp. dependent: Аналогичен типу *Normal* с дополнительными зависимостями по температуре.

Преобразование объекта

В случаях, когда модель имеет симметрию, или состоит из подобных себе объектов можно упростить построение, воспользовавшись функцией *Transform*. Для этого необходимо выделить объект и нажать правой кнопкой мыши и выбрать пункт *Transform*.

В появившемся окне (рис. 14) можно выбрать один из видов преобразования:

- *Translate*: Смещение объекта в заданном направлении;
- *Scale* (масштабирование). Это преобразование даёт возможность изменять масштаб объектов вдоль осей координат. Допускается задавать разные коэффициенты масштабирования для разных осей.
- *Rotate* (вращение). Данное преобразование позволяет поворачивать фигуры вокруг осей координат на заданный угол. Здесь имеется возможность задавать центр вращения в специальном поле *Origin*. Центр вращения может быть определён автоматически как геометрический центр фигуры или задан в виде точки с конкретными координатами. Угол поворота относительно конкретной оси вращения задаётся в соответствующем данной оси поле. Например, если задать угол поворота 45 градусов для оси *Y* и 0 градусов для осей *X* и *Z*, то система повернёт объект на 45 градусов только вокруг оси *Y*.

- *Mirror* (зеркальное отображение). Это преобразование позволяет зеркально отображать фигуру относительно заданной плоскости. Точка на плоскости зеркального отображения задаётся в поле *Origin*, вектор нормали плоскости задается в поле *Mirror plane normal*.

Для любого из этих преобразований имеется возможность сохранить исходный объект, для чего необходимо включить опцию *Copy*. Кроме того, в поле *Repetition factor* можно задать число повторений указанного преобразования. Таким образом, при включённой опции *Copy* и определённом числе повторений, каждый раз будет создаваться новый объект.

Имя нового объекта или объектов будет сохраняться как имя исходного объекта с добавкой «_X», где X – порядковый номер преобразованного нового объекта. Если включить опцию *Unite*, то все преобразованные объекты, включая исходный, могут объединиться в один объект в дереве проекта.

Также можно присвоить преобразованному объекту другой материал или переместить его в другую группу объектов дерева проекта.

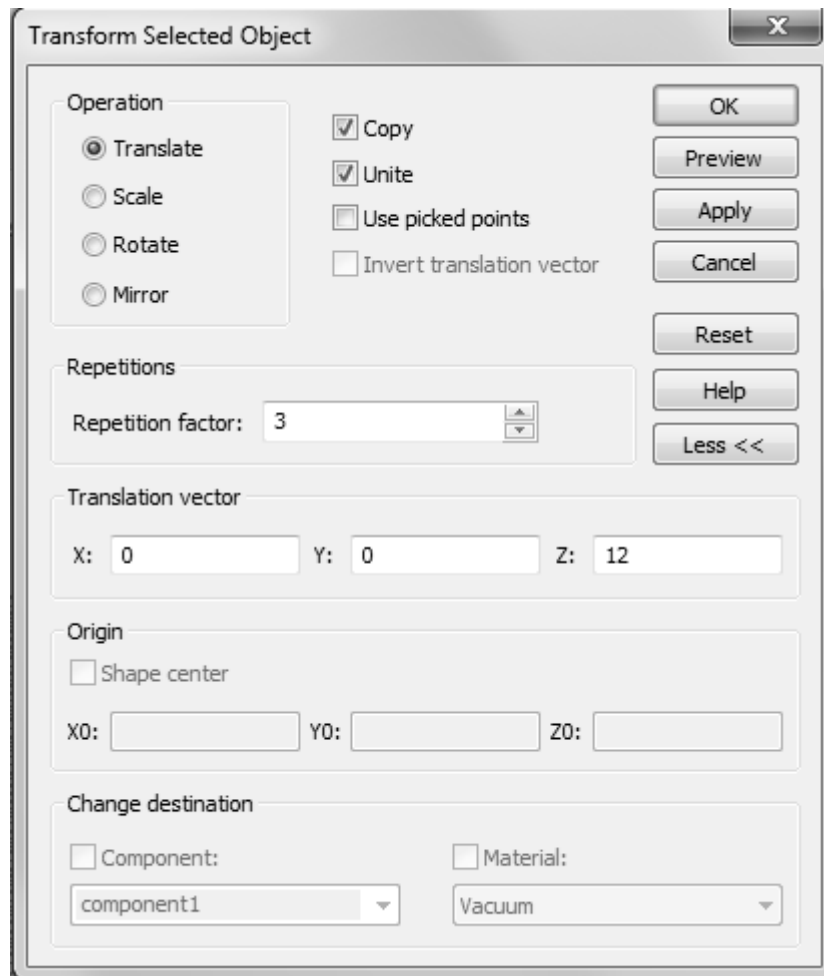


Рисунок 14. Окно преобразования объекта.

Привязки объекта

Очень часто в процессе построения объектов требуется привязка к какой-либо точке, ребра или грани соседних объектов. Для этого используется команда из группы *Picks* вкладки *Modeling*, показанных на рис. 15.

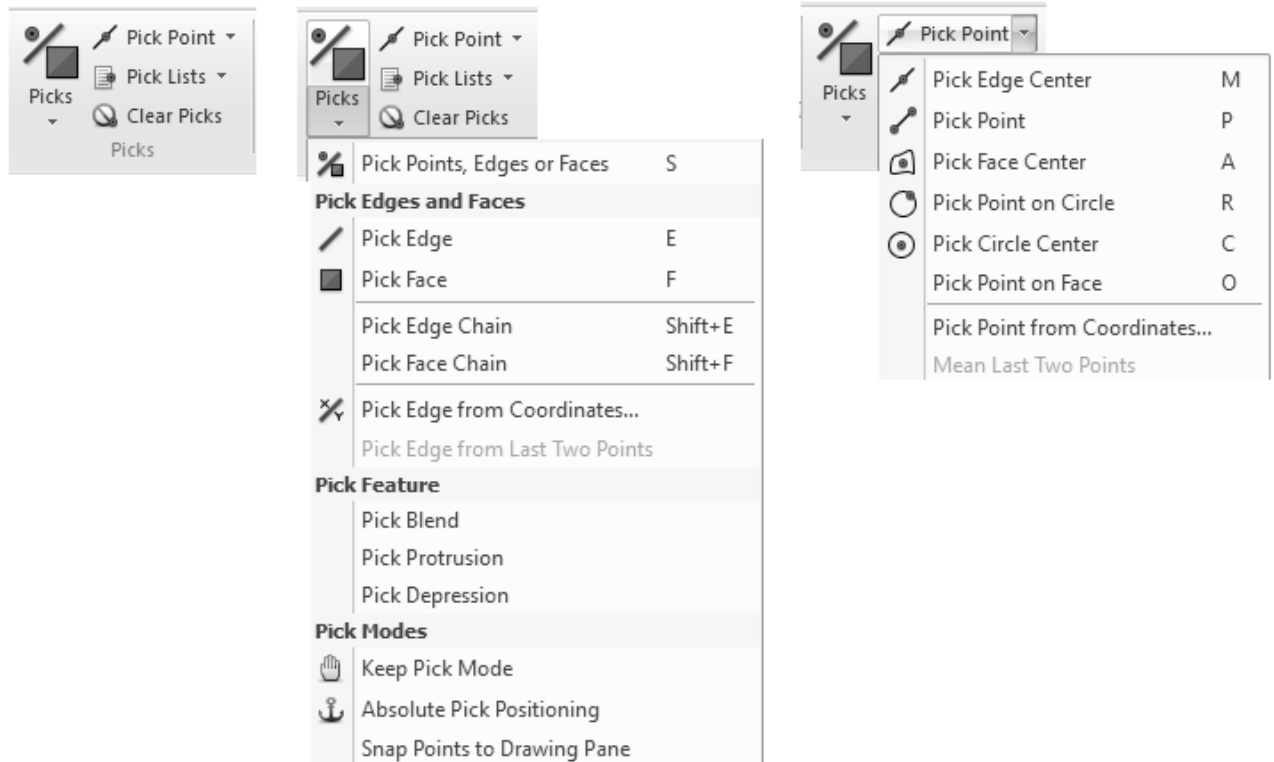


Рисунок 15. Меню *Picks*

- *Pick edge end points (P)*: Привязка крайним точкам ребра. Дополнительно при выборе двух точек в правом нижнем углу окна отображения модели появляются координаты этих точек, а также рассчитывается расстояние между ними;

- *Pick edge mid points (M)*: Привязка к середине ребра;

- *Pick circle centers (C)*: Привязка к центру окружности. Окружность не обязательно должна быть неразрывной;

- *Pick points on circles (R)*: Привязка к произвольной точке на окружности. Эта операция полезна при задании радиуса окружности объекта при его интерактивном создании;

- *Pick face centers (A)*: Привязка к центральной точке выбранной грани;

- *Pick edges (E)*: Привязка к ребру объекта;
- *Pick faces (F)*: Привязка к плоскости грани объекта;
- *Pick edge chain (Shift+E)*: Привязка к выбранному ребру, и ребру, прилегающему к нему. Если выбранное ребро будет являться границей раздела двух граней, то необходимо выбрать нужную грань;
- *Pick face chain (Shift+F)*: Эта функция автоматически выделит указанную грань, и остальные, прилежащие к ней.

Ранее выбранные точки, ребра или грани могут быть отменены выбором команды *Clear picks* или клавишей *D*.

Примеры использования привязок

Одно из самых распространённых действий с использованием привязок – это закругление и сопряжение элементов рёбер. Рассмотрим на примере модели параллелепипеда (рис.16). Для этого установим привязку к его рёбрам командой *Pick edge chain*.

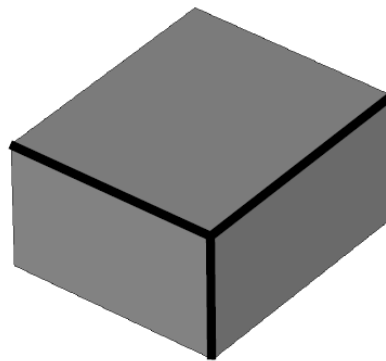


Рисунок 16. Выделение рёбер объекта

В группе *Tools* из вкладки *Modeling* выберем одну из команд меню *Blend* (рис. 17).

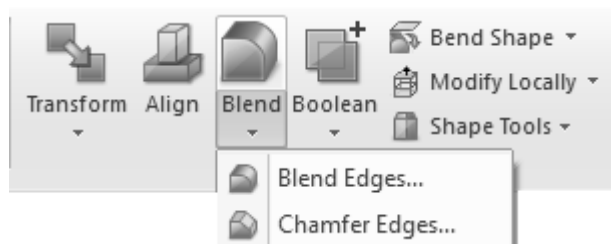
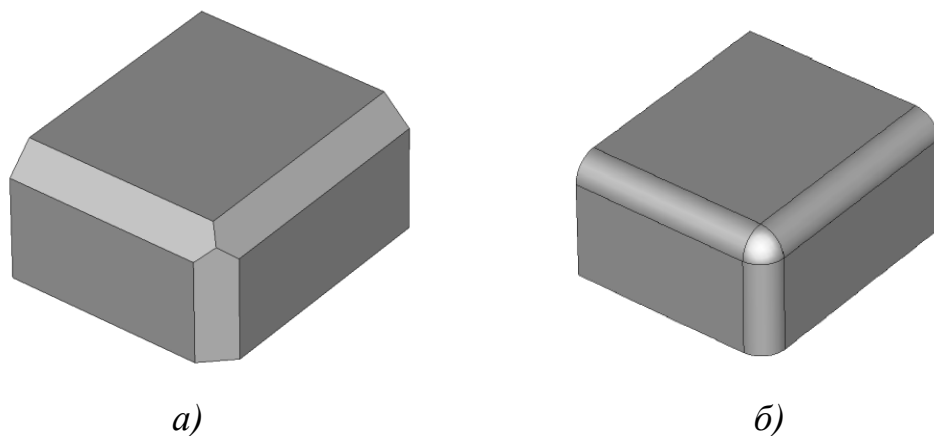


Рисунок 17. Меню *Blend*

Команда *Chamfer Edges*, позволяет добавить фаски объекту с заданным размером (рис.18 а). Команда *Blend edges*, позволяет добавить скругление с заданным радиусом (рис.18 б). Пример выполнения описанных действий приведён на рис. 18.



а) Снятие фаски, б) Скругление

Рисунок 18. Выполнение операций меню *Blend*

Использование привязки к граням объекта позволяет выполнять такие операции как выдавливание, создание плавных переходов и полых объектов. Создадим цилиндр, и выберем его переднюю грань:

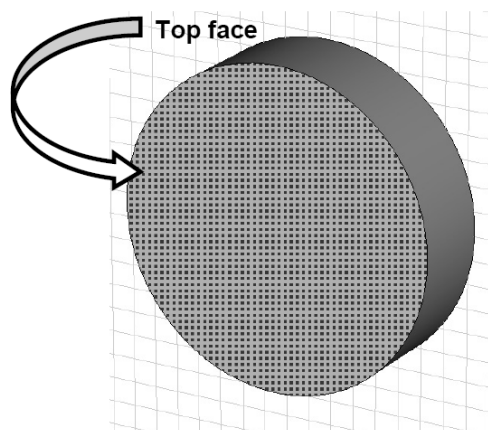
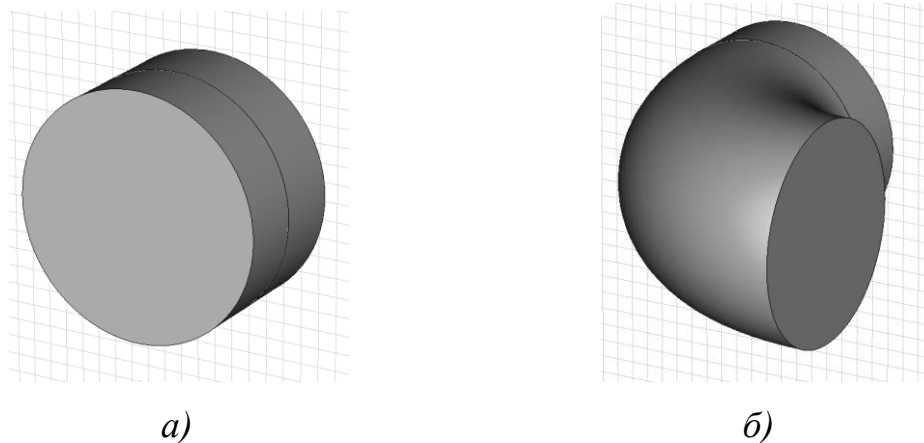


Рисунок 19. Выделение грани объекта

В группе *Shapes* из вкладки *Modeling* выберем одну из команд меню *Extrusions* (рис. 20).

Рисунок 20. Меню *Extrusions*

Команда *Extrude*, позволяет выполнить операцию выдавливания нового объекта вдоль нормали выделенной грани на заданную высоту (рис.21 *a*). Команда *Rotate* позволяет выдавить объект из выделенной грани вдоль сектора окружности, для которой потребуется дополнительно задать ось вращения. Осью вращения может быть линейное ребро объекта или задать в виде координат двух точек. Результат выполнения команды *Rotate* представлен на рис. 21 б.



a) Выдавливание вдоль нормали, *б*) Выдавливание вдоль сектора окружности

Рисунок 21. Выполнение операций меню *Extrusions*

Для создания плавного перехода между двумя объектами создадим два объекта разных размеров и выделим у их смежные грани, как показано на рис.22.

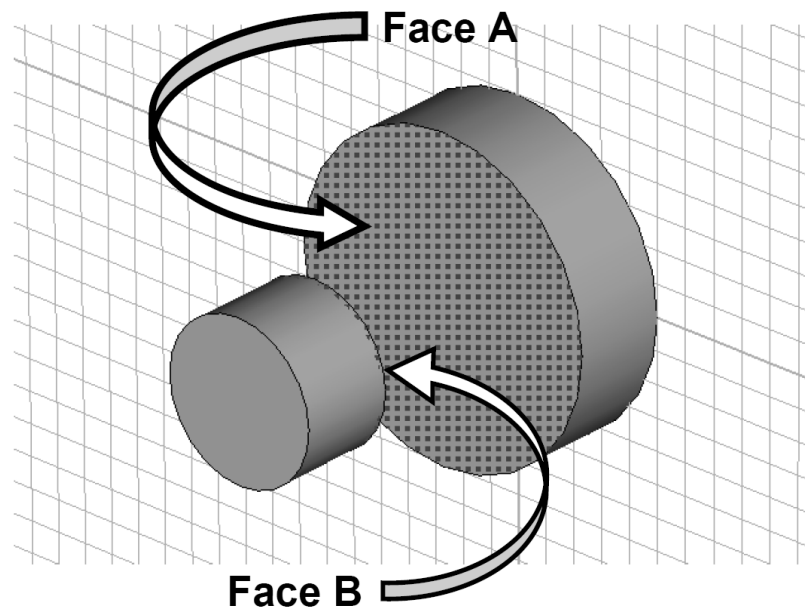


Рисунок 22. Выделение граней у двух объектов

Команда *Loft* позволяет выполнить плавный переход от одной выделенной грани к другой. Используя параметр *Smoothness* в окне настроек команды *Loft* можно выбрать наиболее подходящую форму перехода.

В результате модель должна быть похожа на изображение, представленное на рис. 23.

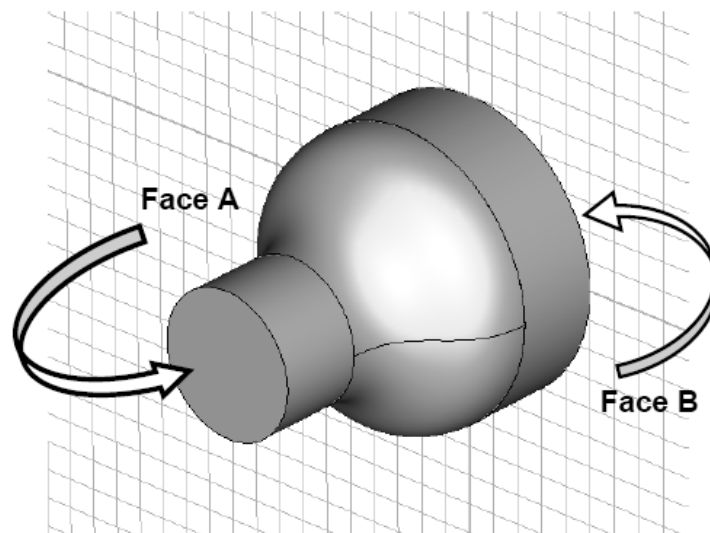


Рисунок 23. Плавный переход между двумя объектами

Совместим все три объекта в один, выделяя последовательно каждую форму при нажатой клавише *Ctrl*, и выполняя в заключении команду *Add* из меню

Boolean. С помощью команды *Shed solid or thicken sheet tool* (рис. 24) можно на основе выделенного объекта создать полый объект с заданной толщиной стенки как показано на рис. 25.

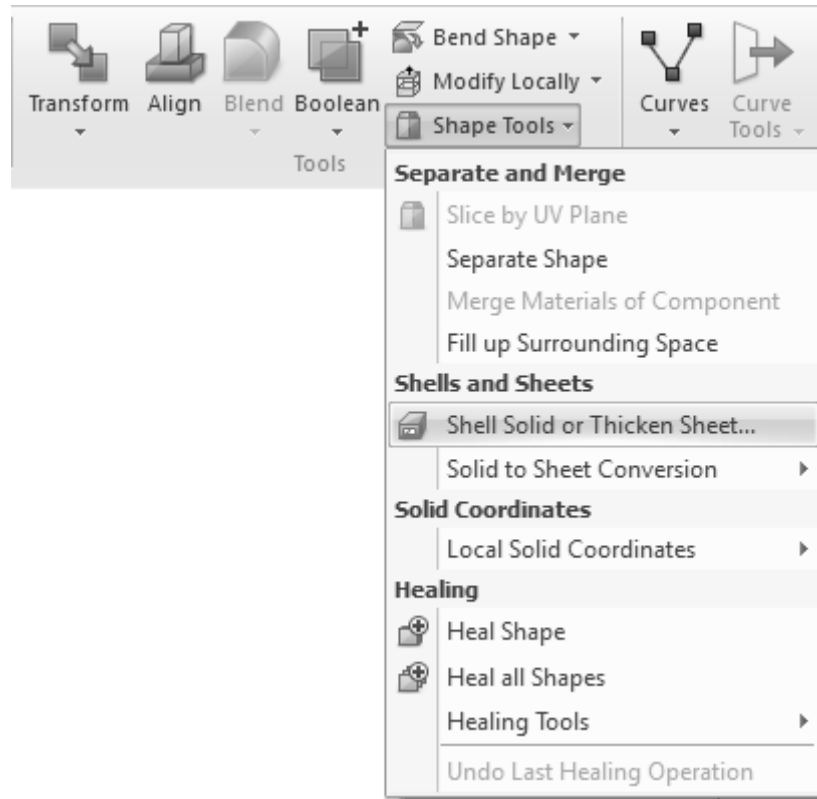


Рисунок 24. Меню *Shape tools*



Рисунок 25. Полый объект

Полученная в итоге преобразований форма объекта может быть представлена как согласованный переход между двумя волноводами круглого сечения, или антенна, возбуждаемая круглым волноводом.

Использование кривых

В случаях, когда необходимо создать более сложную форму объекта, например спираль или изогнутый по определённом математическому закону проводник в пространстве используется инструмент *Curves* (кривые). Он находится в группе *Curves* вкладки *Modeling* (рис. 26).

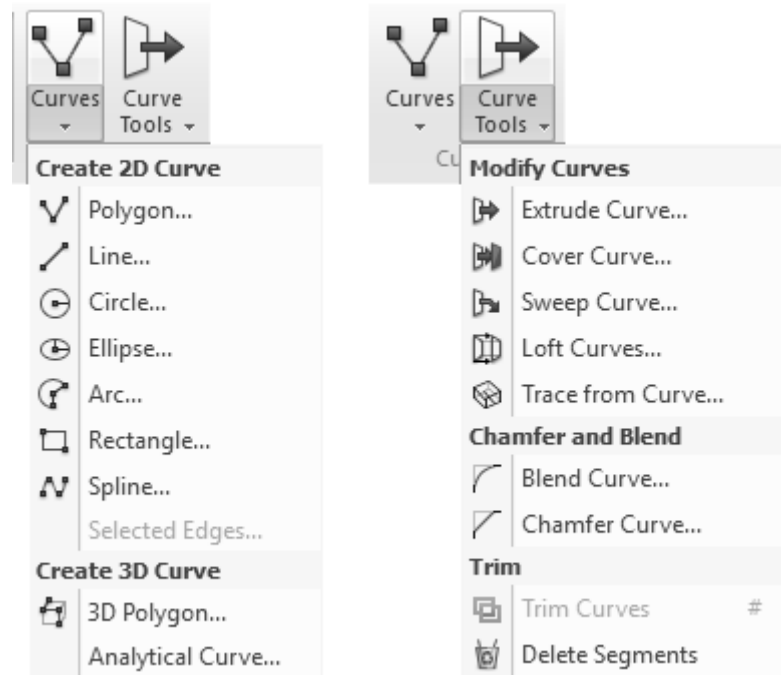


Рисунок 26. Меню *Curves*

В качестве примера создадим объект в виде спирали. Для этого выберем команду *Analytical Curve...*, далее заполним поля как показано на рис. 27.

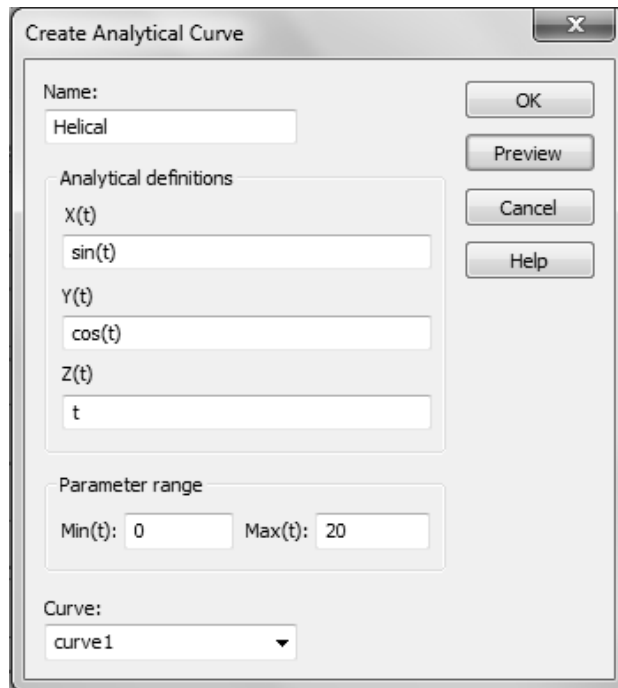


Рисунок 27. Окно создания контура на основе аналитических формул

После подтверждения операции в окне отображения объектов появится линия в форме спирали. Для получения проводника конечного диаметра и заданными свойствами материала, необходимо создать у основания спирали вспомогательный контур окружности заданного диаметра с помощью команды *Circle* меню *Curves* как показано на рис. 28.

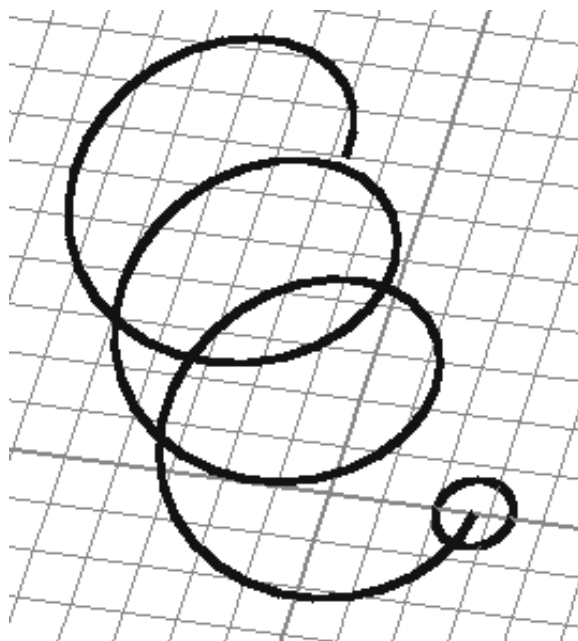


Рисунок 28. Контур окружности и спирали

Команда *Sweep Curve* меню *Curve Tools* позволяет создать объект, выдавив контур одной кривой вдоль другой. Для этого, после вызова команды *Sweep Curve*, необходимо выбрать контур окружности, которая будет являться контуром выдавливания, а затем, выбрать контур спирали, которая будет являться осью, вдоль которой будет проводиться операция выдавливания. После выбора контуров появится окно свойств нового объекта, в котором необходимо выбрать название и материал, как показано на рис. 29.

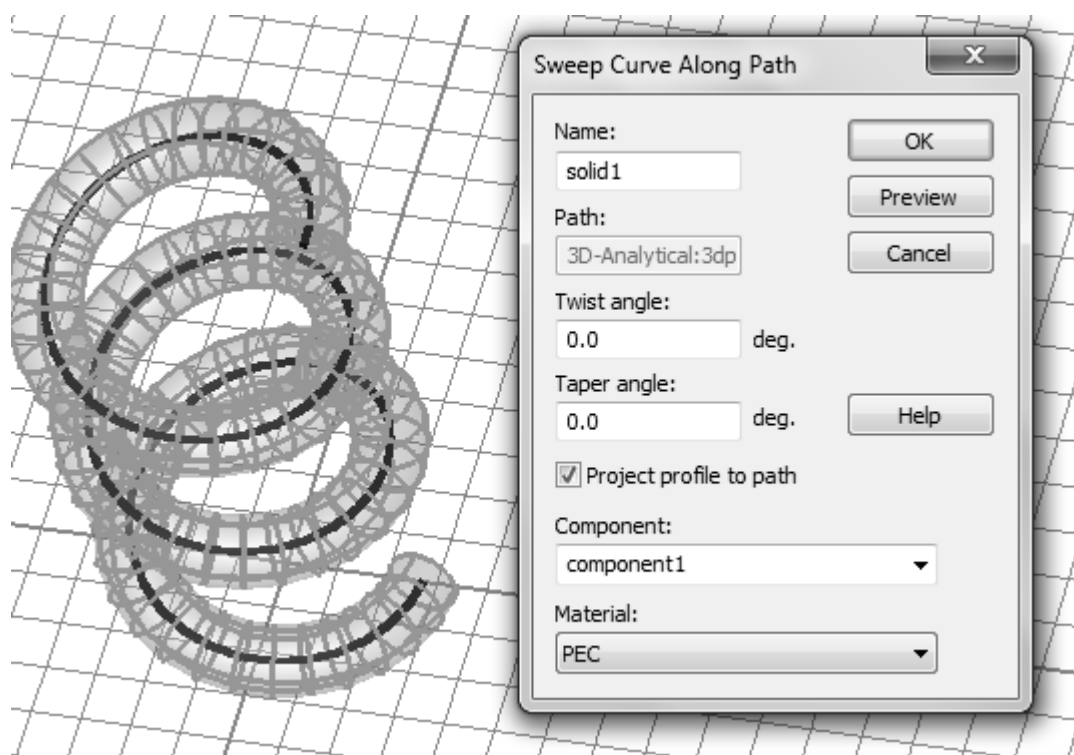


Рисунок 29. Окно создания проводника в форме спирали

В итоге создан объект проводника в форме спирали, который может быть использован для моделирования спиральной антенны (рис. 30).

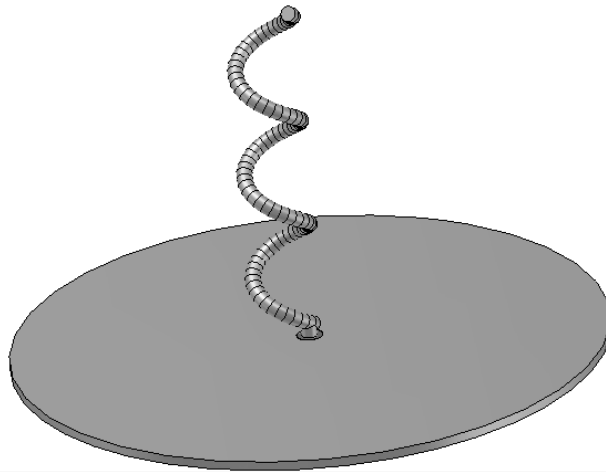


Рисунок 30. Модель спиральной антенны.

Во втором примере создадим плотский проводник для микрополосковой линии передачи. Для этого необходимо создать необходимую кривую с помощью инструментов меню *Curve*. На рис. 31 приведён пример такой кривой.

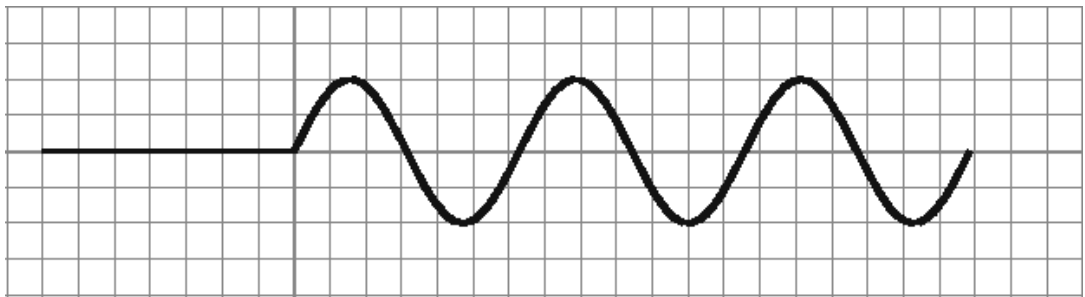


Рисунок 31. Пример кривой

Команда *Trace from Curve* меню *Curve Tools* позволяет создавать плотский объект на основе заданного контура (рис. 32).

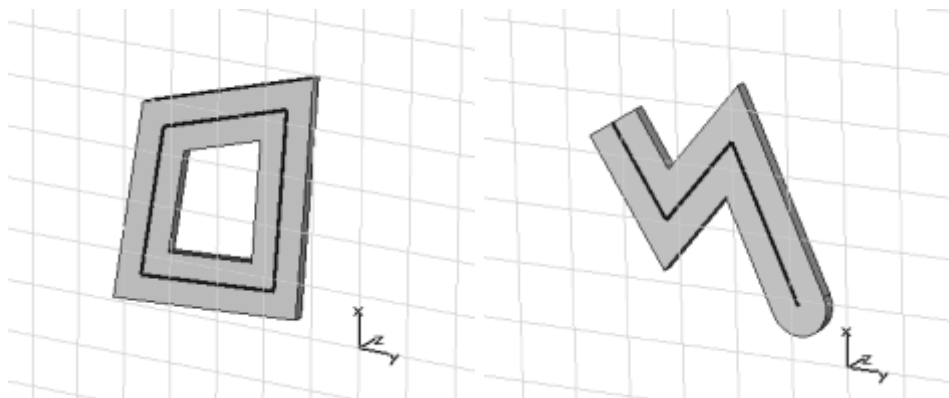


Рисунок 32. Замкнутый и разомкнутый контура и объекты на их основе

Для этого, после вызова команды *Trace from Curve*, необходимо выбрать созданную кривую, затем появится окно свойств нового объекта, в котором необходимо выбрать его название (*Name*), толщину вдоль оси *Z Thickness* (если задать отрицательное значение, то выдавливание будет совершено в обратном направлении оси *Z*), ширину (*Width*) и материал (*Material*), как показано на рис. 33. Так же в начало или окончание можно скруглить, выбрав соответствующую ячейку *Start* или *End*.

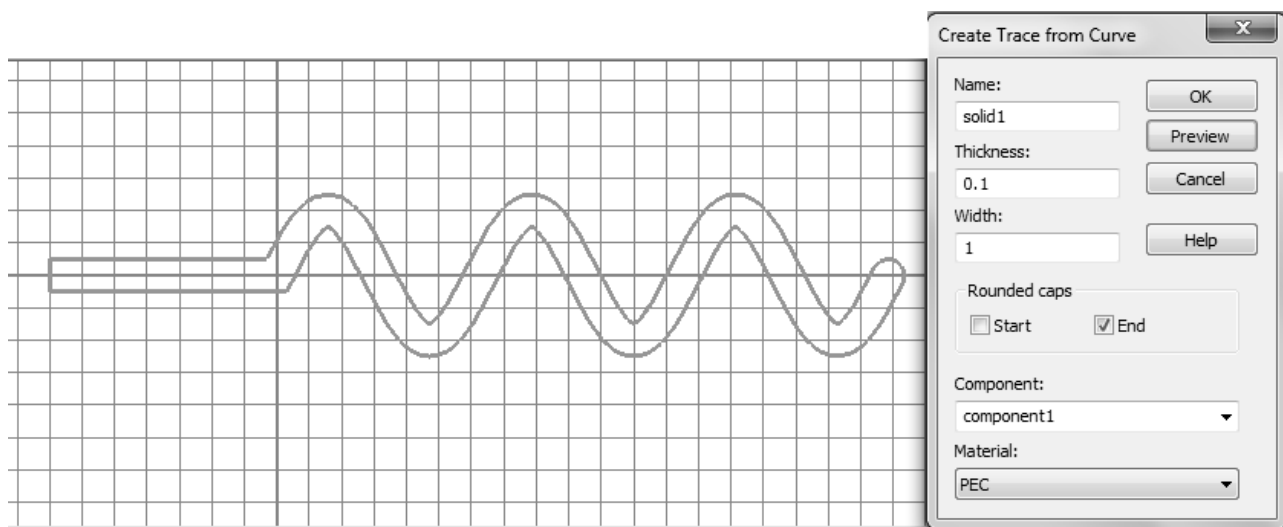


Рисунок 33. Окно свойств нового объекта.

В итоге создан объект плотского проводника на основе заданного контура, который может быть использован для моделирования микрополосковой антенны (рис. 34).

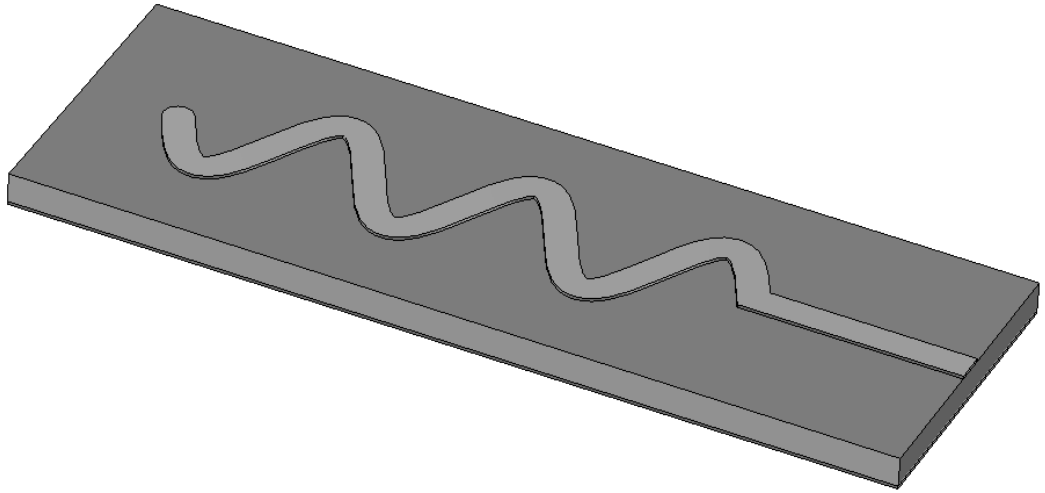


Рисунок 34. Модель микрополосковой антенны

2. Настройки для электромагнитного расчёта

Настройки и запуск электродинамического расчёта модели устройства, состоящего из созданных или подгруженных объектов, проводится во вкладке *Simulation*.

Первая группа параметров *Settings*. Последовательно даёт возможность выставить настройки для расчёта:

- *Frequency* – задание частотного диапазона, в котором будет проводиться расчёт. От выбора диапазона частот зависит время расчёта. При использовании линий передачи с дисперсией, рекомендуется задавать нижнюю граничную частоту больше или равной критической частоте волны основного типа.
- *Background* – задание типа материала, который будет заполнять всё окружающее пространство, а также незаполненные объектами пространства внутри модели (рис. 35). Для численного решения интегрального метода расчёта распределения электромагнитного поля внутри модели, вся модель ограничивается описанным прямоугольным параллелепипедом (рис. 36), в котором проводится расчёт.

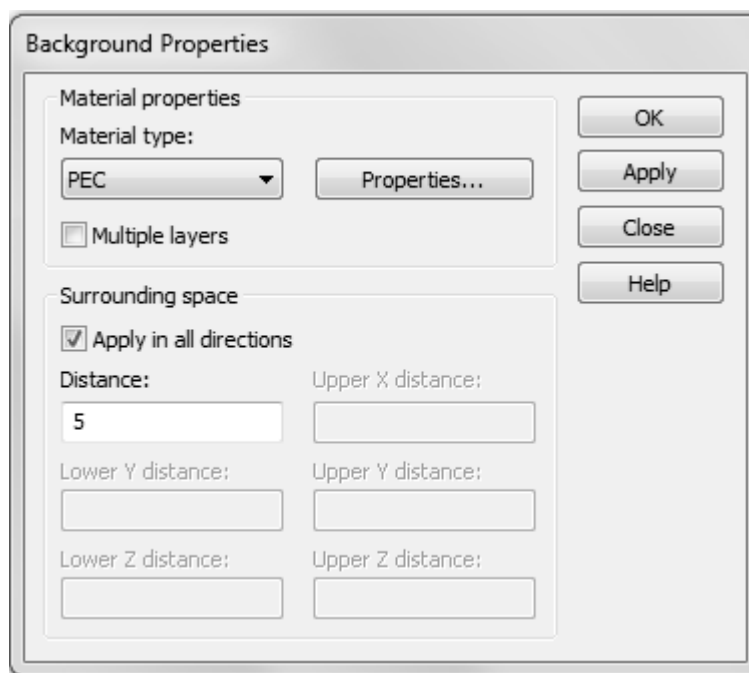


Рисунок 35. Окно настроек *Background*

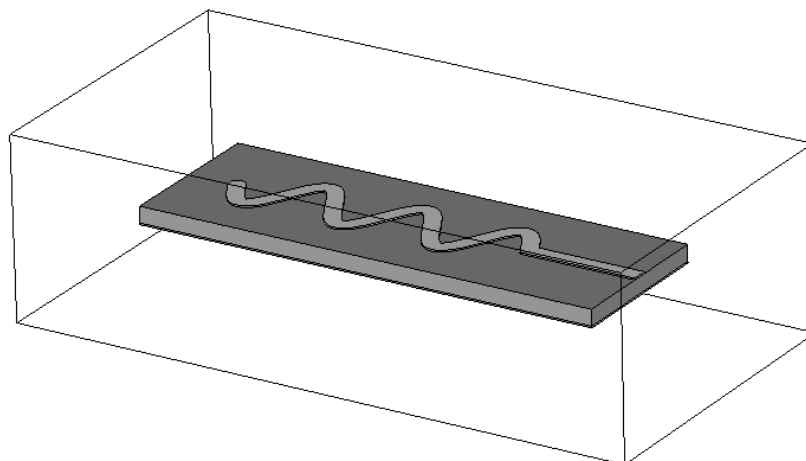


Рисунок 36. Границы моделирования устройства

Из прилагаемых на выбор типов материалов можно выбрать однородные материалы, такие как: идеальный проводник, металл с потерями, магнито-диэлектрик или температурнозависимый. Кроме этого есть возможность задать слоистую неоднородную среду, например, для моделирования работы устройства внутри человека, где есть слой мышц, жира, кожи и т.д. дополнительно можно задать увеличение размеров границ моделирования по каждому направлению в поле *Surrounding space*.

Рекомендации настроек проекта для экранированных устройств: следует создавать модель без экранирующего материала, т.к. в дальнейшем в настройках можно назначить, что вокруг модели будет идеальный проводник. Например, для коаксиального кабеля достаточно создать объекты центрального проводника и изолятора, а внешняя оплётка будет представлять собой окружающий материал *PEC*.

Рекомендации настроек проекта для излучающих устройств: следует выбирать тип материала *Normal*, таким образом все незаполненные места в модели будут заполняться средой с относительными магнитной и диэлектрической проницаемостями равными единице.

По умолчанию, используется материал *PEC*.

- Boundaries – задание граничных условий моделирования (рис.37).

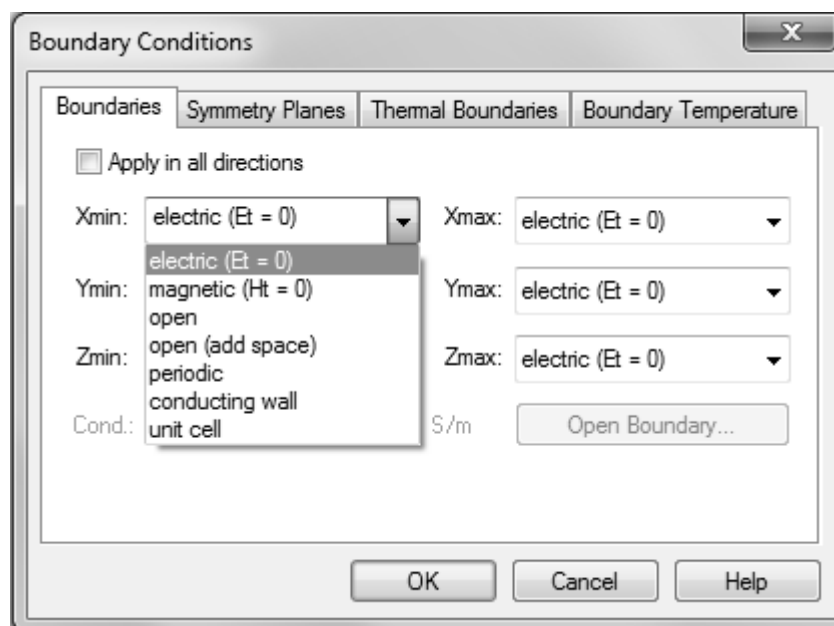


Рисунок 37. Окно граничных условий

На выбор предлагается 7 типов:

- 1) *Electric* Идеальная электрическая стенка – все тангенциальные составляющие поля равны нулю и нормальные составляющие магнитного поля устанавливаются равными нулю.
- 2) *Magnetic* Идеальная магнитная стенка, на которой все тангенциальные компоненты магнитного поля и нормальные компоненты электрического поля устанавливаются равными нулю.
- 3) *Open (PML)* Открытое пространство – волны проходят через эту границу с минимальным отражением.
- 4) *Open (add space)* Граничное условие, такое же, как *Open (PML)*, но добавляется некоторое дополнительное пространство для расчёта дальнего поля. Эта опция рекомендуется для антенных задач.
- 5) *Periodic* Периодические граничные условия. Связывают две противоположные границы с фазовым сдвигом, равным нулю, так что область расчёта будет периодически расширена в соответствующем направлении. Таким образом, необходимо, чтобы всегда обе границы касались друг друга, что показывает, что они периодически повторяются.

Модели антенны с периодическими границами позволяют рассчитать изменение ближнего поля вокруг одной антенны.

6) *Conducting Wall* Металлические стенки с потерями.

7) *Unit cell*. Упрощённый вариант периодических граничных условий. Он может применяться только в плоскости XY, тем не менее, позволяет применить не ортогональную сетку, что приводит к уменьшению размеров и снижению времени на расчёт.

При настройке проекта для экранированных устройств, следует присваивать каждой грани электрическую стенку (electric) для которой тангенсальная составляющая электрического поля равна нулю.

При настройке проекта для излучающих устройств, следует присваивать каждой грани параметр открытого пространства (open). Если необходимо рассчитывать поле излучения в дальней зоне, то следует присваивать каждой грани параметр открытого пространства с добавкой (open add space).

По умолчанию, используется электрическая стенка.

Для упрощения расчёта модели возможно задание плоскостей симметрии для этого необходимо выбрать вкладку *Symmetry Planes* в диалоговом окне граничных условий. Такие настройки применимы для геометрически симметричных моделей. Зная распределение поля в модели можно установить электрическую или магнитную плоскость симметрии в месте, где соответствующее поле не имеет никакой касательной составляющей к соответствующей плоскости.

Следует заметить, что каждая установленная плоскость симметрии сокращает время расчёта в два раза.

Назначение портов устройства

Для вычисления S-параметров требует определения портов, через которые проходит входная и выходная мощность. Для этого необходимо установить привязки к устройству, на котором должен находиться вход и выход модели.

Существует два различных типа порта – волноводный *Waveguide Port* и дискретный *Discrete Port* (рис. 36). Волноводный порт имитирует собой бесконечно длинный волновод, подключённый к устройству, и, имеющий идеальное согласование с входом.

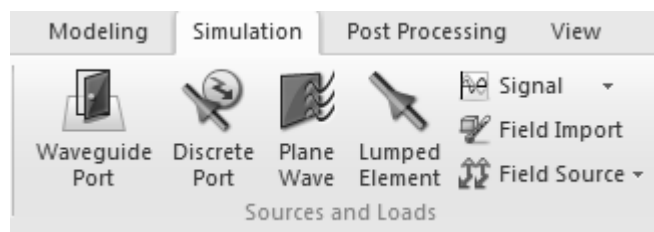
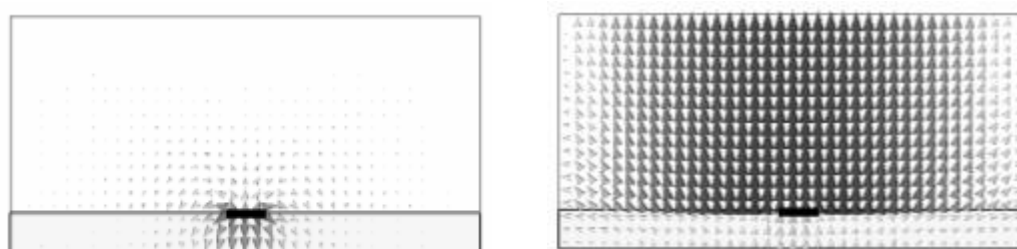


Рисунок 38. Группа источников и нагрузок вкладки Simulation

Рассмотрим пример назначения порта для микрополосковой линии передачи. Этот тип линии требует моделирования воздуха над микрополосковой линией. Размер порта является очень важным фактором. С одной стороны, порт должен быть достаточно большим, чтобы приложить значительную часть основного типа волны квази-ТЕМ волны к микрополосковой линии. С другой стороны, размер порта не должен быть выбран излишне большим, поскольку это может привести к появлению волн высших порядков, которые будут распространяться в порту.

Рисунок 37 показывает режим основной волны микрополосковой линии и режим высших типов волн.



Поле основной волны

Поле волны высшего порядка

Рисунок 39. Распределение поля в сечении микрополосковой линии

Чем больше порт, тем меньше критическая частота основного типа волны. Таким образом, размер порта должен быть выбран достаточно малым, чтобы более высшие типы волн, не могли распространяться.

Рекомендуемые размеры порта приведены на рис. 38.

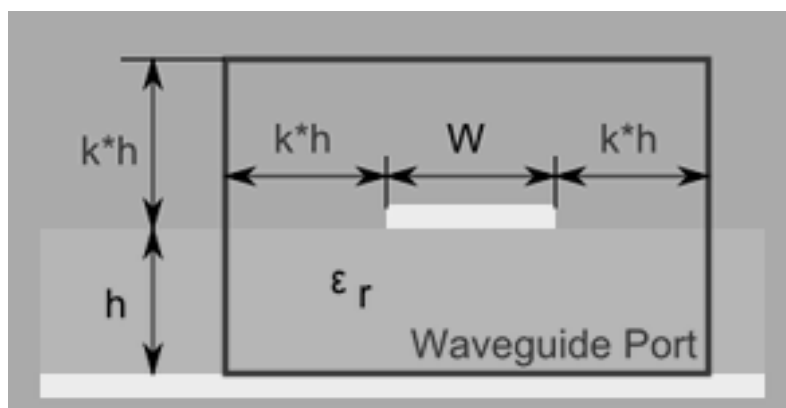
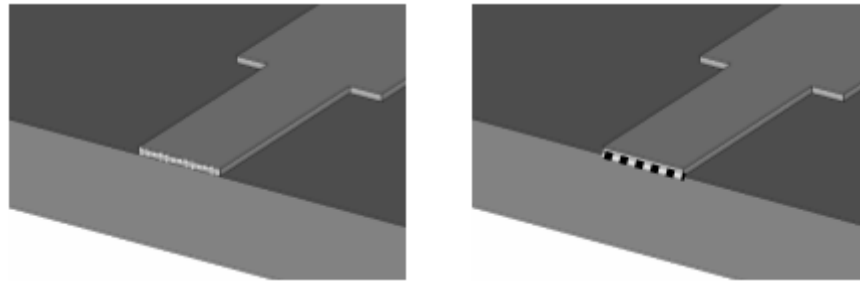


Рисунок 40. Размеры волноводного порта

Его оптимальное значение изменяется в диапазоне от 5 до 10 в зависимости от соотношения W/h , на диэлектрической подложке и на частотном диапазоне (из-за частотной дисперсии основной моды квази-ТЕМ волны). Размер порта может быть быстро проверен по визуализации распространения E и/или H области моды порта. Если поле резко отсекается границей порта, его размер должен быть увеличен, и наоборот. Более надёжный вариант, является оценка коэффициента k по сходимости кривой линии импеданса, в разумных пределах, например, 3 - 15.

Удобный способ создания порта – использование привязок. Для этого необходимо установить привязку к грани или ребру полоскового проводника, расположенного на поверхности диэлектрической подложки, как показано на рис. 41. Затем, выбрать команду *Waveguide Port*, и в появившемся окне ввести коэффициенты, как показано на рис. 42.



Привязка к грани

Привязка к ребру

Рисунок 41. Варианты привязок

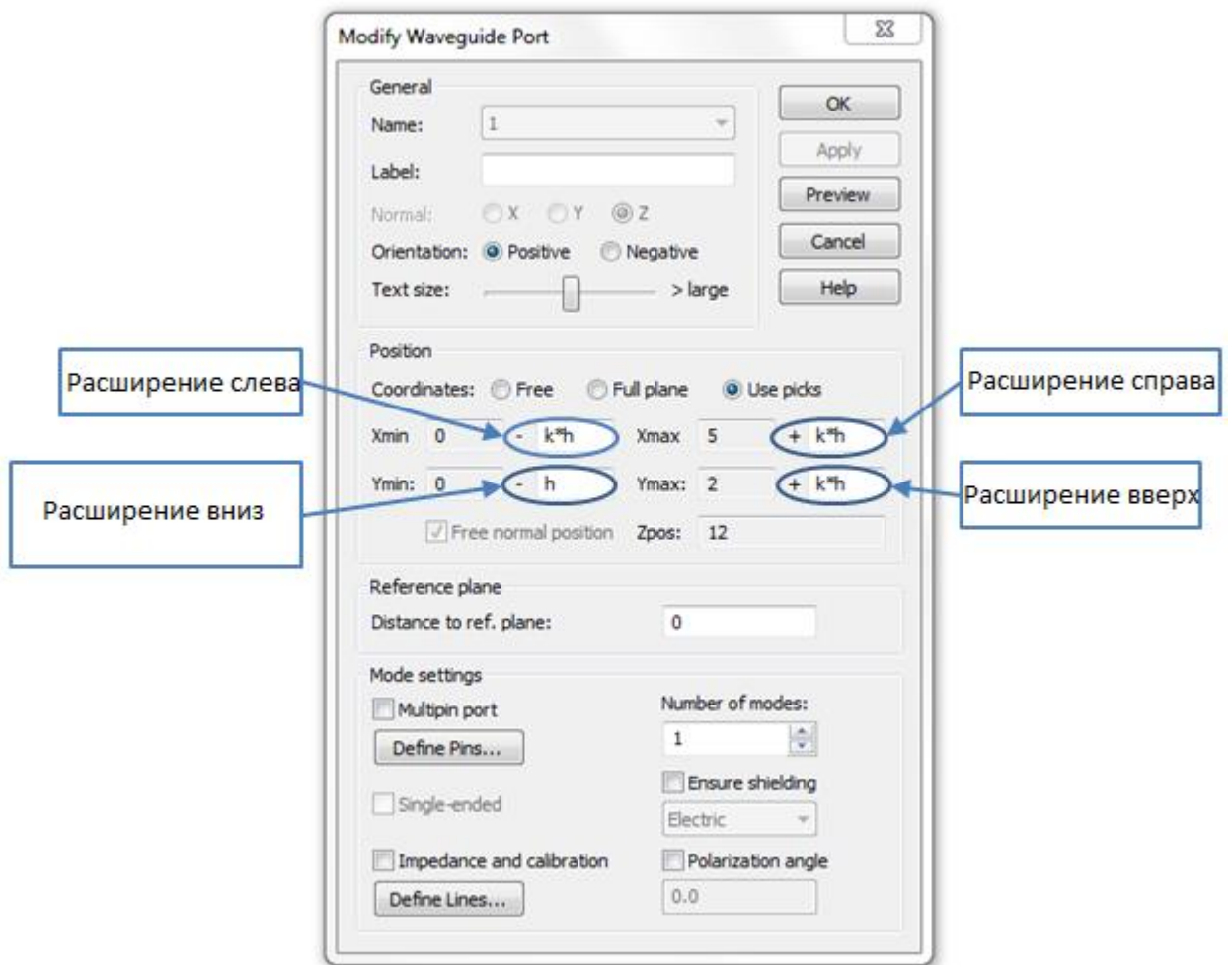


Рисунок 42. Окно настроек волноводного порта

Использование волноводных портов повышает точность моделирования, однако, использование дискретных портов иногда бывает намного удобнее. Дискретный порт состоит из источника тока с внутренним сопротивлением и двух полюсов, которые могут быть подключены к устройству. Он используется

как источник питающей точки антенны или как завершение линии передачи на очень низких частотах. На высоких частотах (например, длина порта больше, чем одна десятая длины волны), полученные S -параметры, могут отличаться от тех же результатов, но рассчитанных при использовании волноводного порта. Это происходит из-за неправильного согласования порта и структуры.

Так же как и для волноводного порта, дискретный порт подключается с помощью привязок. Например, необходимо оценить работу V-образного вибратора, для этого создадим два цилиндрических проводника необходимых размеров, установим привязки в точки питания антенны и вызовем команду *Discrete Port* (рис. 43).

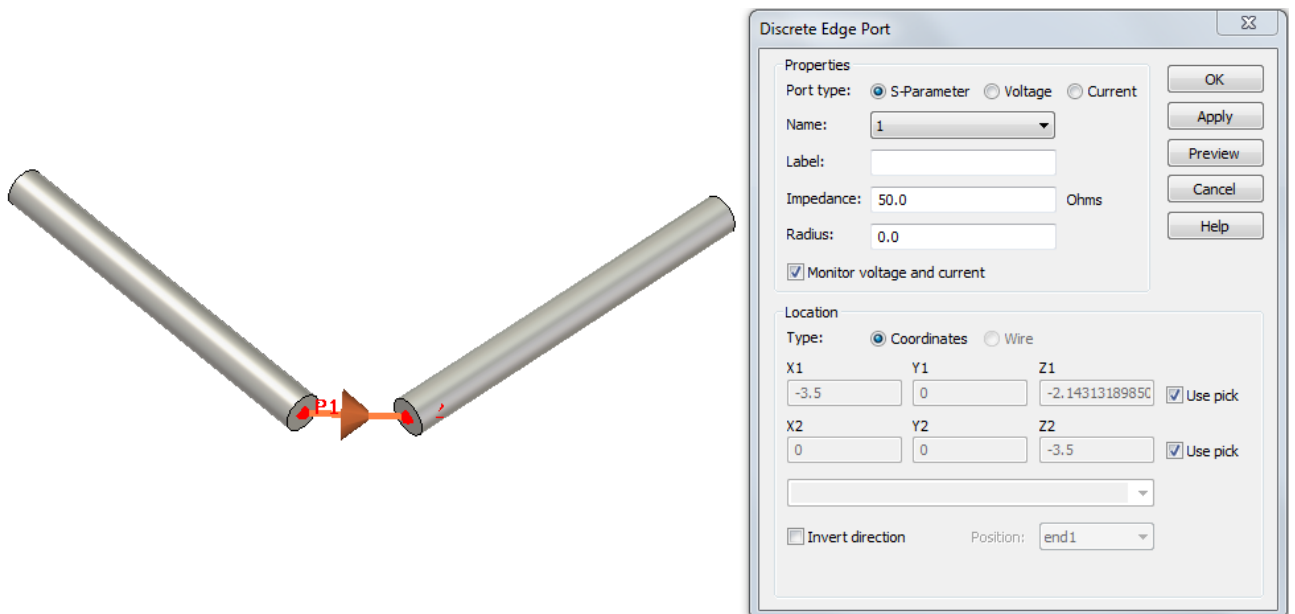


Рисунок 43. Окно настройки *Discrete Port*

В окне *Discrete Port* необходимо задать внутреннее сопротивление порта (*Impedance*) и, при необходимости, номер. Дополнительно можно задать обратное направление протекания тока (*Invert direction*).

Разбиение сетки

В любом методе, связанном с конечными элементами, все объекты разбиваются на небольшие элементы. Если модель СВЧ устройства задана

только прямыми плоскостями, то число анализируемых элементов разбиения невелико, и расчёт проводится относительно быстро. При использовании в СВЧ устройствах криволинейных поверхностей, для их аппроксимации требуется намного большее количество элементов разбиения, что приводит к значительным временным затратам при анализе. Настройки для разбиения сетки находятся в группе *Mesh* вкладки *Simulation* (рис.44).

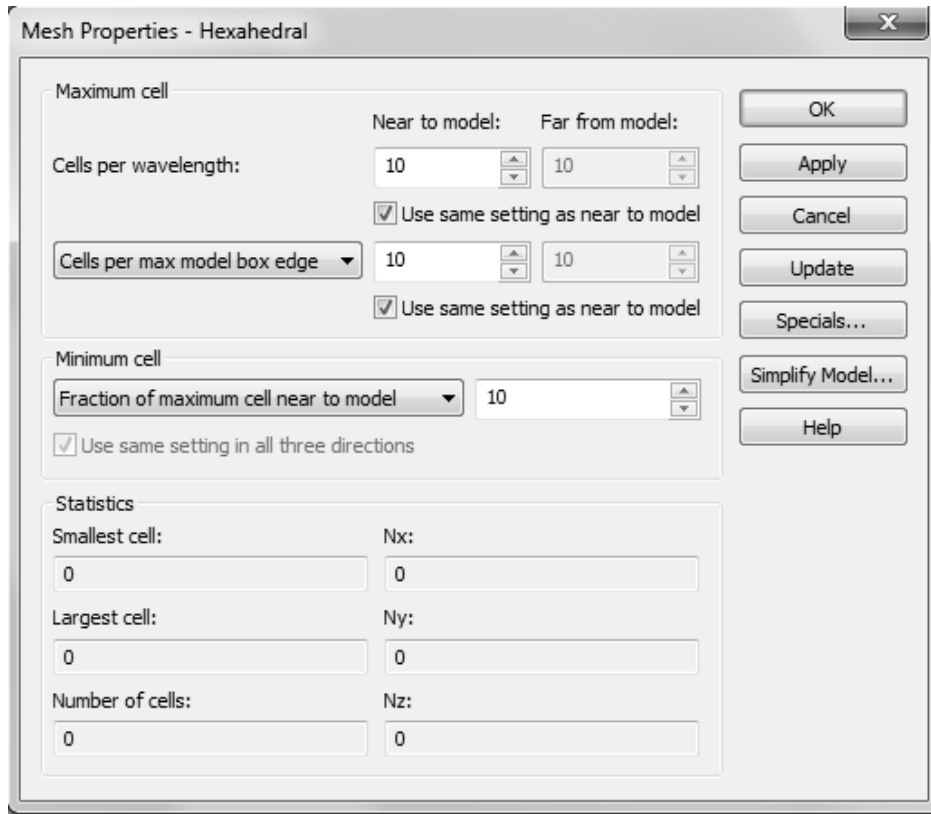


Рисунок 44 Окно настройки разбиения сетки

Параметр *Cell per wavelength* определяет количество ячеек сетки для пространственного выборка наименьшей длиной волны (самая высокая частота), минимум 10 рекомендуется. Увеличение значения этого параметра приведёт к увеличению общего количества ячеек сетки, особенно для электрического больших задач.

Параметр *Cell per max model box edge* определяет минимальное число ячеек сетки по диагонали наименьшей грани объекта. Этот параметр особенно важен для электрически малых задач, в которых параметр *Cell per wavelength* не

имеют хороший контроль над сеткой. Для того, чтобы понять это, рассмотрим, например, электрически малый объем: 10 см^3 , заполненный диэлектриком и моделируемых на частоте 100 МГц. Частоте 100 МГц соответствует длине волны 150 см. Таким образом, описанная выше настройка может привести к ячейке сетки каждый 15 см, что явно недостаточно для надлежащего дискретизации заданного объема. В этом случае, сетка управляется параметром *Cell per max model box edge*. Таким образом, увеличение этого параметра увеличивает общее количество ячеек сетки, особенно для электрически небольших задач.

Параметр *Fraction of maximum cell near to model* определяет допустимое соотношение между наибольшим и наименьшим размерами ячейки сетки в модели. Самый большой размер ячейки определяется наименьшей длиной волны и количеством разбиений на длину волны, увеличивая этот параметр можно уменьшить размер минимальной ячейки сетки. Таким образом, увеличение этого значения будет иметь два противоположных эффекта: 1) мелкие структурные особенности в модели будут правильно разбиты, 2) общее количество ячеек сетки будет увеличиваться. Альтернативный вариант – задать минимальный размер ячейки сетки. Эта функция может быть полезной, когда есть точное значение наименьшего размера элемента в модели, который должен быть разбит.

3. Пример моделирования коаксиального изгиба

В данном примере Вы смоделируете коаксиальный изгиб с настроечным шлейфом. Также Вы сможете вычислить широкополосную матрицу S-параметров структуры прежде, чем просмотрите электромагнитное поле на различных частотах внутри нее. На следующем изображении показан разрез рассматриваемой структуры. Изображение было произведено при помощи экспортной функции POV CST Microwave Studio.

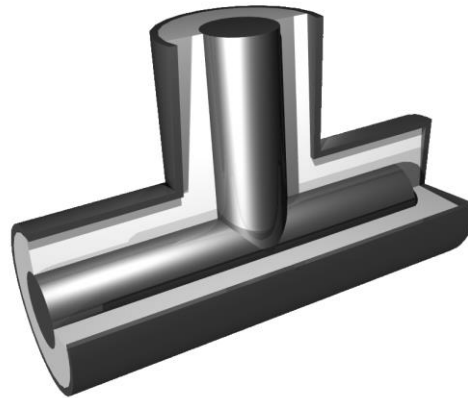


Рисунок 45

Прежде чем запустить моделирование необходимо обсудить некоторые моменты, которые важны для более эффективной работы. Наружный провод коаксиального кабеля отсутствует, и структура является изолированной, так, как будто она была бы встроена в идеальный по проводимости электрический блок. Таким образом, для упрощения, Вы можете смоделировать задачу без наружного провода, и вместо этого внедрить его в идеальный проводящий блок.

Для упрощения этой процедуры CST Microwave Studio позволяет Вам определить свойства основного материала. Всем объектам, которым Вы не назначите специфический материал, по умолчанию, будут присвоены параметры исходного материала. Для рассматриваемой структуры будет достаточно моделирования только диэлектрической части и определения основного материала, как идеальный электрический проводник.

Поэтому Ваш метод описания структуры должен быть следующим:

1. Моделирование диэлектрического (воздушного) цилиндра;
2. Моделирование внутреннего провода в диэлектрической части.

Запуск CST Microwave Studio

После запуска программы создайте новый проект и выберите один из предложенных шаблонов, который наиболее подходит для решения Вашей задачи.

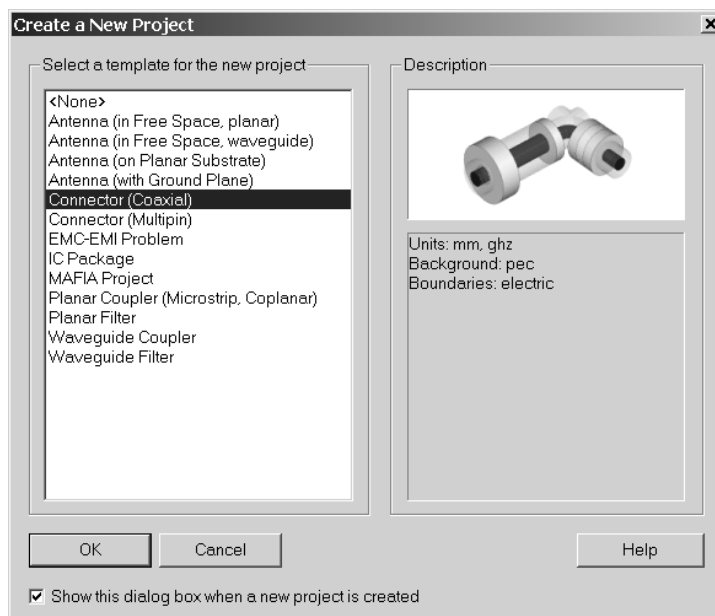


Рисунок 46

Для данного примера выберите шаблон *None* и нажмите кнопку ОК.

Задание множителей размерностей

В окне *Solve – Units* задайте - геометрические размер вычисляются в миллиметрах, а частоты в ГГц.


Определение основного материала

Как было сказано выше, структура будет описана в условиях идеальной проводимости. В шаблоне коаксиального разъема это значение установлено

уже по умолчанию. Чтобы изменить эти параметры настройки, Вы можете внести свои изменения в соответствующее диалоговое окно (*Solve - Background Material*). Для этого примера оставьте настройки по умолчанию.

Создание модели объекта

Первым шагом является создание цилиндра вдоль оси z:

1. Выберите команду создания цилиндра из главного меню (*Objects – Basic Shapes – Cylinder* );

2. Нажмите сочетание клавиш *Shift+Tab* и введите среднюю точку (0, 0) в плоскости x-y, и нажмите кнопку *OK*;

3. Нажмет клавишу *Tab*, задайте величину радиуса равным 2 и нажмите *OK*;

4. Опять нажмите клавишу *Tab* и введите значение высоты равной 12 и нажмите *OK*;

5. Нажмите клавишу *Esc*, чтобы создать твердотельный цилиндр (при этом пропускается операция формирования внутреннего радиуса);

6. В появившемся диалоговом окне, в поле *Name* (имя) введите «*long cylinder*»;

7. Вы может просто выбрать предустановленный материал – вакуум (который очень близок по параметрам к воздуху) в списке материалов. Но здесь мы собираемся создать новый материал «воздух (*air*)», чтобы показать, как работает процедура создания слоя. Поэтому выберите *New material* в графе выбора материала;

8. В диалоговом окне создания материала, в строке *Name* введите новое имя материала «*air*», тип диэлектрика выберите *Normal* и проверьте численные параметры *Epsilon* = 1.0 и *Mue* = 1.0. И, наконец, Вы можете выбрать нужный цвет и нажать кнопку *OK*.

9. Вернувшись опять к диалоговому окну создания цилиндра, нажмите *OK*, для того чтобы завершить его создание.

Результатом всех этих операций должно стать изображение, похожее на рисунок, представленный ниже. Вы можете нажать клавишу пробела, чтобы привести масштаб изображения к полноэкранному виду.

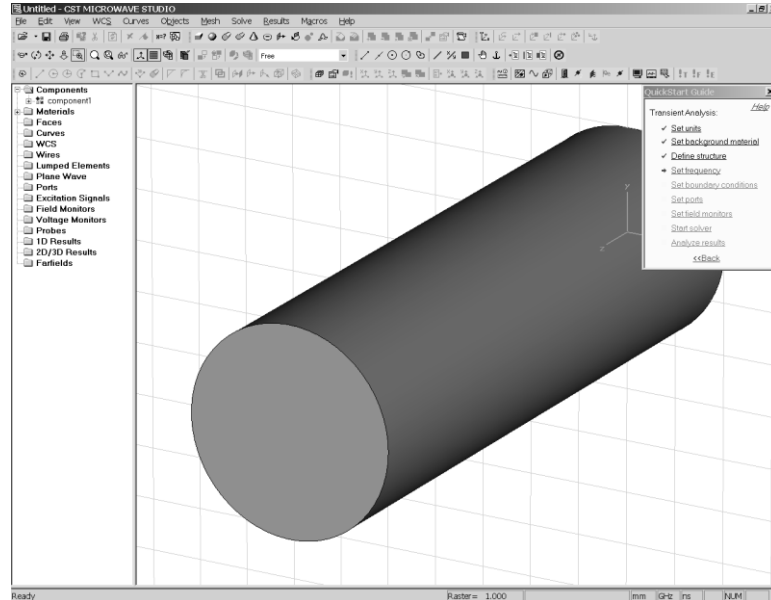




Рисунок 47

Следующим шагом является создание цилиндра, перпендикулярного первому. Центр основания второго цилиндра должен совпадать с серединой первого.

Второй шаг состоит из следующих действий:

1. Выберите каркасный режим изображения *View - View Options* () или комбинация клавиш *Ctrl+W*;
2. Активируйте режим указки *Circle Center* (центр круга): *Objects - Pick - Pick Circle Center* ();
3. Произведите двойной щелчок левой клавишей мышки на одном из круговых ребер цилиндра, в результате чего будет выделен центр окружности;
4. Выполните теперь операции 2 и 3 для противоположного основания цилиндра.

Конструкция должна принять примерно следующий вид:

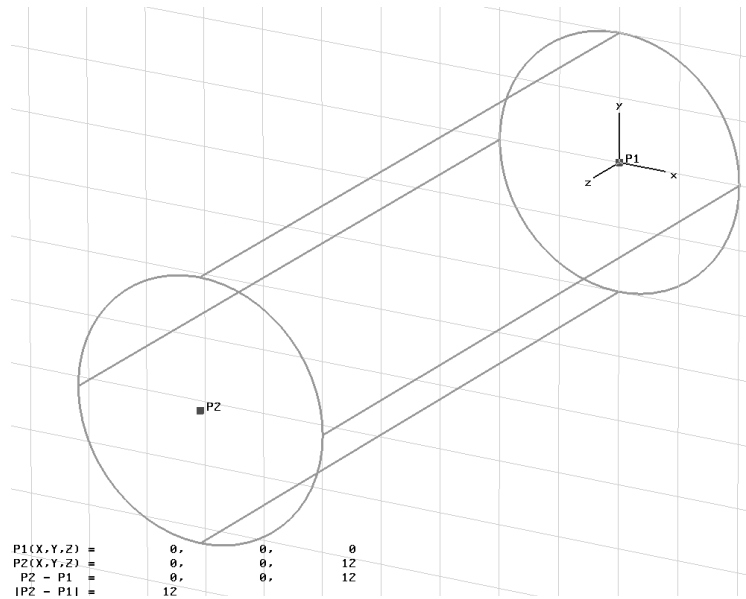


Рисунок 48

Следующим шагом необходимо выбрать середину, между этими двумя выбранными точками. Для этого выполните команду *Objects – Pick - Mean Last Two Points* из главного меню.

Теперь Вы можете к этой точке привязать локальную систему координат путем выполнения команды *WCS - Align WCS With Selected Point* из главного меню. На экране Вы увидите следующее:

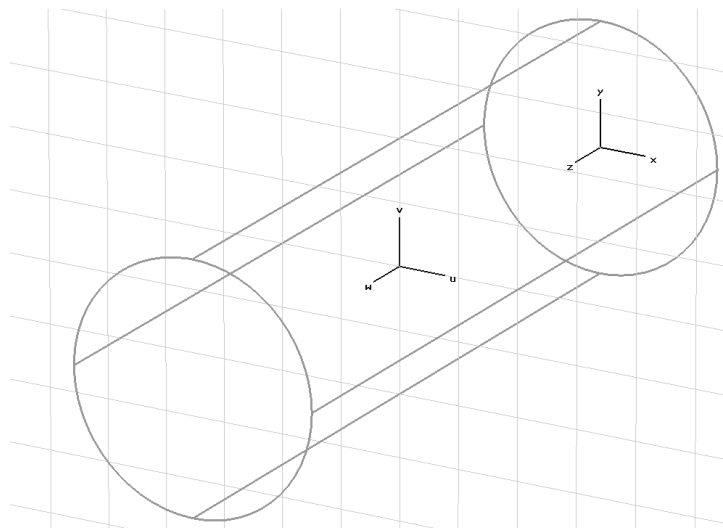


Рисунок 49

Следующим шагом необходимо выровнять ось w с предполагаемой осью второго цилиндра.

1. Выберите команду *WCS - Rotate local coordinates* (📐) из главного меню.
2. Выберите ось u за ось вращения, и введите значение угла поворота « -90 » градусов.
3. Нажмите кнопку *OK*.

В качестве альтернативы можно нажать сочетание клавиш *Shift+U*, что при каждом нажатии приводит к повороту локальной оси координат на 90 градусов относительно оси u . Таким образом, нажатие сочетания клавиш *Shift+U* трижды, равносильно использованию диалогового окна, описанного выше.

Теперь структура должна выглядеть следующим образом:

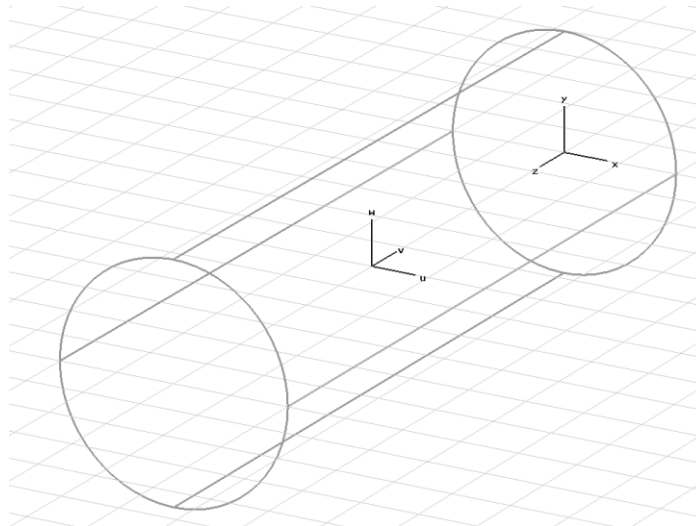


Рисунок 50

Следующим шагом является создание цилиндра, перпендикулярного первому.

1. Выберите команду создания цилиндра из главного меню (*Objects – Basic Shapes – Cylinder* (📐));
2. Нажмите сочетание клавиш *Shift+Tab* и введите среднюю точку $(0, 0)$ в плоскости $u-v$, и нажмите кнопку *OK*;
3. Нажмет клавишу *Tab*, задайте величину радиуса равным 2 и нажмите *OK*;

4. Опять нажмите клавишу *Tab* и введите значение высоты равное 6 и нажмите *OK*;

5. Нажмите клавишу *Esc*, чтобы создать твердотельный цилиндр;

6. В появившемся диалоговом окне, в поле *Name* введите «*short cylinder*»;

7. Выберите материал «*air*» и нажмите *OK*.

Теперь программа автоматически обнаружит пересечение между двумя этими цилиндрами.

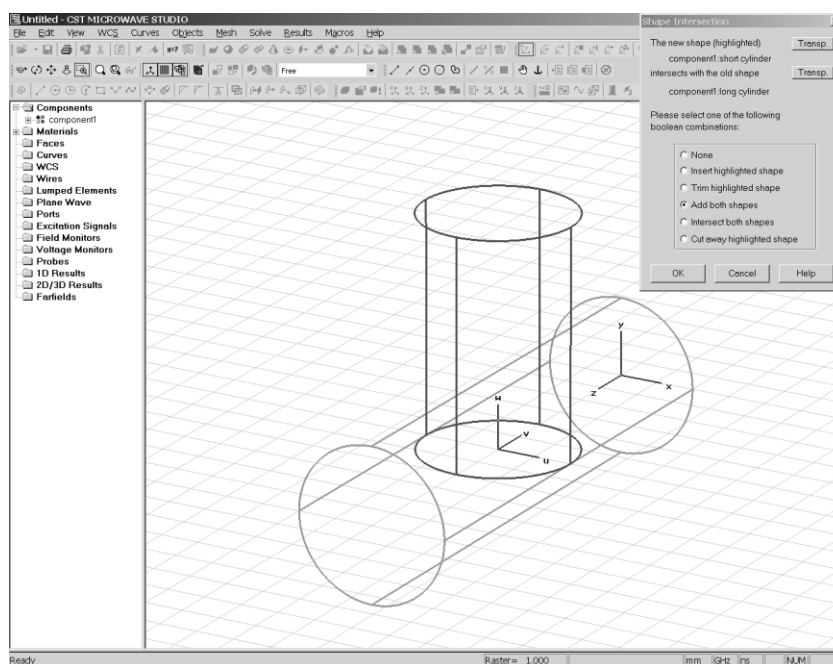


Рисунок 51

В диалоговом окне *Shape intersection* выберите опцию *Add both shapes* и нажмите *OK*. В результате Вы должны увидеть следующее:

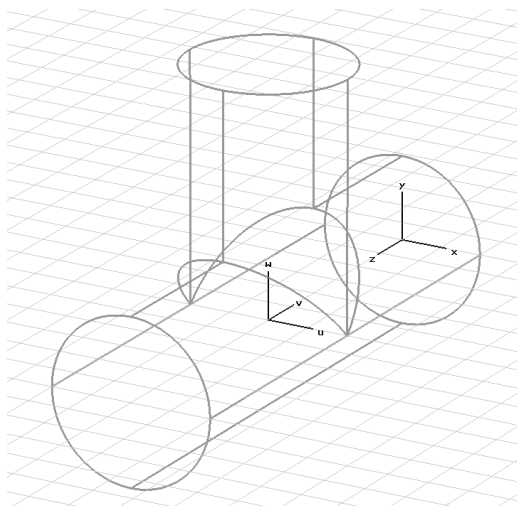



Рисунок 52

Создание диэлектрических воздушных частей полностью закончено. Следующей операцией будет создание внутреннего провода в воздухе.

Так как система координат уже выровнена с центром второго цилиндра, Вы сразу можете приступить к созданию первой части проводника:

1. Выберите команду создания цилиндра из главного меню (*Objects – Basic Shapes – Cylinder* );
2. Нажмите сочетание клавиш *Shift+Tab* и введите среднюю точку (0, 0) в плоскости u-v, и нажмите кнопку *OK*;
3. Нажмет клавишу *Tab*, задайте величину радиуса равным 0.86 и нажмите *OK*;
4. Опять нажмите клавишу *Tab* и введите значение высоты равное 6 и нажмите *OK*;
5. Нажмите клавишу *Esc*, чтобы создать твердотельный цилиндр;
6. В появившемся диалоговом окне, в поле *Name* введите «*short conductor*»;
7. Выберите материал *PEC* (идеальный электрический проводник) и нажмите *OK*.

Здесь необходимо немного поговорить о пересечении между формами. Вообще, каждая точка пространства должна быть соотнесена со специализированным материалом. Однако идеальный электрический проводник также может быть рассмотрен как специализированный вид

материала. Это допускает присутствие идеального проводника в той же самой точке, где присутствует и диэлектрический материал. В этом случае, идеальный проводник всегда будет доминирующим материалом.

С другой стороны, две различные диэлектрические формы не должны накладываться друг на друга. Это касается также и двух проводников. Таким образом, наложение идеального проводника на диэлектрик является единственным исключением.

***Важная информация:** некоторые структуры содержат чрезвычайно высокие комплексные проводящие части, внедренные в пределы диэлектрика; в таком случае, общую комплексную проводимость можно уменьшить, не создавая пересечения двух таких материалов; по этой причине, CST Microwave Studio позволяет это сделать; однако Вы должны всегда использовать эту возможность, когда это позволительно, даже в таких простых примерах, как этот.*

На следующем рисунке показана форма в том виде, в котором она должна находиться в данный момент:

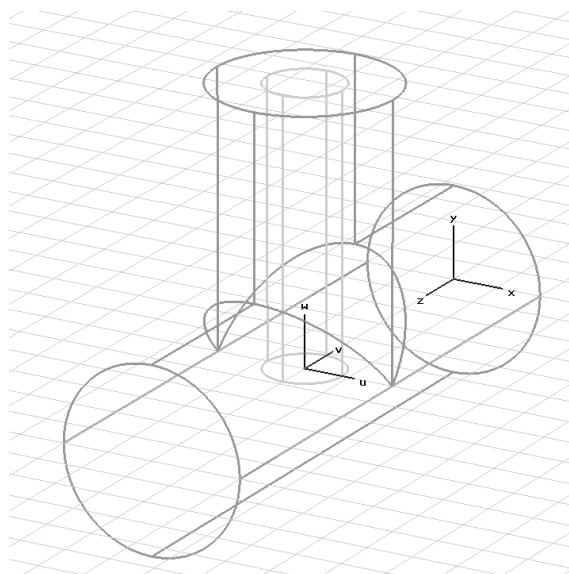


Рисунок 53

Теперь Вы должны добавить второй проводник. Сначала выровняйте локальную систему координат с глобальной:

1. Выберите команду *Objects – Pick - Pick Face* (■) из главного меню;
2. Двойным щелчком выберите верхнюю, относительно оси z , грань первого цилиндра; в результате Вы должны получить следующее изображение:

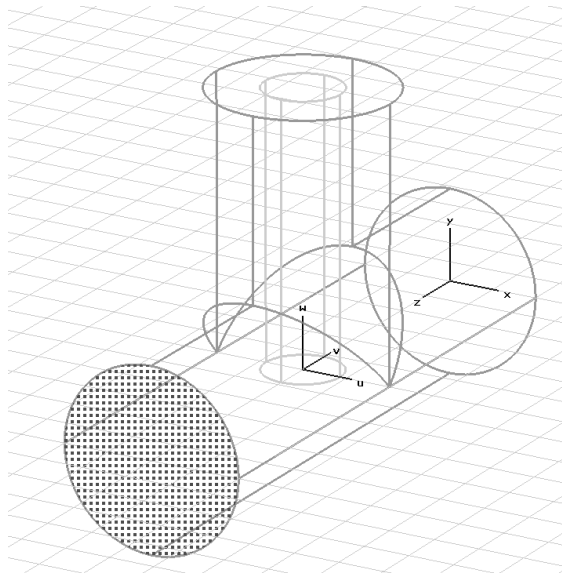


Рисунок 54

3. Теперь выберите команду основного меню *WCS - Align WCS With Selected Face*.

Ось w локальной системы координат теперь совпадает с осью z глобальной координатной системы. Теперь Вы можете создать второй проводник:

1. Выберите команду создания цилиндра из главного меню (*Objects – Basic Shapes – Cylinder* (○));
2. Нажмите сочетание клавиш *Shift+Tab* и введите среднюю точку $(0, 0)$ в плоскости $u-v$, и нажмите кнопку *OK*;
3. Нажмет клавишу *Tab*, задайте величину радиуса равным 0.86 и нажмите *OK*;
4. Опять нажмите клавишу *Tab* и введите значение высоты равное «-11» и нажмите *OK*;
5. Нажмите клавишу *Esc*, чтобы создать твердотельный цилиндр;
6. В появившемся диалоговом окне, в поле *Name* введите «*long conductor*»;

7. Выберите материал *PEC* (идеальный электрический проводник) и нажмите *OK*:

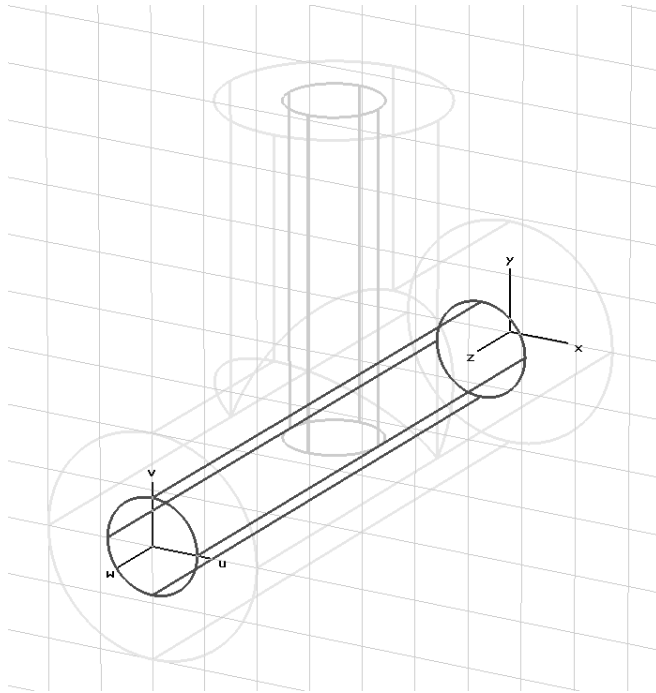


Рисунок 55

После этого появится диалоговое окно пересечения форм. Выберите пункт *Add shapes* и нажмите *OK*.

Перед Вами должно быть следующее изображение:

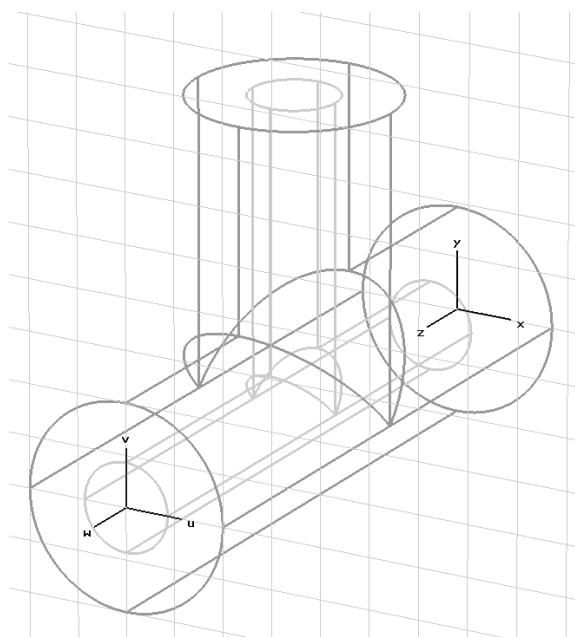


Рисунок 56

Ниже представлено несколько видов возможной визуализации структуры:

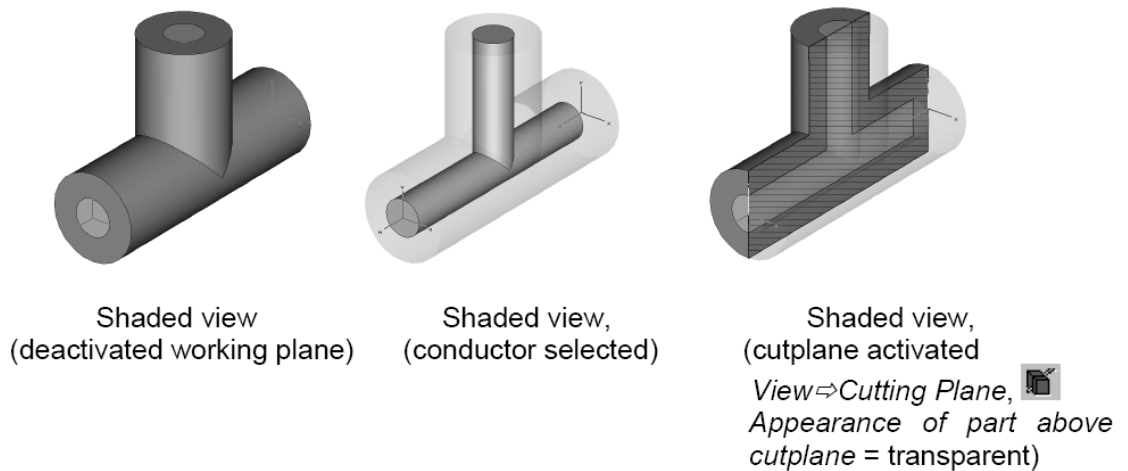



Рисунок 57

Установка портов

Следующее за этим вычисление S -параметров требует определения, так называемых, портов, через которые проходит входная и выходная энергия. Это может быть произведено путем простого выбора граней, прежде чем вызвать диалоговое окно определения портов.

Для определения первого порта выполните следующие действия:

1. Выберите команду *Objects – Pick - Pick Face* () из главного меню;
2. Двойным щелчком выберите верхнюю, относительно оси z , грань первого цилиндра; в результате Вы должны получить следующее изображение:

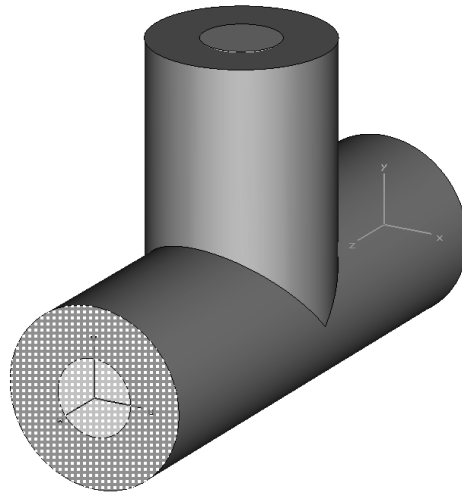


Рисунок 58

3. Откройте диалоговое окно определения порта, выбирая команду основного меню *Solve - Waveguide Ports* (

Рисунок 59

В данном окне все уже установлено правильно (для случая коаксиального кабеля), поэтому можете просто нажать *OK*.

Как только первый порт будет определен, структура должна будет выглядеть следующим образом:

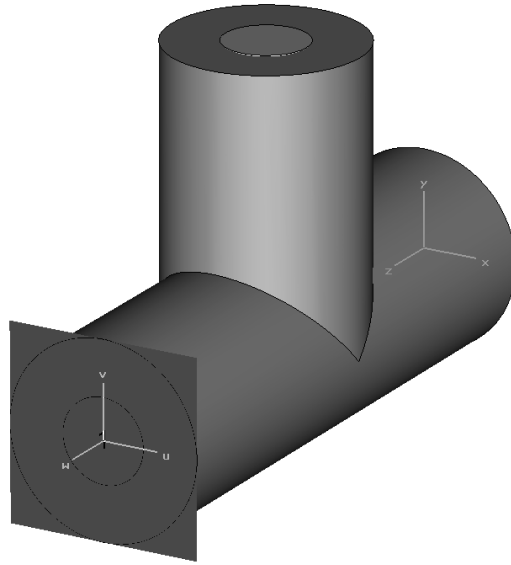


Рисунок 60

Вы можете теперь определить второй порт таким же образом. Следующее изображение показывает структуру уже с двумя портами:

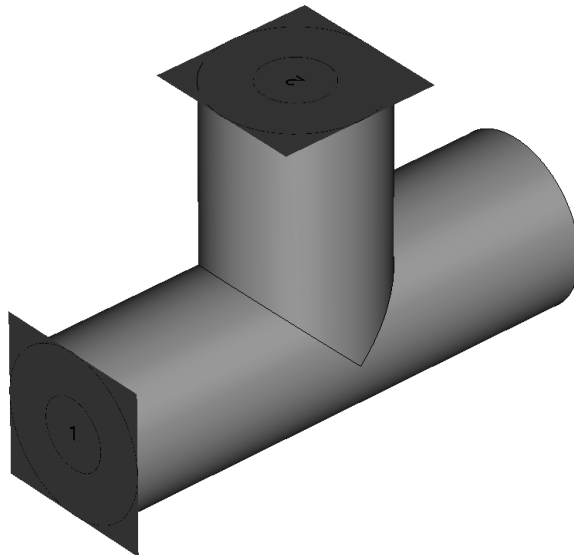


Рисунок 61

Задание частотного диапазона

Следующая важная настройка для моделирования – частотный диапазон, представляющий интерес. Частота может быть определена путем выбора команды *Solve – Frequency* (📡) из главного меню.

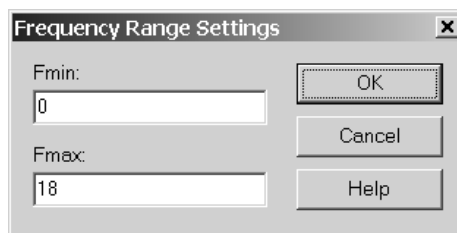


Рисунок 62

В этом примере Вы должны определить частотный диапазон от 0 до 18 ГГц. Заметьте, что Вы уже установили единицы измерения частоты в ГГц, и поэтому здесь Вы должны только определить значения диапазона 0 и 18 (строка состояния на дисплее всегда отображает текущие единицы измерения).

Настройка граничных условий и симметрии

Имитация данной структуры будет выполнена только в пределах ограничивающего ее прямоугольника. Однако Вы можете определить граничащие условия для каждой плоскости ($X_{min}/X_{max}/Y_{min}/Y_{max}/Z_{min}/Z_{max}$) ограничивающего прямоугольника.

Граничные условия определяются в следующем диалоговом окне (*Solve - Boundary Conditions*):

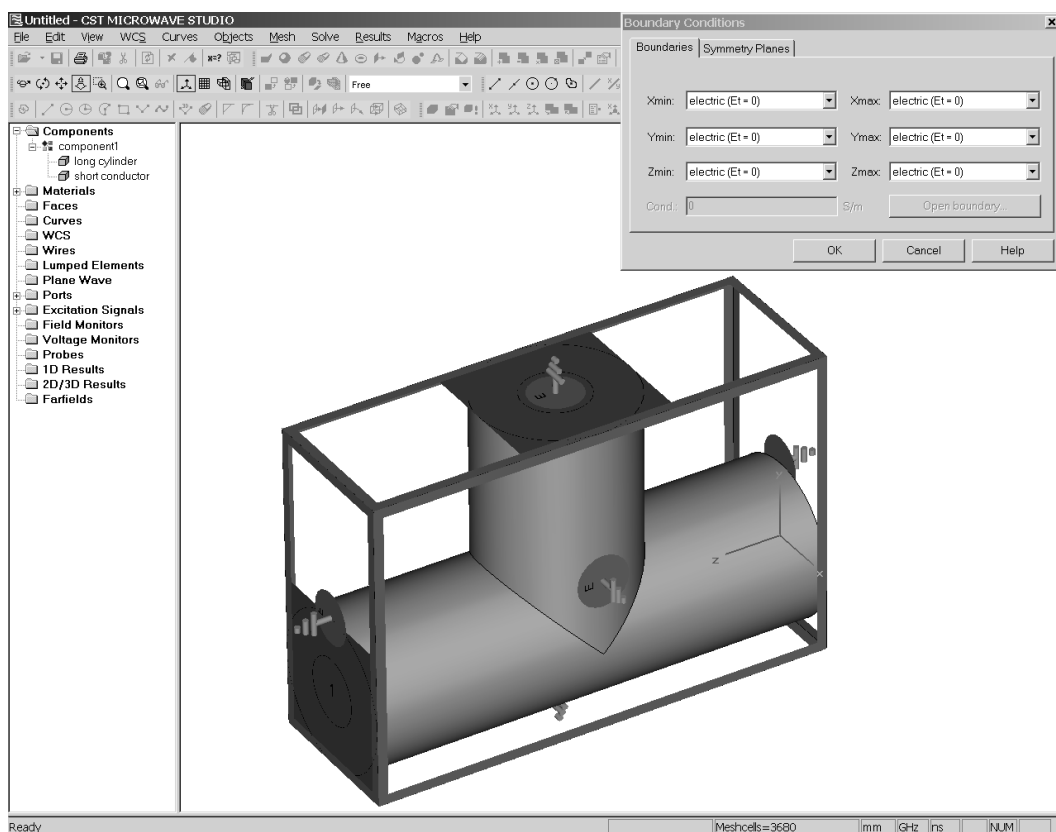


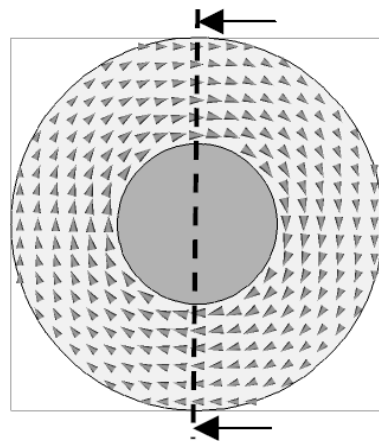
Рисунок 63

Когда данное диалоговое окно открыто, граничащие условия будут визуализироваться, как это и показано выше.

В данном простом случае структура будет полностью помещена в идеальный проводящий материал, таким образом, все граничные плоскости могут быть определены как «*electric*» плоскости (значение по умолчанию).

В дополнение к этим граничным условиям Вы также можете определить так называемые плоскости симметрии. Описание каждой плоскости симметрии может привести к сокращению времени моделирования вдвое.

В данном примере структура симметрична плоскости $y-z$. Возбуждение поля будет выполнено фундаментальным режимом коаксиального кабеля, для которого магнитное поле представляет следующую картину:



Plane of structure's symmetry (Y/Z plane)

Рисунок 64

У магнитного поля нет никакой касательной составляющей на плоскость симметрии структуры (все поле перпендикулярно данной плоскости). Если Вы определяете эту плоскость как магнитную симметрию плоскости, то Вы можете ограничить моделирование в CST Microwave Studio лишь одной половиной фактической структуры, принимая во внимание данное условие.

Для того чтобы определить условие симметрии Вам сначала необходимо выбрать вкладку *Symmetry Planes* в диалоговом окне граничных условий (*Solve - Boundary Conditions*). Впоследствии на Вашем экране должны быть отображена следующая картина:

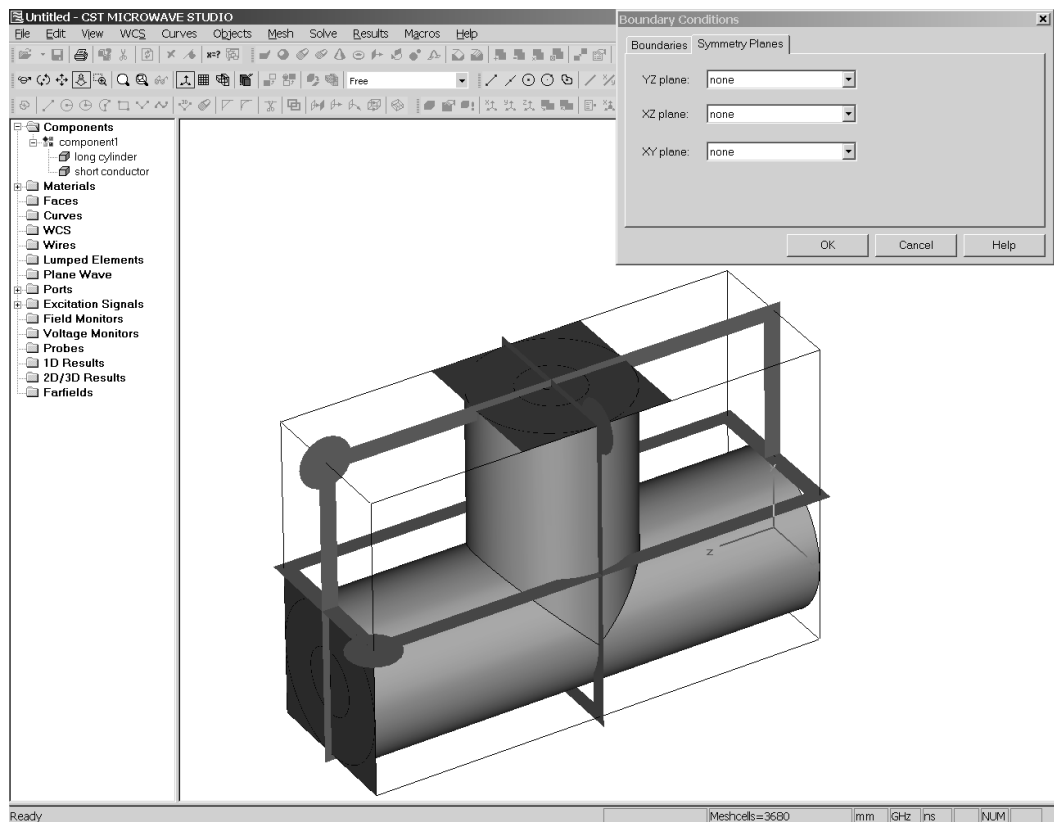


Рисунок 65

Для плоскости симметрии $y-z$ Вы можете выбрать тип *magnetic*. Как только Вы выполните это, произойдут следующие изменения:

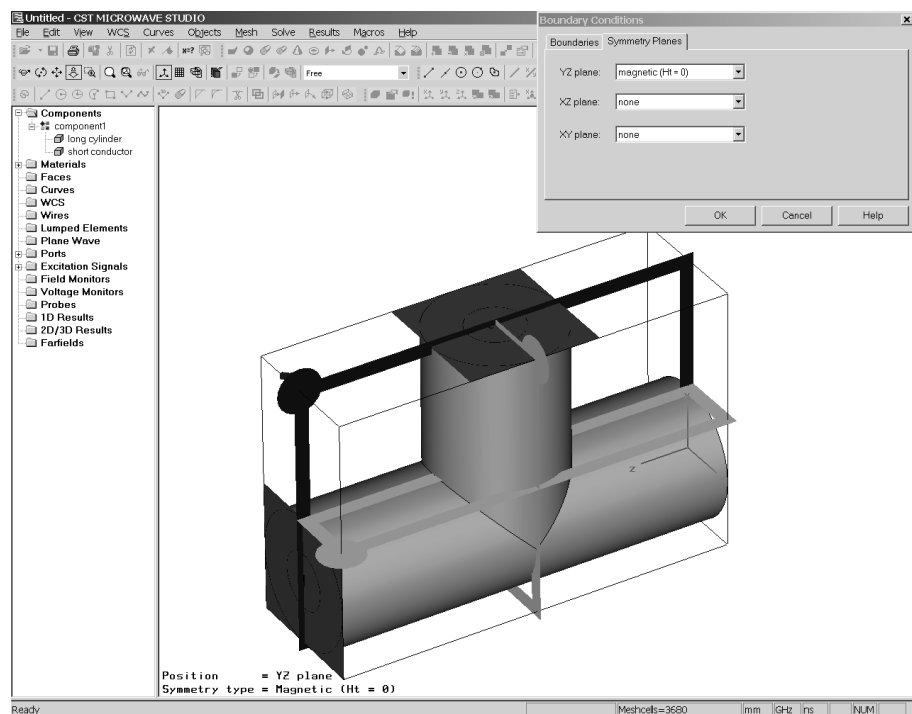


Рисунок 66

В завершение, нажмите *OK*, чтобы сохранить параметры настройки. Визуализация границ исчезнет.

Визуализация сетки

Создание сетки для структурного анализа будет выполнено автоматически на основе экспертной системы. Однако в некоторые моменты моделирования будет полезно производить некоторые изменения параметров сетки для увеличения скорости моделирования.

Сетка может быть визуализирована путем выполнения команды *Mesh - Mesh View* (📏). Для этой структуры сетка будет отображена следующим образом.

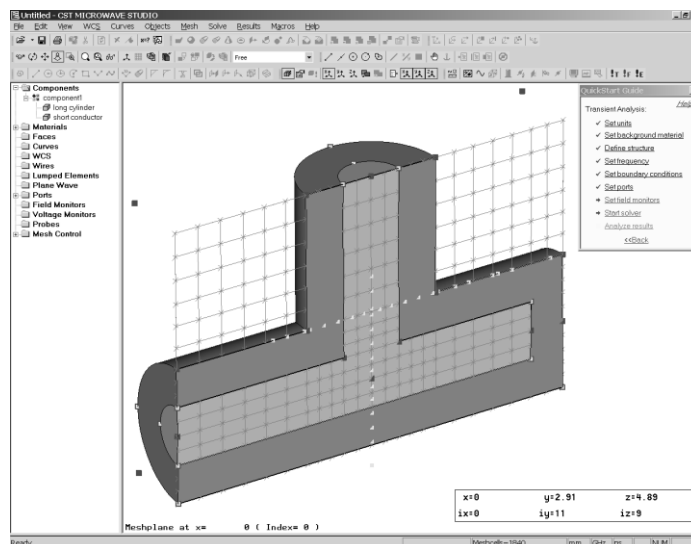


Рисунок 67

Двухмерная плоскость всегда будет сохраняться в поле зрения. Из-за настроек симметрии плоскость сетки будет проходить только через одну половину структуры. Ориентация плоскости сетки может быть изменена *Mesh - X/Y/Z Plane Normal* (📏/📏/📏). Плоскость также может быть перемещена вдоль нормали к ней путем выбора команды *Mesh - Increment/Decrement Index* (📏/📏) или нажатием на клавиатуре стрелок управления вверх и вниз.

Красные точки в модели – это критические точки, где экспертная система находит необходимым расположить линии сетки. В дополнение к этому, желтые точки обозначают места, где сетка автоматически должна быть уплотнена.

В большинстве случаев автоматически выставленная сетка является достаточной, но мы настоятельно рекомендуем, чтобы после того, как Вы достаточно познакомитесь с процессами имитации, Вы изучили бы сетевую документацию по вопросу определения сетки.

Теперь Вы должны отключить режим контроля сетки: *Mesh - Mesh View* (☒).

ЗАПУСК СИМУЛЯЦИИ

Теперь, когда Вы определили все необходимые параметры, можно произвести первое моделирование структуры.

Запуск моделирования производится из диалогового окна переходных процессов: *Solve - Transient Solver* (⚠):

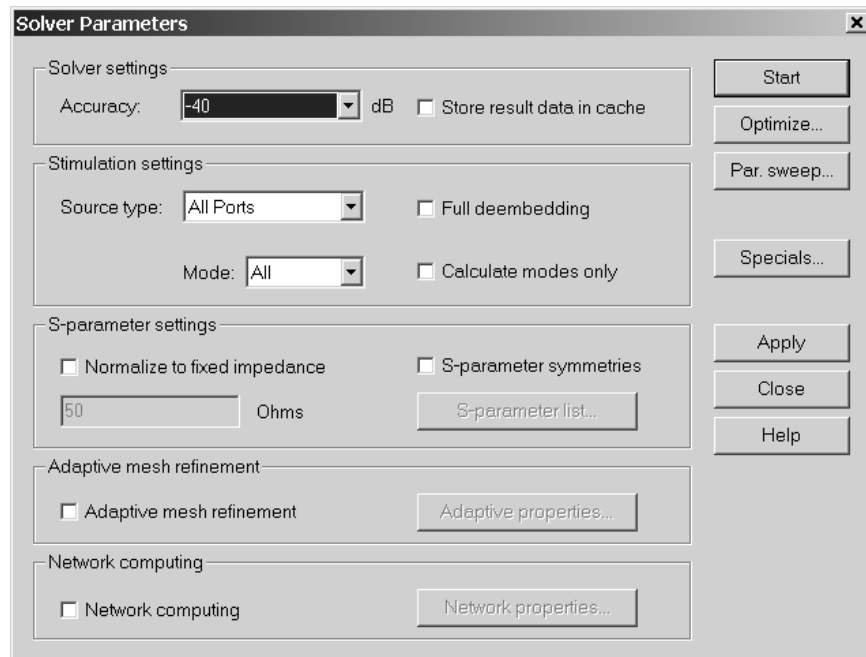


Рисунок 68

В этом диалоговом окне Вы можете определить какой столбец S-матрицы должен быть вычислен. Поэтому в поле Source type выберите тот порт, для которого будут вычислены связи со всеми другими портами во время данного моделирования. Для нашего примера, при установке порта *Port1* будут вычислены параметры *S11* и *S21*. При установке порта *Port2* – параметры *S22* и *S12*.

В некоторых случаях, когда необходимо вычисление полной S-матрицы, Вы должны будете выбрать строку *All ports*, что подразумевает, что за одно вычисление будет выполнено вычисление для каждого порта. However for loss free, two port structures (like the structure investigated here), the second calculation run will not be performed since all S-parameters can be calculated from one run using analytic properties of the S-matrix.

В этом случае Вы должны будете вычислить полную S-матрицу, оставив при этом в поле Source type строку *All ports*.

Вычисляемые S-параметры всегда будут, по умолчанию, нормализоваться к полному сопротивлению порта (который будет вычислен автоматически). В этом случае, полное сопротивление (импеданс) порта коаксиальной линии с указанными размерами и диэлектрическими постоянными, составит примерно:

$$138 \cdot \log\left(\frac{2}{0.86}\right) = 50.58 \text{ Ohms}$$

Однако импеданс Вы можете изменить самостоятельно, в поле, расположенном ниже. В данном примере Вы должны вычислить S-параметры при импедансе равном 50 Ом. Заметьте, что перенормировка S-параметров возможна только в случае, когда вычисляются все S-параметры (*Source Type = All Ports*).

В то время, как точность моделирования главным образом зависит от дискретизации структуры и может быть улучшена за счет усовершенствования

параметров сетки, погрешность аппроксимации может стать второй причиной погрешности при расчете переходных процессов.

Для того чтобы получить S-параметры, фазовый переход временного сигнала в частотной области требует затухания до полного нуля. Иначе произойдет ошибка аппроксимации, которая вызовет пульсации на характеристиках S-параметров.

CST Microwave Studio имеет встроенное проверочное устройство, которое останавливает анализ переходных процессов, при достижении энергии в приборе, определенного уровня, что способствует обнулению временных сигналов порта. Отношение между максимальной энергией и энергией, при которой будет остановлен анализ переходных процессов, определяется в поле accuracy (в данном случае «- 40 dB»).

Заметьте, что решающее устройство будет возбуждающей структурой с частотно-независимой мощностью 1 Вт. Все параметры поля, полученные во время имитации, будут нормализованы к этому уровню входной мощности.

После установки всех этих параметров диалоговое окно должно выглядеть следующим образом:

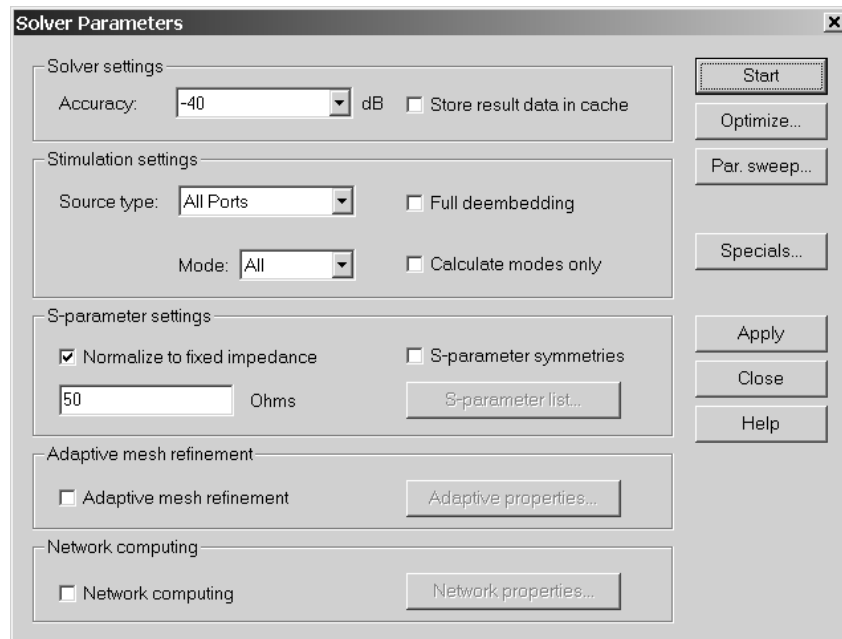


Рисунок 69

Теперь Вы можете запустить процесс имитации, нажимая кнопку *Start*. При этом будет отображаться ход процесса моделирования:

1. *Checking model*: на этом этапе будет проведена проверка Вашей модели на наличие ошибок, таких как недопустимое наложение материалов и так далее;

2. *Calculating matrix and dual matrix*: на этом этапе будет составлена система уравнений, которая будет впоследствии решена;

3. *Calculating the port modes*: на этом шаге определяется распределение поля порта, характеристики распространения, а также полное сопротивление порта;

4. *Processing excitation*: во время данного этапа входной сигнал будет введен в порт; при этом будет вычислено последующее распределение поля в структуре и амплитуда мод колебаний во всех других портах; благодаря полученной информации будут вычислены частотно-зависимые S-параметры (при помощи использования преобразования Фурье);

5. *Transient field analysis*: после того, как импульс возбуждения обратится в ноль, в структуре все еще будет присутствовать электромагнитная энергия поля; решающее устройство при этом продолжает вычисление распределения поля и S-параметры, пока энергия в структуре не уменьшится до определенного уровня (зависит от параметров заданной точности моделирования).

Для данной структуры весь процесс моделирования занимает несколько секунд.

Анализ мод портов

После того, как решающее устройство закончит вычисление мод порта, Вы можете ознакомиться с результатами (даже если анализ переходных процессов завершился еще не полностью).

Чтобы визуализировать определенную моду порта, Вы сначала должны выбрать решение из дерева навигации. Вы можете увидеть моды порта *Port1*, открыв последовательно папки *2D/3D Results - Port Modes - Port1* дерева навигации. Здесь Вы можете выбрать режим отображения как электрического, так и магнитного поля. При выборе папки электрического поля *e1*, и его

параметров, соответствующие результаты будут визуализированы в основном представлении:

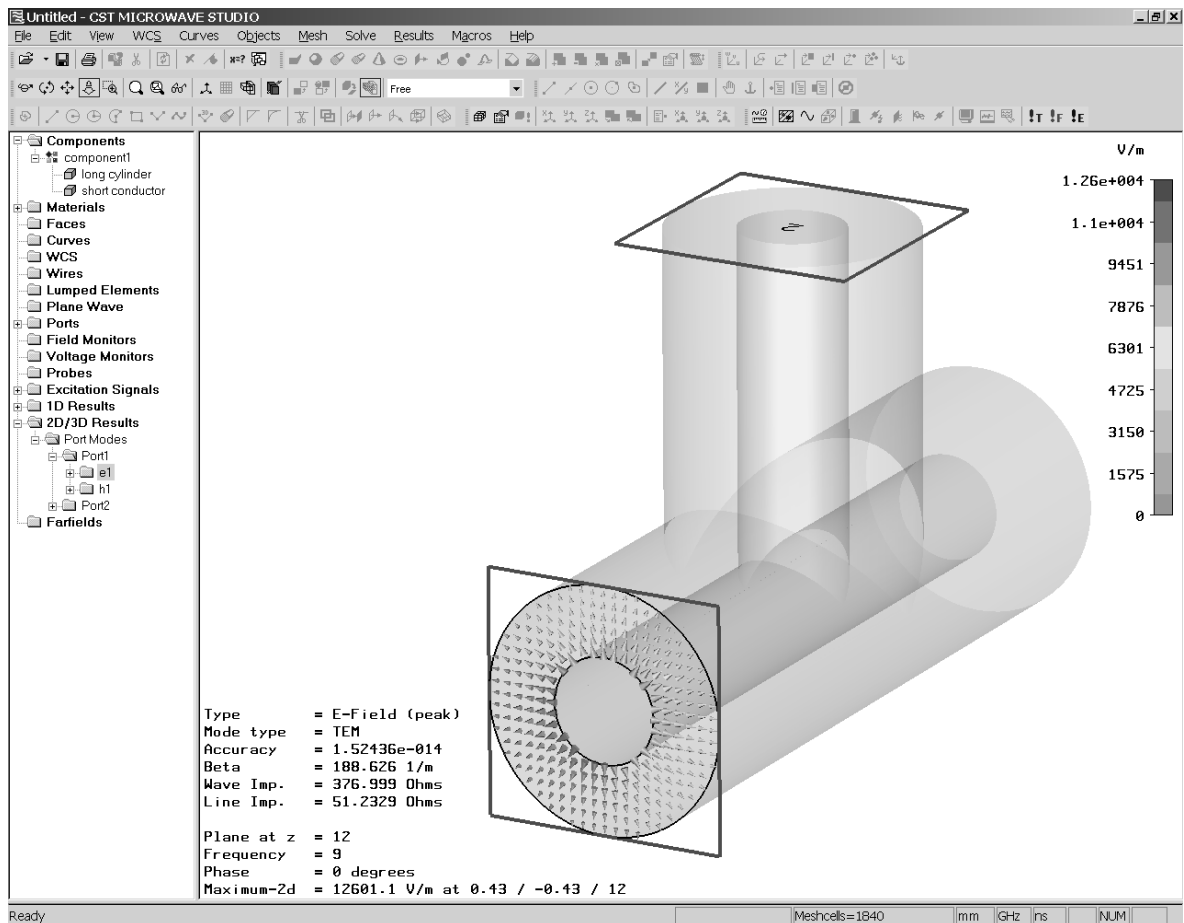


Рисунок 70

Помимо информации о типе моды, Вы также увидите постоянную распространения волны (Beta) на средней частоте. Дополнительно автоматически будет вычислено полное сопротивление порта (полное входное сопротивление линии).

При этом Вы обнаружите, что рассчитанный результат импеданса порта 51.23 Ом, весьма хорошо согласуется с аналитическим решением импеданса равным 50.58 Ом. Разница в 1.29% объясняется дискретизацией структуры. Увеличивая плотность сетки, можно получить соглашение между теоретическим и рассчитанным значением еще лучше. Однако автоматическое

создание сетки всегда пытается выбрать такой режим сетки, при котором достигается оптимальное сочетание скорости и точности моделирования.

Количество и размер стрелок может быть откорректировано в диалоговом окне, которое вызывается командой главного меню *Results - Plot Properties*, или командой *Plot Properties* из контекстного меню.

Кроме того, Вы можете выполнить визуализацию скалярного поля, открывая папку *e1* и выбирая одну из его составляющих поля (например *x*). Выбранная составляющая поля будет визуализироваться, по умолчанию, как графический контур:

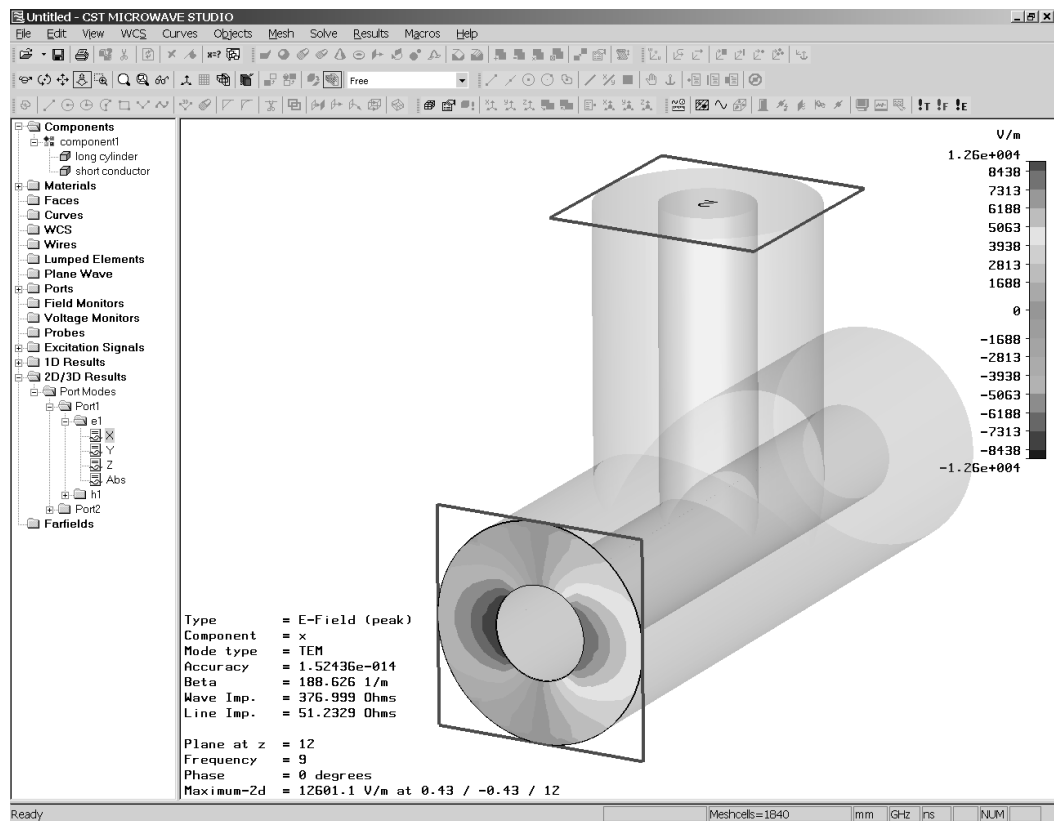


Рисунок 71

Вы можете изменить тип визуализации в диалоговом окне команды *Results - Plot Properties* главного меню или команды *Plot Properties* контекстного меню.

Немного остановитесь на этом, и поэкспериментируйте с различными типами визуализации, прежде чем приступить к следующему шагу.

Анализ S-параметров

Как только моделирование будет закончено, Вы должны посмотреть на временной сигнал мод порта. Вы можете визуализировать эти сигналы, выбирая в дереве навигации папку *IDResults - Port signals*. После выбора этой папки должно появиться следующее графическое изображение:

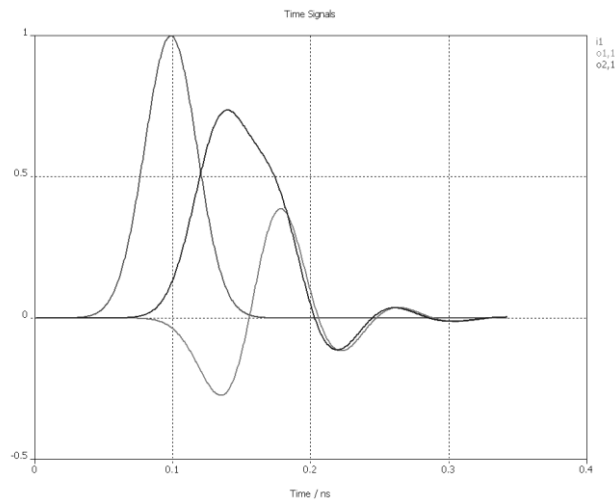


Рисунок 72

Название входных сигналов соответствует их портам: «i1» (для порта Port1), «i2» (для порта Port2) и так далее. Выходные сигналы также названы «o1,1», «o2,1», где вторая цифра соответствует возбуждающему порту.

Чтобы получить достаточно гладкий спектр частот S-параметров, необходимо чтобы уровень всех временных сигналов спал до нуля, прежде чем процесс моделирования будет завершен. Моделирование будет остановлено автоматически, когда данный критерий будет выполнен.

Конечно, результатами, представляющими наибольший интерес, являются непосредственно S-параметры. Вы можете получить визуализацию этих параметров в линейном масштабе, выбрав папку в дереве навигации *IDResults - |S| linear*.

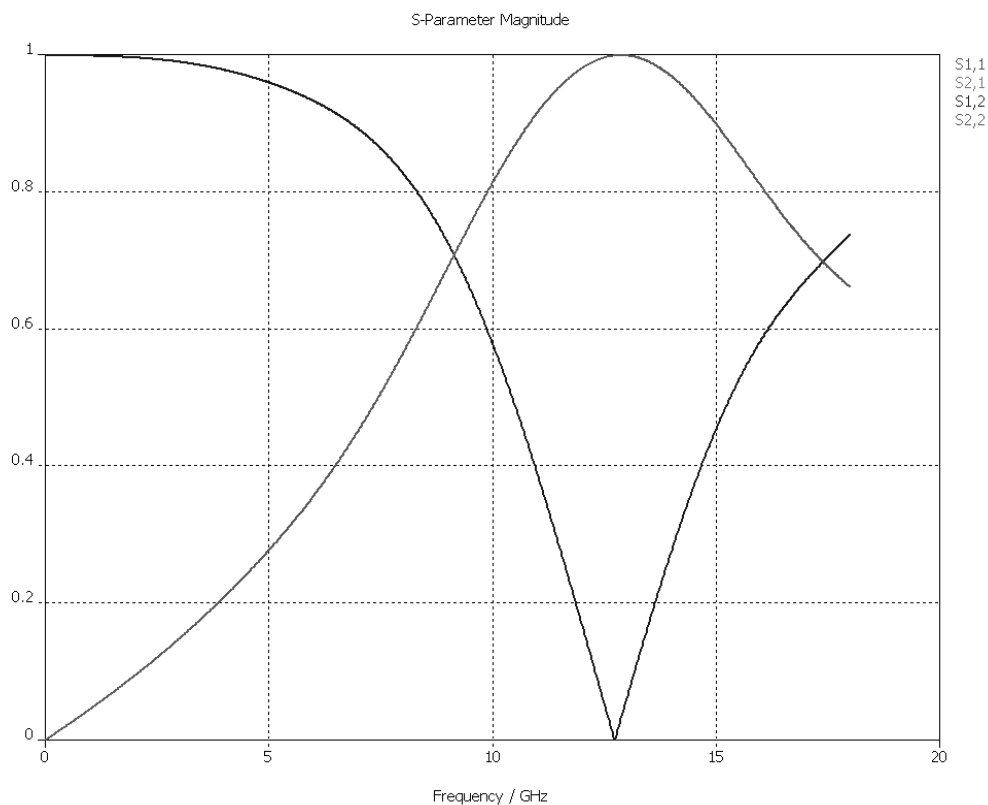


Рисунок 73

Вы можете изменить масштабирование оси, выбирая команду из главного меню *Results - 1D Plot Options - Plot Properties* (или из контекстного меню). Кроме того, Вы можете отобразить или скрыть маркер оси, выбирая команду *Results - 1D Plot Options - Show Axis Marker* главного меню. Маркер может быть перемещен клавишами управления (влево, вправо) или путем перетаскивания мыши.

Маркер в данном случае поможет определить, что минимум передачи ($S_{1,2}$ и $S_{2,1}$) происходит приблизительно на частоте 12.76 ГГц.

Таким же образом, как и выше, S-параметры можно визуализировать в логарифмической шкале (в дБ), путем выбора папки из дерева навигации *1D Results - |S| dB*. Фаза может быть визуализирована путем выбора папки дерева навигации *1D Results - arg(S)*.

Кроме того, S-параметры могут быть визуализированы на диаграмме Смита (дерево навигации - *1D Results - Smith Chart*).

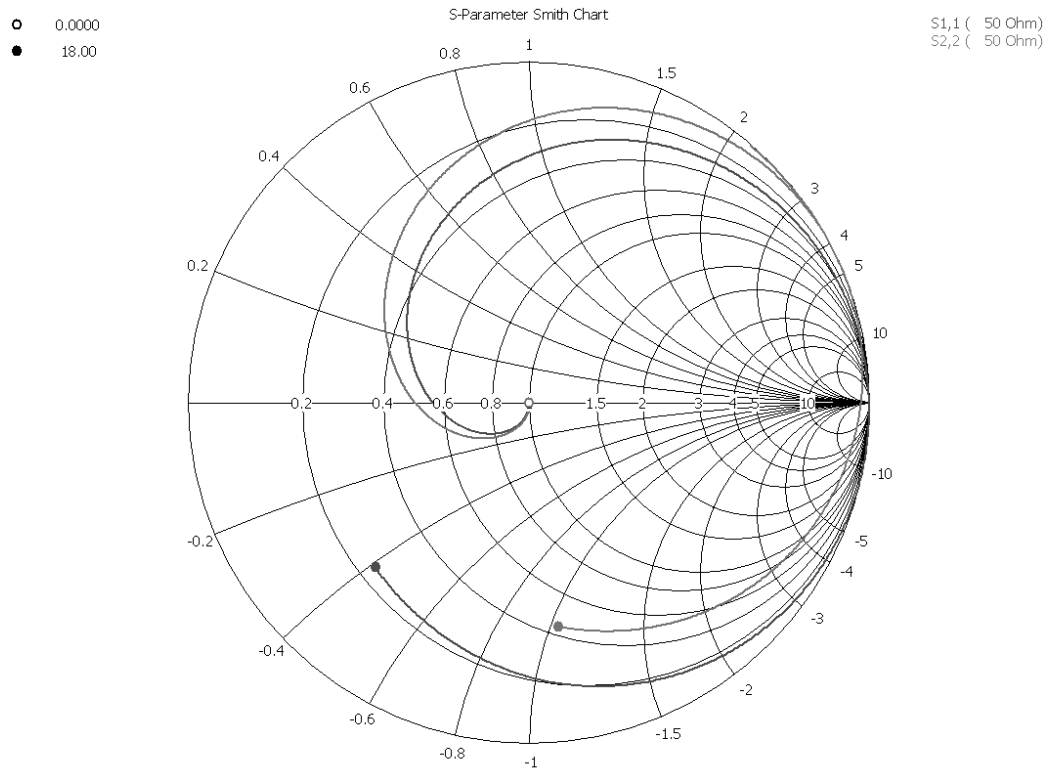


Рисунок 74

В этом графическом окне Вы можете прибавить маркеры к характеристикам просто дважды щелкая клавишей мыши в нужном месте кривой. Удалить данные маркеры Вы можете удалить в диалоговом окне свойств *Results - 1D Plot Options - Plot Properties* главного меню (или из контекстного меню).

Адаптивное разбиение сетки

Как уже было упомянуто, разрешающая способность сетки действительно влияет на результаты работы. Экспертная система разработана таким образом, что она анализирует конфигурацию и пытается идентифицировать части, которые наиболее влияют на поведение электромагнитного поля в структуре. В этих частях сетка будет автоматически усовершенствована. Однако не во всех случаях данное усовершенствование может быть максимально эффективным. Для решения этой задачи в CST Microwave Studio имеется опция адаптивного

измельчения сети, которая использует результаты предыдущего моделирования для улучшения параметров настройки экспертной системы.

Опция адаптивного изменения сетки может быть активировано установкой галочки в соответствующем поле диалогового окна запуска анализа переходных процессов:

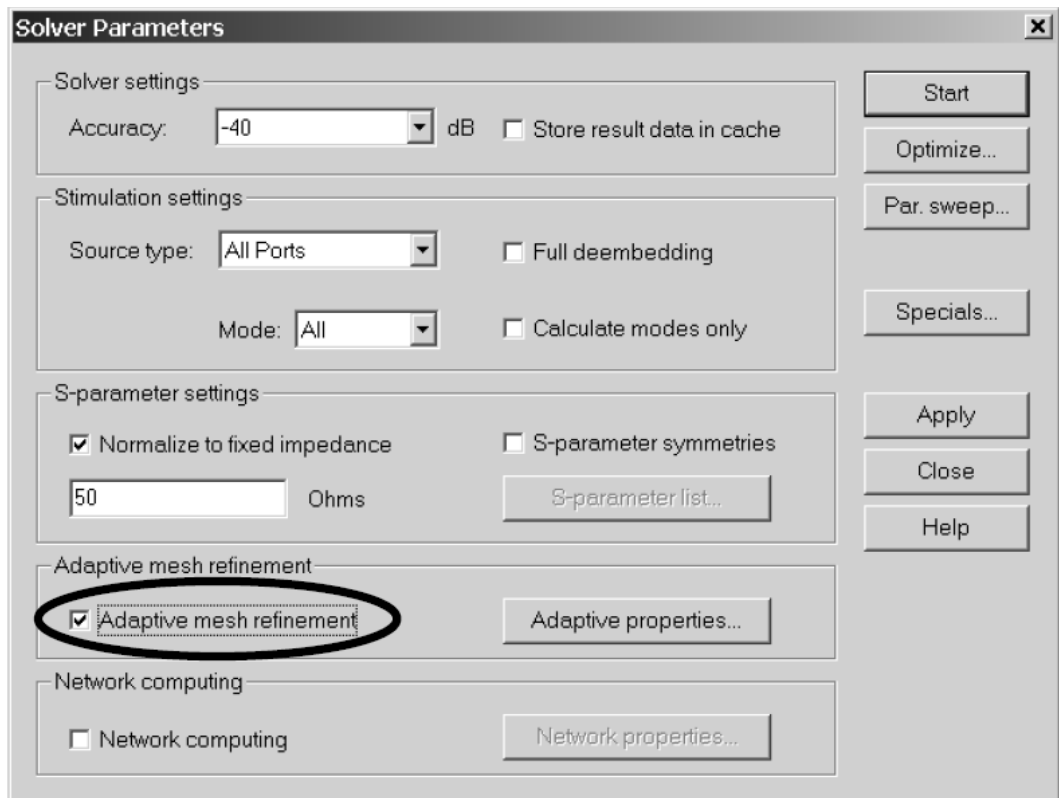


Рисунок 75

После старта решающего устройства, автоматически осуществляется несколько проходов усовершенствования сетки, пока между двумя проходами S-параметры значительно не изменятся.

После того, как два прохода будут закончены, появится следующее диалоговое окно:

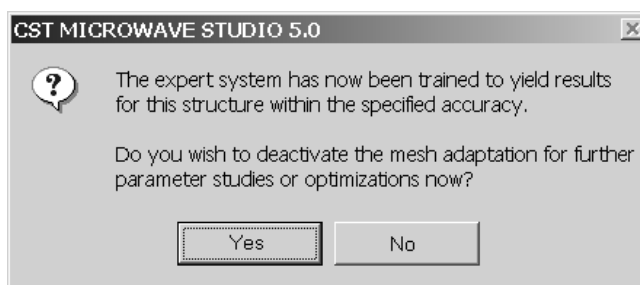


Рисунок 76

Так как автоматическая процедура адаптации сетки успешно скорректировала настройки экспертной системы, с уровнем заданной точности (2% по умолчанию). Теперь Вы можете выключить процедуру адаптивного изменения сетки. Экспертная система теперь установит определенные правила к структуре, даже если они будут изменены в последствии. Эта чрезвычайно сильная технология позволит Вам выполнить процедуру адаптации только один раз, а затем производить изучение параметров или оптимизацию структуры без потребности в дальнейших адаптациях сетки.

Подтвердите дезактивацию адаптации сетки, нажав на кнопку *Yes*.

Когда моделирование закончится, S-параметры и поля показывают схожие результаты. Результаты усовершенствования сетки можно посмотреть в папке *1D Results - Adaptive Meshing - Delta S* дерева навигации. В этой папке содержится характеристика, которая показывает максимальную разность между двумя результатами измерения S-параметра, в результате последовательных проходов. Эту характеристику можно посмотреть, выбрав пункт *1D Results - Adaptive Meshing - Delta S* из дерева навигации.

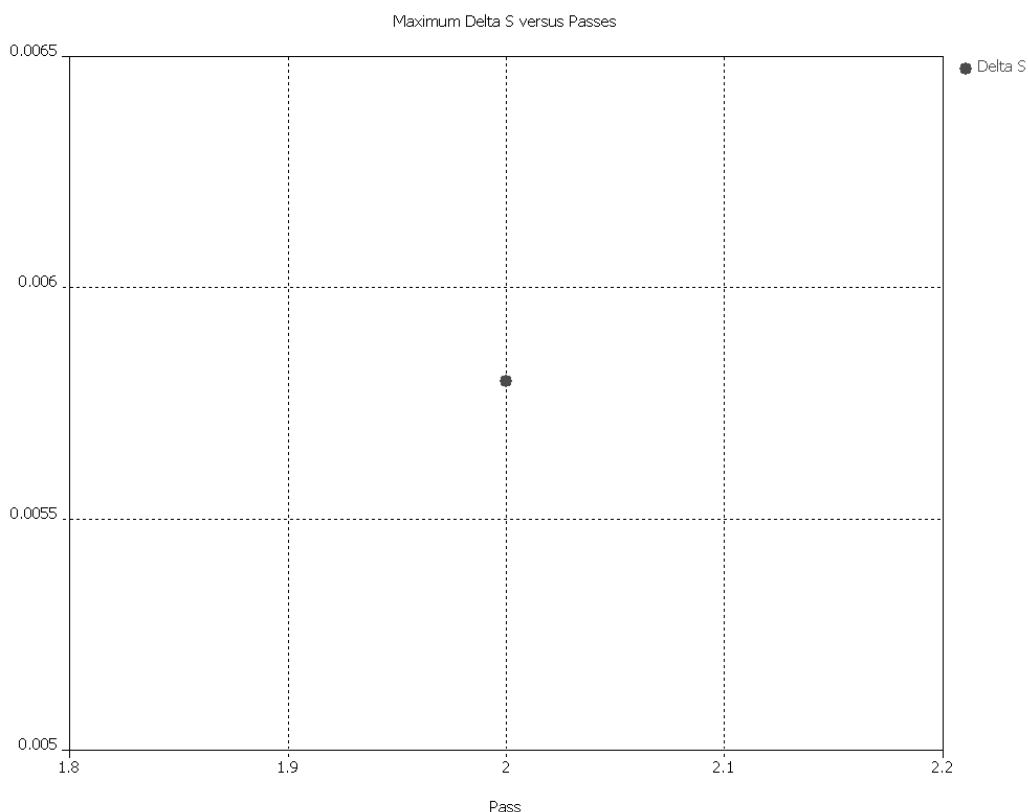


Рисунок 77

Поскольку адаптация сети требовала только двух проходов для этого примера, характеристика Delta S на графике представлена только одной точкой. Результат показывает, что максимальная разность S-параметров составляет приблизительно 0.6% для всего частотного диапазона. Адаптация сетки останавливается автоматически в случае, когда разность составляет менее 2%. Этот предел может быть изменен в предыдущем диалоговом окне, в настройках (кнопка *Adaptive properties*).

Дополнительно, сходимость результатов вычисления S-параметров, может визуализироваться путем выбора пунктов *1D Results - Adaptive Meshing - |S| linear - S1,1* (относительно проходов) и *1D Results - Adaptive Meshing - |S| linear - S2,1* (также относительно проходов) дерева навигации.

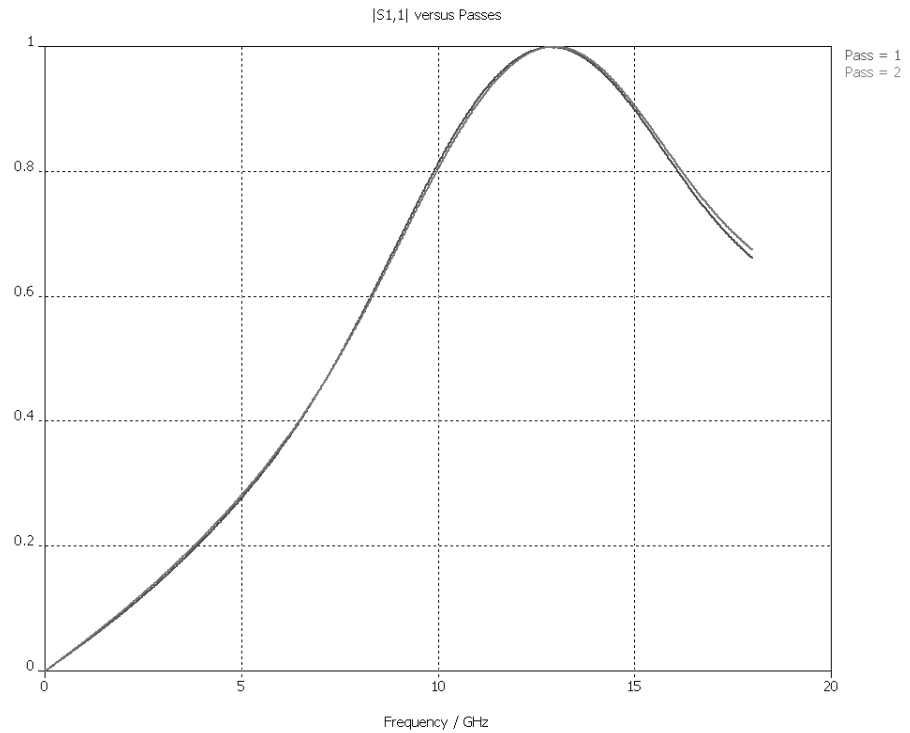


Рисунок 78

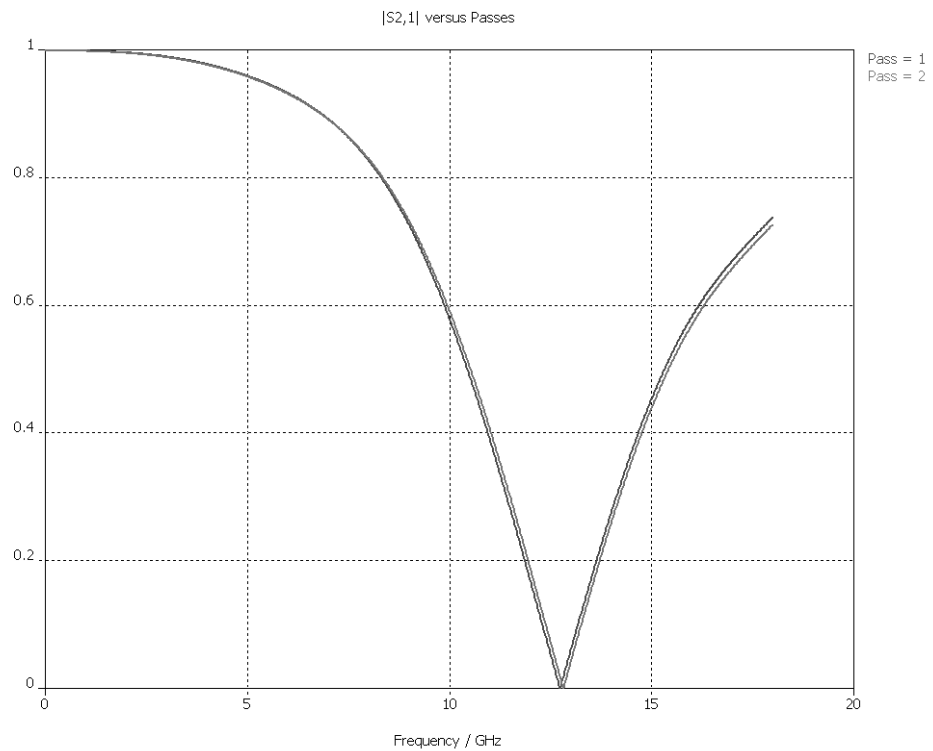


Рисунок 79

Можно заметить, что экспертная система для данной структуры генерирует хорошую по показателям сетку. Сходимость S-параметров достаточно высока.

Другое следствие процедуры адаптации сетки позволяет Вам визуализировать, как изменяется импеданс порта в зависимости от количества адаптивных проходов (пункт *ID Results -Adaptive Meshing - Port Impedance* дерева каталогов).

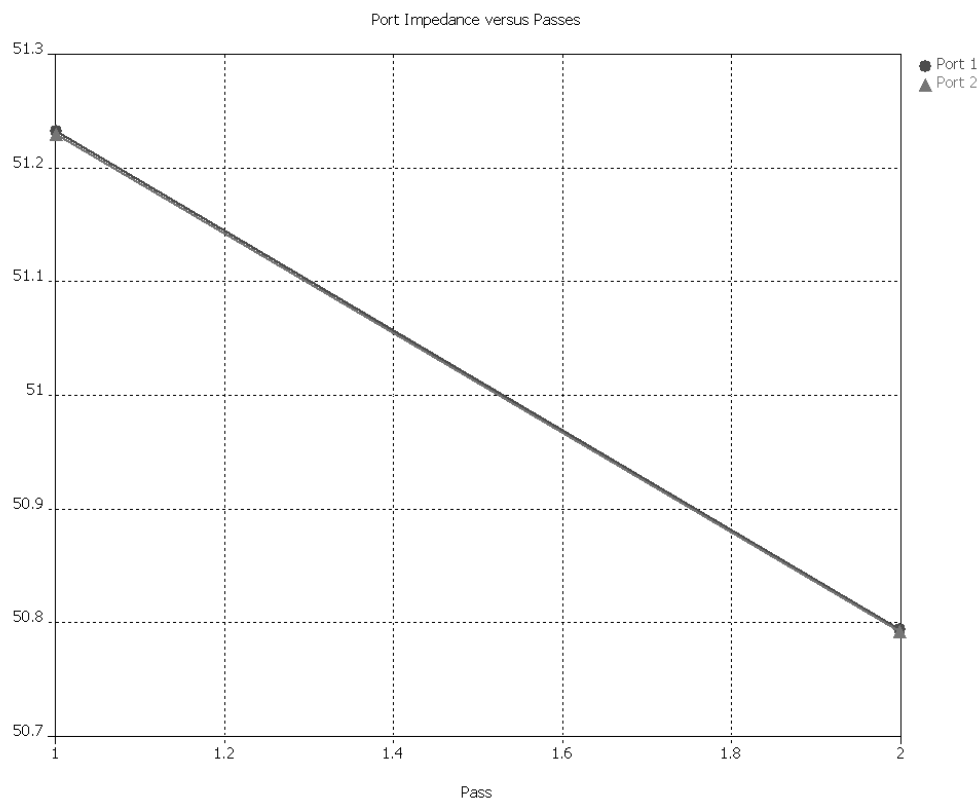


Рисунок 80

Этот результат показывает, что импеданс порта отклоняется не более чем на 0.45% от теоретического результата 50.58 Ом.


Все это доказывает необходимость использования опции адаптации сетки, для проверки сходимости результатов, но это не является необходимым для тех структур, с которыми Вы уже знакомы, и где Вы уже вручную можете корректировать автоматически установленные параметры сети.

Анализ электромагнитного поля на различных частотах

Чтобы понять поведение электромагнитного устройства, часто полезно получить понимания распределения электромагнитного поля в нем. В

представленном примере Вы сможете увидеть различие характеристик поля на различных частотах, и при различных коэффициентах передачи.

Поля могут быть зафиксированы на любых частотах во время имитации. Однако не возможно сохранения картины поля во всех доступных частотах, так как это потребовало бы огромного пространства объема памяти. Поэтому Вы должны определить частоты, при которых будут произведены запись картины поля во время выполнения анализа переходных процессов.

Данные точки могут быть определены в диалоговом окне, которое открывается по команде главного меню *Solve - Field Monitors* (). Однако для того, чтобы данная команда была активна, необходимо вернуться к папке *Components* дерева навигации.

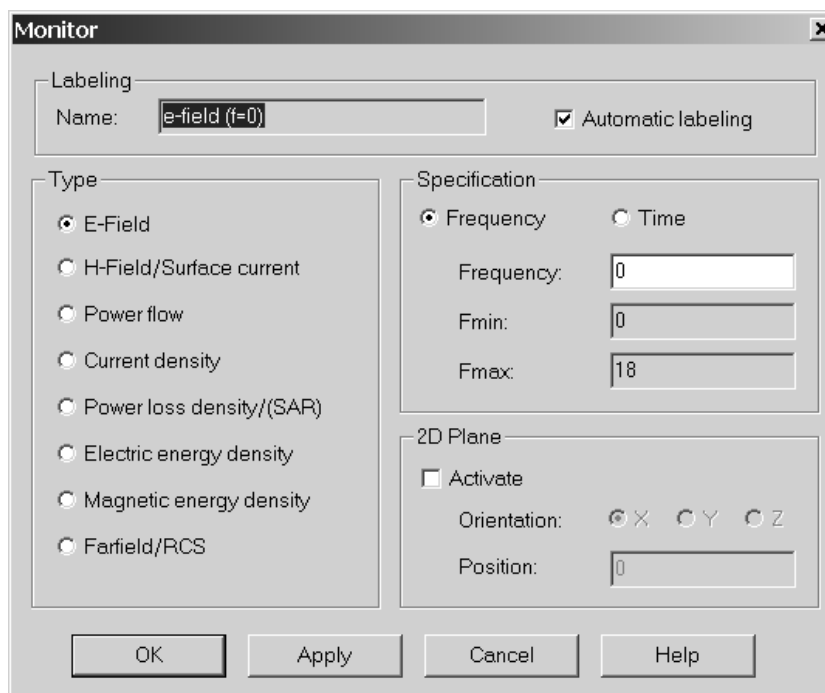


Рисунок 81

После выбора типа *Type* монитора, Вы должны определить его частоту в поле *Frequency*. Затем нажмите кнопку *Apply*. Все частоты определены в ранее установленных единицах (в ГГц).

Для этого анализа Вы должны добавить следующие точки:

Таблица 1

Field type	Frequency / GHz
E-Field	3
E-Field	12.8
H-Field	3
H-Field	12.8

Все выбранные точки, будут отображены в навигационном дереве в папке *Field Monitors*. В данной папке Вы можете выбрать любую из указанных точек, чтобы отобразить ее параметры, изменить или удалить.

Когда моделирование закончится, Вы сможете визуализировать параметры электромагнитного поля при заданной частоте. Результаты могут быть найдены в папке *2D/3D Results* дерева навигации. Результаты упорядочены согласно их физической величине (*E-Field/H-Field/Currents/Power flow*).

Замечание: так как Вы выбрали полное вычисление S-матрицы, то требуется вообще-то два процесса моделирования, в каждом из которых будет производиться запись картины поля на определенных частотах и результаты будут представлены в соответствующей папке дерева навигации, с указанием номера порта возбуждения в скобках. Однако в данном случае проведение второго моделирования не является необходимым, и поэтому Вы сможете наблюдать результаты только первого процесса моделирования. Также Вы можете настроить параметры анализа таким образом, чтобы выполнялись оба процесса моделирования. Это можно сделать, сняв галочку с пункта *Consider two port reciprocity* в пункте *Specials* диалогового окна *Solver Parameters*.

Вы можете исследовать трехмерное распределение электрического поля, выбирая пункт *2D/3D Results - E-Field - e-field(f=3)* дерева навигации. Графическое окно должно выглядеть следующим образом:

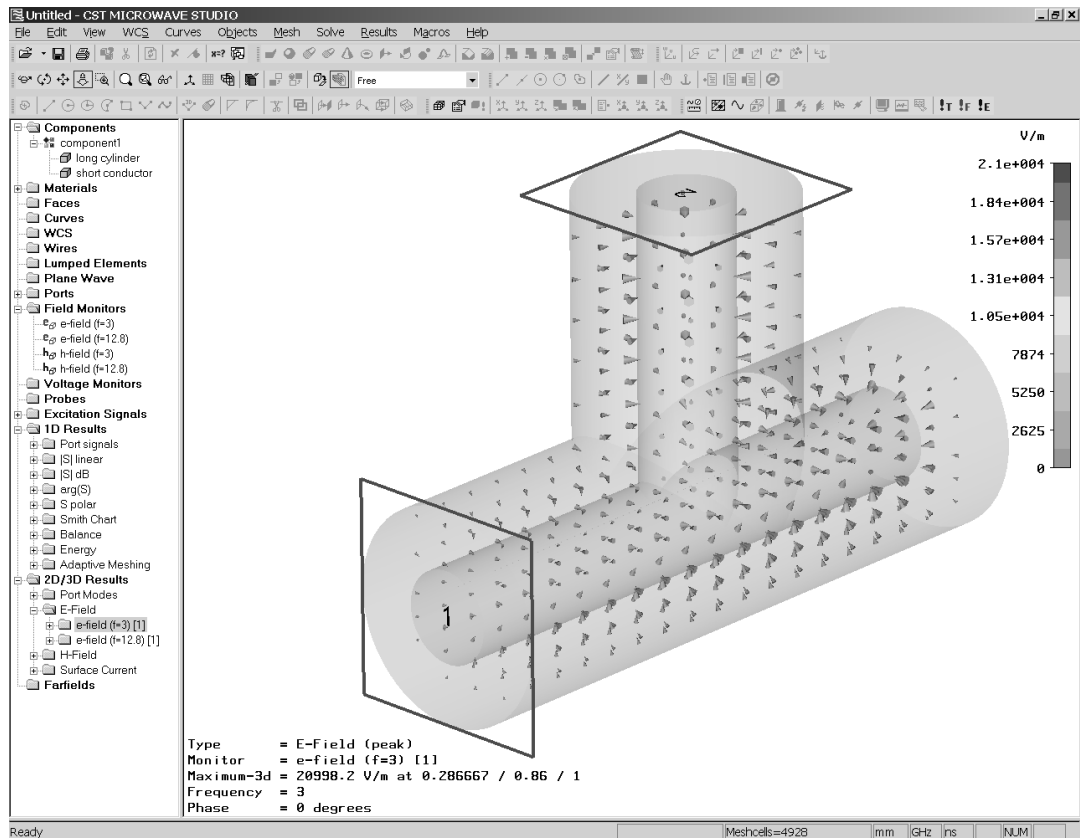


Рисунок 82

Потренируйтесь теперь с различными опциями визуализации для данного трехмерного графического вектора.

Поверхностные токи могут быть визуализированы из дерева навигации *2D/3D Results – Surface Current - h-field(f=3)[1]*. В итоге Вы должны увидеть следующее изображение:

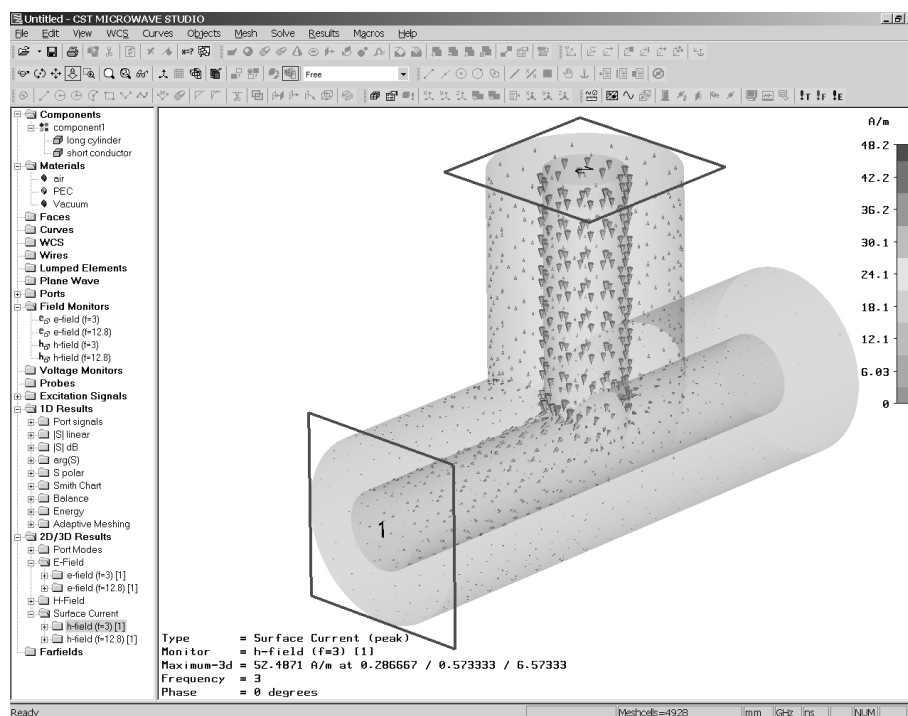


Рисунок 83

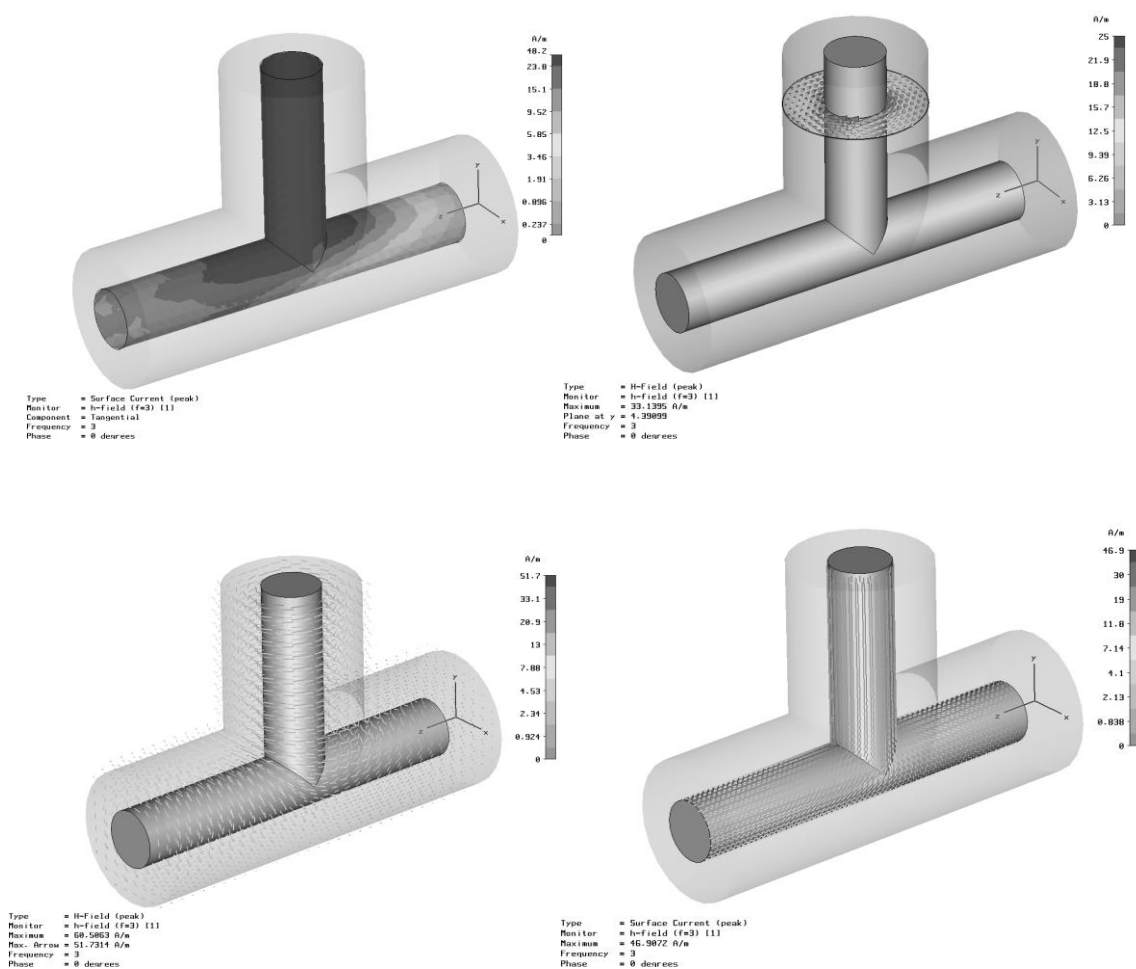
Теперь Вы можете изменить графические опции в диалоговом окне команды *Result- Vector Plot* главного меню (*Plot Properties* контекстного меню). Вы можете получить анимационное изображение поля, нажав кнопку *Start* в поле *Phase/Animation* данного диалогового окна. Здесь фаза поля будет автоматически варьироваться от 0 до 360°. Анимация может быть остановлена нажатием кнопки *Stop*. После чего, активировав основное окно нажатием левой клавиши мыши, Вы можете также последовательно изменять фазу, пользуясь клавишами влево/вправо.

Вы можете увидеть электрический ток на частоте 3 ГГц. Если Вы посмотрите эту же картину на частоте 12.8 ГГц, то сможете увидеть, что на втором проводнике коаксиального (перпендикулярном основному) ток практически не проходит.

После рассмотрения краткого обзора распределения электромагнитного поля в трехмерном изображении, Вы можете исследовать дополнительно еще некоторые параметры, анализируя некоторые перекрестные области структуры. Выберите электрическое или магнитное поле (но только не поверхностные

токи) и переключите режим *3D* в режим *2D (Results - 3D Fields on 2D Plane)* (главного меню). В двухмерном режиме доступны все те же графические операции, что и в трехмерном. Это может быть сделано путем изменения параметра *Cut plane* в диалоговом окне команды *Results - Vector Plot* or *Results - Scalar Plot* главного меню.

Из-за ограниченного объема данного справочника, мы не можем полностью описать здесь все возможные графические операции. Однако на следующем изображении представлены различные виды визуализации. А Вы сможете воспроизвести их всех?



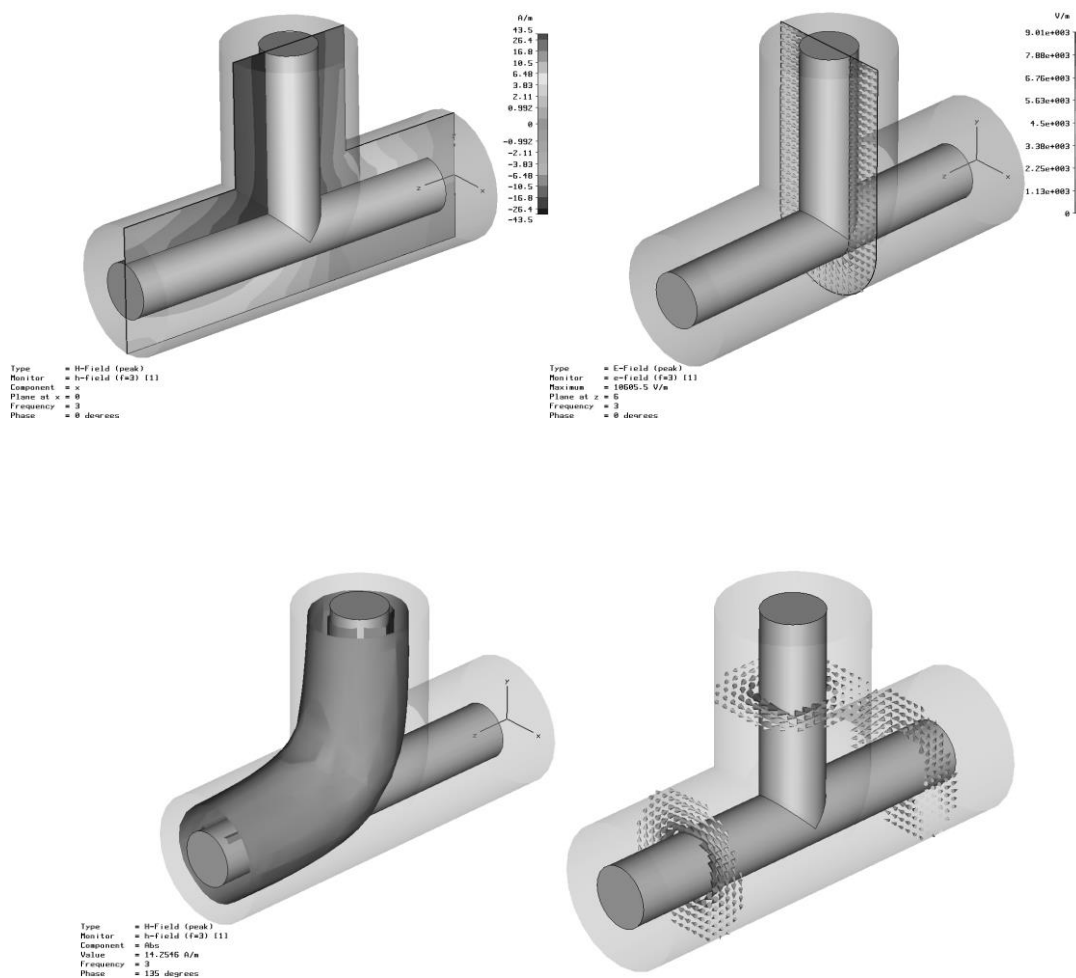


Рисунок 84

Параметризация модели и автоматическая оптимизация

Выше было рассмотрено, как ввести и проанализировать простую структуру. Однако структуры анализируются обычно для улучшения их эффективности. Эту процедуру уже можно называть разработкой.

После того, как Вы получите информацию о том, как улучшить структуру, Вы должны будете изменить параметры структуры. Это конечно может быть сделано и повторным созданием структуры, но это не является лучшим решением.

CST Microwave Studio предлагает довольно большое количество операций по параметризации, которые позволяют легко изменить структуру. Функция листа предыстории, которая была описана выше, является очень общей опцией, но для изменения простых параметров будет полезна и опция, описанная ниже.

Допустим, Вам необходимо изменить длину короткого проводника коаксиального кабеля. Самый простой способ – это перейти в основное окно создание структуры (папка *Components* дерева навигации).

Вы теперь можете выбрать все порты, нажимая на папку *Ports* дерева каталогов. Теперь здесь нажмите на правую кнопку, и из меню контекста выберите пункт *Hide All Ports*. Структура должна выглядеть теперь следующим образом.

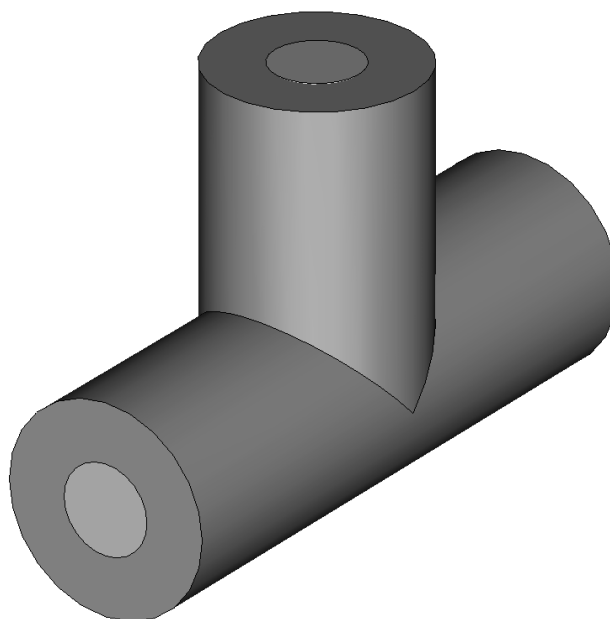


Рисунок 85

Теперь выберите внутренний проводник, дважды щелкая по нему левой клавишей мыши:

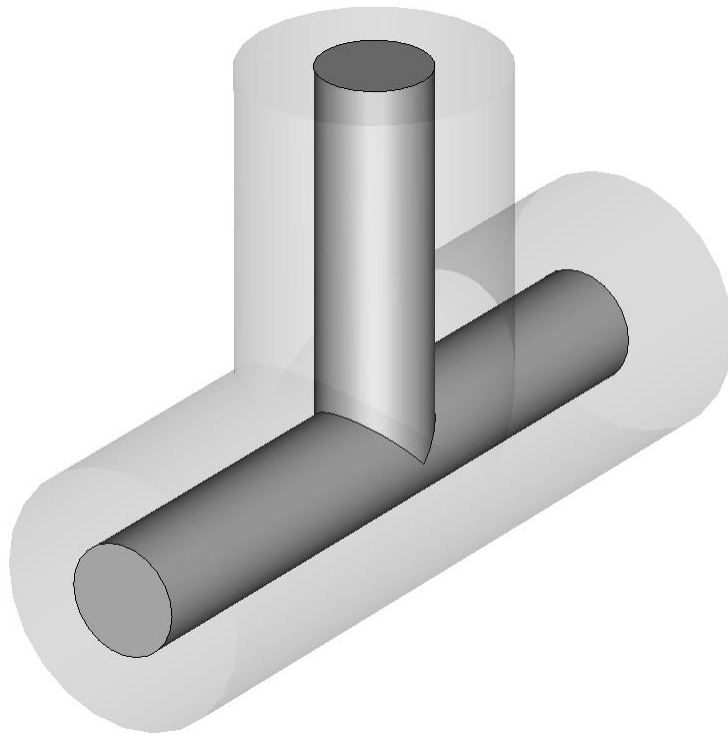


Рисунок 86

Теперь Вы можете выбрать команду *Properties* контекстного меню, которая откроет список с историей создания формы:



Рисунок 87

Выберите операцию «*Define cylinder*» в папке *component1:long conductor* в листе предыстории. Теперь соответствующая форма будет подсвечена в основном окне:

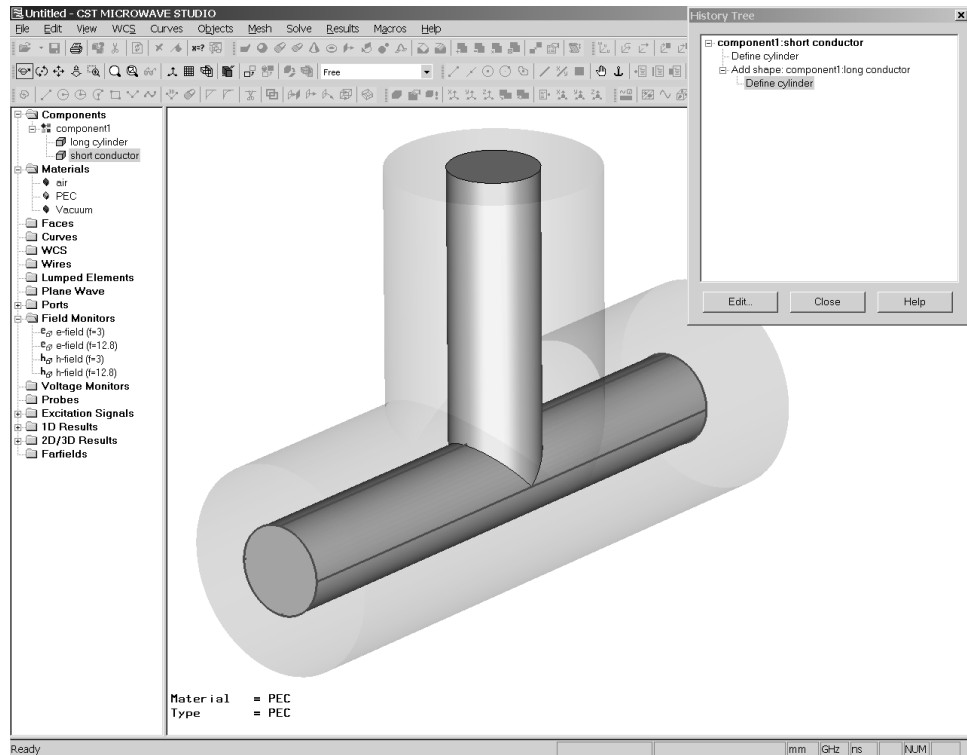


Рисунок 88

После этого нажмите кнопку *Edit* в листе предыстории и появится диалоговое окно с параметрами формы:

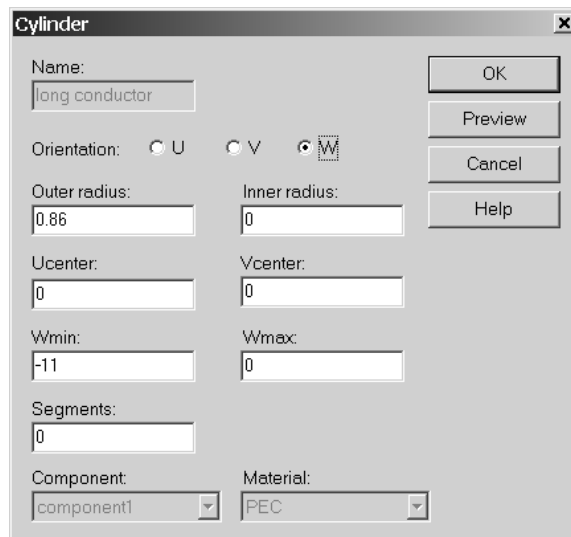


Рисунок 89

В этом диалоговом окне Вы можете найти параметр длины цилиндра ($W_{min}=-1$). Измените этот параметр на «-9» и нажмите ОК. Так как Вы

собираетесь изменить структуру, то ранее полученные результаты моделирования теперь не будут соответствовать текущей структуре и перед Вами откроется следующее диалоговое окно:

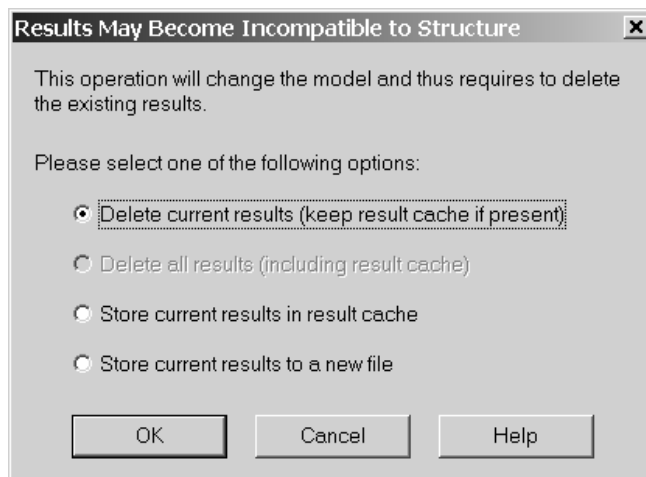


Рисунок 90

Здесь Вы можете определить, сохранить ли результаты в КЭШе, или в файле, или удалить их. В данном случае действуйте по умолчанию, и просто нажмите кнопку *OK*.

Спустя несколько секунд структура примет следующий вид:

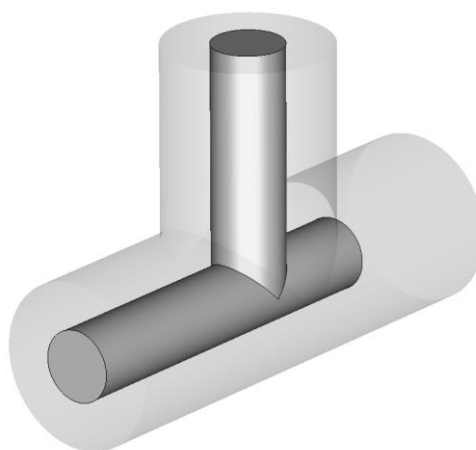



Рисунок 91

Вы можете вообще изменить все параметры формы, просто выбирая тот или иной объект и редактируя его. Это полностью параметрическое структурное моделирование – одно из выдающихся особенностей CST Microwave Studio.

Параметрическое моделирование работает даже в том случае, если объекты были созданы относительно друг друга с использованием локальной системы координат. В этом случае программа попытается идентифицировать все выбранные грани согласно их топологическому порядку, а не относительно абсолютной позиции в пространстве.

Изменения параметров иногда бывает настолько большим, что может привести к появлению ошибки. Для этих случаев операция листа предыстории предлагает некоторые функции, позволяющие обойти эти проблемы. Пожалуйста, обратитесь по этому поводу к сетевой документации.

Помимо опции прямого изменения параметров, Вы также можете задать переменные на структурные параметры. Это может быть сделано путем прибавления новых переменных к таблице параметров (*Edit – Parameters*, ):

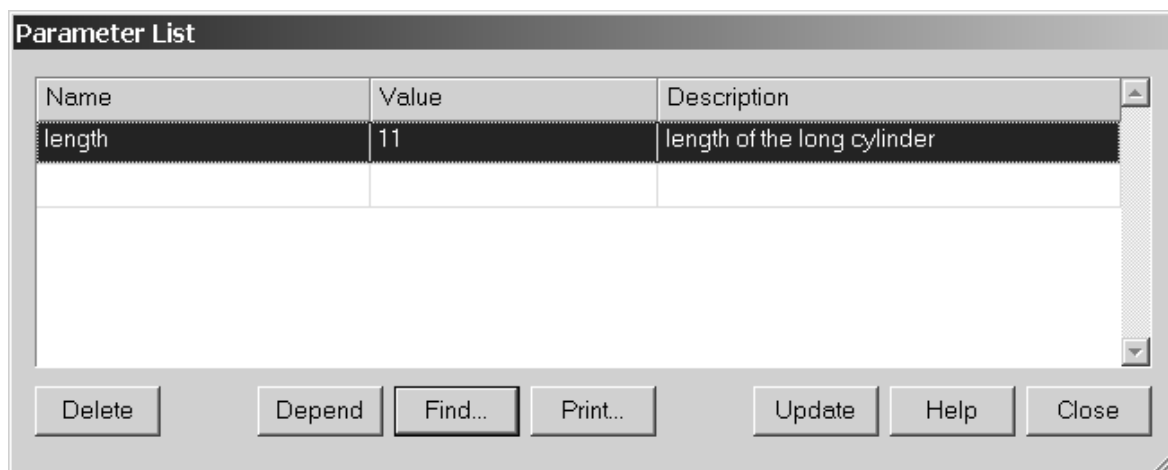


Рисунок 92

Замечание: элементы данного диалогового окна могут быть неактивными в случае, если при этом открыто еще одно окно структурного изменения (например, лист предыстории). Поэтому, для изменения параметров, закройте все другие диалоговые окна.

Чтобы добавить новый структурный параметр, дважды щелкните в поле *Name* и введите имя нового структурного параметра (в данном случае *length*). Далее определите его величину в поле *Value* (в данном случае *11*). Также Вы можете дать описание параметру в соответствующем поле *Description*. Теперь замените величину $W_{min}=-9$ в диалоговом окне *Cylinder* на переменную величину «*-length*».

Вы можете теперь изменить значение этого параметра записывая новую величину в поле *Value* и нажимая затем кнопку *Update*. После чего структура будет изменена согласно текущему параметру. Теперь Вы можете проверить, что изменение данного параметра в диапазоне от 7 до 11,5 дает полезные результаты.

Теперь, когда Вы параметризировали свою структуру, интересно будет посмотреть, как изменяются S-параметры при изменении длины внутреннего проводника. Самый простой способ получить эти результаты – использовать программное приспособление, которое открывается нажатием на кнопку *Par. sweep* в диалоговом окне анализа переходных процессов (*Transient Solver*). Откроется следующее диалоговое окно:

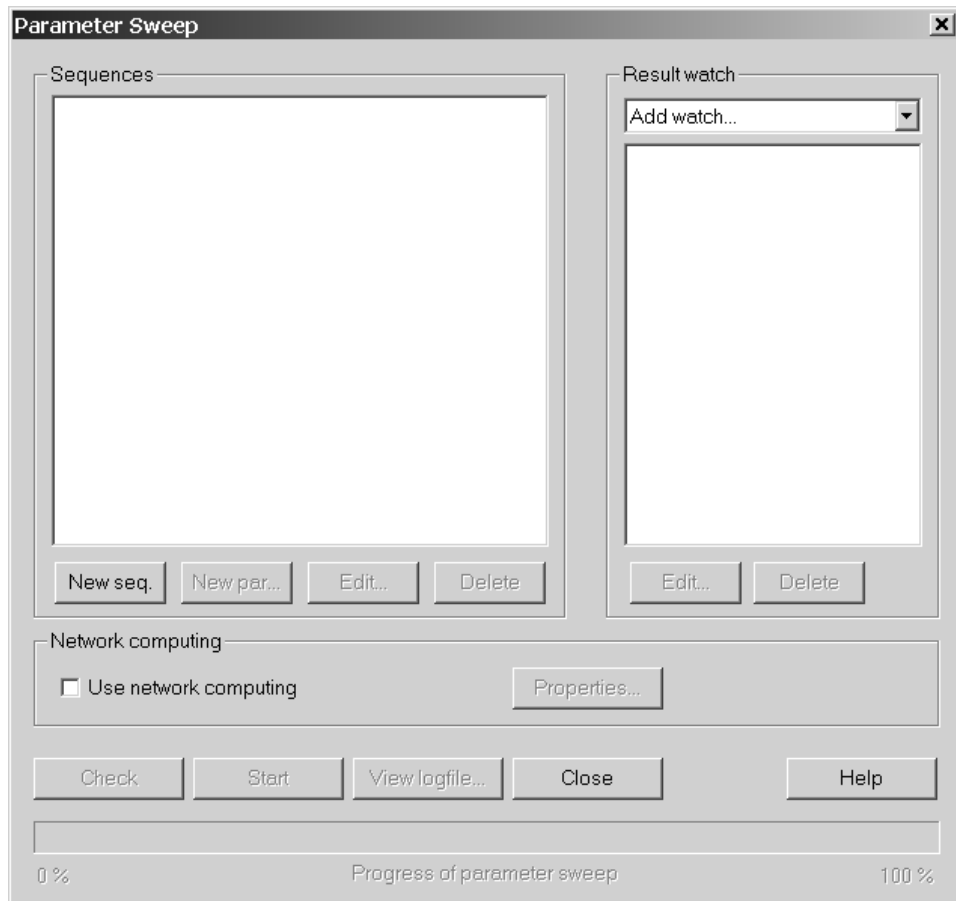


Рисунок 93

Здесь Вы можете определить так называемые последовательности (*Sequences*), которые будут состоять из различных комбинаций параметров. Чтобы добавить такую последовательность нажмите кнопку *New seq.* В дальнейшем Вы сможете выбрать пункт *New par...* при помощи которой Вы сможете добавить изменяемые параметры в последовательность:

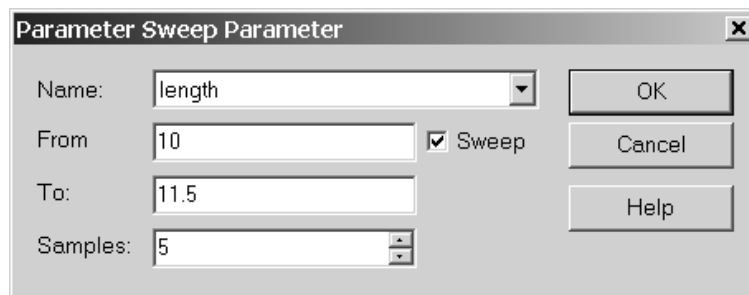


Рисунок 94

В этом окне Вы можете задать имя *Name* изменяемого параметра. Далее Вы можете определить нижнюю *From* и верхнюю *To* границы изменения параметра. В завершение введите количество шагов в поле *Samples*.

В этом примере Вы должны выбрать диапазон от 10 до 11.5 с количеством шагов равным 5. Диалоговое окно будет выглядеть следующим образом:

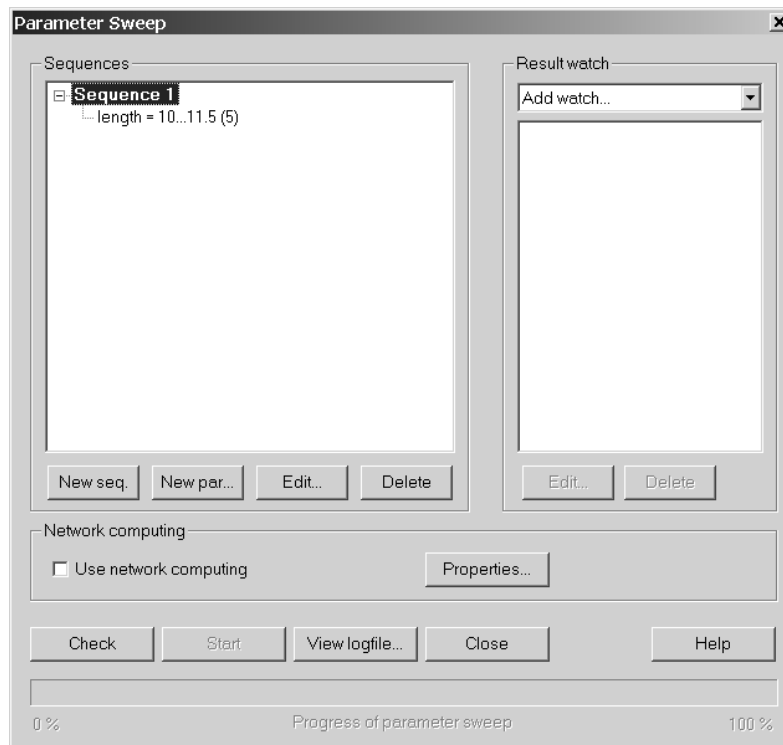


Рисунок 95

Пожалуйста, заметьте, что Вы можете определить произвольное количество последовательностей с неограниченным количеством комбинаций параметров.

Следующим шагом, Вы должны определить, какой результирующий параметр Вас интересует. Поэтому выберите строку *S-Parameter* в поле *Result watch*. Откроется следующее диалоговое окно:

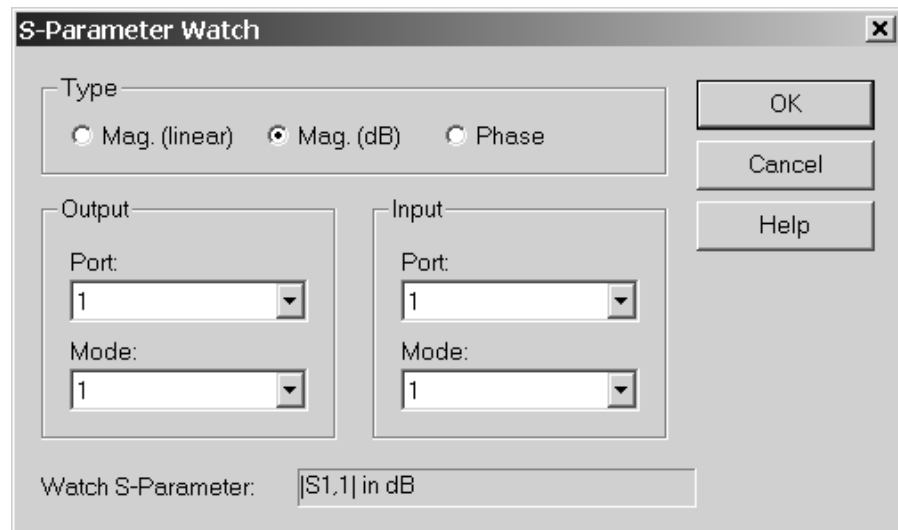


Рисунок 96

Во-первых, Вы должны установить тип измерения *Type* в дБ (*Mag.(dB)*) и нажать *OK*.

Затем Вы должны добавить величину $S_{2,1}$ следующим образом:

1. Выберите *S-Parameters* в поле *Result watch*;
2. Выберите *Type Meg.(dB)*;
3. Выберите 2 в поле *Output Port*;
4. Нажмите *OK*.

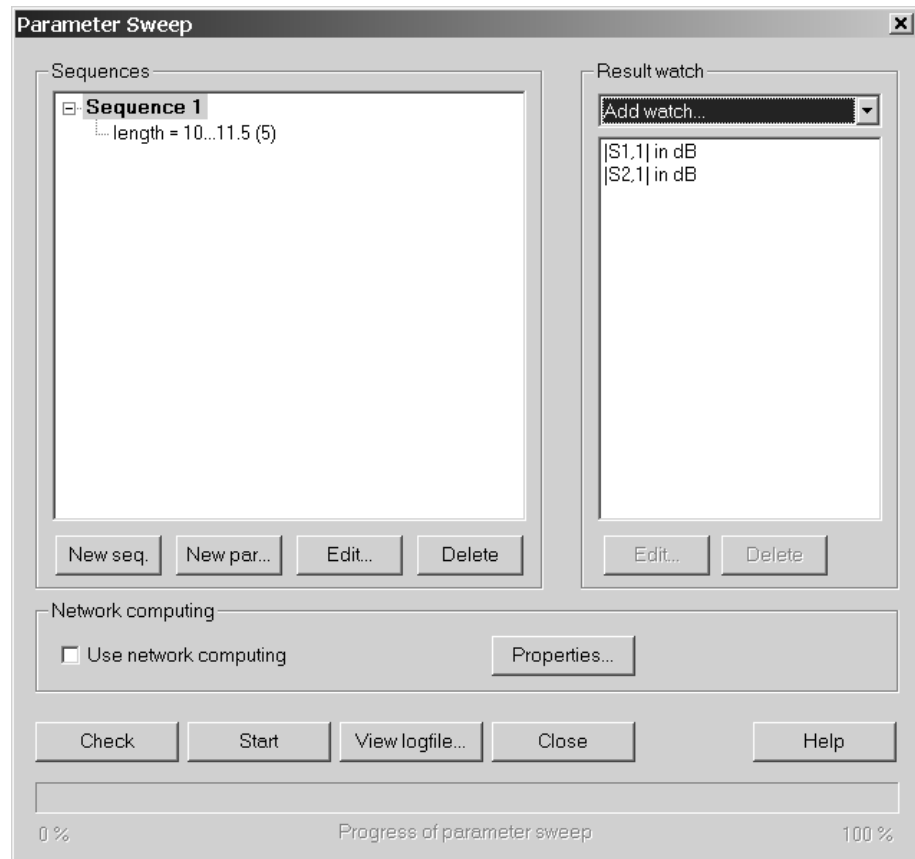


Рисунок 97

Теперь нажмите кнопку *Start*.

При этом заметьте, что при моделировании сохраняются ранее установленные настройки анализа переходных процессов. Если Вы изменяете эти настройки (например, для адаптации сетки), то удостоверьтесь, что новые параметры сохранены нажатием кнопки *Apply*.

После того, как процесс моделирования полностью закончится, нажмите кнопку *Close*. В дереве навигации теперь будет содержаться новый элемент *Tables* в котором Вы должны выбрать первый пункт.

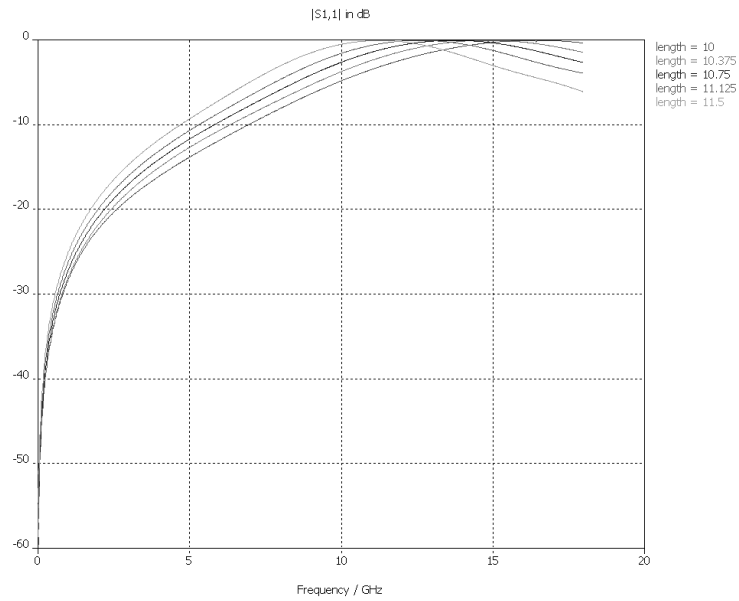


Рисунок 98

Таким же образом, Вы можете вывести на экран график коэффициентов передачи параметра $S_{2,1}$, выбирая пункт *Tables - $|S_{2,1}|$ in dB*:

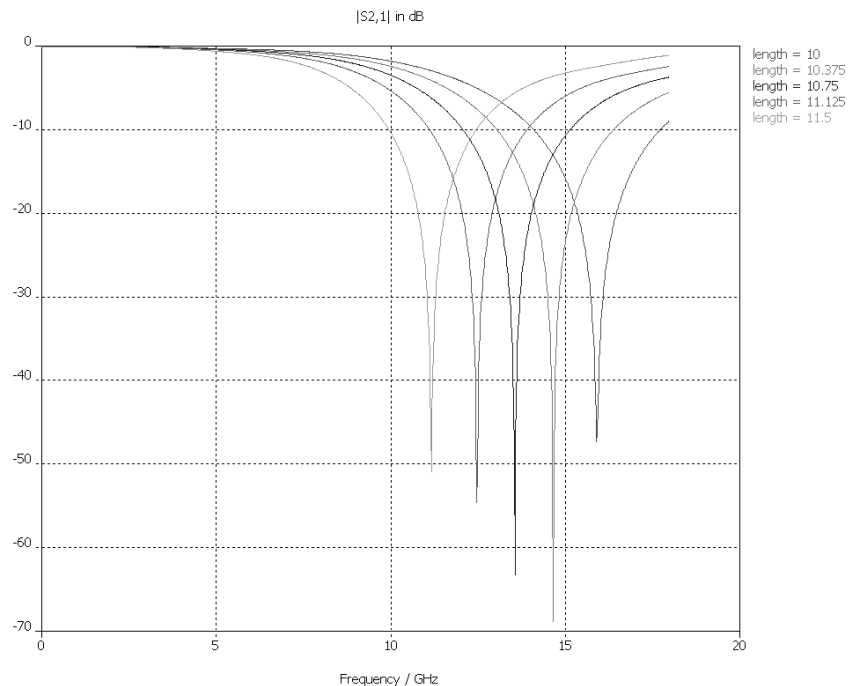


Рисунок 99

На данных рисунках интересно наблюдать, как изменяются характеристики при изменении параметров структуры. Эти и другие данные могут быть автоматически вычислены при использовании опции *Result Templates*. Откройте

соответствующее диалоговое окно, выбирая команду *Results - Template Based Postprocessing* (🔗).

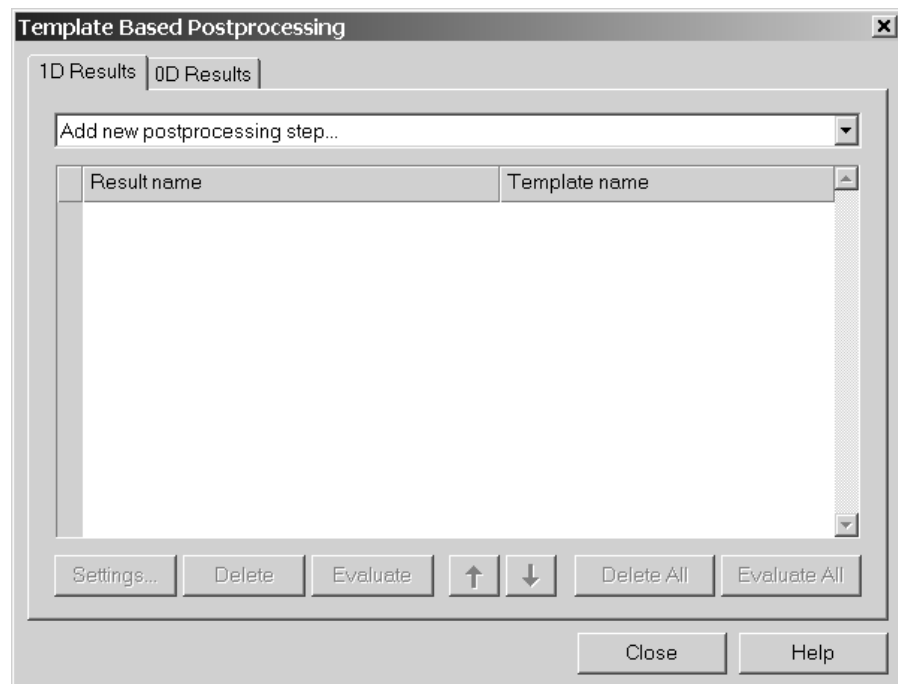


Рисунок 100

Во-первых, выберите в качестве исследуемого параметра S-параметры, из списка. Откроется следующее диалоговое окно:

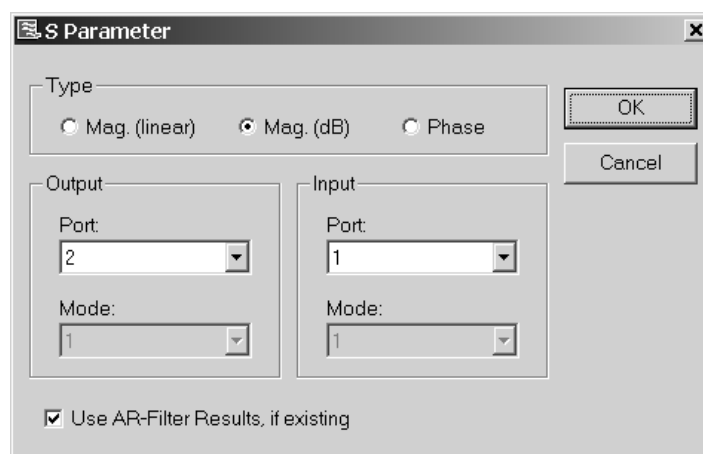


Рисунок 101

В этом окне задайте параметр $S_{2,1}$, величина измерения в дБ. Нажмите *OK*. Диалоговое окно примет вид:

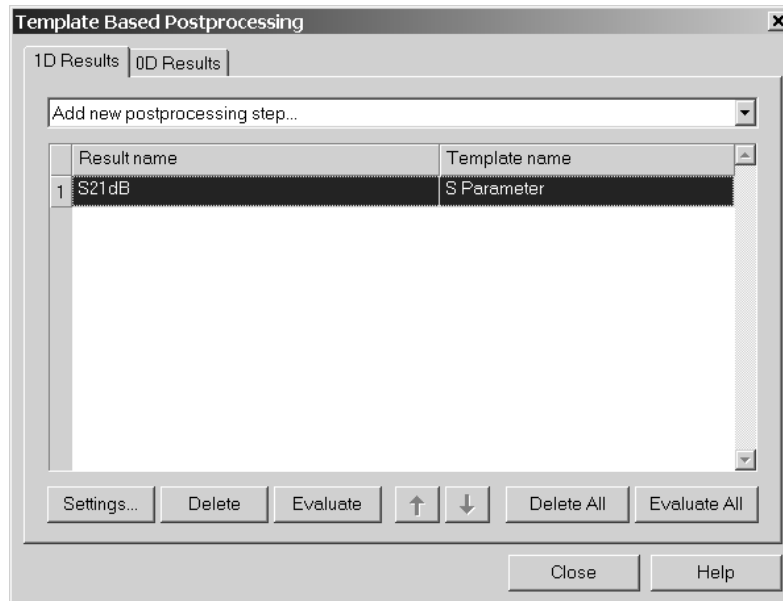


Рисунок 102

Из данных S-параметров в широкой полосе частот, можно определить минимальное значение, которое определяется единственной точкой на графике (*0D Result*). Поэтому переключите вкладку *0d Results* в указанном диалоговом окне и выберите там пункт *0D Value From 1D Result* в списке. Откроется диалоговое окно, где Вы сможете задать специфические параметры:

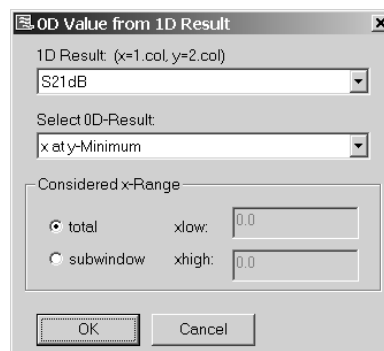


Рисунок 103

В поле *1D Result* доступен только один параметр – S21, так как только он и был вычислен. Так как Вам необходимо узнать (*y*)*минимум*, то Вы должны выбрать строку *x at y-Minimum* в поле *Select 0D Result*. В завершение нажмите *OK*.

После любого запуска решающего устройства, все данные операции будут автоматически выполняться, а их результаты заноситься в таблицу. Пожалуйста, просмотрите все параметры заново. Конечно, дополнительная отработка шагов, может быть начата прежде, чем запуститься первый процессор, но для обучения мы разбили эту задачу на два шага.

Как только решающее устройство обработает данную информацию, Вы сможете познакомиться с результатами (*Tables - 0D Results - S21dB_x* дерева навигации):

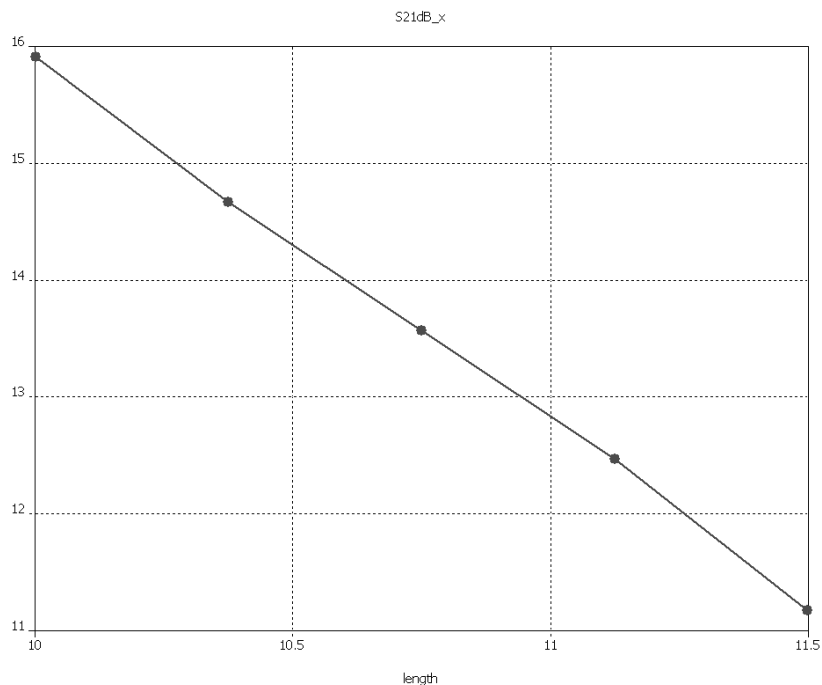


Рисунок 104

Эта характеристика ясно показывает, что расположение (= частоте) минимума передачи изменяется как функция геометрического параметра.



Также, учитывая невозможность отразить в данном пособии все возможности данной опции, мы настоятельно рекомендуем Вам обратиться к сетевой документации.


Предположим, Вам необходимо иметь минимум на частоте 13 ГГц. Измеряя характеристику (для этого необходимо активизировать опцию маркера оси при помощи команды *Results - 1D Plot Options - Axis Marker*), Вы можете увидеть,

что желательное значение параметра *length* при этом, должно быть равно приблизительно 10,94. Однако выяснение точного значения параметра могло бы быть более долгой задачей, которая вполне может быть выполнена автоматически.

Прежде, чем Вы продолжите оптимизировать эту структуру, Вы должны определить значение *length* в пределах заданного диапазона (например, 10.5) и обновить структуру (пожалуйста, заметьте, что Вы должны перейти к основному виду структуры, прежде чем изменять параметры).

4. Пример расчета антенны

Во 2-й сверху строке с помощью <1LK> активизируется иконка с изображением параллелепипеда  («Create Brick») или по другому сверху в строке (1S) с помощью <1LK> разворачивается меню надписи [Object]. В этом меню при наведении стрелки мыши на строку «Basic Shapes» разворачивается ещё одно меню, в котором с помощью <1LK> активизируем строку с изображением параллелепипеда  («Brick...»). На экране появится приглашение к прорисовке первого слоя многослойной структуры печатной антенны. Пусть первым слоем будет диэлектрик. Тогда двойным нажатием левой клавиши мыши (<2LK>) в левом верхнем углу координатной сетки произвольно фиксируется первый (в данном примере – левый верхний) угол подложки. Перемещением мыши устанавливается произвольный правый нижний угол подложки и фиксируется его положение с помощью <2LK>. Затем лёгким смещением мыши устанавливается произвольно толщина подложки и её величина фиксируется с помощью <2LK>. На экране появится красный параллелепипед подложки и окошко с именем «Solid 1» для задания её геометрических размеров (координат) и параметров ε_r , μ_r .


Для упрощения задачи прорисовки подложки можно сразу, после того, как активизировали иконку с изображением параллелепипеда  («Create Brick»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки красного параллелепипеда. После выполнения этих действий вновь появится окошко с именем «Solid 1» для задания геометрических размеров и параметров ε_r , μ_r данного слоя.



Полагая, что начало декартовой системы координат будет у верхнего левого края подложки, устанавливаем следующие, рассчитанные предварительно в разделах 2 и 3 размеры (в миллиметрах):

$$\left. \begin{array}{l} X_{min} = -27.75; \quad X_{max} = 459.6; \\ Y_{min} = 2; \quad Y_{max} = -73.4; \\ Z_{min} = -1.5; \quad Z_{max} = 0. \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

Разворачиваем в этом же окошке с помощью <1LK> (далее по умолчанию всегда при любом выборе того или иного раздела меню будет использоваться однократное нажатие левой клавиши мыши <1LK>) вложенное окно (окошко со стрелкой вниз) «Material» и в нём выбираем строку [New Material...]. В появившемся окне «New Material Parameters» разворачиваем вложенное окно «Type» и выбираем в нём строку [Normal]. Устанавливаем значение $\varepsilon_r = 2.5$ в окне «Epsilon», а окно «Mue» оставляем без изменений (т.е. величина относительной магнитной проницаемости μ_r равна 1). Согласившись с активизацией выбора нажав <OK> в окне «New Material Parameters», возвращаемся в окно с именем «Solid 1». Также, как и в прошлом окошке, нажимаем <OK>, тем самым тоже соглашаемся с активизацией параметров (координат и материала) которые указали в этом окне.

Таким образом, завершается формирование 1-го слоя – диэлектрической подложки, и на экране появляется её изображение с осями координат, причём в данном случае подложка лежит в плоскости XOY.

После завершения прорисовки диэлектрической подложки, в левой части окна программы в разделе «Components», если раскрыть его, нажав <1LK> на «+» рядом с именем «Components», наблюдаем, что автоматически создаётся компонент с именем «component 1». Также раскрыв «component 1», наблюдаем нами созданный 1-ый слой с именем «solid 1». Для того, чтобы изменить значения нашего созданного слоя, необходимо нажать на «solid 1» правой кнопкой мыши (далее <1RK> - однократное нажатие правой клавиши мыши), после чего раскроется окно, в котором выбираем самую нижнюю строчку с изображением  и именем «Properties...». В открывшемся окне «History tree» выбираем строку [define brick], используя <1LK>. Затем нажимаем в этом же окошке на кнопку с именем <Edit...>. В результате откроется окно, в котором можно изменить ранее заданные параметры (координаты) слоя «solid 1» и согласиться с ними, нажав <OK>. Это справедливо для любого слоя многослойной структуры.

Переходим к прорисовке 2-го слоя – слоя излучателя на лицевой стороне подложки, ориентированной в положительном направлении оси Z [т.е. по орту $(+\vec{z}_0)$]. Для удобства и наглядности прорисовки используем тот факт, что в 3-ей сверху строке во вложенном окошке (окошко со стрелочкой вниз) по умолчанию стоит «Free». Развернув это меню, нужно выбрать строку с названием «Front» (т.е. мы выбрали вид передней стороны нашей подложки). Во 2-й сверху строке с помощью мыши активизируется иконка с изображением  («Extrude») или, по другому, сверху в первой строке с помощью мыши разворачивается меню надписи [Object]. В этом меню активизируем строку с изображением  («Extrude...»). На экране появится приглашение к прорисовке второго слоя многослойной структуры печатной антенны.

Двойным нажатием левой клавиши мыши на подложке произвольно фиксируется первая точка прорисовки металлизации 2-го слоя. Перемещением мыши устанавливается вторая точка и фиксируется её положение с помощью $\langle 2LK \rangle$. Так как топология излучателя передней стороны подложки имеет структуру в виде буквы «Г» (рис. 105), то для прорисовки этого слоя нам понадобится 6 точек. Ещё одна, седьмая, завершающая прорисовку точка двойным нажатием левой клавиши мыши устанавливается в положение первой точки топологии излучателя. Тем самым замыкается контур будущей металлизации части дипольного излучателя в виде буквы «Г».

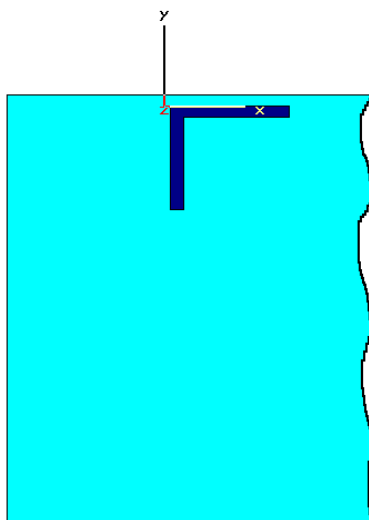



Рисунок 105

Затем лёгким смещением мыши устанавливается произвольно толщина подложки, её величина фиксируется $\langle 2LK \rangle$. На экране появится второй слой многослойной структуры и окошко с именем «Solid 2» для задания его геометрических размеров и параметров.

Также, как и при прорисовке 1-го слоя, для упрощения задачи прорисовки 2-го слоя можно сразу, после того, как активизировали иконку с изображением  («Extrude»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек. В результате выполнения «отказных» действий появится окошко создаваемого слоя с именем «Solid 2» для задания его геометрических размеров и параметров.

Поскольку металлизация (в данном случае – медная фольга), толщиной 20 мкм = 0.02 мм, плотно прилегает к лицевой поверхности подложки устанавливаем следующие значения в окне «Solid 2»: $Z_{min} = 0$; в строке с именем «Height» устанавливаем значение, равное 0.02 (т.е. установили толщину металлизации по орту ($+z_0$) равную 20 мкм), а в столбцах X и Y - значения, указанные в таблице 4.1 (в миллиметрах):

Таблица 4.1.

X	Y
1	1
1	-18.3
3.3	-18.3
3.3	-1
22	-1
22	1

Разворачиваем в этом же окошке с помощью мыши вложенное окно (окошко со стрелкой вниз) «Material» и в нём выбираем строку [PEC] (Perfect electric conductivity – совершенная электрическая проводимость). Нажимаем $\langle OK \rangle$, тем самым соглашаемся с активизацией параметров излучателя

(координат и материала), которые указали в этом окне. После проделанного на экране появляется изображение первой половины дипольного излучателя в виде буквы «Г» (рис. 4.1). Так как в целом дипольный излучатель состоит из двух частей, приступим к прорисовке второй его части.


Последовательность действий при прорисовке второй части излучателя аналогична прорисовке первой части излучателя (рис. 4.1), только структура её будет в виде развёрнутой на 180 градусов буквы «Г». Активизировав иконку с изображением  («Extrude»), следует отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек, после чего появится окошко с именем третьего слоя «Solid 3» для задания его геометрических размеров и параметров. В появившемся окошке устанавливаем следующие значения: $Z_{min} = 0$; в строке с именем «Height» устанавливаем значение равное 0.02, а в столбцах X и Y значения, указанные в таблице 4.2 (в миллиметрах). Разворачиваем в этом же окошке с помощью мыши вложенное окно «Material» и в нём выбираем строку [PEC]. Для того, чтобы узнать будет ли соответствовать введённые координаты желаемой прорисованной структуре излучателя, нужно в окне, в котором вводили координаты и параметры (т.е. в данном случае в окне «Solid 3»), нажать кнопку с именем «Preview». Нажимаем «OK» - тем самым соглашаемся с активизацией параметров излучателя, которые указали в этом окне.

Таблица 4.2.

X	Y
1	1
1	-18.3
3.3	-18.3
3.3	-1
22	-1
22	1

Таким образом, завершается формирование второй части излучателя, и на экране появляется его полное изображение (рис. 106) в левом верхнем углу подложки в плоскости XOY.

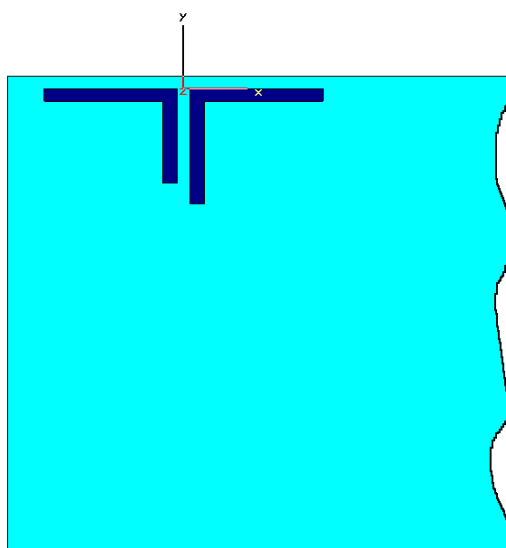


Рисунок 106

Прорисовка остальных восьми излучателей ФАР осуществляется аналогично прорисовке одного излучателя, только с другими заранее рассчитанными координатами. В результате формируется топология будущего антенного полотна ФАР из 9-ти излучателей, приведенная на рис. 107.

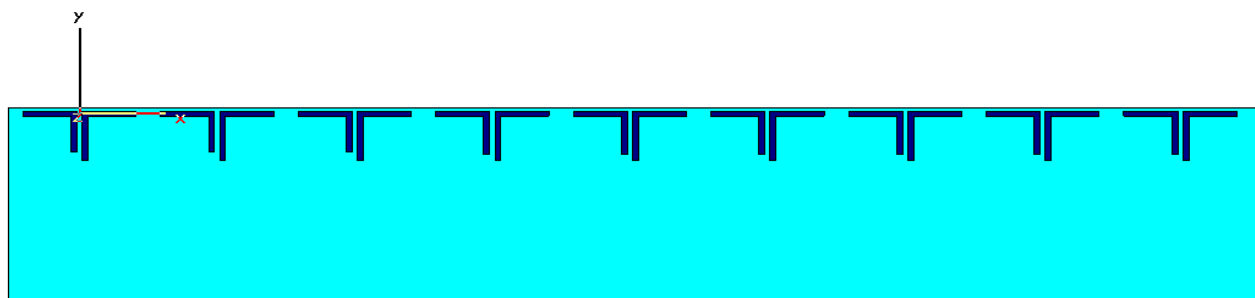





Рисунок 107

Переходим к прорисовке металлизации (это будет по счёту уже четвёртый слой) обратной (задней) стороны подложки, ориентированной в отрицательном направлении оси Z [т.е. по орту $(-\vec{z}_0)$]. Для удобства и наглядности прорисовки в третьей сверху строке во вложенном окошке (окошко со стрелочкой вниз) по умолчанию стоит «Free», развернув это меню, следует выбрать строку с названием «Back» (т.е. мы выбрали обратную сторону

нашей подложки). Также, как и при прорисовке 2-го слоя, во 2-й сверху строке с помощью мыши активизируется иконка с изображением  («Extrude») или, по другому, сверху в первой строке с помощью мыши разворачивается меню надписи [Object]. В этом меню активизируем строку с изображением  («Extrude...»). На экране появится приглашение к прорисовке топологии металлизации обратной стороны подложки (то есть третьего слоя) многослойной структуры печатной антенны. Так как топология металлизации обратной стороны подложки имеет сложную структуру в виде массива «ласточкиных хвостов», нам понадобится множество точек. Двойным нажатием левой клавиши мыши в левом верхнем углу подложки произвольно фиксируется первая точка прорисовки металлизации этого слоя. Перемещением мыши устанавливается вторая точка и фиксируется её положение с помощью <2LK>. Затем фиксируются все остальные точки структуры этого 4-го слоя (всего 76 точек). Затем ещё одну, 77-ую точку, двойным нажатием левой клавиши мыши устанавливаем в положение первой точки прорисовки. Тем самым замыкается контур металлизации обратной стороны подложки. Затем лёгким смещением мыши устанавливается (пока произвольно) толщина металлизации, и её величина фиксируется с помощью <2LK>. На экране появится красный обратный (четвёртый) слой многослойной структуры и окошко с именем «Solid 4» для задания его геометрических размеров и параметров.

Также, как и в прорисовке 1-го и 2-го слоя, для упрощения прорисовки этого слоя можно сразу, после того, как активизировали иконку с изображением  («Extrude»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек сложной структуры, после чего появится окошко с именем «Solid 4» для задания его геометрических размеров и параметров.

В появившемся окошке устанавливаем следующие значения: $Z_{min} = -1.5$ (начальное значение металлизации), в строке с именем «Height» устанавливаем значение равное -0.02 (толщина медной фольги по орту ($-\bar{z}_0$)), а

в столбцах X и Y значения, указанные в таблице 4.3 (в миллиметрах). Так как значений (координат) много (76 точек), они указаны в таблице 4.3 в четырёх парах столбцов, начиная с $X(1)$, $Y(1)$ (т.е. слева сверху вниз) и заканчивая $X(4)$, $Y(4)$ (то есть справа внизу).

Таблица 4.3.

X(1)	Y(1)	X(2)	Y(2)	X(3)	Y(3)	X(4)	Y(4)
-26.75	-15	106.5	-2	214.5	-2	369	-15
-5	-15	106.5	-15	219.5	-2	369	-2
-5	-2	107.5	-15	219.5	-15	374	-2
-0.5	-2	107.5	-2	262	-15	374	-15
-0.5	-15	112.5	-2	262	-2	375	-15
0.5	-15	112.5	-15	267	-2	375	-2
0.5	-2	155	-15	267	-15	380	-2
5	-2	155	-2	268	-15	380	-15
5	-15	160	-2	268	-2	422.5	-15
48	-15	160	-15	273	-2	422.5	-2
48	-2	161	-15	273	-15	427.5	-2
53	-2	161	-2	315.5	-15	427.5	-15
53	-15	166	-2	315.5	-2	428.5	-15
54	-15	166	-15	320.5	-2	428.5	-2
54	-2	208.5	-15	320.5	-15	433.5	-2
59	-2	208.5	-2	321.5	-15	433.5	-15
59	-15	213.5	-2	321.5	-2	458.6	-15
101.5	-15	213.5	-15	326.5	-2	458.6	-70.4
101.5	-2	214.5	-15	326.5	-15	-26.75	-70.4

Разворачиваем в этом же окошке с помощью мыши вложенное окно «Material» и в нём выбираем строку [PEC]. Нажимаем <OK>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне.

Таким образом, завершается формирование слоя металлизации обратной стороны подложки, и на экране появляется его изображение с осями координат, показанное на рис. 108.

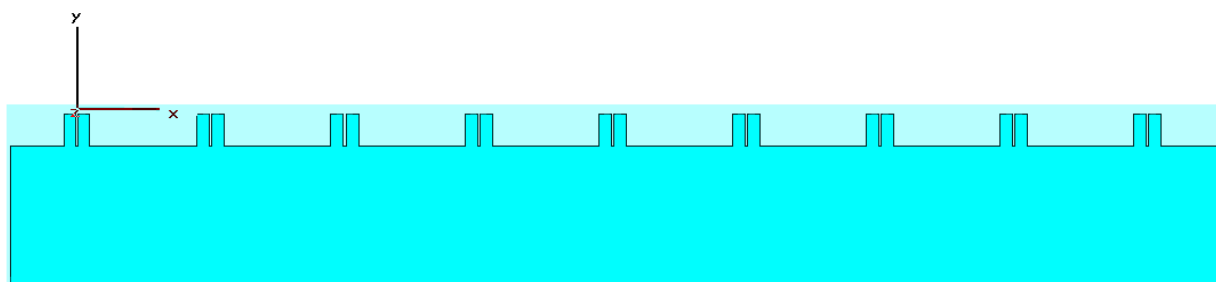


Рисунок 108


Оставив место под установку фазовращателя в виде свёрнутой в меандр одиночной несимметричной полосковой линии передачи, приступаем к прорисовке прямого тракта делителя мощности на лицевой стороне подложки, отступив от нижнего края подложки 4 мм. Металлизация прямого тракта делителя мощности ориентирована в положительном направлении оси Z [т.е. по орту $(+\vec{z}_0)$]. Также, как и в прорисовке 2-го слоя, для упрощения задачи прорисовки очередного слоя нужно сразу, после того, как активизировали иконку с изображением  («Extrude»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек, после чего появится окошко с именем «Solid 5» для задания его геометрических размеров и параметров. В появившемся окошке устанавливаем следующие значения: $Z_{min} = 0$; в строке с именем «Height» устанавливаем значение, равное 0.02, а в столбцах X и Y значения, указанные в таблице 4.4 (в миллиметрах).

Таблица 4.4.

X(1)	Y(1)	X(2)	Y(2)
-26.75	-67.1	239.3	-69.4
453.3	-67.25	237	-68.69
453.3	-69.4	217.3	-69.69
451	-69.32	215	-69.4

431.3	-69.32	185.8	-69.4
429	-69.4	183.5	-68.85
399.8	-69.4	163.8	-68.85
397.5	-69.1	161.5	-69.4
377.8	-69.1	132.3	-69.4
375.5	-69.4	130	-69.08
346.3	-69.4	110.3	-69.08
344	-68.82	108	-69.4
324.3	-68.82	78.8	-69.4
322	-69.4	76.5	-69.28
292.8	-69.4	56.8	-69.28
290.5	-68.66	54.5	-69.4
270.3	-68.66	-26.75	-69.4
268.5	-69.4		

Разворачиваем в этом же окошке с помощью мыши вложенное окно «Material», и в нём выбираем строку [PEC]. Нажимаем <OK>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне.

Таким образом, завершается формирование слоя прямого тракта делителя мощности и на экране появляется изображение, показанное на рис. 109.

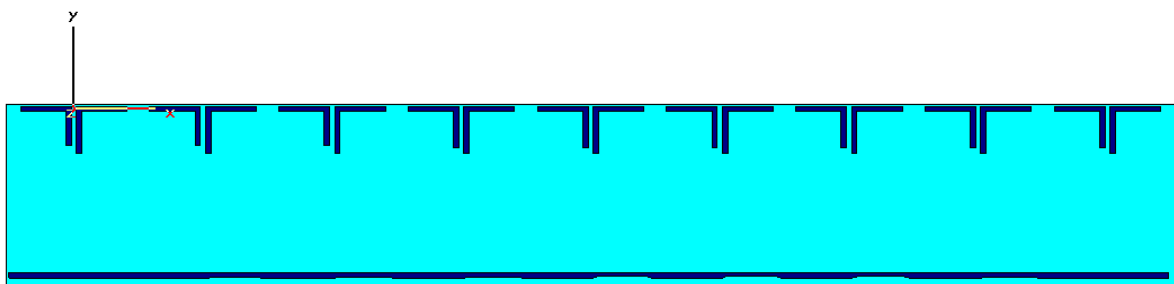



Рисунок 109

Прорисовка топологии при помощи  «Extrude» даёт преимущество над прорисовкой с помощью «Create Brick», так как при прорисовке с помощью

«Create Brick» можно построить топологию только с углом среза 45° при поворотах или скачках полосковых линий, а при использовании «Extrude» можно построить углы среза любой величины.


Переходим к прорисовке топологии фазовращателя с ответвителем мощности на лицевой стороне подложки, ориентированной в положительном направлении оси Z [т.е. по орту $(+\vec{z}_0)$]. Также, как и в прорисовке 2-го слоя, для упрощения задачи прорисовки очередного слоя нужно сразу после того, как активизировали иконку с изображением  («Extrude»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек, после чего появится окошко с именем «Solid 6» для задания его геометрических размеров и параметров. В появившемся окошке устанавливаем следующие значения: $Z_{min} = 0$; в строке с именем «Height» устанавливаем значение равное 0.02, а в столбцах X и Y значения, указанные в таблице 4.5 (в миллиметрах).

Таблица 4.5.

X(1)	Y(1)	X(2)	Y(2)	X(3)	Y(3)	X(4)	Y(4)
1	-16	-23.45	-42.5	25.3	-65.474	23.45	-38.2
25.75	-16	25.75	-42.5	1	-65.474	23.45	-36.2
25.75	-23.3	25.75	-49.1	1	-55.4	-25.75	-36.2
-23.45	-23.3	-23.45	-49.1	18.2	-55.4	-25.75	-29.6
-23.45	-25.3	-23.45	-51.1	18.2	-53.4	23.45	-29.6
25.75	-23.3	20.5	-51.1	-25.75	-53.4	23.45	-27.6
25.75	-31.9	20.5	-57.7	-25.75	-46.8	-25.75	-27.6
-23.45	-31.9	3.3	-57.7	23.45	-46.8	-25.75	-21
-23.45	-33.9	3.3	-63.174	23.45	-44.8	23.45	-21
25.75	-33.9	23	-63.174	-25.75	-44.8	23.45	-18.3
25.75	-40.5	23	-60.4	-25.75	-38.2	1	-18.3
-23.45	-40.5	25.3	-60.4				

Разворачиваем в этом же окошке с помощью мыши вложенное окно «Material» и в нём выбираем строку [PEC]. Нажимаем <OK>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне. После чего появится окно с именем «Shape intersection», в котором (так как слои «solid 2» и «solid 6» пересекаются) спрашивается, какие действия с ними произвести? Указав клавишей <1LK> строчку с именем «None» (т.е. ничего не производить), нажимаем <OK>.

Таким образом, завершается формирование фазовращателя и на экране появляется изображение, показанное на рис. 110.

Остальные восемь фазовращателей прорисовываются также, как и первый, только уже с другими, заранее рассчитанными координатами.

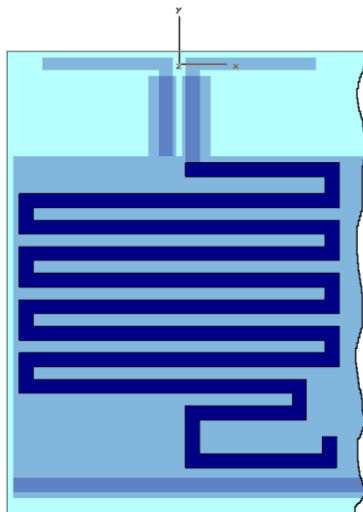



Рисунок 110

Чтобы объединить металлизацию фазовращателя и вторичной линии делителя мощности, лежащие в одной плоскости, нужно выполнить следующее действия. Слева в окне программы разворачиваем, путём нажатия клавиши <1LK> на «+» напротив строчки с именем «Component», соответствующее меню. Если оно уже развёрнуто ранее, то нужно в списке «Component» выбрать строчку с именем «component 1». Если и эта строка уже развёрнута, то в появившемся списке слоёв «Solid1», «Solid2», «Solid3», «Solid4», «Solid5», «Solid6» маркируем (отмечаем) нужные нам слои (т.е. слои тех фрагментов

металлизации, которые нужно объединить). Для этого, нажав и не отпуская на клавиатуре клавишу с именем «Ctrl», выбираем нажатием <1LK> строчки «Solid 2» и «Solid 6» (излучатель и фазовращатель в данном примере). После этого, отпустив клавишу «Ctrl», во второй сверху строке активизируем иконку с изображением  и именем «Boolean Add», в результате чего получаем из двух слоёв «Solid 2» и «Solid 6» один сплошной слой «Solid 2», показанный на рис. 111.

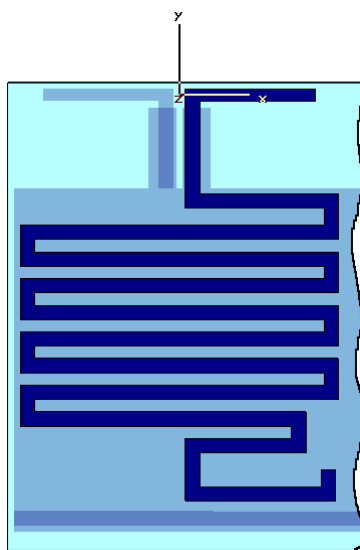






Рисунок 111

Следующим этапом прорисовки топологии следует выполнить срезы углов на поворотах несимметричной полосковой линии фазовращателя и вторичной линии направленного ответвителя мощности. Приступая к этой процедуре, учтём, что сверху в третьей строке во вложенном окошке по умолчанию стоит «Free». Развернув это меню, нужно выбрать строку с названием «Perspective» (этим действием выбрали удобный вид расположения слоёв на экране монитора). Приблизим (увеличим масштаб изображения) нужного нам угла колёсиком мышки, покрутив его (если такое имеется), или активизируем в 3-ей сверху строке иконку с изображением  и именем «Activate zoom mode». Также можно воспользоваться функцией приближения, активизировав иконку с изображением  и именем «Activate dynamic zoom mode». Приближаем нужный нам угол фазовращателя (пусть этим углом будет

правый верхний угол первого изгиба меандра) так, чтобы было разборчиво видно его ребро, толщина которого составляет 20 мкм. Приблизив угол, активизируем иконку с изображением  (красная прямая, расположенная под углом) и именем «Select edge». Активизировав её, выбираем с помощью <2LK> требуемое приближенное ребро (ребро должно выделиться красным цветом). После чего во второй сверху строке активизируем иконку с изображением  и именем «Chamfer edges». В появившемся окне с именем «Chamfer edges» в строке «Chamfer width» указываем значение, на которое нужно срезать угол. Так как ширина полоска составляет 2.3 мм, указываем значение, равное 2.3. Нажимаем <ОК>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне. Описанная процедура производится со всеми углами фазовращателя и ответвителя мощности, кроме конца ответвителя. Таким образом, завершается формирование углов и на экране появляется изображение, показанное на рис. 112.

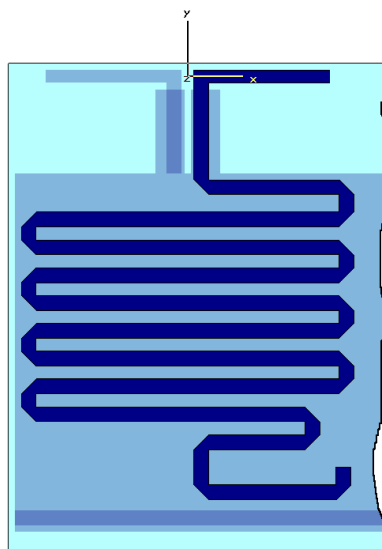



Рисунок 112

Переходим к прорисовке резистора лицевой стороны подложки, ориентированной в положительном направлении оси Z [т.е. по орту $(+\vec{z}_0)$]. Также, как и при прорисовке 2-го слоя, для упрощения задачи прорисовки очередного слоя нужно сразу, после того, как активизировали иконку с изображением  («Create Brick»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с

надписью «Esc» от прорисовки точек. После этого появится окошко с именем «Solid 6» для задания геометрических размеров и параметров. В этом окне задаём следующие параметры:

$$\left. \begin{array}{l} X_{min} = 23; \quad X_{max} = 25.3; \\ Y_{min} = -58.1; \quad Y_{max} = -60.4; \\ Z_{min} = 0; \quad Z_{max} = 0.02. \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

Разворачиваем в этом же окошке с помощью <1LK> вложенное окно «Material» и в нём выбираем строку [New Material...]. В появившемся окне «New Material Parameters» разворачиваем вложенное окно «Type» и выбираем в нём строку [Lossy metal]. Устанавливаем рассчитанное ранее в разделе 3 (см. рис. 3.2 и формулы (3.7) и (3.8)) значение удельной проводимости, равное 666,7 S/m, в строку с именем «Electric conductivity» в окне «Epsilon», а окно «Mue» оставляем без изменений (т.е. величина относительной магнитной проницаемости μ_r остаётся равной 1). Для удобства и наглядности нажимаем в этом же окошке кнопку с именем «Change». Появляется ещё одно окно, в котором выбираем, например, третий сверху зелёный цвет с помощью <1LK>. Нажимаем в этом окошке <OK>. Согласившись с активизацией выбора и нажав <OK> в окне «New Material Parameters», возвращаемся в окно с именем «Solid 6». Также, как и в прошлом окошке, нажимаем <OK>, тем самым и здесь соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне. Таким образом, завершается формирование резистора, и на экране появляется его изображение, показанное на рис. 113.

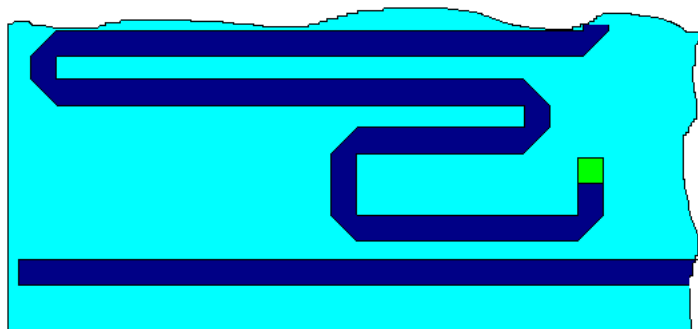



Рисунок 113


Остальные девять резисторов прорисовываются также, как и первый, только уже с другими, заранее рассчитанными координатами.

Переходим к прорисовке отверстия (отступив от резистора 1мм), расположенного с лицевой стороны подложки, ориентированной в положительном направлении оси Z [т.е. по орту $(+\vec{z}_0)$]. Отверстие необходимо для того, чтобы соединить резистор и обратную металлизированную и заземлённую сторону подложки. Тем самым один вывод резистора заземляется, что необходимо для нормальной работы ответвителя [10, 11]. Также, как и при прорисовке других слоёв, для упрощения задачи прорисовки очередного слоя нужно сразу, после того, как активизировали иконку с изображением  («Create Brick»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек. После этого появится окошко с именем «Solid 7» для задания геометрических размеров и параметров. В этом окне задаём следующие параметры:

$$\left. \begin{array}{l} X_{min} = 23; \quad X_{max} = 25.3; \\ Y_{min} = -56.1; \quad Y_{max} = -57.1; \\ Z_{min} = -1.50; \quad Z_{max} = 0. \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

Разворачиваем в этом же окошке с помощью <1LK> вложенное окно «Material» и в нём выбираем строку [material 1] (т.е. материал подложки). Нажимаем <ОК>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне. После чего появится окно с именем «Shape intersection», в котором спрашивается (так как слои «solid 1» и «solid 7» пересекаются), какие действия с ними произвести? Указав щелчком клавиши <1LK> самую нижнюю строчку с именем «Cut away highlighted shape», нажимаем <ОК>. Этим действием мы удалили область подложки с координатами указанными в (4.3).

Далее нужно удалить часть металлизации обратной стороны подложки, которая пока что располагается в отверстии. Также, как и в прорисовке других слоёв металлизации, для упрощения задачи удаления (эта задача может рассматриваться как задача продолжения прорисовки соответствующего слоя),

следует сразу, после того, как активизировали иконку с изображением  («Create Brick»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек. После этого появится окошко с именем «Solid 7» для задания геометрических размеров и параметров. В этом окне задаём следующие параметры:

$$\left. \begin{array}{l} X_{min} = 23; \quad X_{max} = 25.3; \\ Y_{min} = -56.1; \quad Y_{max} = -57.08; \\ Z_{min} = -1.52; \quad Z_{max} = -1.5. \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

Разворачиваем в этом окошке с помощью клавиши <1LK> вложенное окно «Material» и в нём выбираем строку [PEC]. Нажимаем <OK>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне. После чего появится окно с именем «Shape intersection», в котором спрашивается (так как слои «solid 4» и «solid 7» пересекаются), какие действия с ними произвести? Указав клавишей <1LK> самую нижнюю строчку с именем «Cut away highlighted shape», нажимаем <OK>. Этим действием мы удалили область металлизации с координатами, указанными в (4.4). Таким образом, завершается формирование отверстия, и на экране появляется его изображение, показанное на рис. 114.

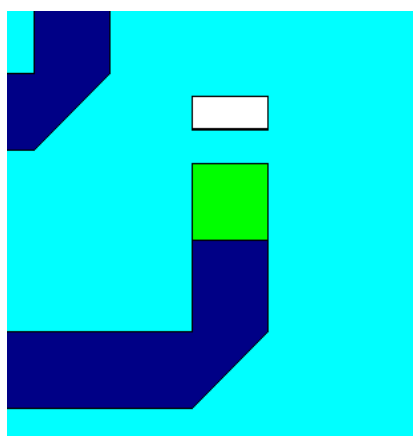




Рисунок 114

Остальные девять отверстий прорисовываются аналогично, только уже с другими, заранее рассчитанными координатами.

Последним шагом прорисовки топологии является прорисовка и соединение (пайка) металлизации обратной стороны подложки и резистора. Переходим к прорисовке металлизации. Также, как и в прорисовке остальных слоёв металлизации, для упрощения задачи прорисовки очередного слоя нужно сразу, после того, как активизировали иконку с изображением  («Create Brick»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек. После этого появится окошко с именем «Solid 7» для задания её геометрических размеров и параметров. В этом окне задаём следующие параметры:

$$\left. \begin{array}{l} X_{min} = 23; \quad X_{max} = 25.3; \\ Y_{min} = -57.08; \quad Y_{max} = -58.1; \\ Z_{min} = 0; \quad Z_{max} = 0.02. \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

Разворачиваем в этом же окошке с помощью клавиши <1LK> вложенное окно «Material» и в нём выбираем строку [PEC]. Нажимаем <OK>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне.


Переходим к прорисовке металлизации в отверстии. Также, как и в прорисовке остальных слоёв металлизации, для упрощения задачи прорисовки очередного слоя нужно сразу, после того, как активизировали иконку с изображением  («Create Brick»), отказаться, нажав на клавиатуре клавишу с надписью «Esc», от прорисовки точек. После этого появится окошко с именем «Solid 8» для задания геометрических размеров и параметров. В этом окне задаём следующие параметры:

$$\left. \begin{array}{l} X_{min} = 23; \quad X_{max} = 25.3; \\ Y_{min} = -57.08; \quad Y_{max} = -57.1; \\ Z_{min} = -1.52; \quad Z_{max} = 0.02. \end{array} \right\} \quad (4.6)$$

Разворачиваем в этом окошке с помощью клавиши <1LK> вложенное окно «Material» и в нём выбираем строку [PEC]. Нажимаем <OK>, тем самым соглашаемся с активизацией параметров, которые указали в этом окне. После чего появится окно с именем «Shape intersection», в котором спрашивается (так

как слои «solid 7» и «solid 8» пересекаются), какие действия с ними произвести? Указав клавишей <1LK> строчку с именем «None», нажимаем <OK>.

Таким образом, завершается формирование металлизации и на экране появляется изображение соответствующего слоя. Остальные девять металлизаций прорисовываются аналогично, только уже с заранее рассчитанными координатами.

Чтобы объединить металлизацию слоёв «solid 7», «solid 8» и «solid 4» (так же, как и в прошлом примере соединения металлизации фазовращателя и излучателя), нужно выполнить следующие действия. Слева в окне программы разворачиваем нажатием клавиши <1LK> на «+» напротив строчки с именем «Component». Если она уже развёрнута ранее, то нужно в соответствующем списке «Component» (или после развёртывания этого списка) выбрать строчку с именем «component 1». Если и эта строка уже развёрнута, то в появившемся списке слоёв маркируем (отмечаем) нужные нам слои (т.е. те слои, которые нужно соединить). Нажав и не отпуская на клавиатуре клавишу с именем «Ctrl», выбираем нажатием на мыши клавиши <1LK> строчки «Solid 7», «Solid 8» и «solid 4», после чего, отпустив клавишу «Ctrl», во второй сверху строке активизируем иконку с именем с изображением  и именем «Boolean Add». В результате этого получаем из трёх слоёв «Solid 7», «Solid 8» и «solid 4» один слой «Solid 4». Таким образом, завершается полное формирование 1-го излучателя проектируемой дипольной антенной решётки и на экране появляется его изображение, показанное на рис. 115.

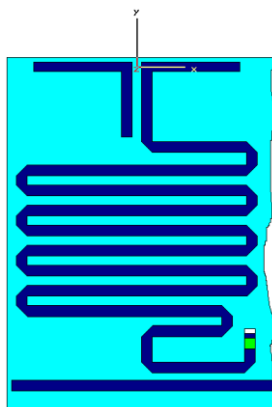


Рисунок 115

Повторив соответствующее число раз вышеописанные действия, прорисовываем топологию всей ФАР. На экране появляется изображение топологии, показанное на рис. 116.

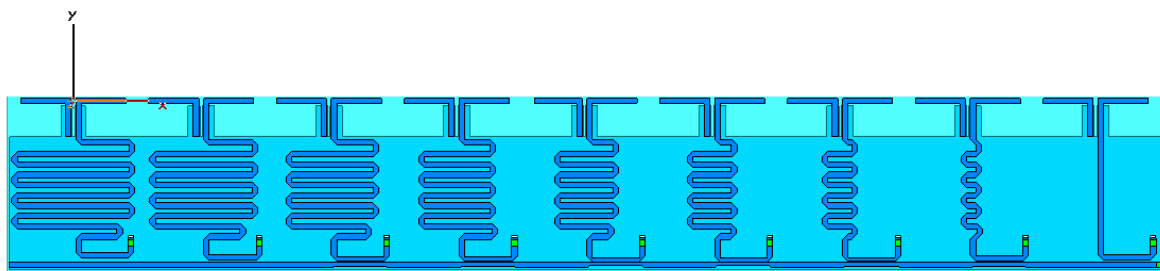


Рисунок 116

Вот теперь можно запускать программу на расчёт всех характеристик проектируемой фазированной антенной решётки в требуемой полосе частот. Эта процедура подробно описана в методических указаниях к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны» (лаборатория IV – 521) кафедры «РПиРПУ». В соответствии с этими указаниями вначале рассчитывается частотная характеристика «возвратных» потерь [(Return Loss (RL)]. Если эта характеристика удовлетворяет поставленным в техническом задании требованиям, то по ней выбирается частотная точка (или несколько точек), где следует рассчитать диаграмму направленности ФАР, уровень кросс-поляризации, распределения токов на поверхностях проводящих слоёв и структуру электрического и магнитного полей вокруг ФАР. При этом отметим, что модуль входного коэффициента отражения на входе ФАР $|S_{11}|$ связан со входным коэффициентом стоячей волны $K_{ст.У}$ и уровнем «Return Loss» (RL, в децибелах) соотношением:

$$|S_{11}| = \frac{K_{ст.У} - 1}{K_{ст.У} + 1} = \frac{1}{ant \lg \left(\frac{RL}{20} \right)} = \frac{1}{10 \left(\frac{RL}{20} \right)}. \quad (4.7)$$

В рассматриваемом примере такой точкой является значение 2784 МГц. Именно на этой частоте была рассчитана трёхмерная диаграмма направленности (рис. 116) и все остальные характеристики (эти характеристики

из-за ограничения объёма данного пособия не приведены). Частотная характеристика модуля входного коэффициента отражения представлена на рис. 118.

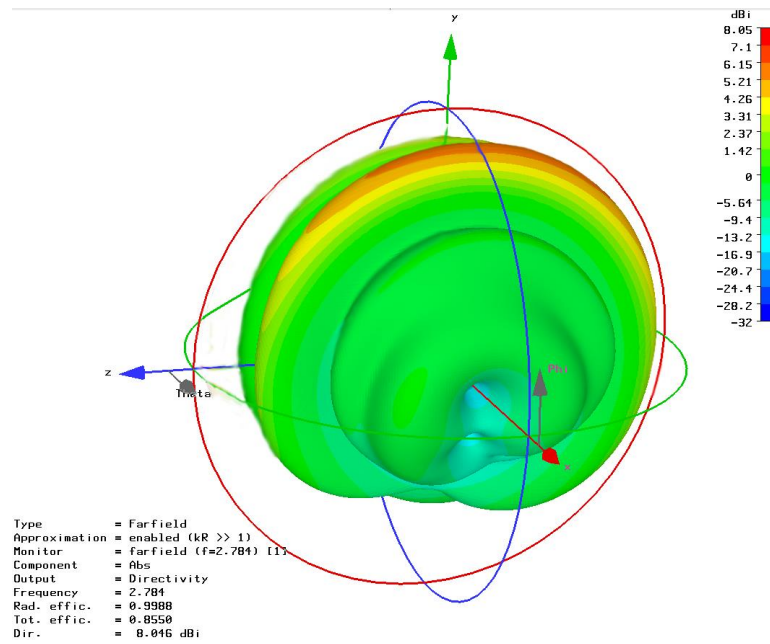


Рисунок 117

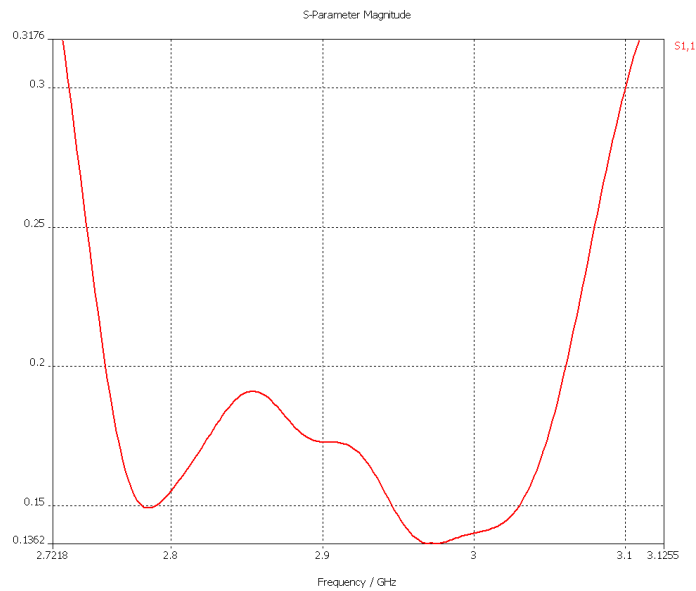


Рисунок 118

Литература

- 1) Официальный сайт компании CST [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cst.com>
- 2) Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – М.: Издательство МЭИ, 2010 – 160 с.
- 3) Горбачев, А.П., Ермаков Е.А. Проектирование печатных фазированных антенных решеток в САПР «CST Microwave Studio»: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008, – 88 с.

Учебное издание

Фатеев А.В.

**Применение ПО CST Microwave Studio
для расчёта микроволновых антенн и устройств СВЧ**

Учебное пособие

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л..

Тираж экз. Заказ

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. (3822) 533018.