

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

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

Учебно-методическое пособие

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Фатеев А.В.

Применение ПО CST Microwave Studio
для расчёта антенн и устройств СВЧ

Учебно-методическое пособие

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

УДК 621.3.049.77.029:681.3.06

Фатеев А.В.

Применение ПО CST Microwave Studio для расчёта антенн и устройств СВЧ
Антенны и устройства СВЧ: Учебно-методическое пособие. – Томск, ТУСУР, 2013. – 100 с.

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны»
для направлений подготовки специалистов 210601.65 – Радиоэлектронные
системы и комплексы и магистров 210400.68 – Радиотехника.

Введение	4
Пользовательский интерфейс программы	6
Создание объекта	7
Стандартные формы объектов.....	9
Задание формы объекта и свойств материала	10
Изменение вида отображения модели	14
Применение геометрических преобразований	16
Комбинирование форм объектов.....	20
Точки, ребра и грани объекта.....	22
Закругление и элементы сопряжения рёбер объекта	23
Выдавливание, скручивание и развертка граней.....	24
Локальная система координат	30
Лист хронологии	33
Дерево хронологии объекта.....	35
Использование кривых	37
Локальные изменения	41
Трассировка	42
Пример моделирования коаксиального изгиба	44
Запуск CST Microwave Studio.....	45
Задание множителей размерностей.....	45
Определение основного материала.....	45
Создание модели объекта	46
Установка портов	53
Задание частотного диапазона.....	55
Настройка граничных условий и симметрии.....	56
Визуализация сетки.....	59
Анализ мод портов	62
Анализ S-параметров	64
Адаптивное разбиение сетки	66
Анализ электромагнитного поля на различных частотах	70
Параметризация модели и автоматическая оптимизация	75
Пример расчета антенны.....	86
Упрощение расчёта поля в дальней зоне	90
Расчет в частотной области	91
Вычисление собственных колебаний (Eigenmode)	94
Проведение анализа собственных мод резонатора	97
Дискретные порты.....	99
Литература.....	100

Введение

CST Microwave Studio – это пакет программ для электромагнитного анализа и разработки устройств, работающих в высокочастотном диапазоне. Это упрощает технологию ввода структуры, и обеспечивает ее объемное моделирование, которое базируется на графическом ядре моделирования ACIS. Превосходное визуальное отображение упрощает формирование рисунка вашего устройства. После того, как компонент был смоделирован, и прежде, чем заработает механизм имитации, запускается полностью автоматизированная система «зацепки» (базирующая на экспертной системе). Моделирующие программы используют метод аппроксимации для идеальных граничных условий (РВА) и тонкопленочную технологию (TST), которые увеличивают точность моделирования на порядок по сравнению с обычными симуляторами. Так как метода, одинаково хорошо работающего во всех прикладных областях, нету, то в данном программном обеспечении используется четыре различные типа моделирования (программный процессор для расчета переходных процессов, частотной области, собственного типа колебаний, анализа форм колебаний), которые применяются в зависимости от специфики поставленной задачи.

Самое гибкое приспособление – внутренний процессор для расчета переходных процессов, при помощи которого можно получить результат моделирования устройства во всей ширине частотного диапазона за одно вычисление, в то время, как в других программах моделирования используется технология пошаговой аппроксимации частот). Этот внутренний процессор весьма эффективен для решения многих СВЧ-приложений, таких как соединители, линии передач, фильтры, антенны и много другое. Данный симулятор оборудован новой многоуровневой схемой (MSS), которая улучшает эффективность зацепления и таким образом увеличивается скорость моделирования, особенно для сложных устройств. Однако, например, эффективная разработка фильтров часто требует прямого вычисления режимов работы, а не моделирования S-параметров. Для этого случая CST Microwave Studio имеется внутренний процессор для расчета собственного типа колебаний, который эффективно вычисляет конечное число режимов (мод) в закрытых электромагнитных устройствах. При рассмотрении высокорезонансных структур, таких как узкополосные фильтры, технология применения временной области может быть неэффективна из-за медленного затухания сигнала по времени. Использование улучшенных методик обработки сигнала, представленных в CST Microwave Studio, позволяет на порядок увеличить скорость моделирования по сравнению со стандартными методами, с использованием временной области. Кроме того, CST Microwave Studio содержит в себе еще так называемый процессор анализа форм колебания, который работает в комбинации с процессором собственного типа колебаний. После того, как режимы фильтра будут вычислены, может быть использована эта эффективная технология, которая позволит вычислить S-параметры

фильтра с небольшим дополнительным временем моделирования. Программный процессор переходных процессов становится менее эффективным при решении низкочастотных задач, где сама структура много меньше, чем самая короткая длина волны. В этих случаях более эффективно будет использование программного процессора частотной области. Эта технология является самой эффективной только в случае, когда интерес представляет только несколько частотных точек. Если Вы не уверены, какой из программных процессоров подходит Вам для решения поставленной задачи, обратитесь в Ваш региональный контактный центр для предоставления помощи.

Каждый из результатов моделирования при помощи данных программных процессоров может быть визуализирован различными способами. В этом случае интерактивный интерфейс поможет Вам выбрать наиболее подходящий вариант для понимания Вашего устройства. И последняя (но не менее важная) особенность – полная параметризация структуры модели, которая позволяет использовать переменные в формировании рисунка Вашего компонента. В комбинации со встроенным оптимизатором и инструментальными средствами проекции параметров, CST Microwave Studio готов к проведению обоих анализов и расчета электромагнитных приборов.

Пользовательский интерфейс программы

На следующем рисунке представлено изображение главного окна CST Microwave Studio.

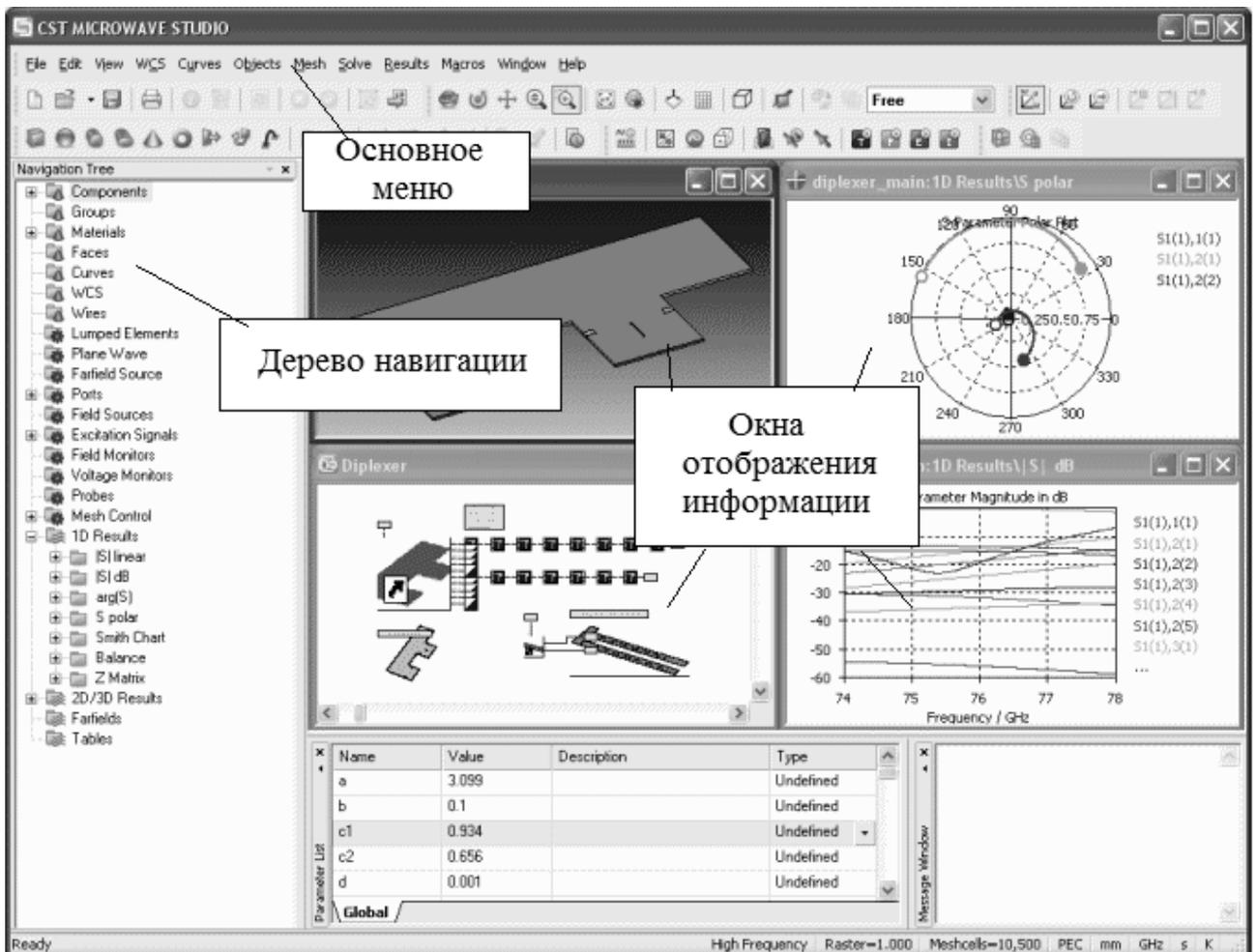


Рисунок 1

Дерево навигации – основная часть пользовательского интерфейса. Отсюда Вы можете обращаться к элементам конструкции и результатам моделирования. В следующих разделах будут подробно рассмотрены элементы дерева навигации.

Окно отображения графической информации – это окно, на которой Вы создаете рисунок. Поскольку мышь – это двухмерное устройство ввода, то даже при черчении трехмерной структуры координаты должны быть спроектированы на плоскость чертежа, чтобы определить пространственное размещение. Так как вы можете изменить ориентацию плоскости рисунка при помощи специальных инструментальных средств, то это дает Вам, как разработчику, наибольшую наглядность.

Самая улучшенная часть пользовательского интерфейса – это встроенный интерпретатор Basic (*Basic editor/debugger*). Этот язык почти на 100% совмещен с функциональным языком Visual Basic. Вы можете использовать этот язык или

для того, чтобы создать Вашу собственную структурную библиотеку, или для автоматизации обработки поставленных задач. Однако в начале работы в CST Microwave Studio Вы будете относительно редко использовать данную способность программы. По этой причине интерпретатор Basic здесь мы игнорируем и рассмотрим его более подробно в online документации и справочнике «Расширенные возможности».

Другие элементы пользовательского интерфейса являются стандартными для большинства приложений Windows, и поэтому мы предполагаем, что Вы знакомы с данными элементами управления.

Создание объекта

1. Первым Вашим шагом активизируйте иконку «параллелепипед», нажимая соответствующую кнопку на панели инструментов  (альтернативой является команда *Objects - Basic Shapes - Brick* главного меню). Теперь необходимо выбрать первую точку основания бруска в плоскости чертежа (смотрите текстовую строку в основном окне).

2. Вы можете установить начальную точку двойным кликом левой клавиши мыши в нужном месте на плоскости чертежа.

3. Теперь Вы можете указать противоположный угол основания параллелепипеда также производя двойной щелчок клавишей мыши.

4. Третьим шагом Вы должны определить высоту бруска, путем перемещения мыши, и фиксации ее двойным нажатием левой клавиши мыши.

5. После этого откроется диалоговое окно, отображающее численные значения координат параллелепипеда, который Вы спроецировали. Нажмите ОК для завершения создания Вашего первого примитива. Поздравляем!

Следующее изображение дает наглядное представление результата трех последовательных двойных кликов левой клавишей мыши:

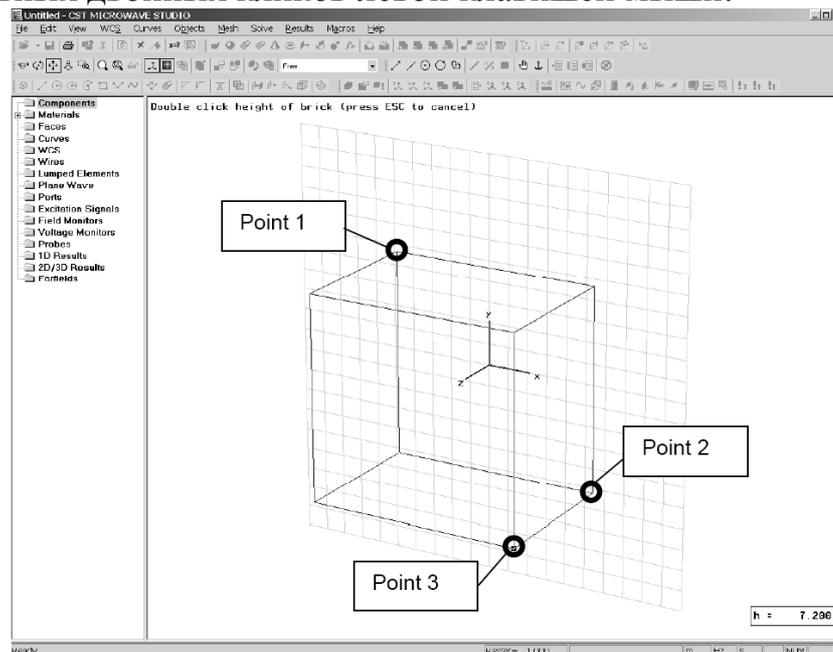


Рисунок 2

Прежде, чем продолжить чертить другие простые формы, остановимся на том, какие еще есть методы установки базовых точек.

Самый простой путь установки базовой точки – двойной щелчок мыши в нужном месте на плоскости чертежа, как это было описано выше. Однако в большинстве случаев, координаты должны быть заданы с высокой точностью. Это достигается при помощи вызова команды *Working Plane Properties* из вкладки *Edit* главного меню. При вызове данной команды на экране отобразится следующее окно:

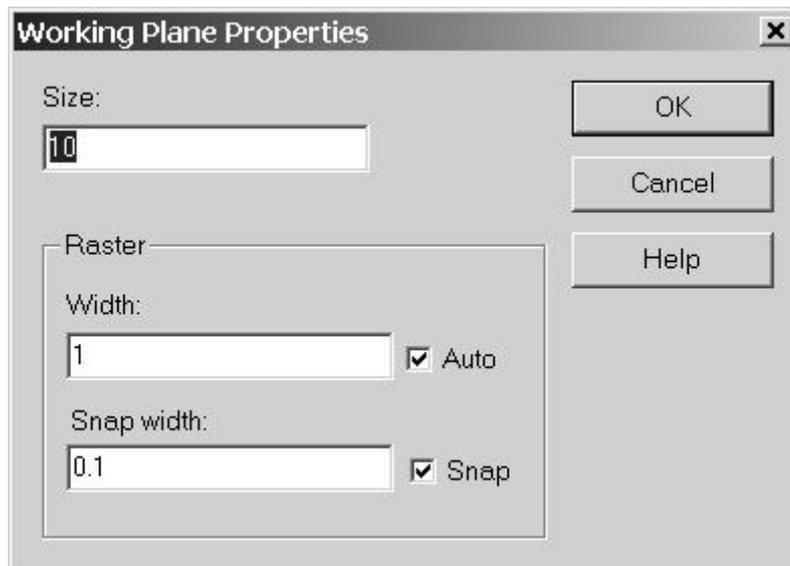


Рисунок 3

Здесь Вы можете определить, должны ли координаты мыши быть привязаны к координатной сетке (значениям по умолчанию) или нет. Кроме того, здесь можно задать размер поля *Size* (X единиц; от – X до + X); ширину делений *Width* и шаг привязки *Snap width*. Причем, координатное изображение не зависит от последнего параметра.

Обратите внимание, что нажатием на кнопку *help* можно вызвать страницу справки, содержащую подробную информацию о диалоговом окне и его параметрах.

Следующий способ определения координат осуществляется путем нажатия клавиши *Tab* всякий раз, как требуется установить базовую точку. В этом случае появится диалоговое окно, в котором Вы можете численно задать координаты. На следующем рисунке представлен пример диалогового окна при задании первой базовой точки:

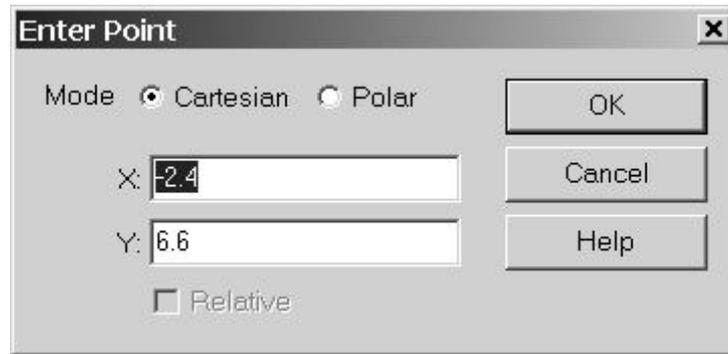


Рисунок 4

Вы можете определить позицию как в полярных, так и в декартовых координатах. Последний тип измеряется от начала системы координат.

После установки первой точки будет доступна опция *Relative*. При включении этой опции следующая точка будет отсчитываться не от начала координат, а от последней введенной точки.

Координатные диалоговые окна всегда отображают текущее значение курсора в поле ввода. Однако зачастую точка должна быть установлена в центр системы координат (0;0). Это может быть достигнуто нажатием сочетания клавиш *Shift+Tab*.

Вы можете опустить формирование рисунка при помощи мыши в любой момент, нажав клавишу *Esc*. В этом случае появится соответствующее диалоговое окно.

Двойное нажатие клавиши *Esc* приводит к прерыванию формирования формы устройства. Нажатие на клавишу *Backspace* удаляет ранее выбранную точку.

Заметьте, что существуют и другие способы создания параллелепипедов. Когда требуется выбрать противоположный угол основания параллелепипеда, Вы можете создать простую линию, а не прямоугольник. В этом случае следующим шагом от Вас потребуется указать ширину, и только за этим – высоту. Эта особенность программы особенно полезна при решении задач, связанных с микрополосковыми линиями, центрированными на подложке. Для большей легкости работы с этой особенностью просто нажмите и удерживайте клавишу *Shift* переместите мышь для определения следующей точки.

Стандартные формы объектов

На следующем рисунке представлены фигуры, которые могут быть созданы подобным параллелепипеду способом (как описано выше).

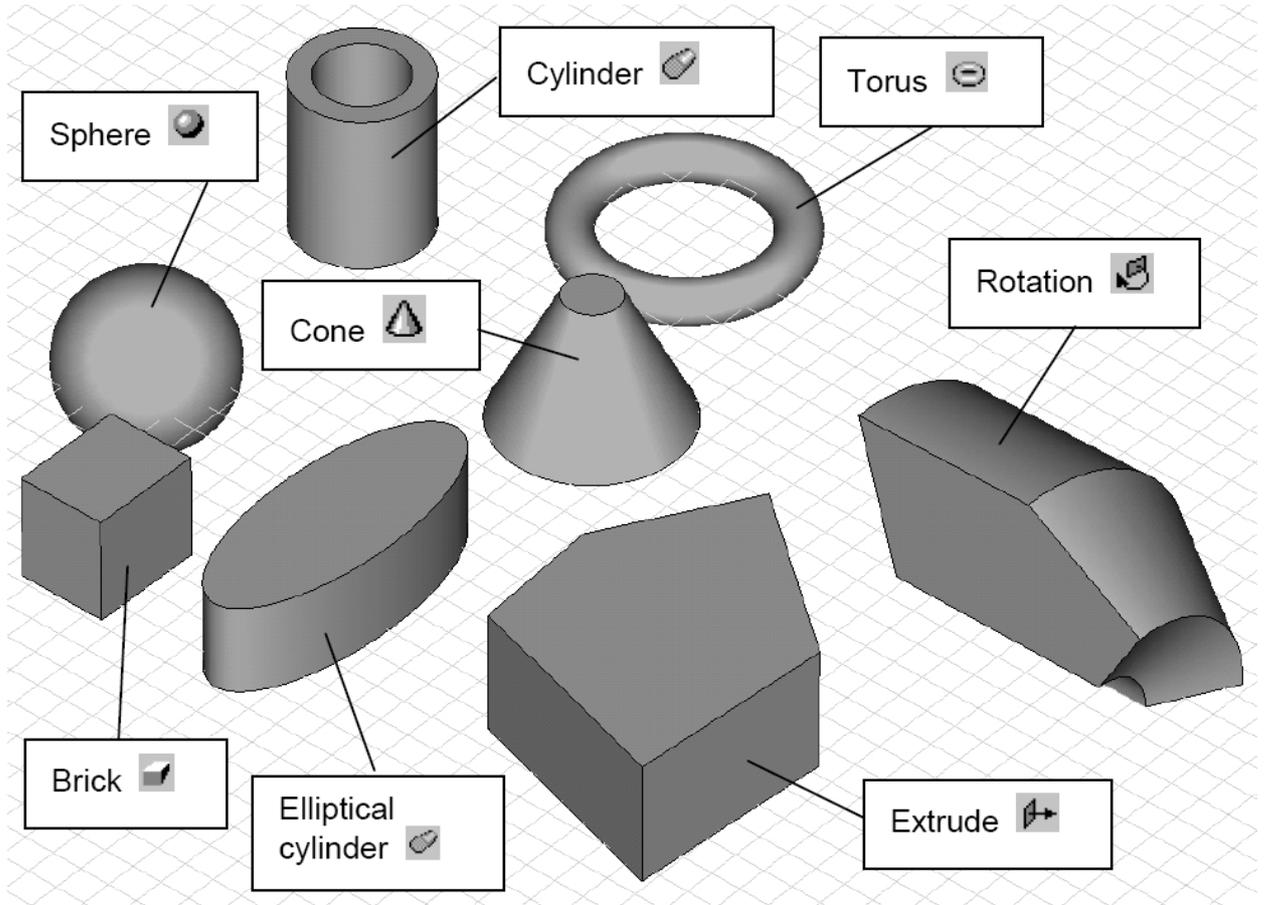


Рисунок 5

На данном этапе желательно поупражняться с генератором форм, чтобы более близко ознакомиться с интерфейсом.

Задание формы объекта и свойств материала

После того, как форма была определена, она автоматически заносится в каталог дерева навигации. Все формы могут быть найдены при помощи папки *Components* дерева навигации. Открыв эту папку, Вы сможете найти там подпапку *component1*. Здесь содержатся все определенные формы. Название каждого примитива назначается в конечном диалоговом блоке, при завершении его создания. По умолчанию им присваиваются названия *solid1*, *solid2* и так далее.

Вы можете выбрать соответствующий элемент, просто выбирая его по названию в дереве навигации. При этом заметьте, что выбранный элемент будет непрозрачным, тем временем как остальные элементы будут прозрачными (смотрите на рисунок, который изображен ниже). Также форма может быть выбрана двойным нажатием на ней левой клавишей мыши в основном окне (на графической панели). В этом случае соответствующий элемент будет выбран также и в навигационном дереве. Выбор одновременно нескольких форм осуществляется следующим способом – удержанием клавиши *Ctrl* и двойным нажатием клавиши мыши на необходимые фигуры на графической панели, либо удержанием клавиши *Shift* и выбором нужных элементов из дерева

навигации. Пожалуйста, потратьте несколько секунд, чтобы ознакомиться с механизмом выбора элементов.

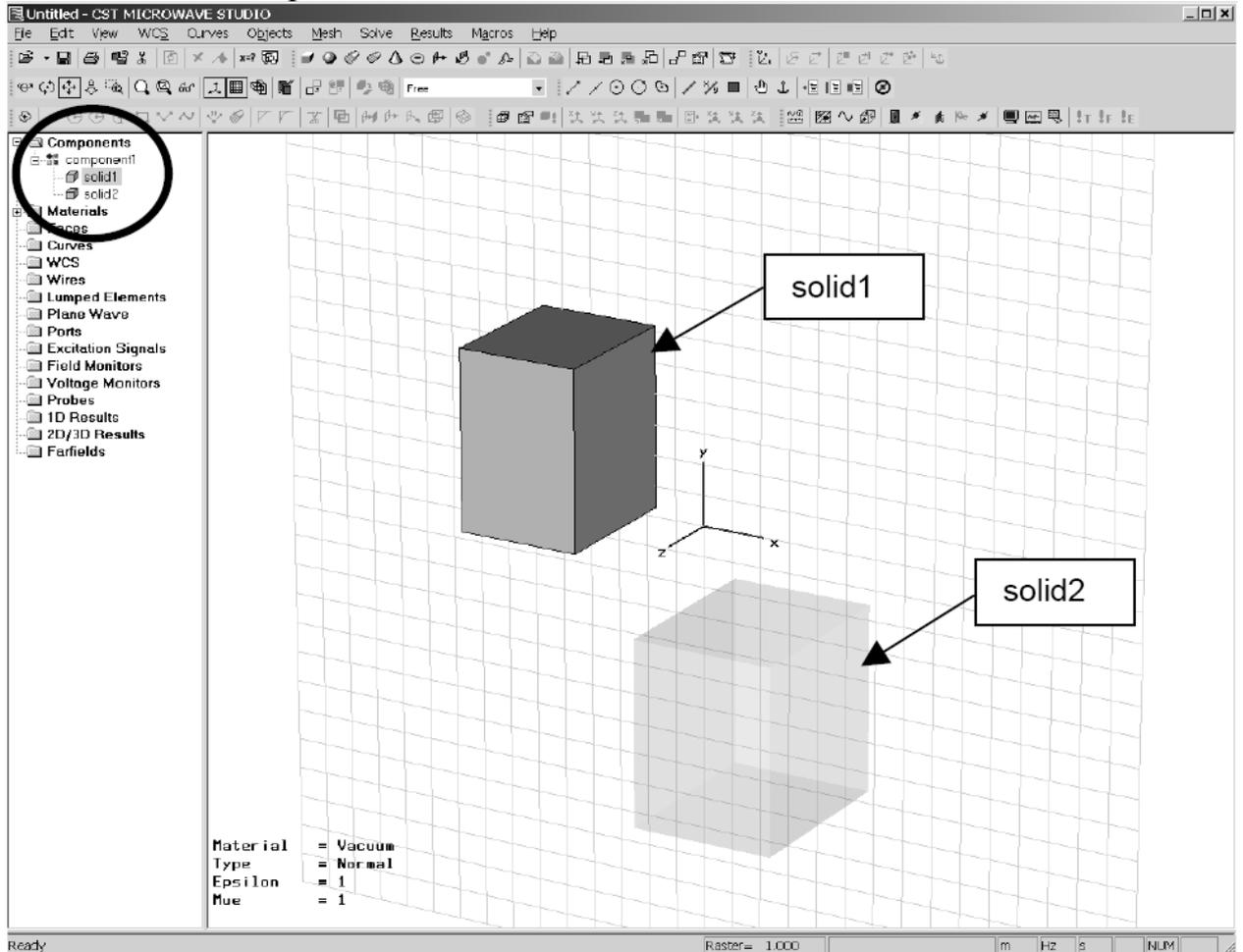


Рисунок 6

Вы можете изменить название формы выбрав ее, а затем выполнить команду *Edit - Rename Object* главного меню, или нажав клавишу *F2*. Название формы теперь может быть изменено путем его редактирования в навигационном дереве.

Теперь, когда мы рассмотрели процедуру выбора объекта, рассмотрим процесс группировки форм, в так называемые компоненты. Каждый компонент занимает отдельную директорию в папке *Components* дерева навигации. Каждый компонент может содержать произвольное число форм.

Цель составления структуры состоит в группировке форм принадлежащих определенному геометрическому устройству, такому как, например, соединитель, антенна и так далее. Такая группировка объектов позволяет производить простые операции (копирование, удаление и так далее) одновременно над всеми данными объектами.

Создание компонента осуществляется путем выбора объекта и вызова из главного меню команды *Edit – Change component*, либо вызовом команды *Change component* из контекстного меню объекта (вызывается однократным нажатием правой клавиши мыши на данном объекте). После этого откроется следующее диалоговое окно:

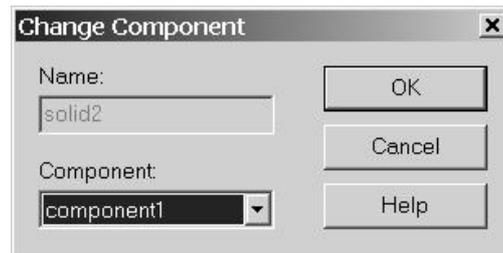


Рисунок 7

В этом окне Вы можете выбрать существующий компонент из списка или создать новый компонент *New component*. Новым компонентам автоматически присваиваются имена *component2*, *component3* и так далее.

Составляющие компонент формы не имеют никакого отношения к своим физическим материальным свойствам. Для этого, каждому объекту, входящему в состав компонента, сопоставляется материал, из которого он состоит, и определенный цвет для визуализации его формы. Другими словами, материальные свойства (и цвета) не принадлежат формам непосредственно, а принадлежат соответствующему материалу. Это означает, что все формы, созданные из одного материала имеют идентичные материальные свойства и цвет визуализации.

Единственным способом для изменения материальных свойств или цвета индивидуальной формы является назначение объекту другого материала. Это производится путем выбора объекта и вызовом команды *Edit – Change material* главного меню, либо соответствующей команды из контекстного меню объекта (вызывается правой клавишей мыши). Появится следующее диалоговое окно:

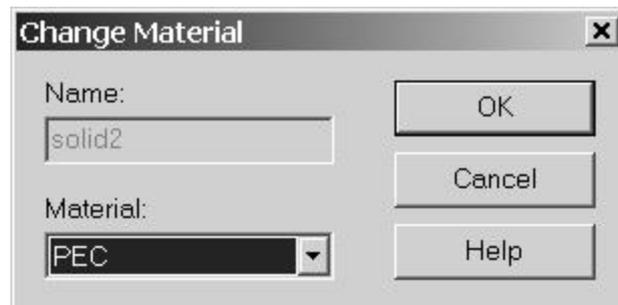


Рисунок 8

В этом диалоговом окне Вы можете выбрать существующий материал из списка или создать новый *New material*. В последнем случае откроется новое диалоговое окно:

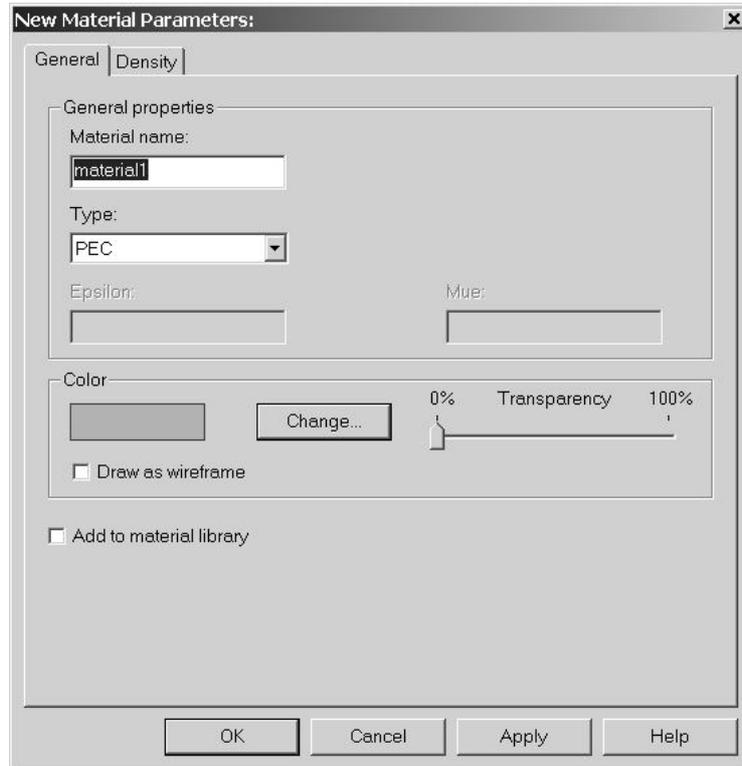


Рисунок 9

В этом диалоговом окне Вы должны задать название материала (*name material*), тип (идеальный проводник *PEC*, нормальный диэлектрик *normal*, анизотропный материал *anisotropic* или материал с поверхностным импедансом). Вы также можете осуществить выбор цвета материала, нажимая на клавишу *Change*. После нажатия кнопки *OK* новый материал отобразится в папке *Materials* дерева навигации. Выбор конкретного материала в дереве навигации сопровождается также визуальным выделением объектов на графической плоскости, сопоставленных данному материалу. Другие объекты при этом примут прозрачный оттенок.

Чтобы упростить использование часто применяемых материалов была создана база данных. Прежде чем материал из базы данных может быть использован, его необходимо добавить к текущему проекту путем выбора команды *Solve – Materials – Load from material Library*. После выбора данной команды откроется окно выбора материала из базы данных:

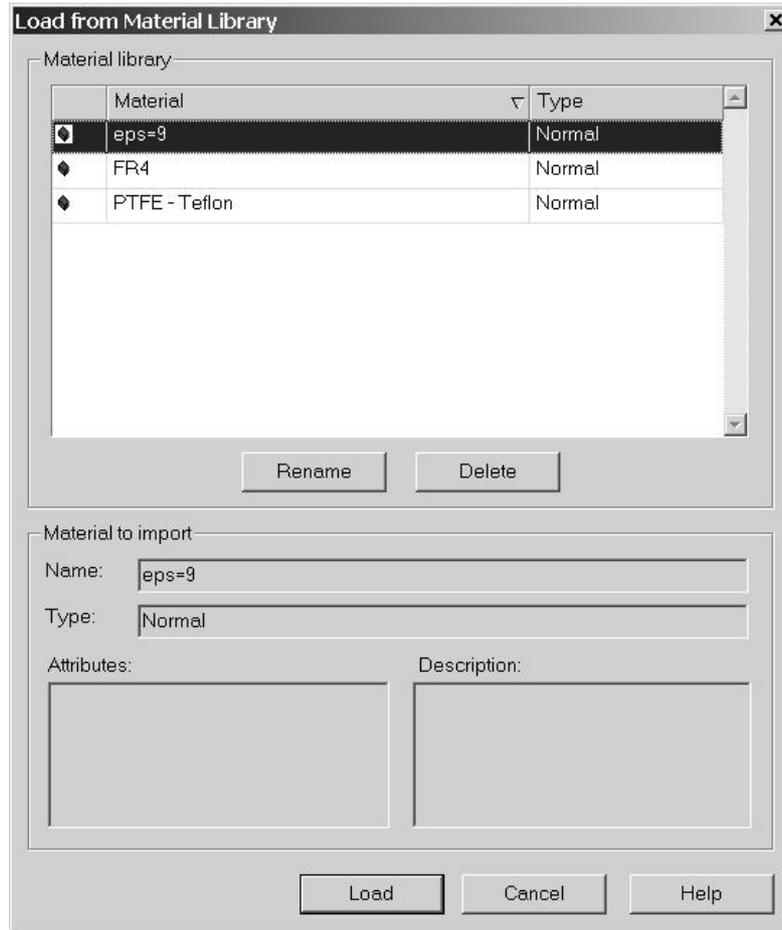


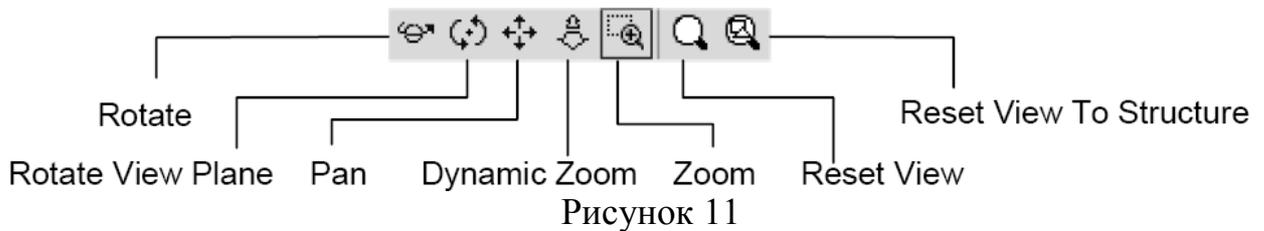
Рисунок 10

Вы можете выбрать существующий материал из списка и нажать кнопку *Load*, чтобы добавить его в папку материалов дерева навигации. Теперь выбранный материал может быть использован в текущем проекте. Также Вы можете добавить созданный Вами материал в базу данных материалов. Это осуществляется путем выбора соответствующего материала из дерева навигации и выполнения команды *Solve – Materials – Add to material library* главного меню.

Изменение вида отображения модели

Пока мы только создавали и рассматривали формы в виде, используемом по умолчанию. Вы можете изменить вид в любое время, используя некоторые простые команды, о которых будет рассказано позже.

Вид будет изменяться всякий раз, когда Вы будете изменять положение мыши при нажатой левой клавише. Происходить это будет согласно выбранному способу. Способ изменения вида выбирается командой *View – Mode* главного меню (*Rotate/Rotate View Plane/Pan/Zoom/Dynamic Zoom*) или соответствующим значком на панели задач:



Возможные способы изменения вида:

- *Rotate*: вращение структуры во всех плоскостях;
- *Rotate view plane*: структура будет вращаться только в одной плоскости;
- *Pan*: перемещение структуры в двух плоскостях;
- *Dynamic zoom*: перемещение мыши с нажатой левой клавишей приводит к увеличению коэффициента масштабирования, вниз – уменьшению;
- *Zoom*: в этом режиме, увеличивается прямоугольная область, выделенная курсором мыши, при нажатой левой клавише.

Динамическое изменение вида всегда прекращается при отжатию левой клавиши мыши. Вы можете отменить произведенное масштабирование путем выбора команды *View – Reset View* из главного меню. Альтернативой служит соответствующий элемент инструментальной панели.

Одна из наиболее важных команд изменения вида активизируется командой *View – Reset view to structure* или клавишей пробела. Эта команда приводит масштаб изображения выбранной структуры к наиболее оптимальному виду. Кроме того, сочетание клавиш *Shift+Spice* приводит к изменению масштаба к оптимальному виду выбранной формы, а не всей структуры.

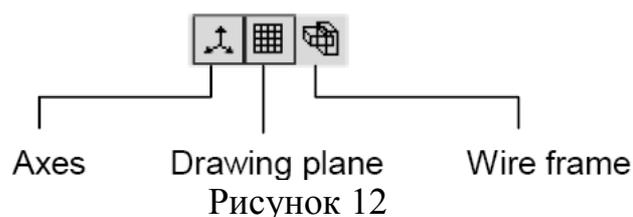
Существует несколько «горячих» клавиш изменения вида, использование которых поможет Вам ускорить работу, при создании интерактивного объекта. Пожалуйста, нажмите и удерживайте следующие клавиши, перетаскивая при этом мышь, с нажатой левой клавишей:

- *Ctrl*: то же самое, что функция *Rotate*;
- *Shift*: то же самое, что функция *Rotate view plane*;
- *Shift+Ctrl*: соответствует функции *Pan*.

Использование колесика мыши дает тот же эффект, что и динамическое масштабирование.

В дополнение к опциям, описанным выше, существуют команды изменения визуализации модели.

Все эти настройки могут быть выбраны из вкладки *View* главного меню, либо нажатием соответствующего значка на инструментальной панели.



Axes (*View – View options* пункт *Coordinate Axes*; *Ctrl + A*) – опция определяет отображается ли система координат, или нет:

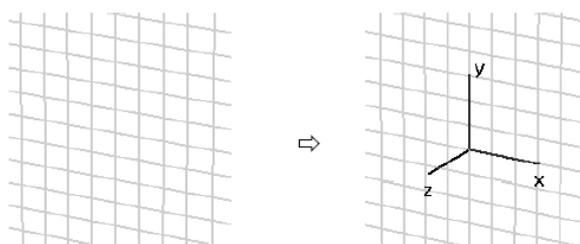


Рисунок 13

Working Plane (*View – View options* пункт *Working plane*; *Alt + W*) – определяет, видна ли координатная плоскость рисунка или нет:

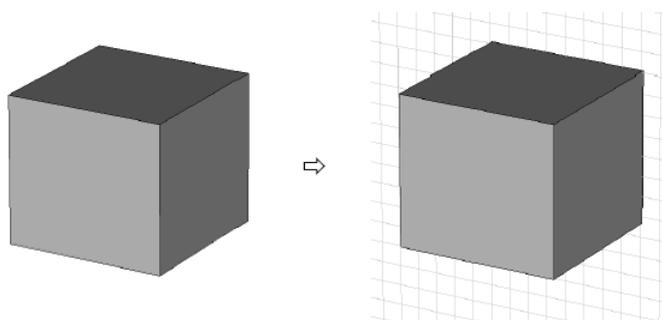


Рисунок 14

Wireframe (*View – View options* пункт *Wireframe*; *Ctrl + W*) – определяет, отображается каркас детали, или форма в целом.

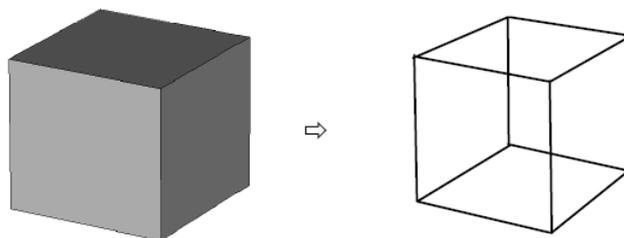


Рисунок 15

Применение геометрических преобразований

Пока Вы только познакомились с тем, как изменить представление вида Вашей модели. Первой из более улучшенных операций с Вашей моделью будет операция геометрического преобразования.

В дальнейшем мы предполагаем, что Вы уже выбрали форму (или несколько), к которой должно быть применено геометрическое преобразование. После этого Вы можете открыть диалоговое окно геометрического преобразования из главного меню командой *Objects – Transform*, либо также командой *Transform* из контекстного меню, либо нажатием кнопки  на панели инструментов.

В этом диалоговом окне Вы должны будете выбрать один из видов преобразования:

- *Translate*: это преобразование переноса формы по вектору сдвига;
- *Scale*: данным преобразованием Вы можете изменять коэффициент масштабирования формы вдоль осей координат. Вы можете определять различные коэффициенты масштабирования в различных координатных направлениях;
- *Rotate*: это преобразование осуществляет поворот формы вокруг оси на указанный угол. Вы можете дополнительно установить центр вращения в строке *Origin*. Центром может быть, либо геометрический центр формы (устанавливается автоматически), либо любая точка формы. Угол вращения и параметры настройки определяются вводом значения в соответствующее поле координатной оси (например, ввод значения угла поворота 45° в ячейке оси *y*, при сохранении нулевых значений других координат, приведет к вращению формы вокруг оси *y* на 45°);
- *Mirror*: данное преобразование позволит зеркально отобразить форму в указанной плоскости. В окне *Origin* задается плоскость симметрии, а в окне *Mirror plane normal* задается плоскость вектора нормали.

При всех данных преобразованиях Вы можете определить, будет ли сохранена при этом первоначальная форма, или же удалена. Это регулируется установкой флажка в ячейке *Copy* (флажок установлен – первоначальная форма будет сохранена). Кроме того, в поле *Repetition factor* Вы можете определить сколько раз данное преобразование должно быть применено к данной форме (при этом должен стоять флажок в поле *Copy*).

Сейчас на простом примере продемонстрируем использование диалогового окна преобразования. Предполагается, что была создана форма в виде параллелепипеда, который изображен ниже. Откройте диалоговое окно *Transform* из контекстного меню, либо выберите команду *Object – Transform* из главного меню.

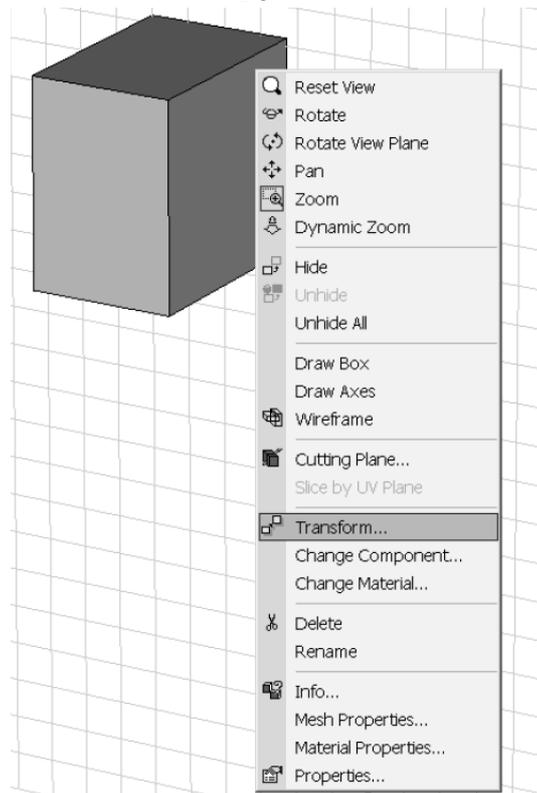


Рисунок 16

Теперь примените к форме преобразование *Translate* с вектором сдвига (5;0;0). Создайте при этом множественную копию:

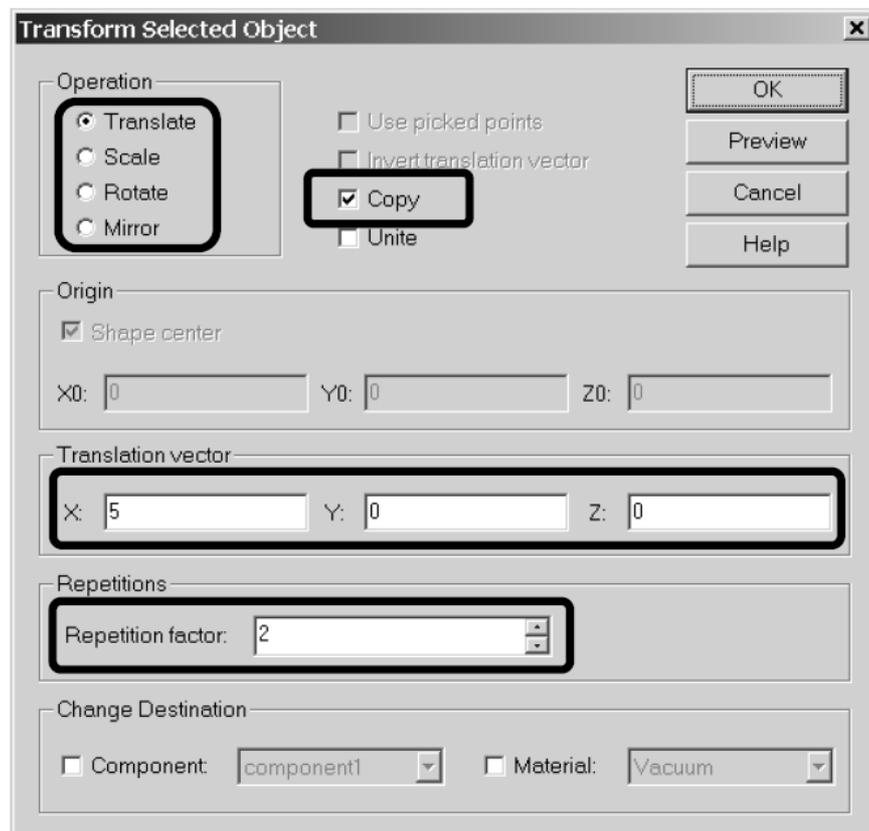


Рисунок 17

В результате Вы получите следующий результат:

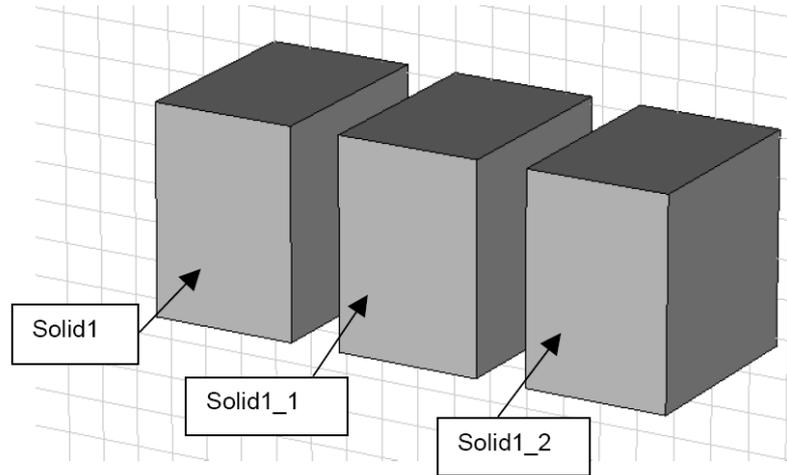


Рисунок 18

Заметьте, что при преобразовании имена форм сохраняются (при выключенной функции *Copy*), или в обратном случае к именам добавляются индексы *_1*, *_2* и так далее, для присвоения уникального имени каждой форме.

Комбинирование форм объектов

Вероятно самыми сильными операциями при создании комбинированных форм из примитивов, являются, так называемые, логические операции. Эти операции позволят Вам вычитать одну, или более форм из другой, вставлять формы друг в друга, пересекать одну или более форм.

Ниже мы рассмотрим две простые формы – сферу и параллелепипед, над которыми будут произведены логические операции.

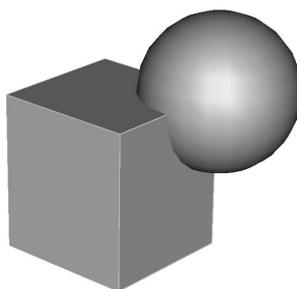
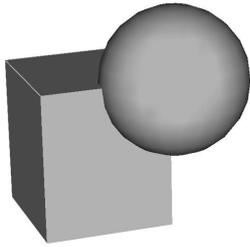
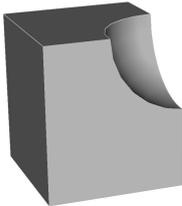
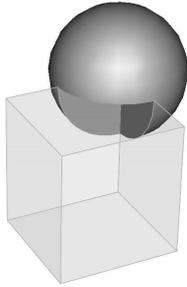
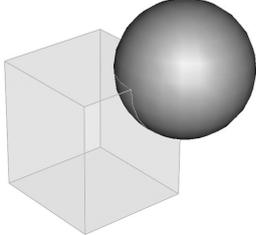


Рисунок 19

Таблица 1. Логические операции и результаты их применения

<p>Прибавление параллелепипеда к сфере</p> <p>Прибавьте обе формы друг к другу, чтобы получить одну. Получившаяся составная форма примет настройки и параметры первоначальной структуры.</p>	
<p>Вычитание сферы из параллелепипеда</p> <p>Вычтите первоначальную форму из второй, чтобы получить единственную форму. Полученная форма будет иметь настройки и параметры первоначального объекта.</p>	
<p>Пересечение параллелепипеда и сферы</p> <p>Пересеките две формы для образования единственной. Полученная форма примет настройки первоначальной.</p>	

<p>Вырезка сферы = вставка параллелепипеда в сферу</p> <p>Первоначальная форма будет урезана поверхностью раздела второй формы. Обе формы будут сохранены. У результирующих форм не будет пересечения объема.</p>	
<p>Вставка сферы в параллелепипед = вырезка параллелепипеда</p> <p>Первоначальная форма будет вставлена во вторую. Обе формы будут сохранены. У результирующих форм не будет пересечения объема.</p>	

Заметьте, что описанные выше операции доступны напрямую. Кроме того, как Вы могли заметить, некоторые операции избыточны (могут быть заменены другими, когда порядок форм изменен на противоположный).

Логические операции доступны из главного меню, вкладки *Object – Boolean – Add/Subtract/Intersect/Insert*. Все операции доступны только в случае, когда форма выбрана («первая» форма). После активации логической операции, программой будет произведен запрос на выбор «второй» формы. После этого нажмите клавишу *Enter* или кнопку  на панели инструментов. Будет выполнена логическая операция. Результат зависит от типа выбранной операции, список которых приведен ниже:

- *Add*: прибавить второй объект к первому. В результате будут сохранены настройки и параметры первоначальной формы;
- *Subtract*: вычитание второй формы из первой. В результате будут сохранены настройки и параметры первоначальной формы;
- *Intersect*: пересечение первой и второй формы. В результате будут сохранены настройки и параметры первоначальной формы;
- *Insert*: вставка второй формы в первую. Сохраняет обе формы, изменяя первоначальную.

Операция вырезки доступна только в диалоговом окне *Shape intersection*, которое появляется в том случае, когда вновь созданная форма пересекается с формами, созданными ранее. Это диалоговое окно будет разобрано позднее.

Когда выбрано несколько форм, операция сложения становится доступной и может быть применена для объединения всех выбранных форм. Вы также можете выбрать более одной формы, когда программа требует указать «вторую» форму при выполнении операции вычитания, пересечения или вставки.

Точки, ребра и грани объекта

Многие конструкторские шаги требуют выбора определенной точки, ребра или грани разрабатываемой модели. В следующем разделе будет объяснено, как выбрать данные объекты в интерактивном режиме.

Для каждой, так называемой, операции указки Вы должны выбрать соответствующее интерактивное приспособление. Выбор осуществляется из вкладки *Object - Pick* главного меню, или нажатием на соответствующую кнопку панели инструментов:

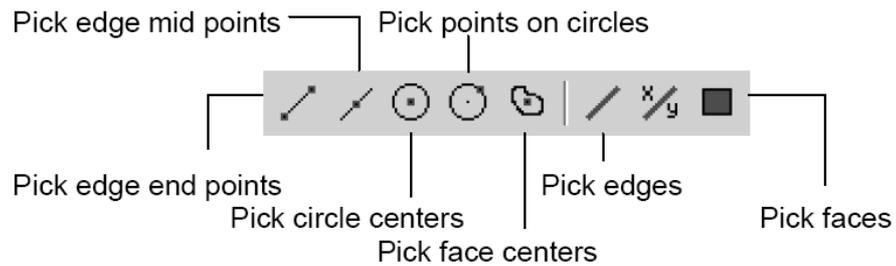


Рисунок 20

После активации нужного интерактивного приспособления курсор мыши изменит свой вид. В дополнение к этому, в соответствии с выбранным приспособлением, точки, ребра или грани модели будут подсвечиваться. Теперь Вы можете дважды щелкнуть левой клавишей мыши на нужном элементе. Вы можете отменить режим указки нажимая клавишу *Esc*, либо выбирая пункт *Leave pick mode* из контекстного меню, либо нажимая кнопку  на панели инструментов.

Замечание: Вы не можете выбрать элементы у других форм, кроме выбранной; в этом случае Вы должны выбрать нужную форму, или отменить выделение всех форм, выбранных ранее.

Как только будет произведено двойное нажатие, курсор мыши примет обычный вид, а выбранная точка, ребро или грань будет подсвечена. Обратите внимание, если в инструментальной панели будет нажата кнопка , то после двойного нажатия на левую клавишу мышки режим указки пропадать не будет. В этом случае Вы должны отменить режим указки, как было описано выше. Этот режим удобен в том случае, когда необходимо выделить несколько точек, ребер или граней. В противном случае пришлось бы активировать режим указки несколько раз.

В следующем списке отображен краткий обзор режимов указки, и описаны результаты их использования. Представлены также «горячие» клавиши для эффективной работы по активации режимов указки. Эти клавиши действуют только в случае, когда активно основное окно структуры. Это Вы можете сделать, нажимая левой клавишей мыши на любом пустом месте графической панели. Ниже, все «горячие» клавиши приведены в скобках, рядом с соответствующей командой:

- *Pick edge end points (P)*: двойной клик левой клавишей мышки по точке, расположенной ближе к концу ребра. Данная точка будет выбрана;

- *Pick edge mid points (M)*: двойной клик на ребре объекта. Будет выбрана середина ребра;

- *Pick circle centers (C)*: двойной клик на ребре окружности. Будет выбран центр окружности. Заметьте, что окружность не обязательно должна быть неразрывной;

- *Pick points on circles (R)*: двойной щелчок на ребре окружности. Будет выбрана произвольная точка на окружности. Эта операция полезна при задании радиуса окружности объекта при его интерактивном создании;

- *Pick face centers (A)*: двойной щелчок по плоскости грани объекта. Будет выбрана центральная точка выбранной грани;

- *Pick edges (E)*: двойной щелчок на ребре модели, которое и будет выбрано;

- *Pick faces (F)*: двойной щелчок по плоскости грани объекта. Соответствующая плоскость будет выбрана;

- *Pick edge chain (Shift+E)*: двойной щелчок на ребре модели. Будут выбраны данное ребро, и ребра, прилегающие к нему. Если выбранное ребро будет являться границей раздела двух граней, то Вам будет предложено выбрать нужную грань;

- *Pick face chain (Shift+F)*: двойной щелчок на грани модели. Эта функция автоматически выделит указанную грань, и остальные, прилежащие к ней.

Операция указки для выбора точки модели применима и при интерактивных режимах создания формы. Всякий раз, когда двойным щелчком мыши требуется ввести следующую точку, альтернативно может быть введен режим указки, в котором и будет указана требуемая точка.

Ранее выбранные точки, ребра или грани могут быть отменены выбором команды *Object – Clear picks* главного меню, клавишей D, либо нажатием на кнопку  инструментальной панели.

Закругление и элементы сопряжения рёбер объекта

Одно из самых общих приложений для выбранных ребер – это закругление и сопряжение элементов ребер. В дальнейшем мы предполагаем, что Вы создали параллелепипед и выбрали его ребра, как это показано на рисунке:

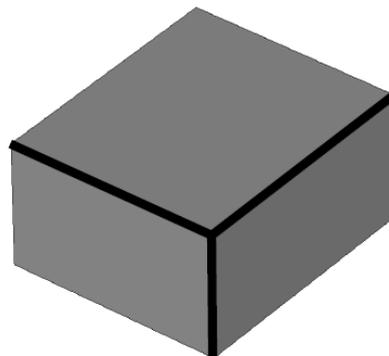


Рисунок 21

Теперь Вы можете выполнить операцию закругления кромки ребра, которая может быть активизирована выбором команды *Objects - Chamfer Edges* главного меню, либо нажатием кнопки  панели инструментов. В следующем диалоговом окне Вы можете выбрать ширину закругления кромки. В результате выполнения описанных выше действий Вы должны получить приблизительно такую картину:

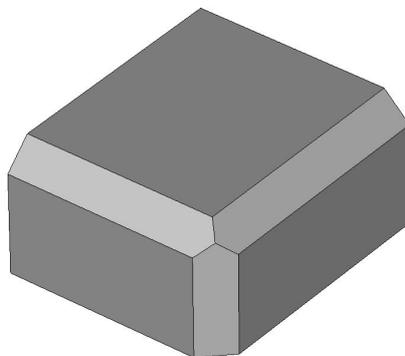


Рисунок 22

Альтернативно Вы можете выполнить операцию сопряжения элементов (команда *Object - Blend edges* главного меню, либо кнопка  инструментальной панели). В следующем диалоговом окне Вы можете определить радиус элемента сопряжения. В результате Вы должны увидеть примерно следующее:

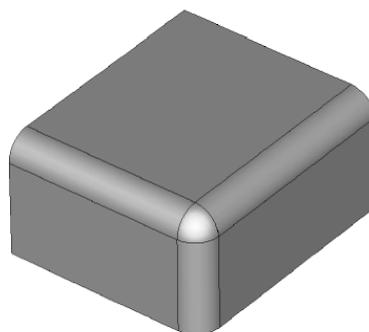


Рисунок 23

Выдавливание, скручивание и развертка граней

Инструментальные средства закругления и сопряжения ребер – общие операции на выбранных ребрах. Такими же общими операциями, только для граней, являются операция выдавливания, скручивания и развертки. Создайте цилиндр, и выберите его переднюю грань:

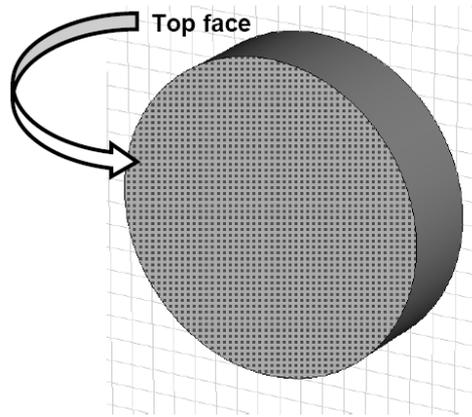


Рисунок 24

Теперь Вы можете активировать операцию выдавливания (*Object – Extrude* главного меню, или  инструментальной панели). После этого перед Вами появится следующее диалоговое окно:

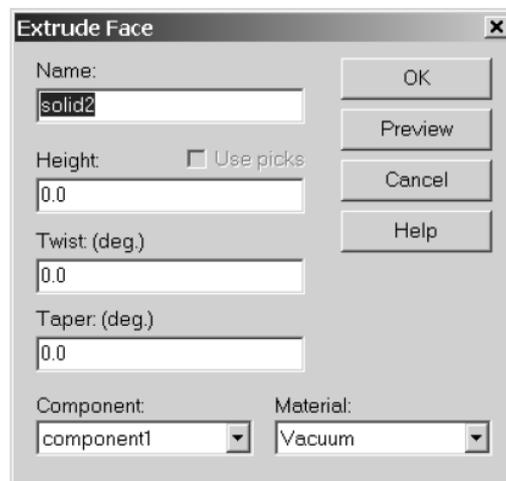


Рисунок 25

Если никакая грань заранее не будет выбрана, то будет введен интерактивный режим, в котором Вы можете определить точки многоугольника, к которому будет применена операция выдавливания. Однако в данном случае от Вас требуется ввести только высоту и нажать *OK*. Далее перед Вами будет следующая картина:

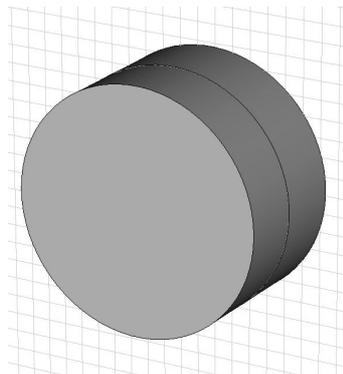


Рисунок 26

Приспособление выдавливания создало вторую форму выбранной грани. Для проведения операции вращения вернитесь к изначальной форме:

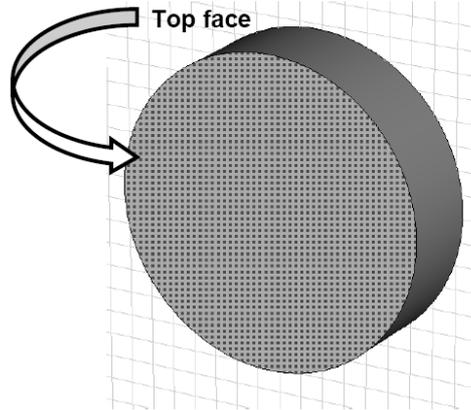


Рисунок 27

Для активации операции вращения необходимо выбрать не только нужную грань, но и ось вращения. Осью вращения может быть также выбрано линейное ребро модели, и, кроме того, она может быть задана численно. В этом примере Вы должны выбрать ось при помощи команды главного меню *Object – Pick – Edge from coordinates*, либо нажатием на кнопку  инструментальной панели. В результате этого Вам будет предложено выбрать две на плоскости точки для задания оси вращения. Выберите, пожалуйста, точки, которые указаны в этом примере:

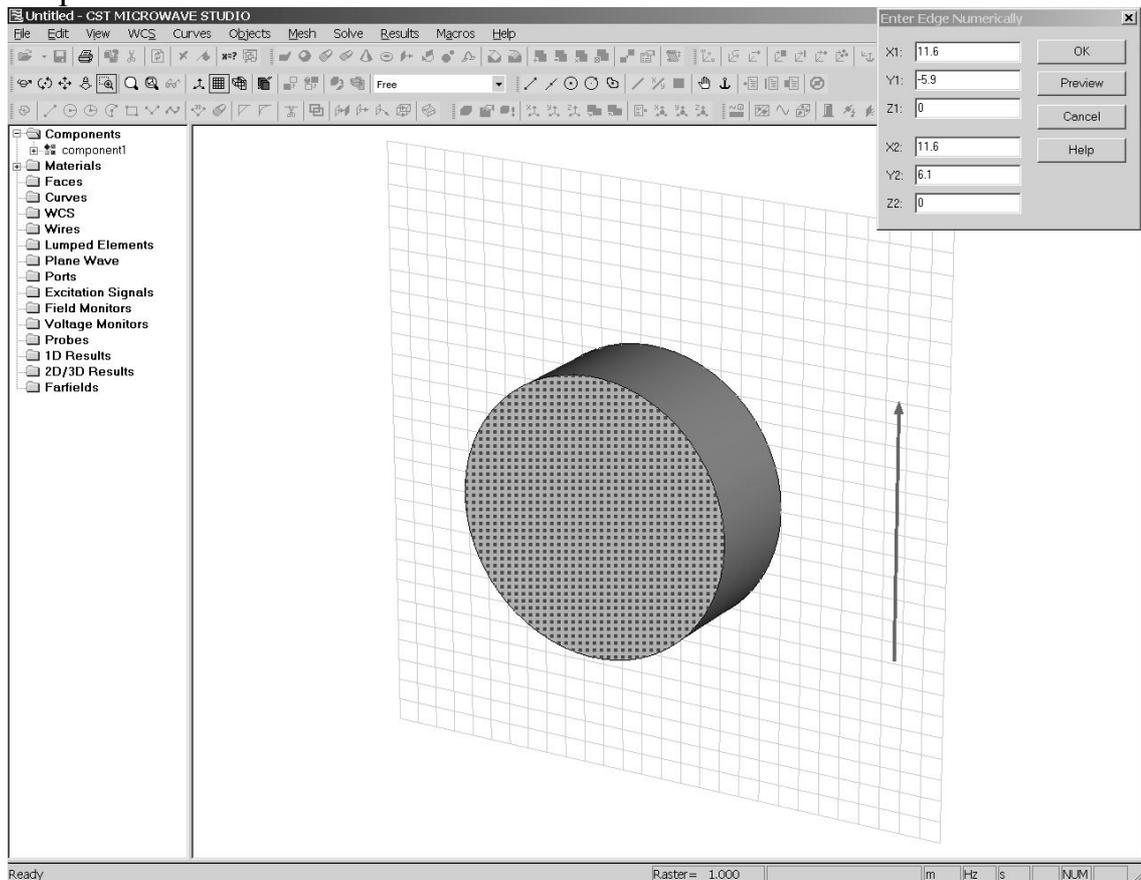


Рисунок 28

После ввода численных значений нажмите кнопку *OK*. Теперь Вы можете активизировать приспособление для вращения грани, выбирая команду *Object – Rotate* из главного меню.

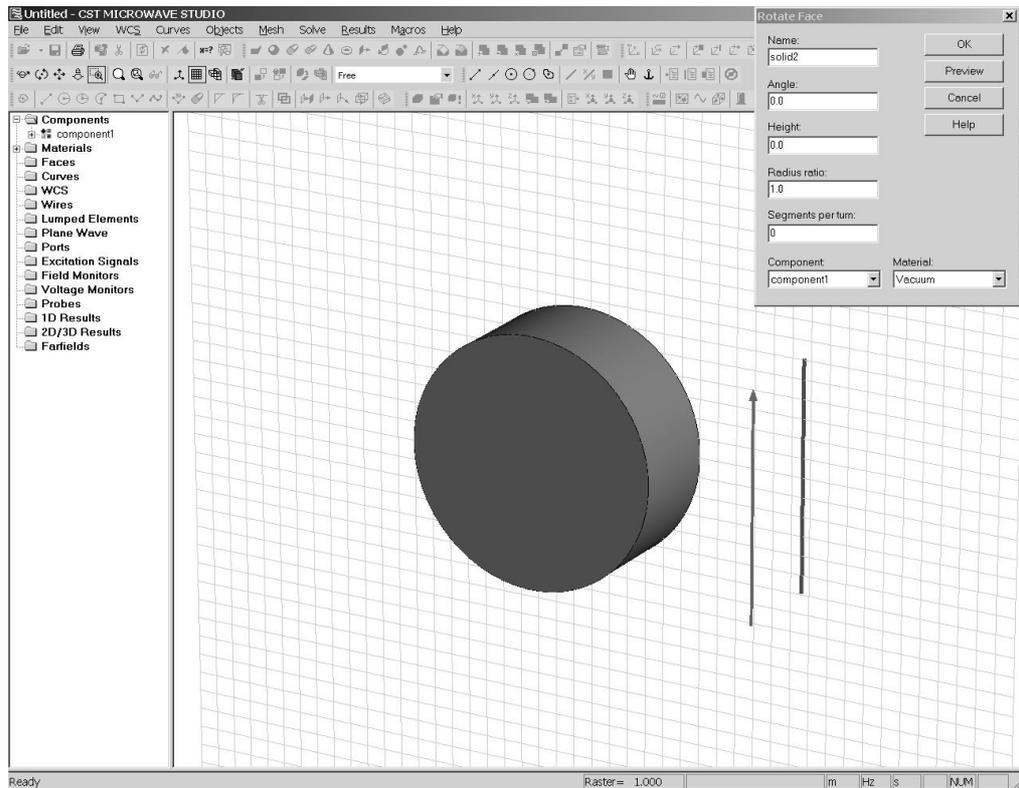


Рисунок 29

Ранее выбранная ось вращения автоматически проецируется на грань объекта и отображается синим цветом. В диалоговом окне *Rotate face* можно задать угол (*Angle*). Введите значение угла равное 90 градусам. В результате Вы получите приблизительно такую картину:

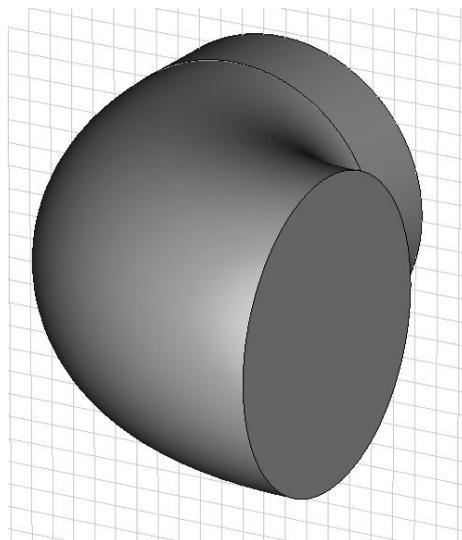


Рисунок 30

Пожалуйста, заметьте, что приспособление вращения также может участвовать в интерактивном режиме формирования объекта, подобно приспособлению выдавливания. Это происходит в том случае, когда на момент активации приспособления никакая из граней не была выбрана.

Одной из более усовершенствованных операций является операция вращения грани. Для примера, создайте цилиндр радиусом 5, и высотой 3. Произведите преобразование данного объекта в режиме *Translated*, вдоль оси с координатами (0,0,8), и с включенным флажком *Copy*.

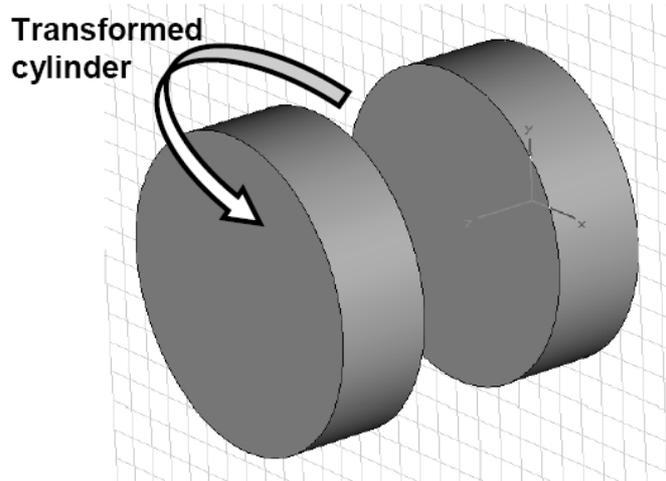


Рисунок 31

Следующим шагом произведите преобразование второй формы в режиме *Scale*, с коэффициентами при x и y равными 0.5, сохраняя коэффициент при z равным 1:

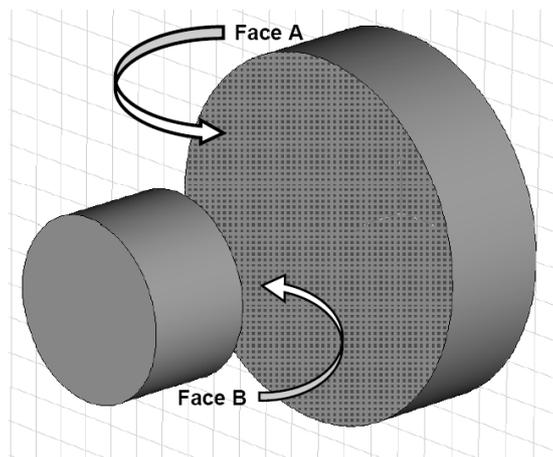


Рисунок 32

Теперь выберите смежные грани, как это показано на рисунке выше. Впоследствии Вы можете применить операцию развертки командой *Object – Loft* (🔗). В следующем диалоговом окне Вы можете задать гладкость поверхности (в разумных пределах) и нажать кнопку *Preview* для предварительного просмотра результата. Пожалуйста, перетащите бегунок гладкости в такое положение, при котором переход между плоскостями будет наиболее плавным, и только после этого нажимайте ОК.

Замечание: Вы должны выбрать соответствующую форму, прежде чем выбрать ее грань. При этом все другие формы становятся прозрачными, что делает возможным выбор нужной грани сквозь них.

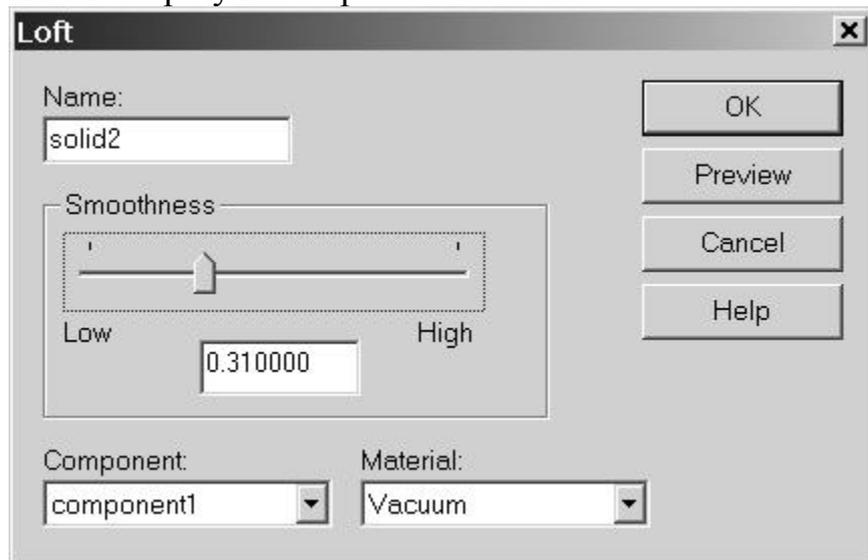


Рисунок 33

В результате Ваша модель должна быть похожа на следующее изображение (заметьте, что фактическая форма зависит от конкретного параметра гладкости):

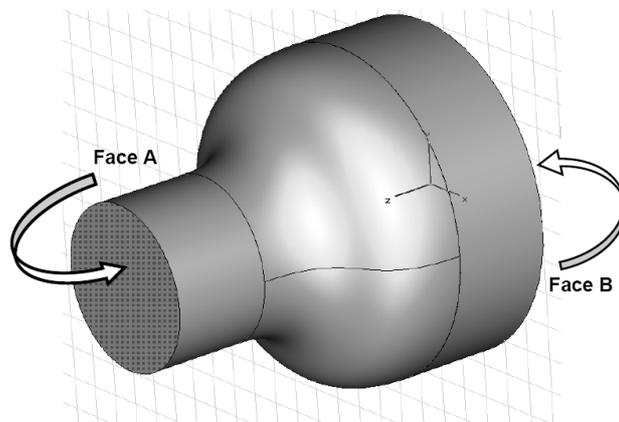


Рисунок 34

Далее, Вы можете совместить все три формы в одну, выделяя последовательно каждую форму при нажатой клавише *Ctrl*, и выполняя в заключении команду *Objects – Boolean – Add*. Теперь выберите верхнюю и нижнюю грани полученной формы, и выполните команду *Objects – Shed solid or thicken sheet tool*.

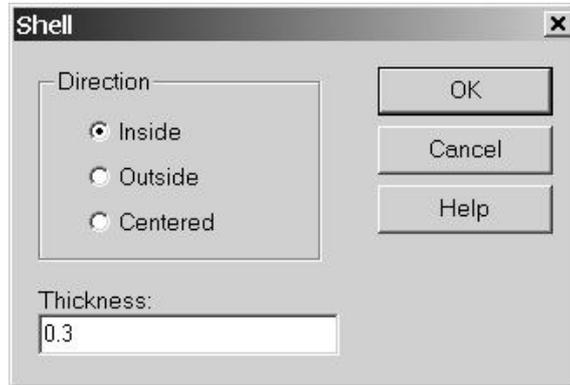


Рисунок 35

В этом диалоговом окне Вы можете задать толщину (*Thickness*), например 0.3 и далее нажмите *OK*. В результате Ваша модель должна выглядеть следующим образом:

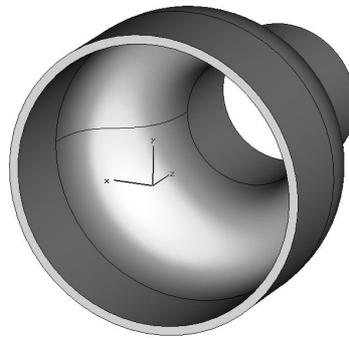


Рисунок 36

Локальная система координат

Помимо логических операций, при создании модели разработчику очень хорошо помогает в работе возможность включения локальной системы координат. В предыдущих разделах были рассмотрены процессы создания простых форм, которые были привязаны к глобальной системе координат графического поля.

Цель локальной системы координат состоит в том, чтобы упростить формирование объекта, когда у него отсутствует привязка к глобальной системе координат.

Локальные системы координат состоят также из трех координатных осей. В отличие от обозначения x , y и z в глобальной системе координат, эти оси носят соответственно названия u , v и w . Локальная система координат носит еще название рабочей системы координат (*WCS*).

В любой момент времени как локальная, так и глобальная система координат могут быть активными. «Активными» означает, что с данного момента времени, все объекты будут рассматриваться относительно данной системы координат. Вы можете активизировать или отключить привязку к локальной системе координат выполняя команду *WCS – Local coordinate system*,

из контекстного меню *WCS*, или нажатием на кнопку  инструментальной панели. Каждый из этих элементов управления производит поочередное включение или выключение локальной системы координат.

Теперь Вы узнали, что такое локальная система координат и как ее активизировать, но Вы должны знать также, как правильно ее задать, чтобы она располагалась именно так, как Вам это требуется.

Самым общим способом задания локальной системы координат состоит в том, чтобы определить ее оси относительно точки, ребра или грани какой-либо модели:

- когда выбрана одна точка, с ней можно сопоставить начало локальной системы координат, путем выбора команды *WCS - Align WCS with Selected Point*;

- когда выбрано три точки, плоскость *u-v* может быть определена данными точками (*WCS - Align WCS with 3 Selected Points*). Начало координат, при этом, будет находится в первой выбранной точке;

- когда выбрано ребро, ось *u* может быть ориентированна параллельно ему (*WCS - Align WCS with Selected Edge*);

- и наконец, когда выбрана грань, плоскость *u-v* может быть ей сопоставлена (*WCS - Align WCS with Selected Face*).

После выбора точки, ребра или грани, Вы можете альтернативно нажать клавишу *W*, чтобы выровнять локальную систему координат с последним выбранным элементом. Наряду с «горячими» клавишами для режимов указки – это самый эффективный способ изменение размещения и ориентации *WCS*.

Помимо способности выравнивания *WCS* относительно элементов той или иной модели, существует еще три способа определения *WCS*:

- прямое задание параметров *WCS* (*WCS - Define Local Coordinates*): в этом диалоговом окне Вы можете вести начало координат (*Origin*) и ориентацию *u* и *v* осей;

- перемещение локальной системы координат (*WCS - Move Local Coordinates*): в данном диалоговом окне Вы можете переместить начало координат по заданному вектору;

- вращение локальной системы координат (*WCS - Rotate Local Coordinates*): в диалоговом окне Вы можете задать ось вращения (одну из координат) и угол поворота.

Первый и третий способ становятся наиболее эффективными в сочетании с элементами указки, описанными выше.

Большинство операций с локальной системой координат также доступно на панели инструментов:

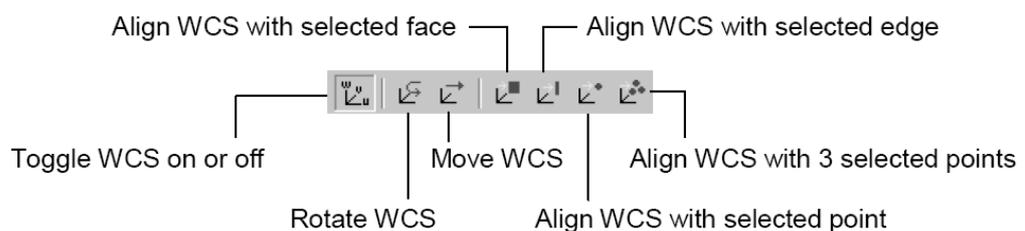


Рисунок 37

В следующем примере будет показан результат эффективного использования локальной системы координат.

Первым шагом создайте параллелепипед в глобальных системах координат. Затем поверните его на 30 градусов по оси z , используя диалоговое окно *Transform*:

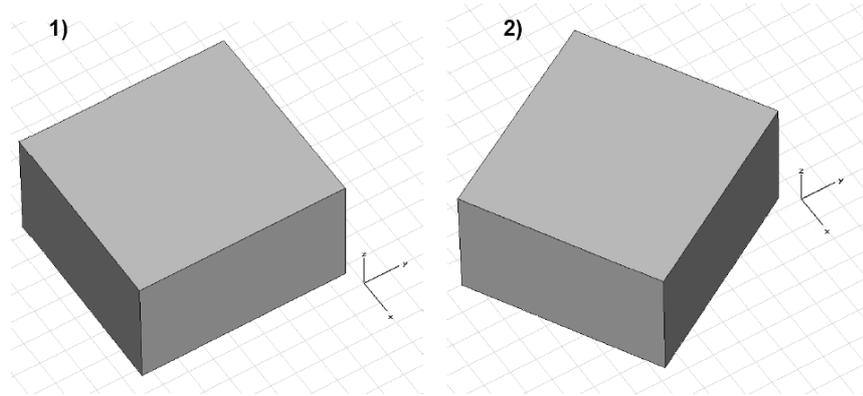


Рисунок 38

Следующим шагом активируйте локальную систему координат, и выровняйте ее, во-первых, с верхней гранью параллелепипеда, а затем с одной из вершин этой грани:

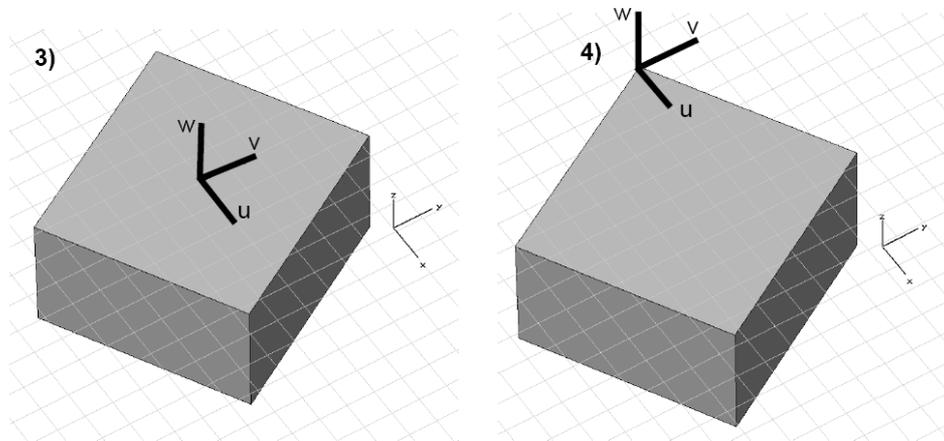


Рисунок 39

Теперь, выровняйте систему координат с одним из ребер верхней грани параллелепипеда, а затем поверните систему координат на 30 градусов относительно оси v :

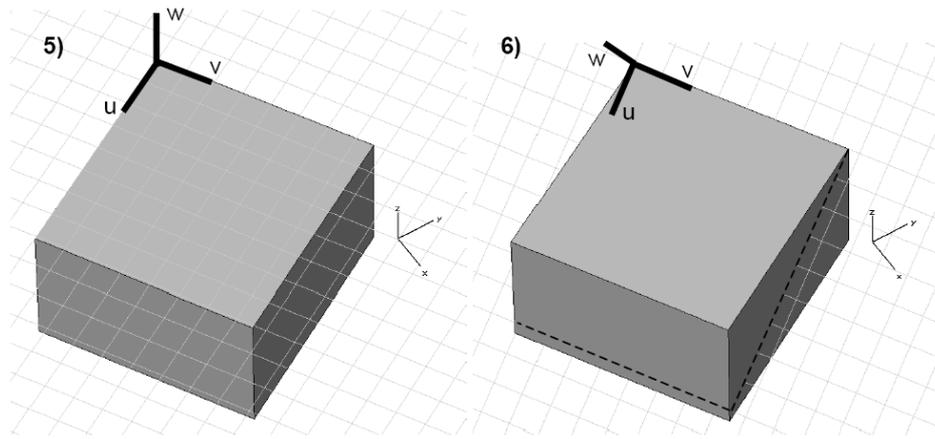


Рисунок 40

В заключении, создайте новый цилиндр в локальной системе координат. Как только Вы определите параметры цилиндра, откроется окно с логическими операциями двух пересекающихся форм. Выберите команду *Add shape*:

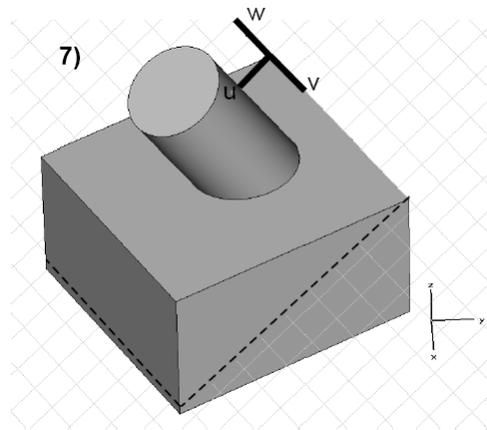


Рисунок 41

Лист хронологии

До сих пор Вы создавали определенные базовые структуры и выполняли некоторые простые геометрические преобразования. Ошибки во время формирования структуры всегда могут быть исправлены при использовании команды *Edit – Undo* главного меню, которая просто удаляет последний выполненный шаг.

Однако иногда бывает необходимо возвратиться к предыдущему шагу формирования структуры, чтобы изменить, удалить или добавить некоторые операции.

Эта типичная задача поддерживается в CST Microwave Studio при помощи, так называемого, листа предыстории. Все соответствующие структурные изменения регистрируются в списке, который можно вывести на экран при помощи команды *Edit – History list* главного меню или путем нажатия на кнопку  инструментальной панели.

В дальнейшем, мы предполагаем, что Вы создали структуру пересечения параллелепипеда и цилиндра, как это изображено на последнем рисунке. В этом случае, список предыстории будет похож на следующее изображение:

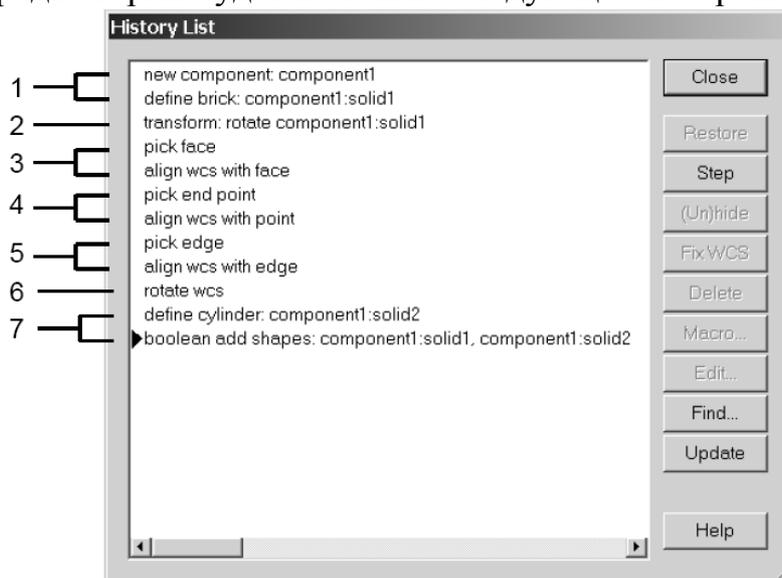


Рисунок 42

Список отображает все операции в хронологическом порядке. Маркер ► указывает текущую позицию создания структуры в листе предыстории. Вы можете перейти к любому этапу создания структуры в листе предыстории, выбирая соответствующую строку и нажимая кнопку *Restore*. Нажатие кнопки *Step* осуществит переход к следующему шагу листа предыстории. Теперь Вы можете поэкспериментировать с этой особенностью программы.

Нажатие кнопки *Update* приведет к перезаписи структуры. Кнопка *Edit* позволяет Вам выполнять изменения предыдущих операций. В данном случае выберите пункт «*rotate wcs*» и нажмите кнопку *Edit*. В результате появится следующее диалоговое окно:

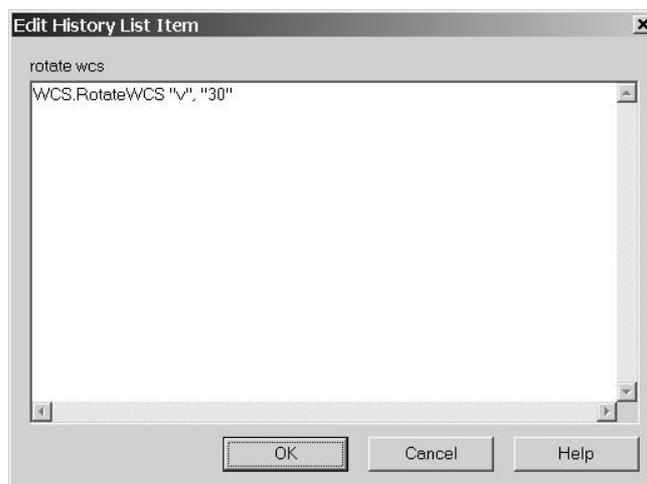


Рисунок 43

Текст, в данном случае, представляет собой команду, записанную на макроязыке, которая выполняет соответствующую задачу. Здесь, первый

параметр « V » является осью вращения, в то время как второй параметр определяет угол вращения. Измените теперь угол вращения на 10 градусов и нажмите кнопку *OK*. Затем, в листе предыстории, Вы должны нажать кнопку *Update*, чтобы перезаписать изменения. В результате, Вы должны получить примерно следующее изображение:

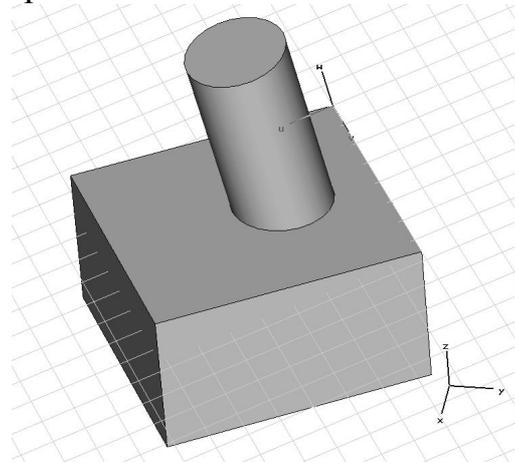


Рисунок 44

Вообще, функциональные возможности листа предыстории позволяют Вам быстро и легко производить изменения модели, избавляя, при этом, от повторного внесения изменений. Однако надо учитывать, что при изменении некоторых элементов листа предыстории, могут последовать сильные изменения в топологии структуры в целом. Это часто встречается, когда некоторые элементы удалены или, наоборот, добавлены. В таких случаях, операцией указки могут быть выбраны некорректные точки, ребра или грани (иногда потому, что выбранные элементы больше не существуют).

Для примера, предположите, что Вы удалили создание параллелепипеда из листа предыстории. В этом случае, операция выбора верхней грани будет уже ошибочна.

В таких случаях мы рекомендуем работать с листом истории с начала, чтобы должным образом корректировать режимы указки, когда это необходимо. Даже в этом крайнем случае это будет намного проще, чем полностью заново формировать структуру.

Дерево хронологии объекта

Список предыстории, описанный в предыдущем разделе, является определенно самым сильным приспособлением для редактирования структуры. Однако во многих случаях изменению должны быть подвержены только некоторые параметры простых форм, а также их преобразования. В этих случаях гораздо удобнее использовать функцию дерева хронологии.

Предположим, Вам необходимо изменить радиус цилиндра в предыдущем примере. Вы можете открыть список предыстории и редактировать этап формирования цилиндра. Однако Вы можете также выбрать форму двойным щелчком мыши и выполнить команду *Edit – Object properties* главного меню или команду *Properties* из контекстного меню.

В новом диалоговом окне (Дерево хронологии) отображается конструкция выбранной формы:

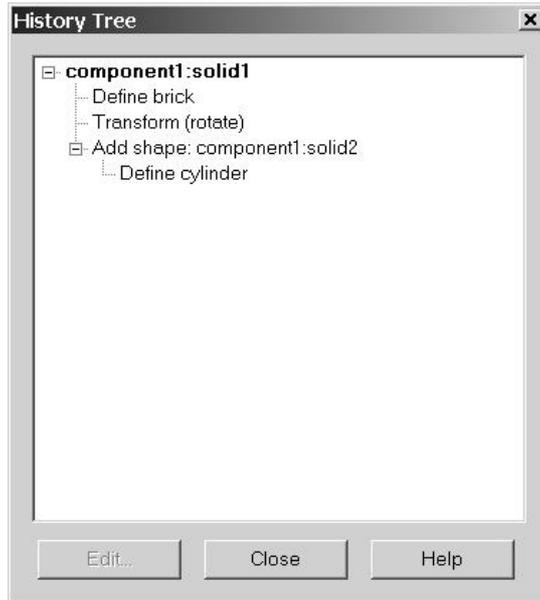


Рисунок 45

Теперь Вы можете просто нажать «*Define cylinder*». Как только Вы выберете доступную для редактирования операцию из дерева хронологии, соответствующий структурный элемент будет выделен. Заметьте, что последовательные преобразования не будут рассмотрены при данном выделении.

После нажатия кнопки *Edit* в диалоговом окне *History tree* откроется диалоговое окно с параметрами цилиндра:

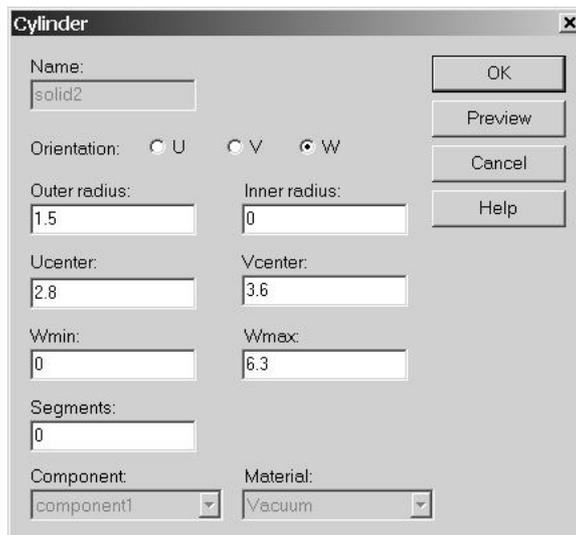


Рисунок 46

Теперь Вы можете изменить радиус цилиндра и нажать затем кнопку *Preview*. Вам будет представлен отпечаток изменения в форме. После того, как Вы будете удовлетворены результатом, нажмите кнопку *OK*, чтобы обновить структуру. В результате, Вы должны увидеть на своем мониторе примерно следующее:

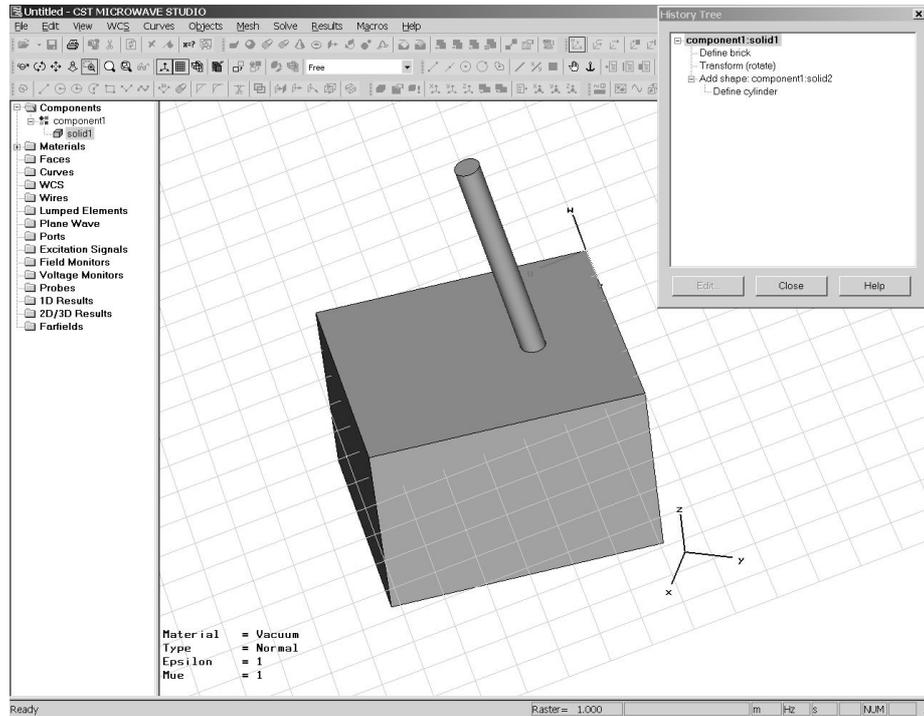


Рисунок 47

Потренируйтесь теперь немного с возможностями дерева хронологии, чтобы понять какие изменения могут быть применены к существующим структурам при помощи этих возможностей. Заметьте, что последовательные преобразования не будут визуализироваться при нажатии кнопки Preview диалогового окна формы, но будут применены, когда структура будет обновлена.

Использование кривых

В предыдущих главах рассматривалось, как могут быть сформированы модели при помощи трехмерных примитивов и их изменении такими сильными операциями, как плавное сопряжение, развертка и так далее.

Другая комплексная операции формирования объекта основана на, так называемых, кривых. Кривая – это трехмерная линия, которая проведена на плоскости рисунка. После того, как кривая была определена, она может использоваться для более улучшенных операций моделирования.

Здесь мы опишем только основные моменты в использовании кривой. Детальное описание не возможно в данном издании из-за его объемности. Поэтому рекомендуем Вам обратиться к сетевой документации.

Рассмотрим простой пример. Создайте новую кривую, используя команду *Curves – New curve* (). В результате будет создана новая кривая «*curve1*», которая отобразится в навигационном дереве в папке *Curves*.

Активизируйте функцию создания прямоугольника, выбирая команду *Curves - Rectangle* (), прежде чем вычертить его на рабочей поверхности. Заметьте, что создание элементов кривой подобны созданию примитивов, рассмотренных ранее. В результате Вы должны получить примерно следующую картину:

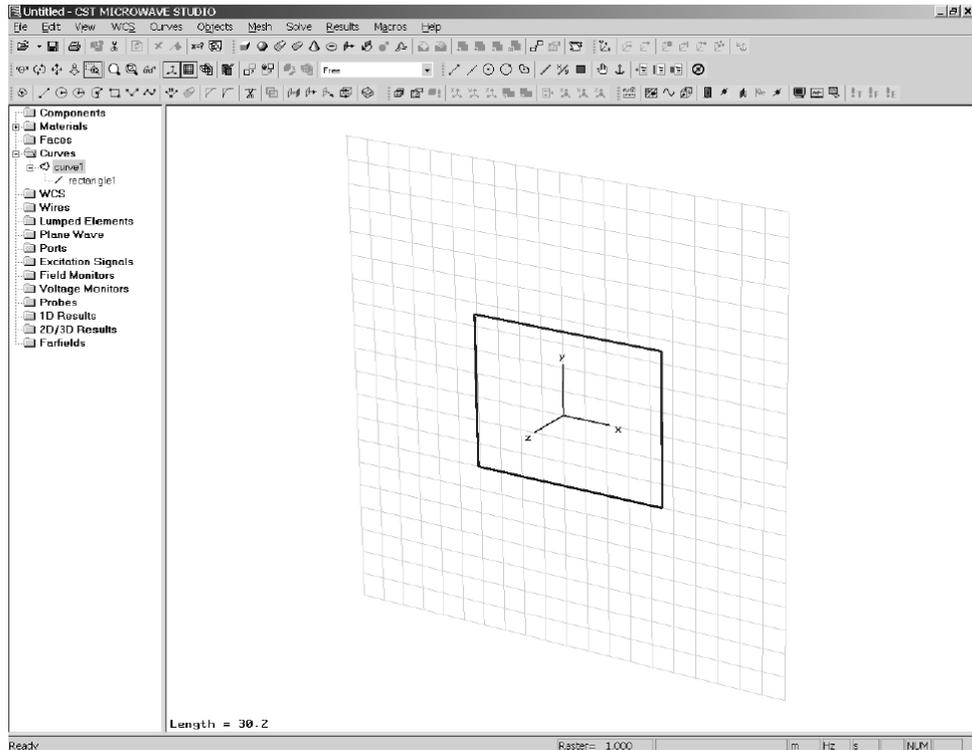


Рисунок 48

В следующем шаге вычертите круг на плоскости рисунка, который накладывается на одно из ребер прямоугольника. Для создания круга выберите команду *Curves – Circle* (🕸). В результате Вы получите следующее:

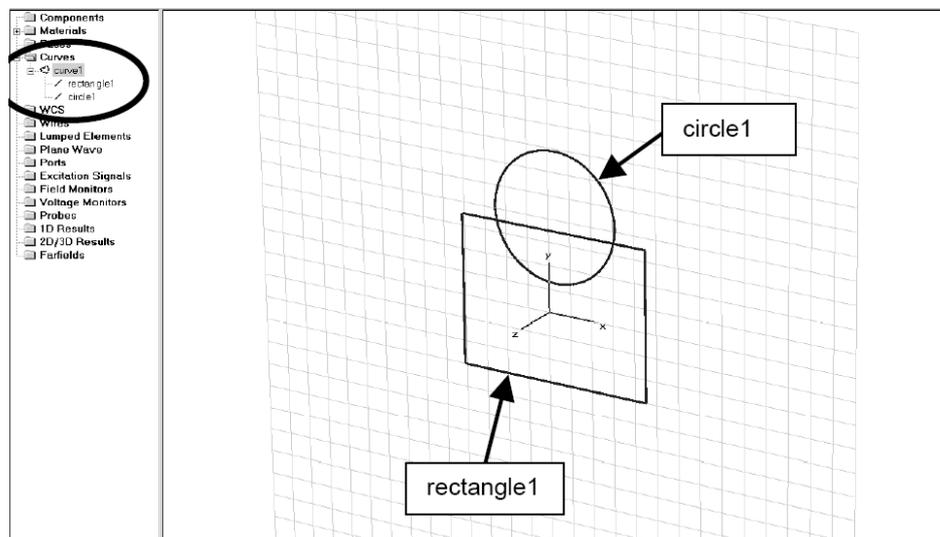


Рисунок 49

В результате предыдущих трех шагов у Вас есть кривая *Curve1*, с элементами *rectangle1* и *circle1*, что и отражено в навигационном дереве.

В следующем шаге необходимо будет урезать оба элемента кривой таким образом, чтобы кривая содержала только контуры этих элементов. Для выполнения этой задачи Вы должны выбрать один из элементов, например *rectangle1* (выбирая его в навигационном дереве или двойным нажатием левой клавиши мыши в рабочей области). Впоследствии Вы можете активировать

операцию Trim curves, выбирая команду *Curves – Trim curves* (🖱️) главного меню.

Теперь Вам будет необходимо выбрать элемент, который будет урезан с прямоугольником. Выберите круг и нажмите клавишу Enter или кнопку 🖱️ панели инструментов.

Следующим шагом Вы должны двойным щелчком выбрать те сегменты кривой, которые необходимо удалить. При наведении мыши на определенный сегмент, он будет выделяться подсвечиванием. Удалите теперь сегменты таким образом, чтобы получился похожий, на изображенном ниже рисунке, результат, и нажмите клавишу Enter или кнопку 🖱️ панели инструментов:

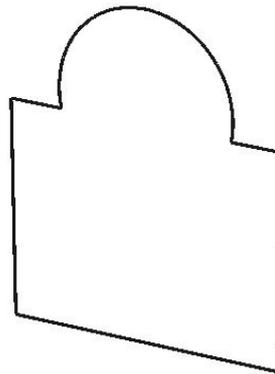


Рисунок 50

Теперь Вы можете активизировать локальную систему координат и вращать ее вокруг оси u . На Вашем экране должно получиться следующее изображение:

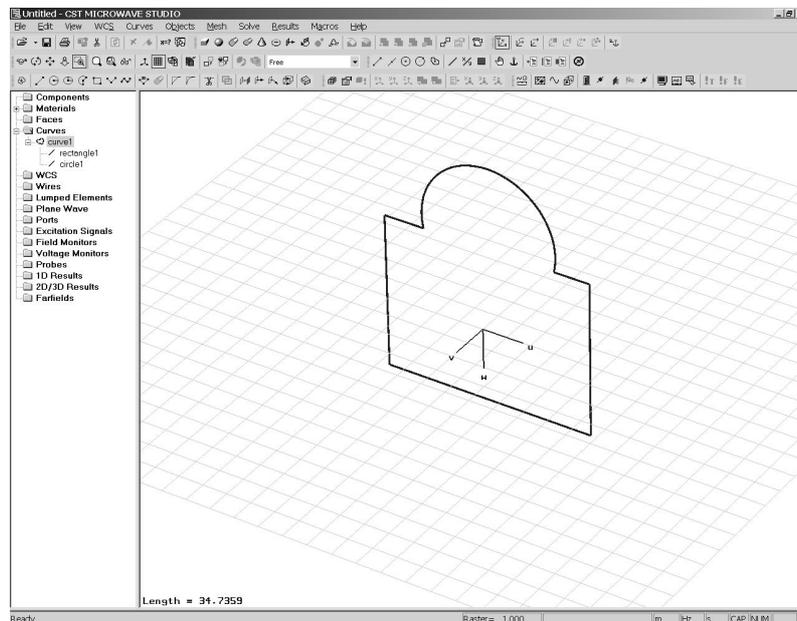


Рисунок 51

Используя команду *Curves – Polygon* (🖱️) начертите открытый полигон на плоскости рисунка:

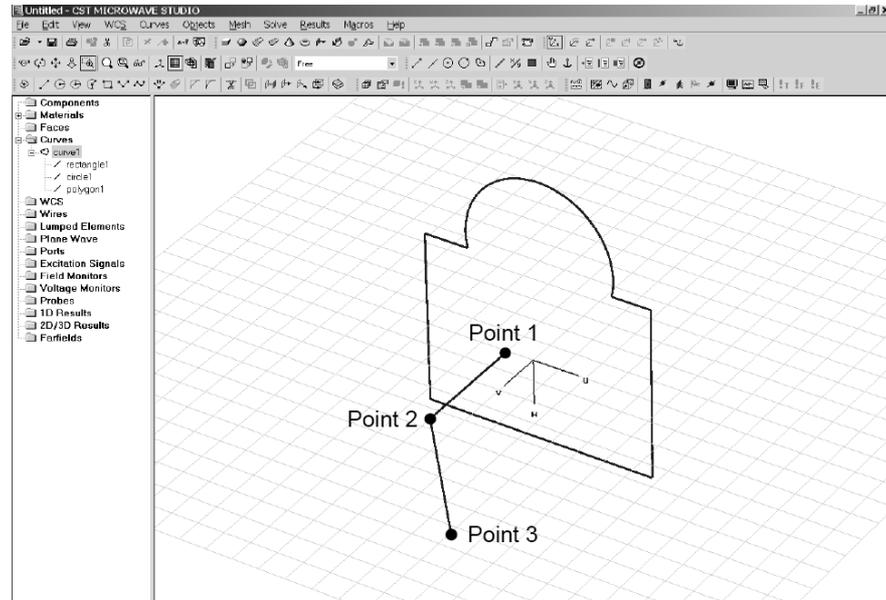


Рисунок 52

Теперь, из этих двух непересекающихся кривых, создадим твердое тело. Это можно осуществить при помощи команды *Curves – Sweep curves* () главного меню.

Как только эта операция будет активизирована, Вы будет запрошены задать параметры кривой. Поэтому произведите двойной щелчок на кривой, состоящей из прямоугольника и круга.

Как только это будет сделано, будет произведен запрос на выбор полигона. После выбора кривой полигона, нажмите *OK*. В результате Вы должны получить следующую структуру:

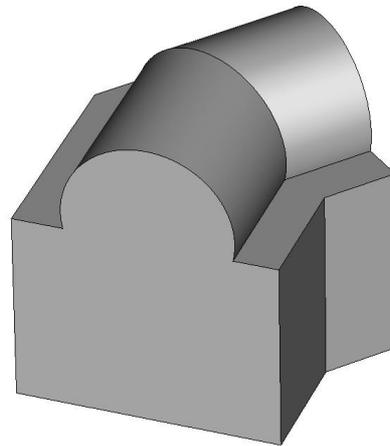


Рисунок 53

Это короткое введение в функцию построения кривой может дать только основы использования данного сильного элемента создания моделей. Поэкспериментируйте с этой особенностью программы, чтобы разобраться в ней больше. Для более подробного рассмотрения данного вопроса, обратитесь, пожалуйста, к сетевой документации.

Локальные изменения

Пока что мы фокусировали информацию на том, как изменить структуру, которая была полностью создана в CST Microwave Studio. Однако иногда бывают случаи, когда модель импортирована и информация предыстории ее создания отсутствует.

В данном разделе будет показано, что даже такая структура может быть параметризирована при помощи, так называемых, локальных изменений. Прежде чем активировать данную функцию программы Вы должны создать структуру, которая приведена ниже (параллелепипед, соединенный с цилиндром, с закругленной кромкой его верхней грани):

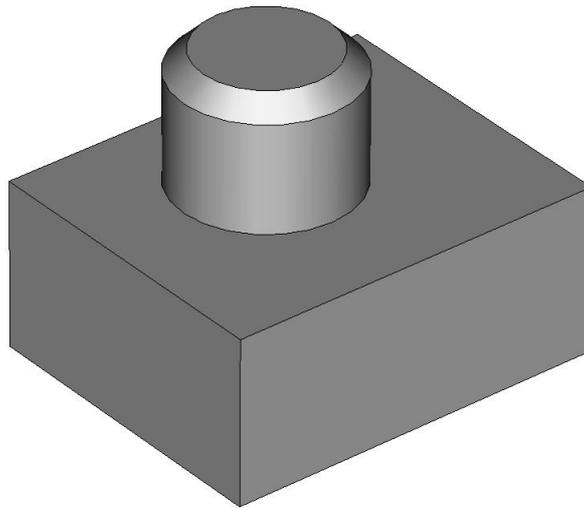


Рисунок 54

В этом случае Вы должны будете сначала использовать режим указки, для выбора скругленной кромки. Впоследствии Вы можете использовать опцию *remove feature* (команда *Objects - Local Modifications - Remove Feature* главного меню).

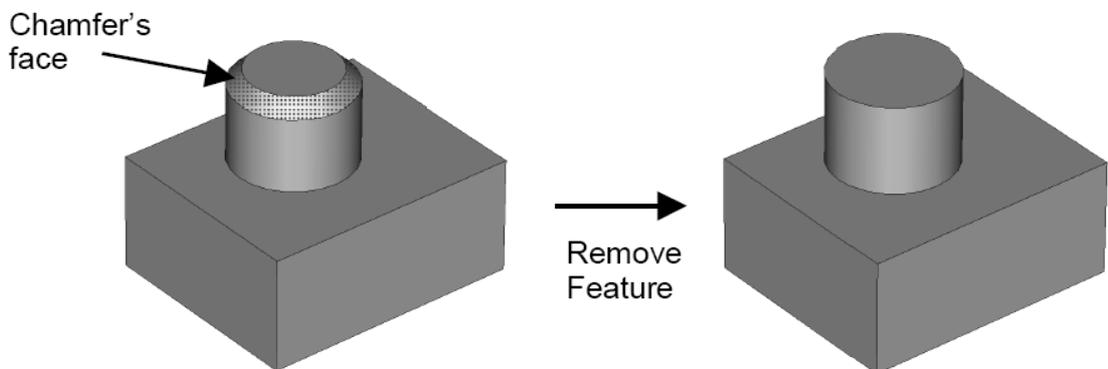


Рисунок 55

Затем, Вы можете выбрать грань цилиндра и изменить его радиус, выполнив операцию *Objects - Local Modifications - Change Face Radius* из главного меню. В открывшемся диалоговом окне задайте численное значение радиуса.

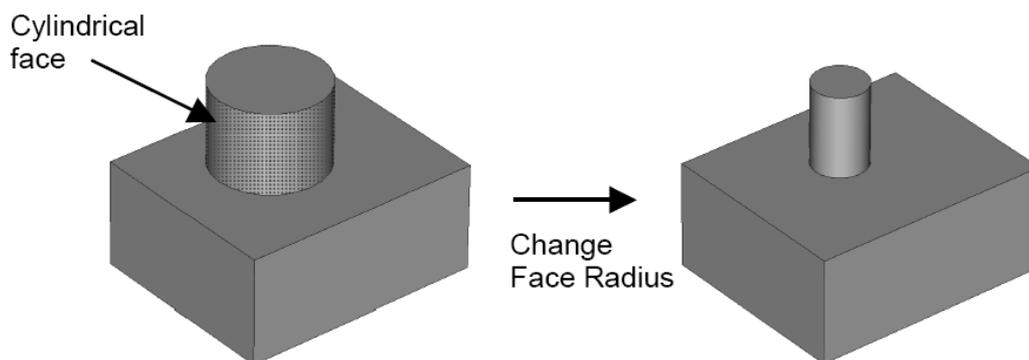


Рисунок 56

Наконец, Вы можете выбрать верхнюю грань цилиндра и выбрать команду *Objects – Local Modifications - Offset Faces*. Определите величину смещения (возможны также и отрицательные значения) и нажмите *OK*.

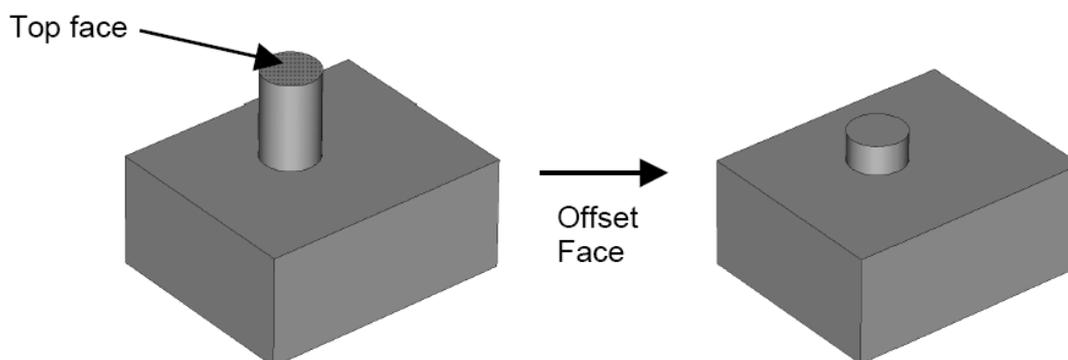


Рисунок 57

Локальные изменения – довольно мощные средства моделирования. Однако изменения не будут приносить пользы, если Вы не примете правильного решения, для исправления недостатков. Поэтому поупражняйтесь в использовании такой опции программы, как локальные изменения, чтобы владеть ими более уверенно.

Трассировка

В данном разделе будет рассмотрена довольно утомительная часть создания модели, а именно формирование рисунка из трассировочной линии. Некоторые структуры (например, печатные монтажные схемы) требуют большого числа трассировочных прямых, которые часто влекут за собой большое число шагов моделирования.

Для упрощения этой задачи и было создано приспособление создания трассировки, которое учитывает создание твердых трассировочных линий и толщину основания, при создании рисунка.

В качестве простого примера, использования данного приспособления, Вы должны начертить непрерывную кривую, которая будет выглядеть следующим образом:

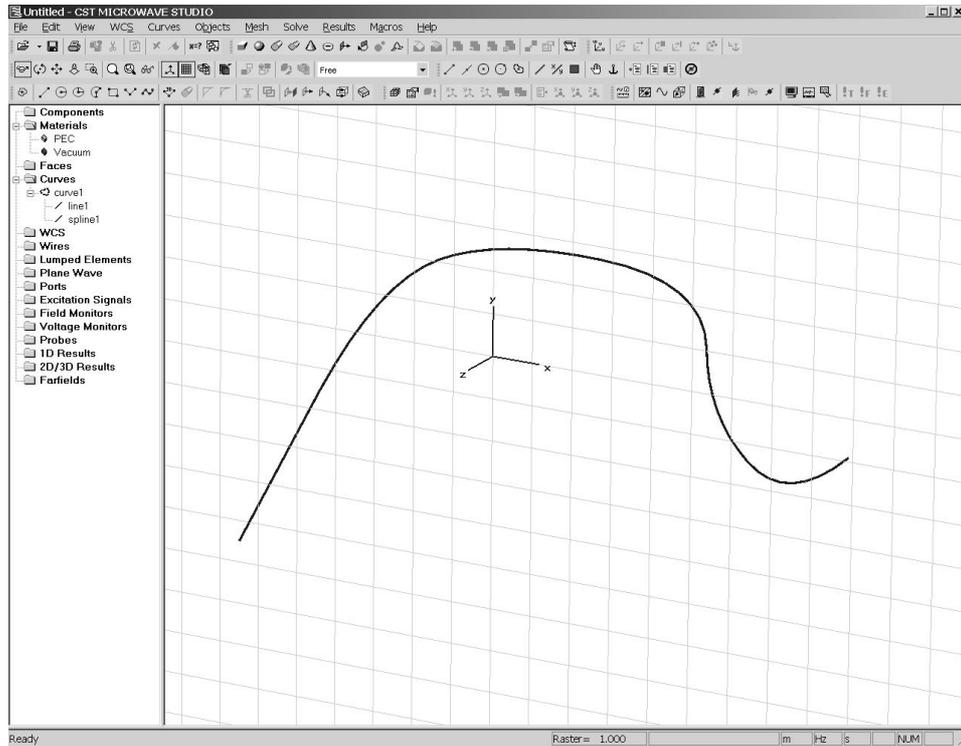


Рисунок 58

Основываясь теперь на этой прямой, Вы можете создать трассировочную линию, выбирая команду *Curves - TraceFrom Curve* (). Теперь, после выбора данной кривой двойным щелчком мыши появиться следующее диалоговое окно:

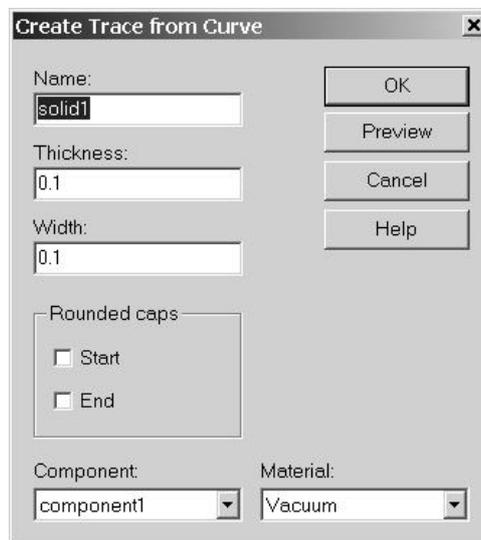


Рисунок 59

В этом диалоговом окне, Вы можете задать толщину (*Thickness*) и ширину (*Width*) трассировочной линии. Кроме того, Вы можете определить, будут ли закруглены концы трассировочной линии, или останутся прямыми. На нижнем рисунке приведен пример трассировочной линии ранее изображенной прямой с закругленным концом:

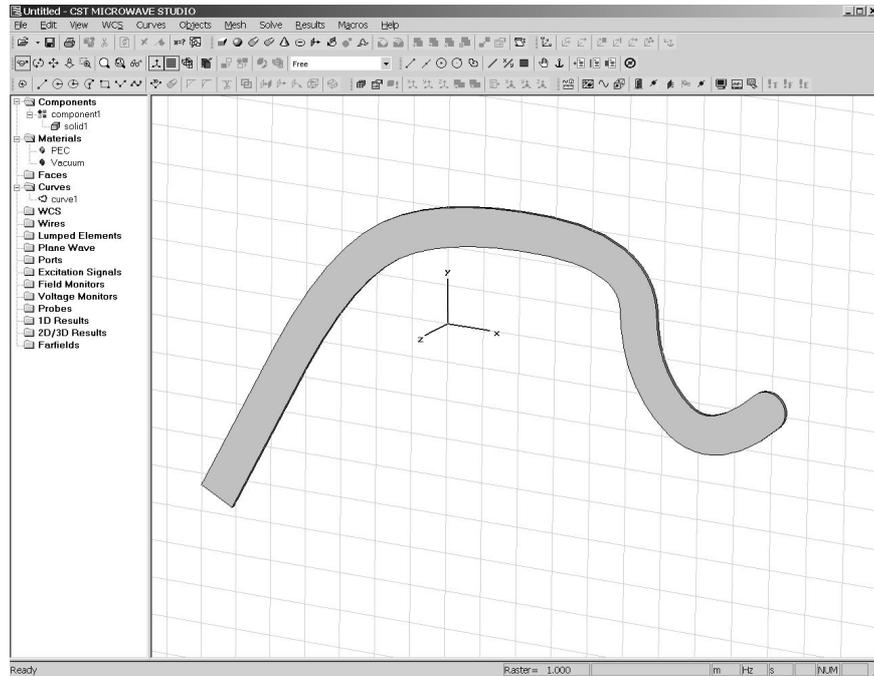


Рисунок 60

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.

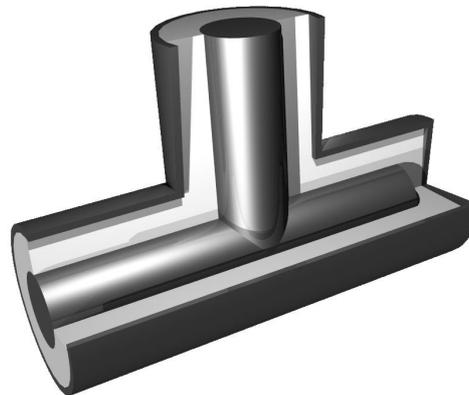


Рисунок 61

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 внешнего 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.

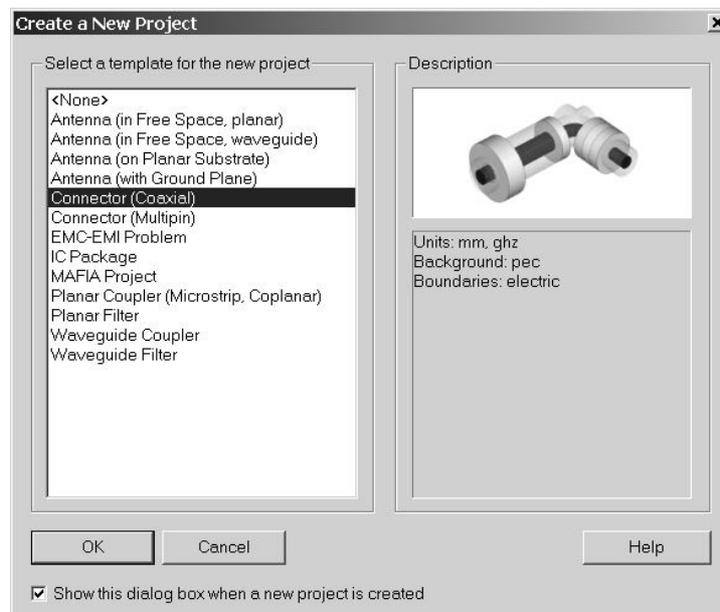


Рисунок 62

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 $\mu = 1.0$. 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.

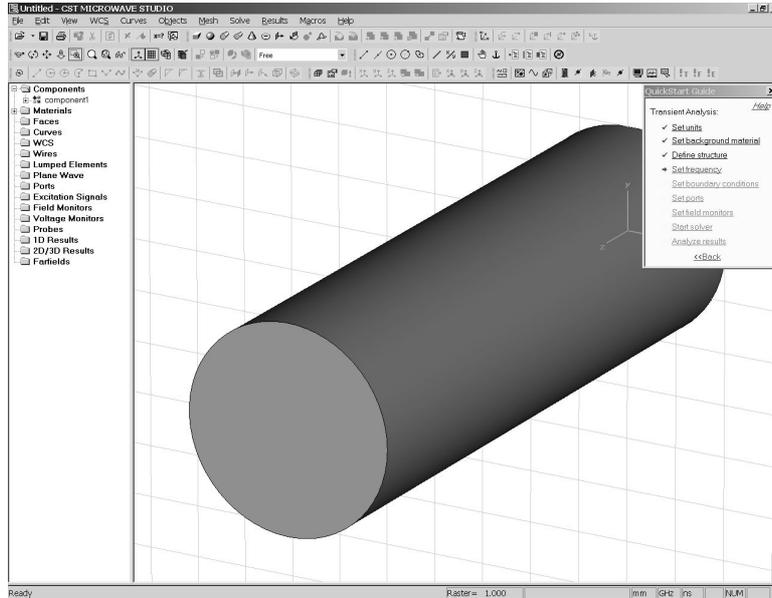


Рисунок 63

Следующим шагом является создание цилиндра, перпендикулярному 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:

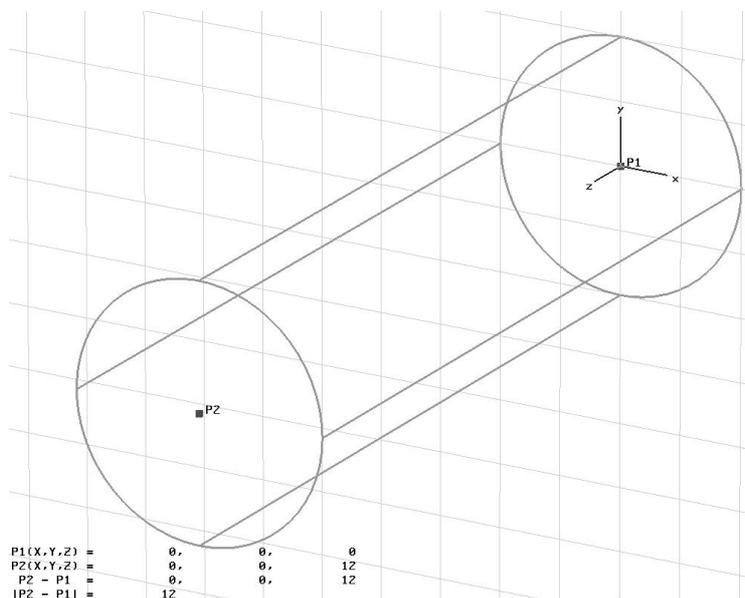


Рисунок 64

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:

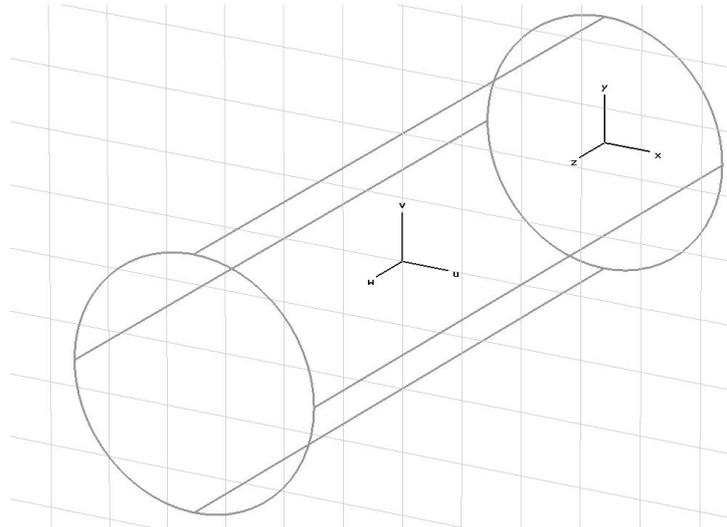


Рисунок 65

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

1. Выберите команду *WCS - Rotate local coordinates* () из главного меню.
2. Выберете 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:

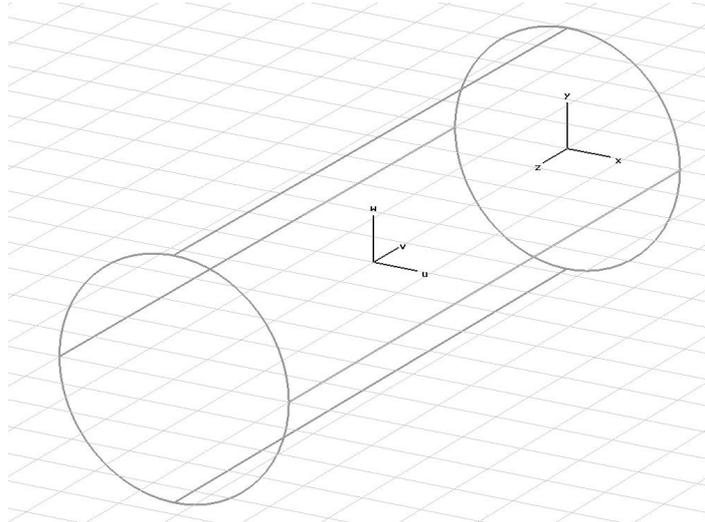


Рисунок 66

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.

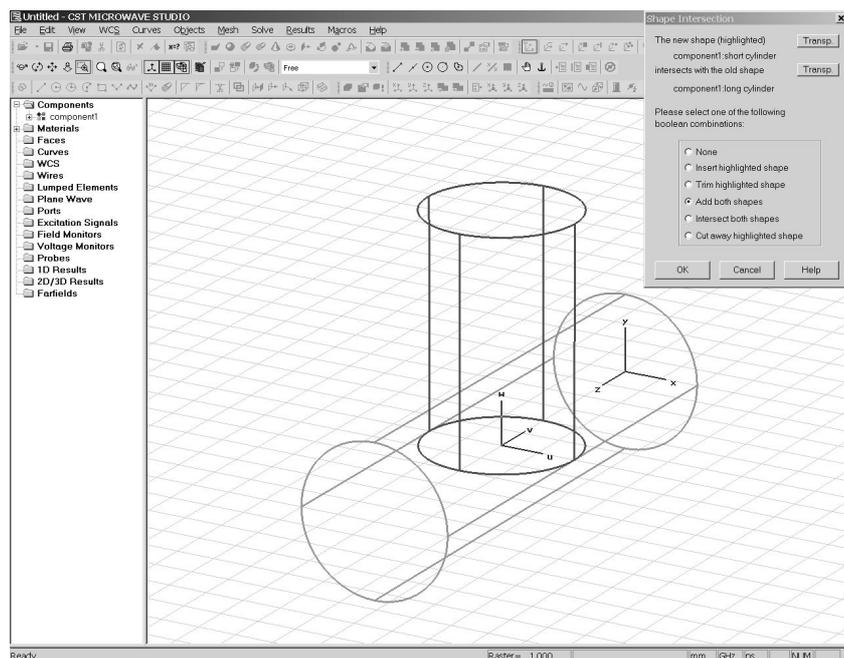


Рисунок 67

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

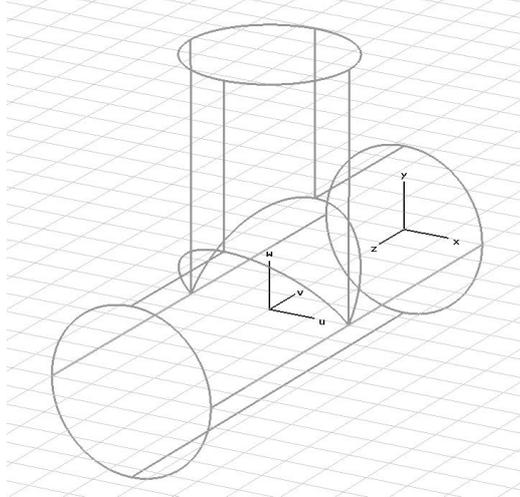


Рисунок 68

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:

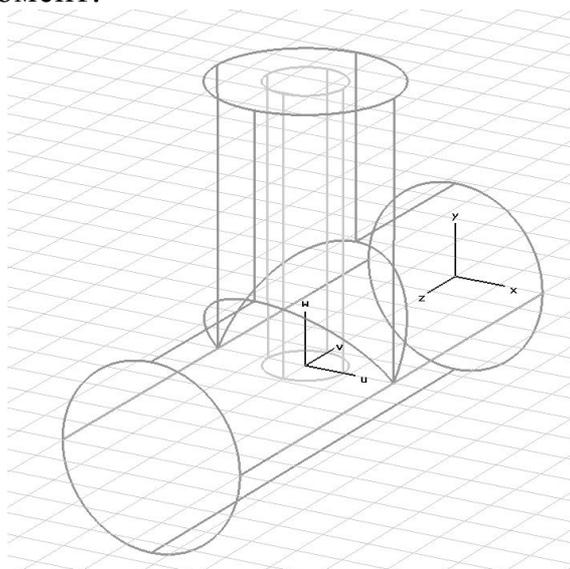


Рисунок 69

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:

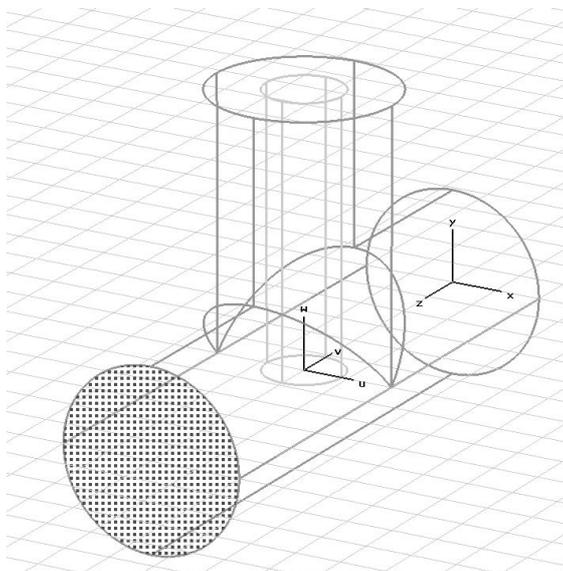


Рисунок 70

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*:

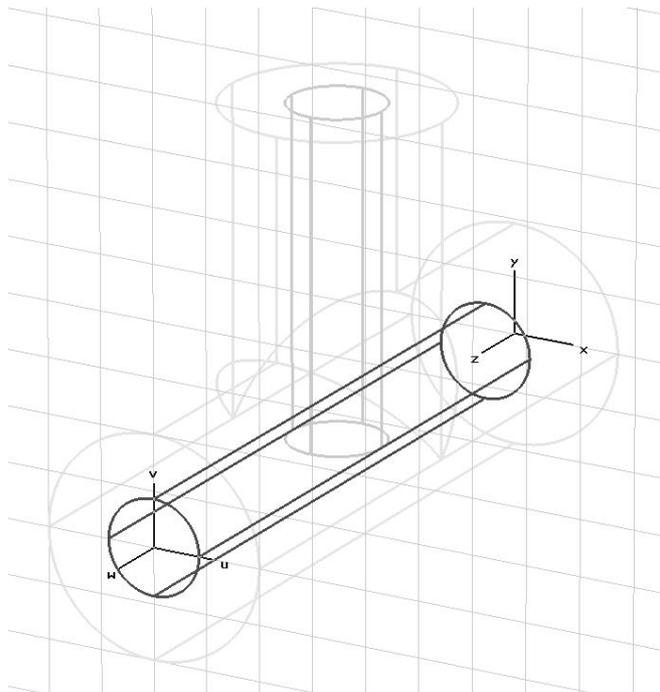


Рисунок 71

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

Перед Вами должно быть следующее изображение:

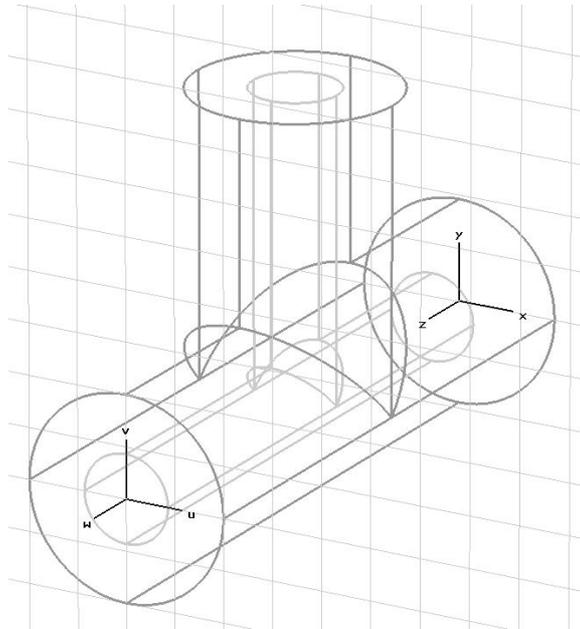


Рисунок 72

Ниже представлено несколько видов возможной визуализации структуры:

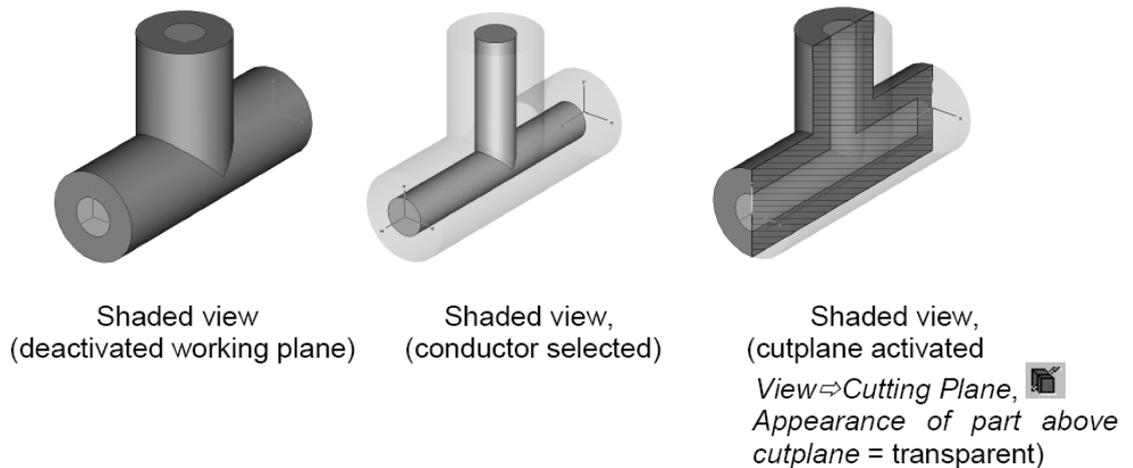


Рисунок 73

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:

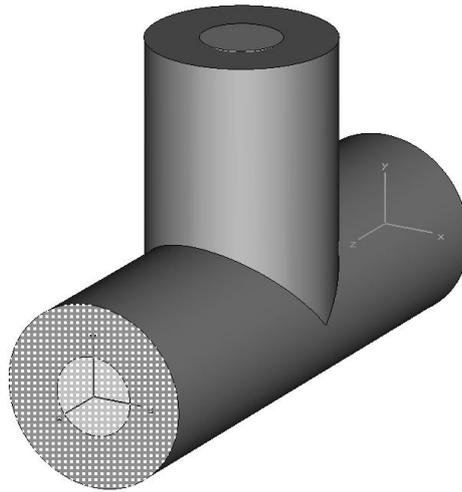


Рисунок 74

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

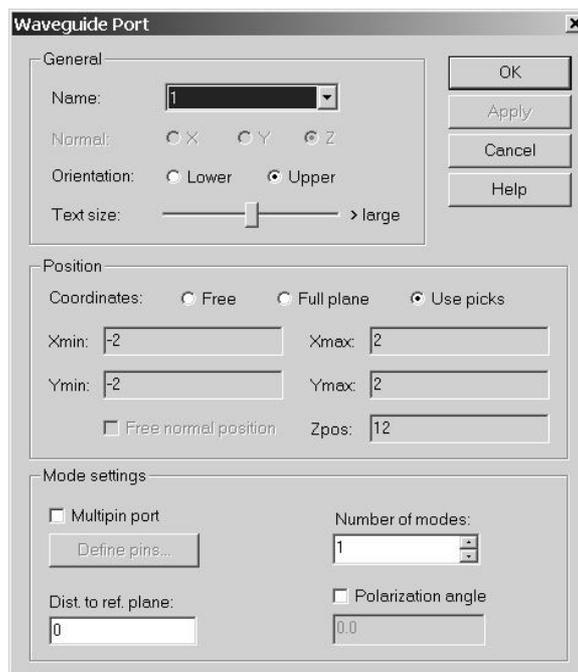


Рисунок 75

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:

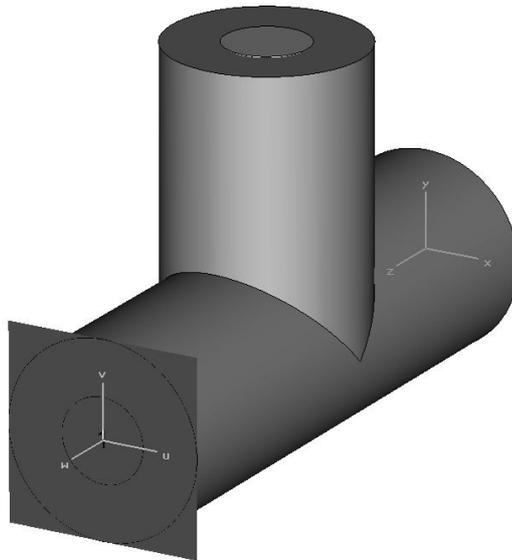


Рисунок 76

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

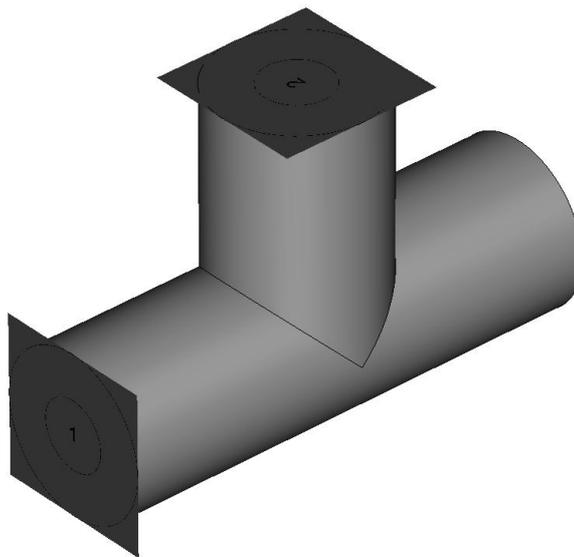


Рисунок 77

Задание частотного диапазона

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

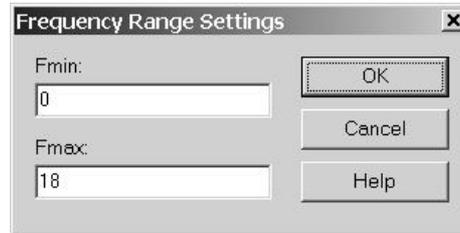


Рисунок 78

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 граничные условия для каждой плоскости ($Xmin/Xmax/Ymin/Ymax/Zmin/Zmax$) ограничивающего прямоугольника.

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

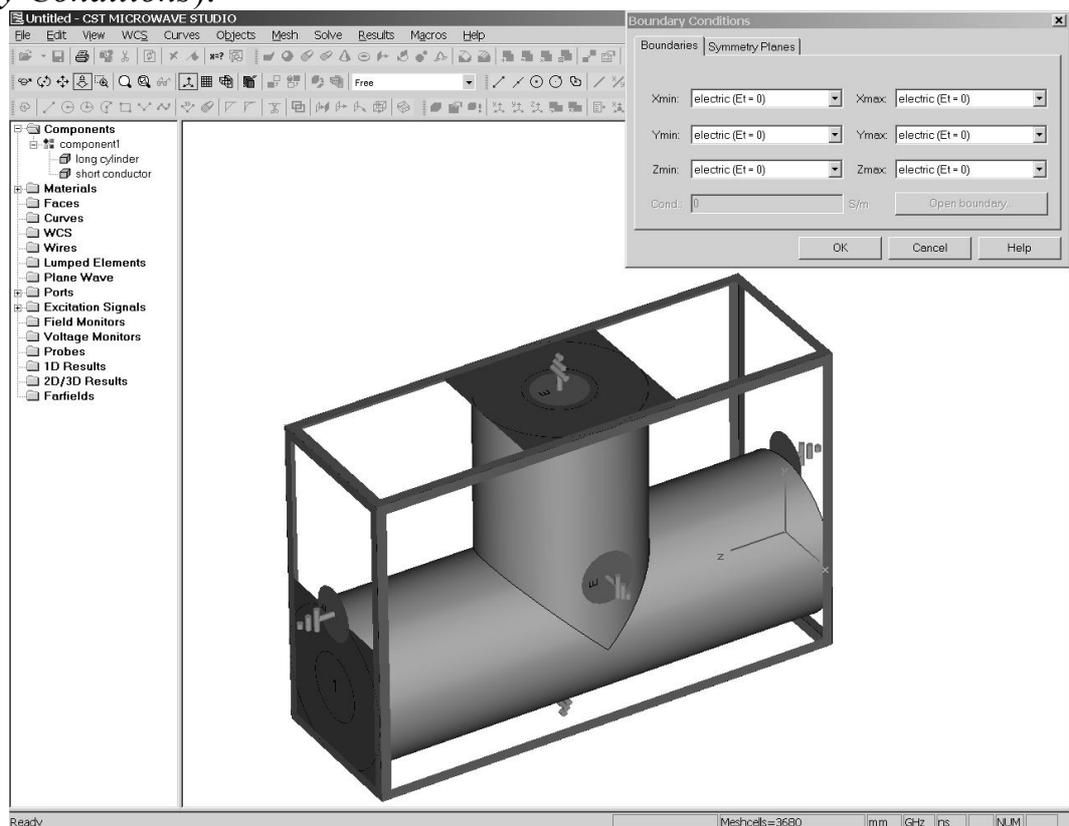


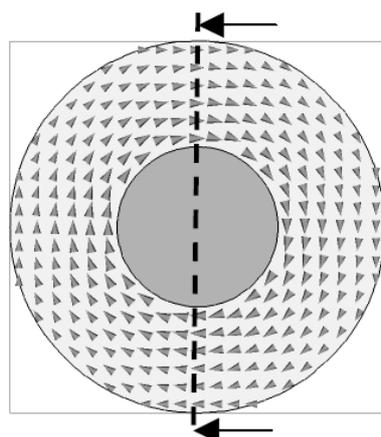
Рисунок 79

Когда данное диалоговое окно открыто, граничные 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 80

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:

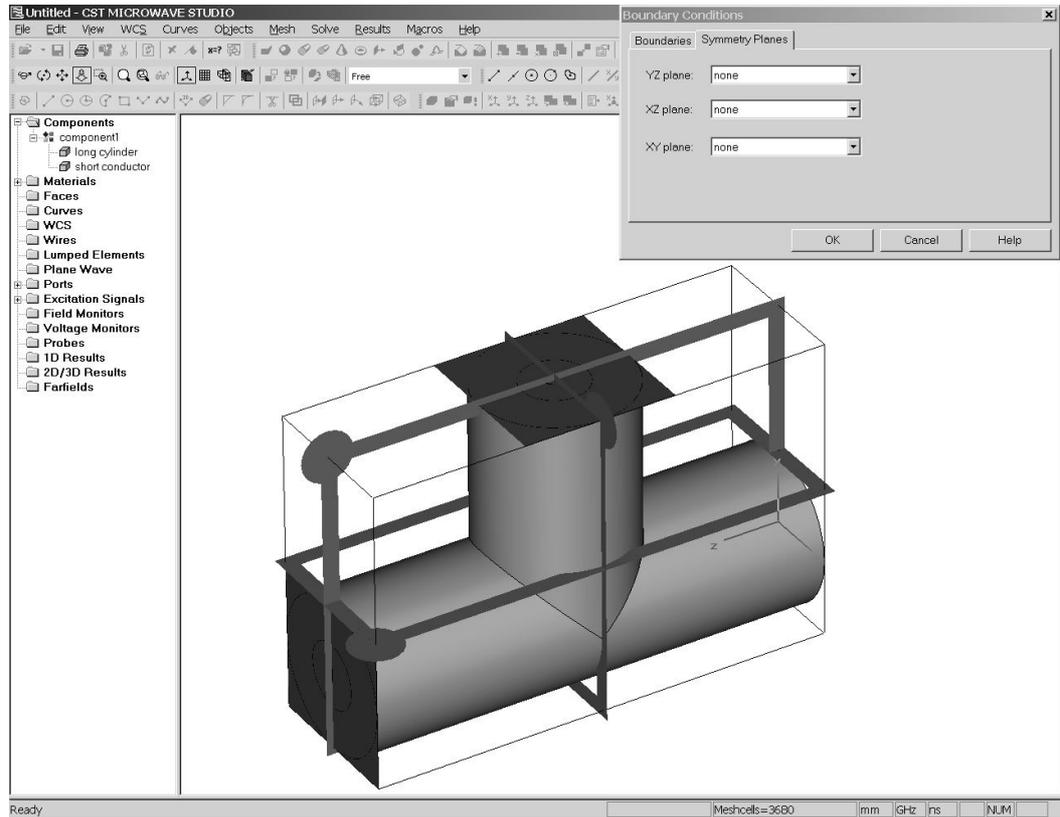


Рисунок 81

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

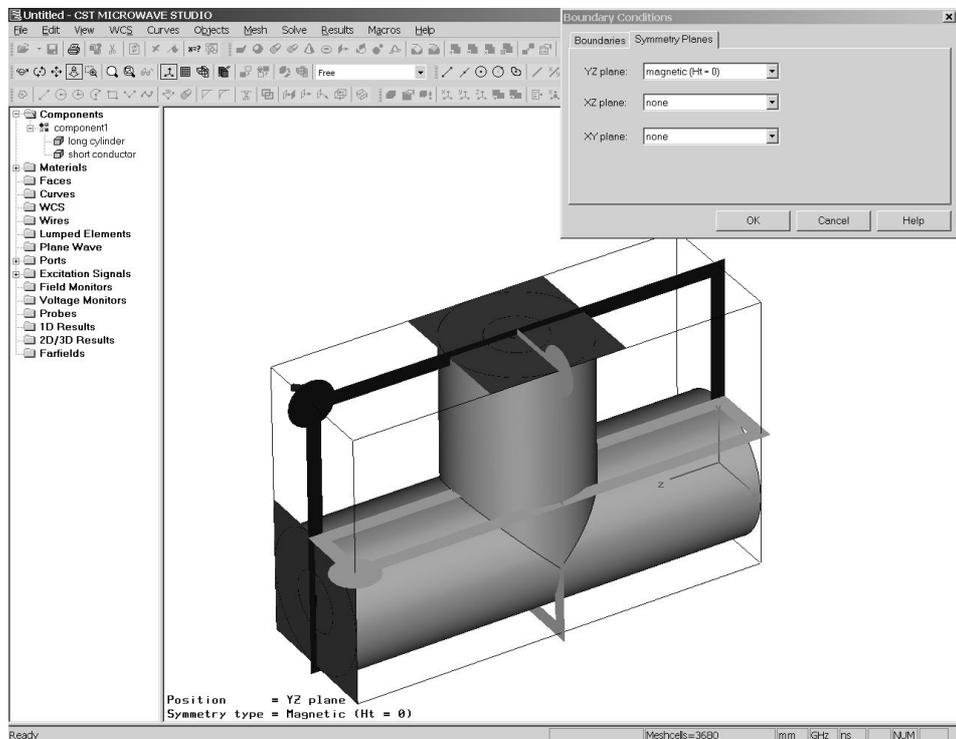


Рисунок 82

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.

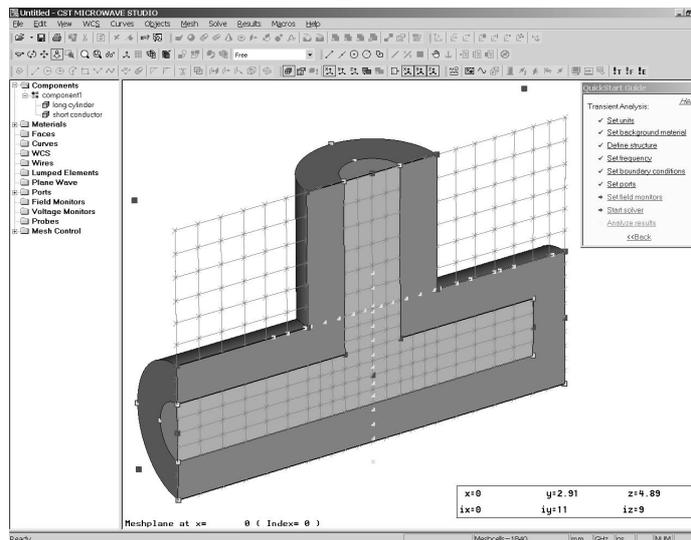


Рисунок 83

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* (!):

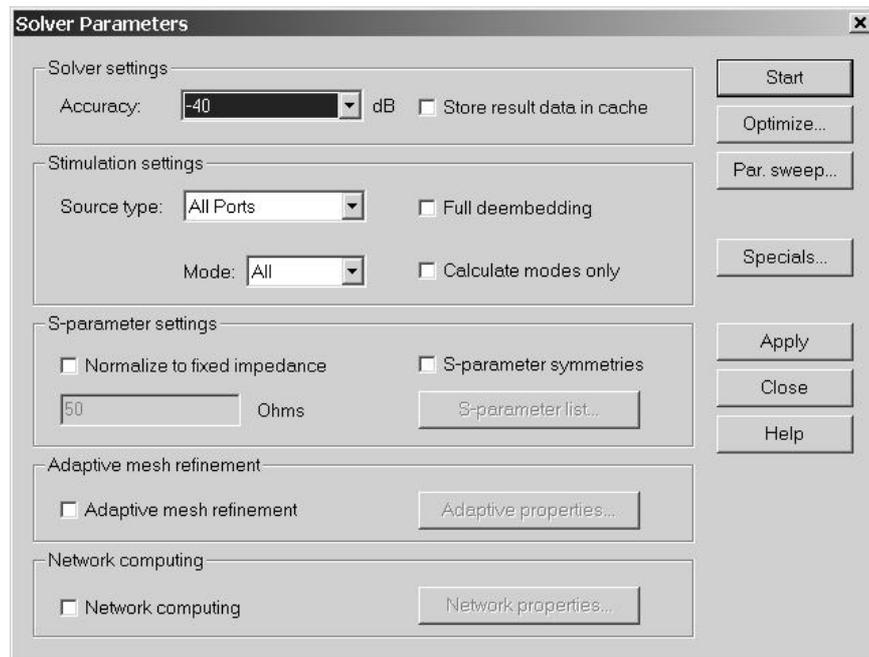


Рисунок 84

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:

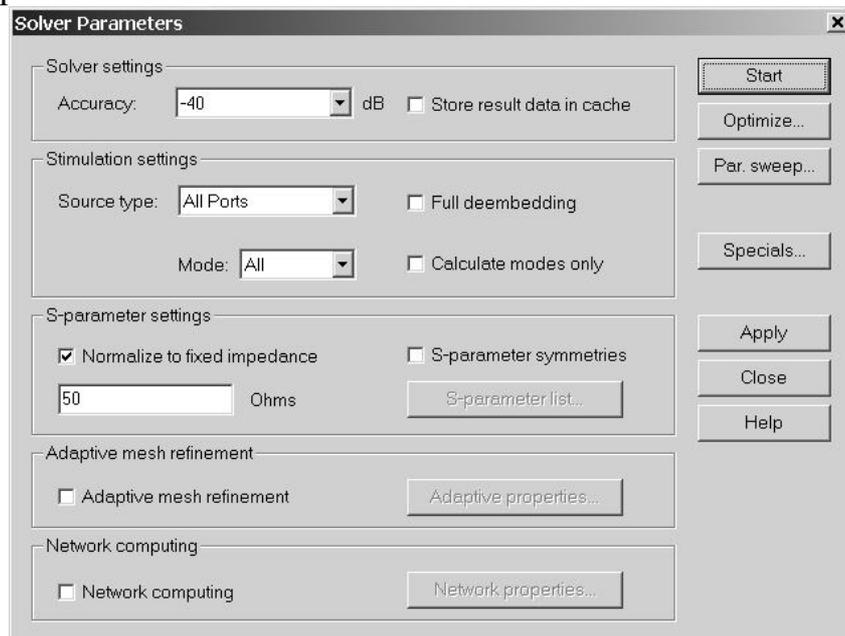


Рисунок 85

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:

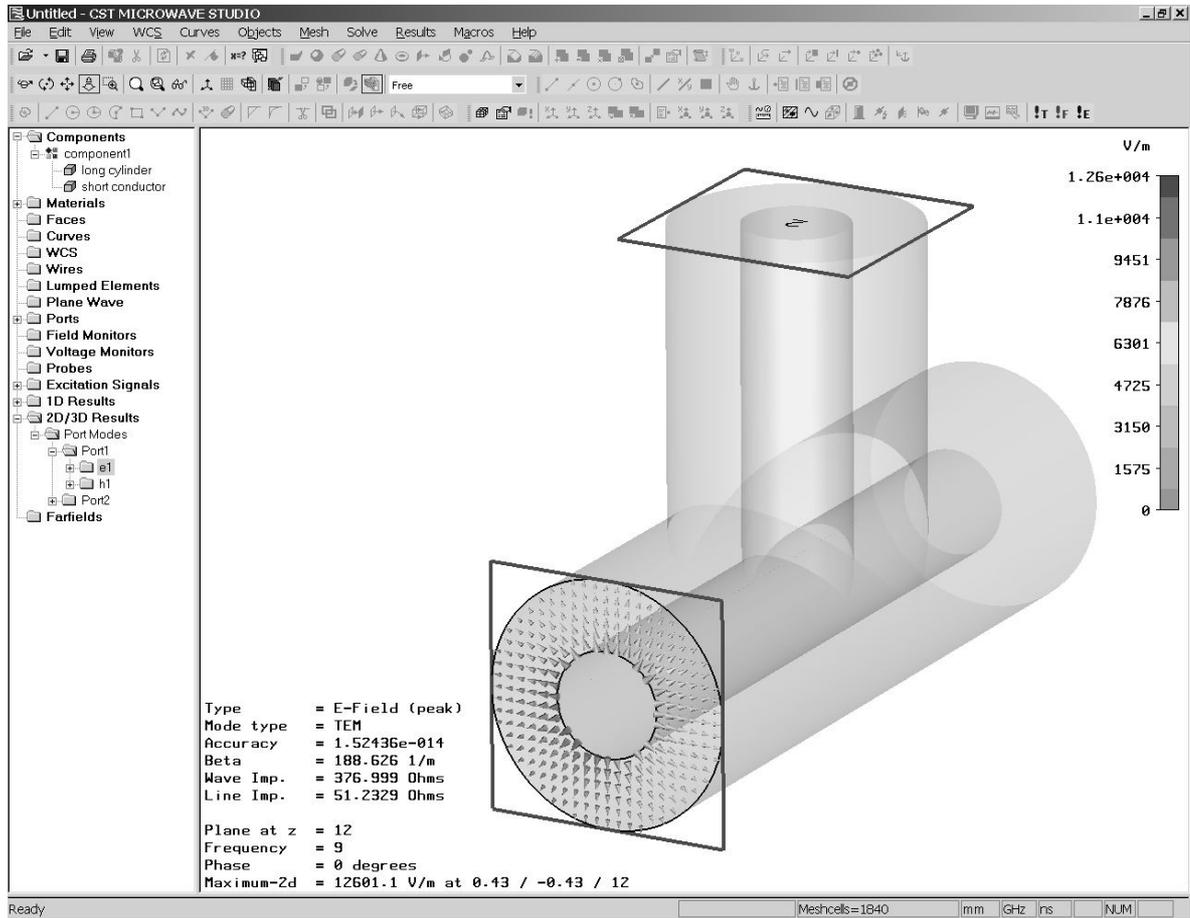


Рисунок 86

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:

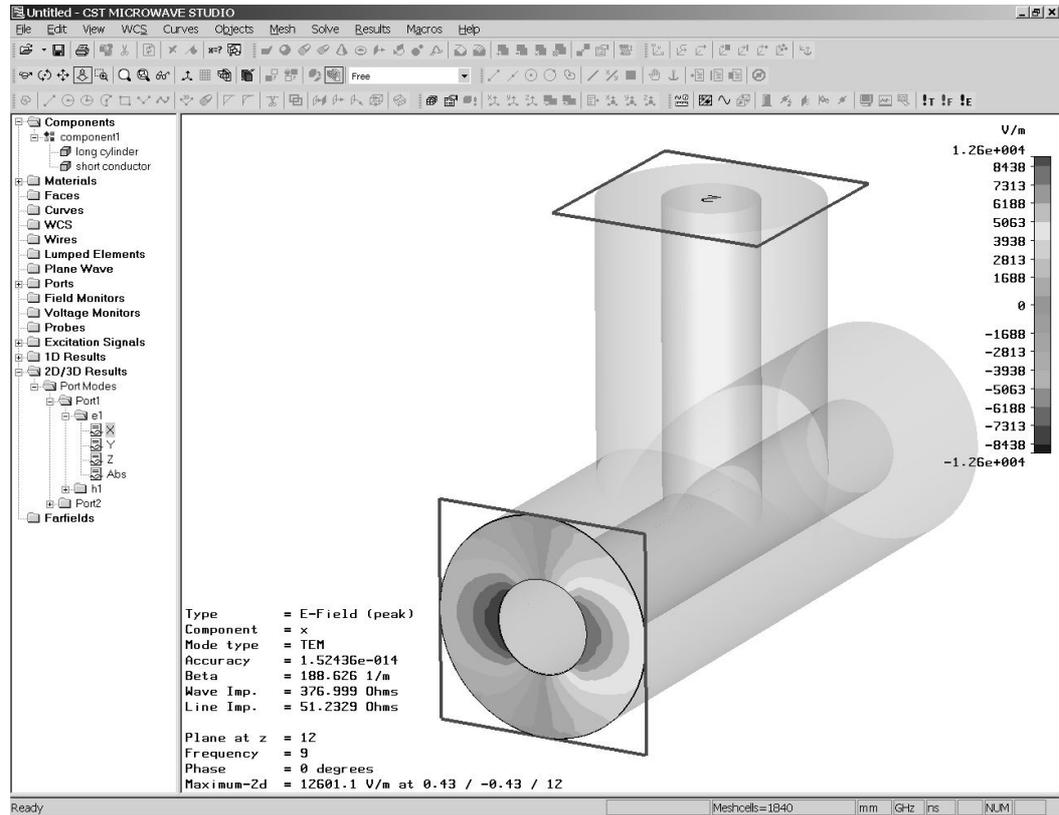


Рисунок 87

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:

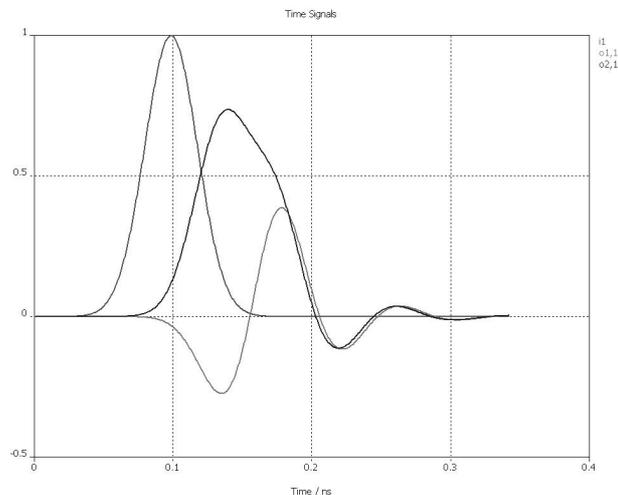


Рисунок 88

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 *1DResults - |S| linear*.

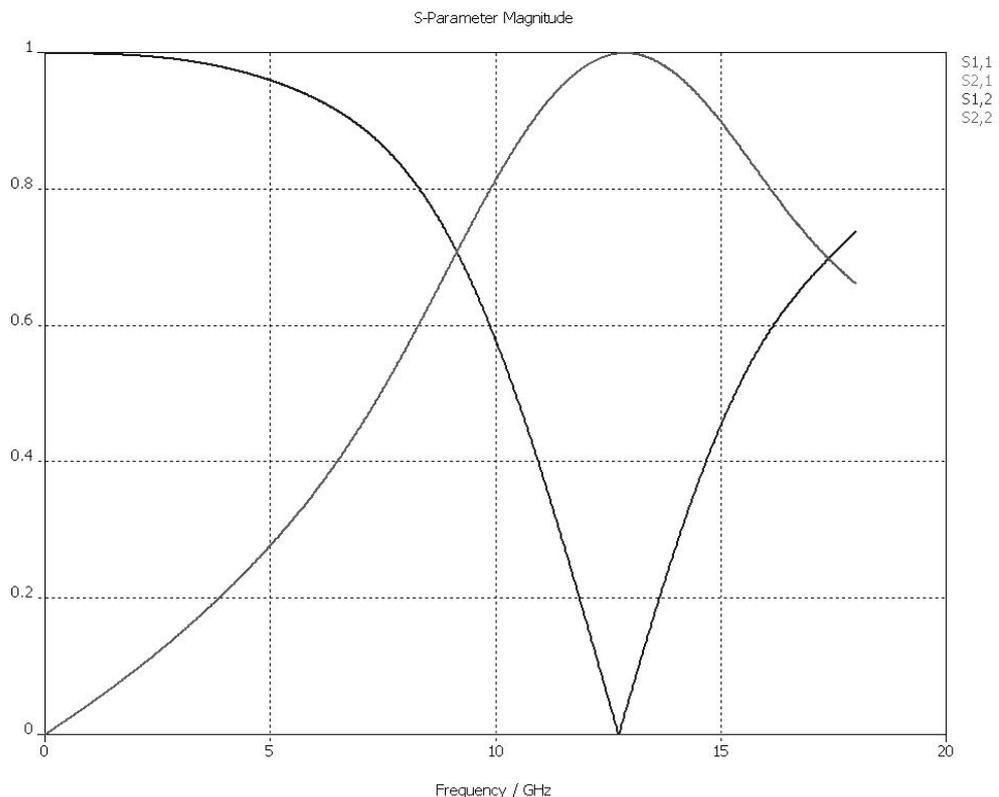


Рисунок 89

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 *1DResults - |S| dB*. Фаза может быть визуализирована путем выбора папки дерева навигации *1DResults - arg(S)*.

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

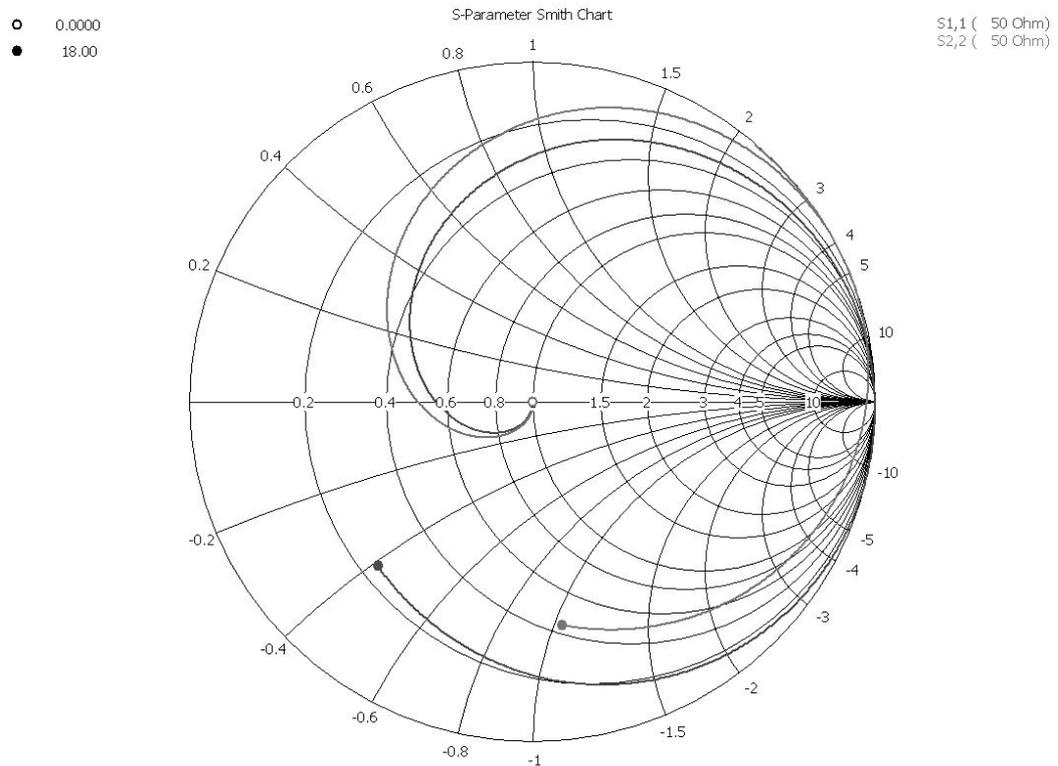


Рисунок 90

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 - ID 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:

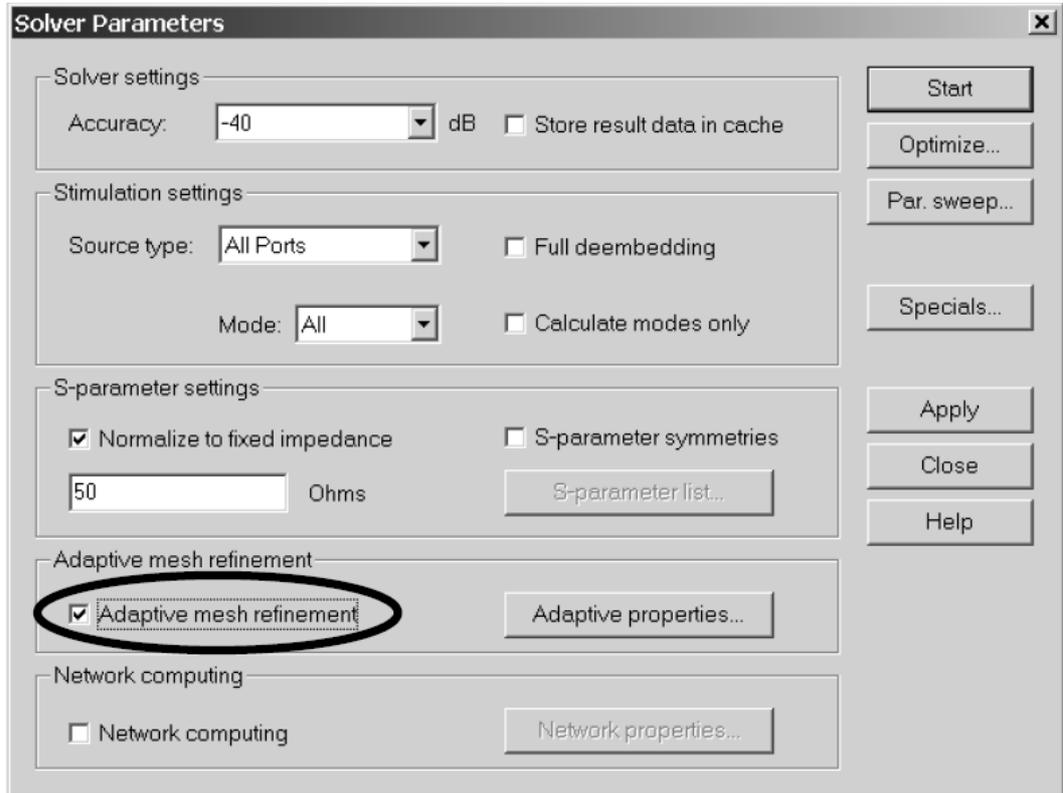


Рисунок 91

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:

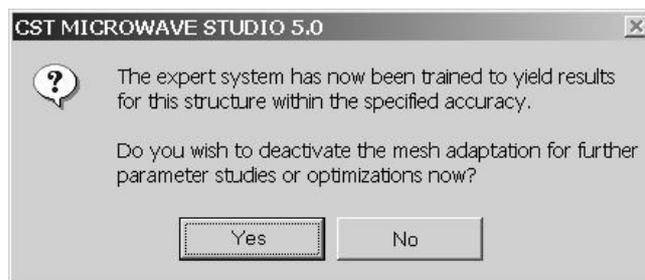


Рисунок 92

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 *ID 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 *ID Results - Adaptive Meshing - Delta S* из дерева навигации.

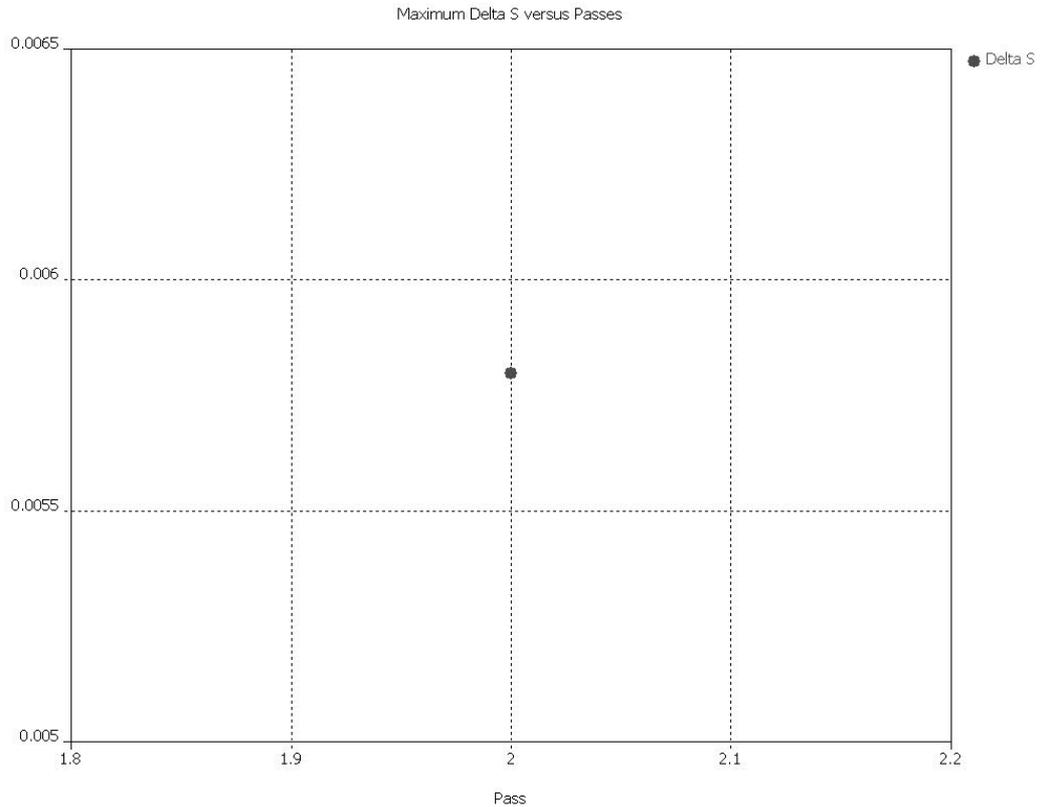


Рисунок 93

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 *ID Results - Adaptive Meshing - |S| linear - S1,1* (относительно проходов) и *ID Results - Adaptive Meshing - |S| linear - S2,1* (также относительно проходов) дерева навигации.

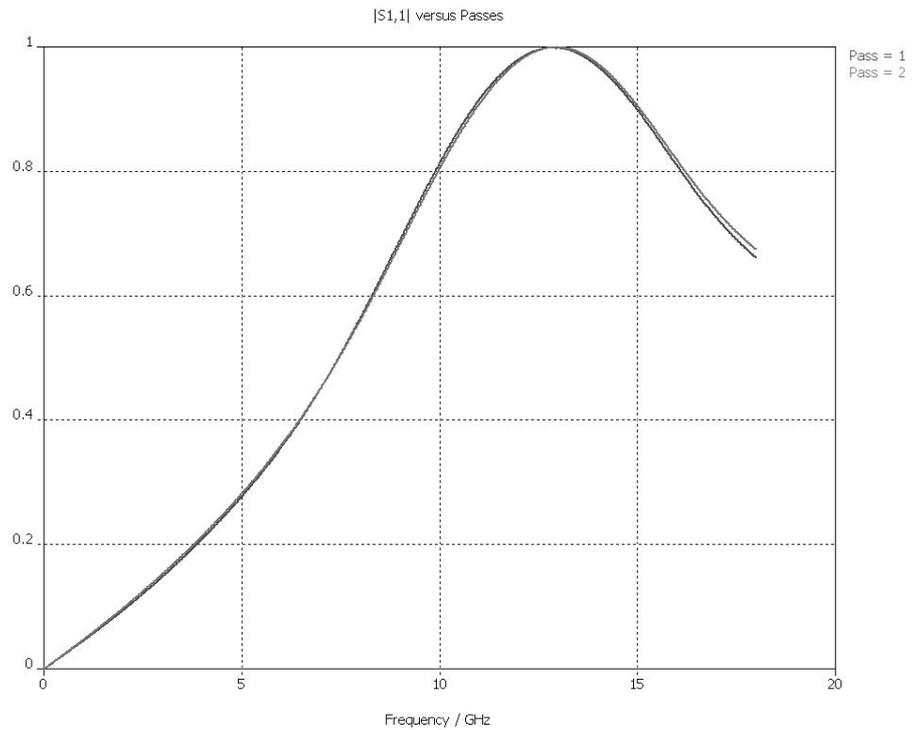


Рисунок 94

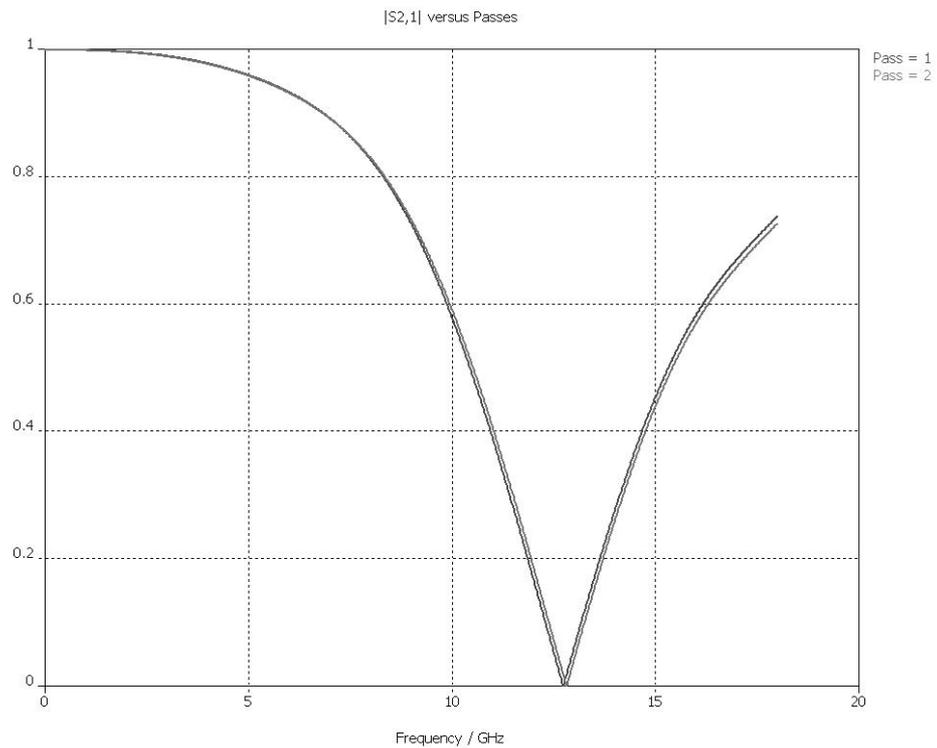


Рисунок 95

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).

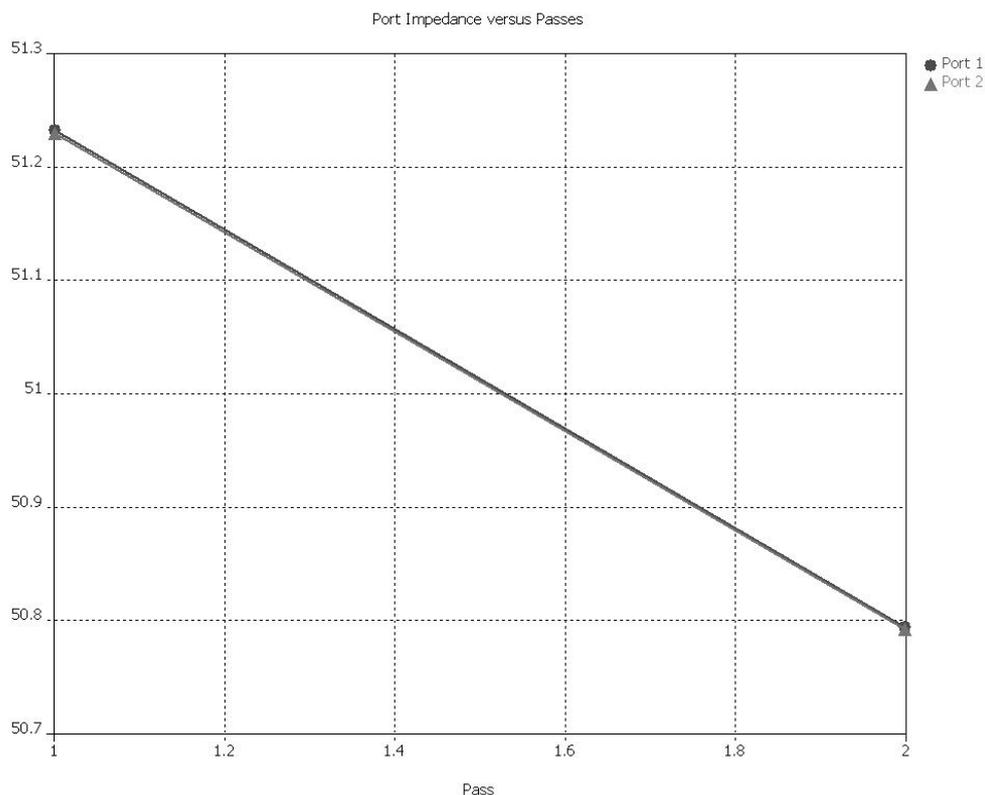


Рисунок 96

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.

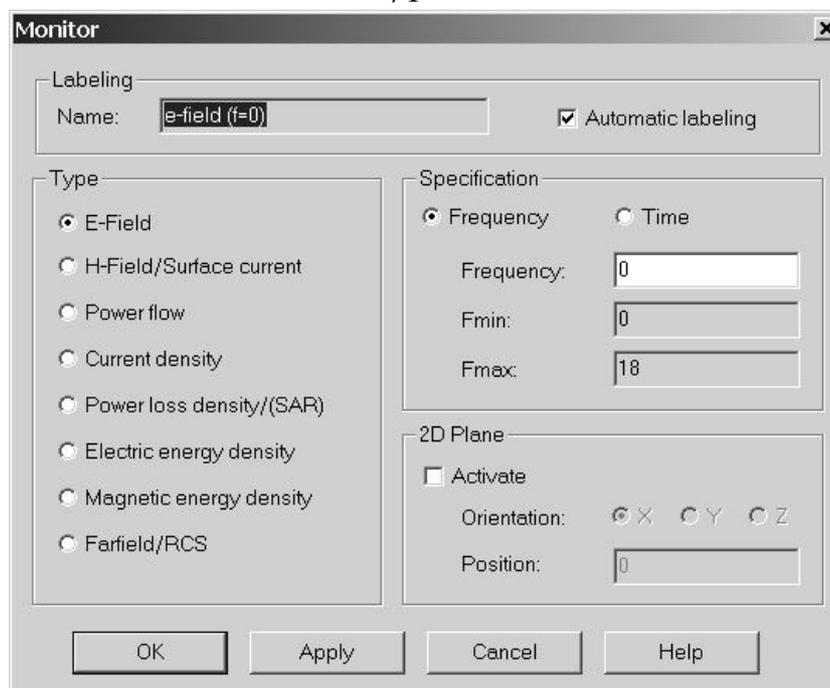


Рисунок 97

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 2

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:

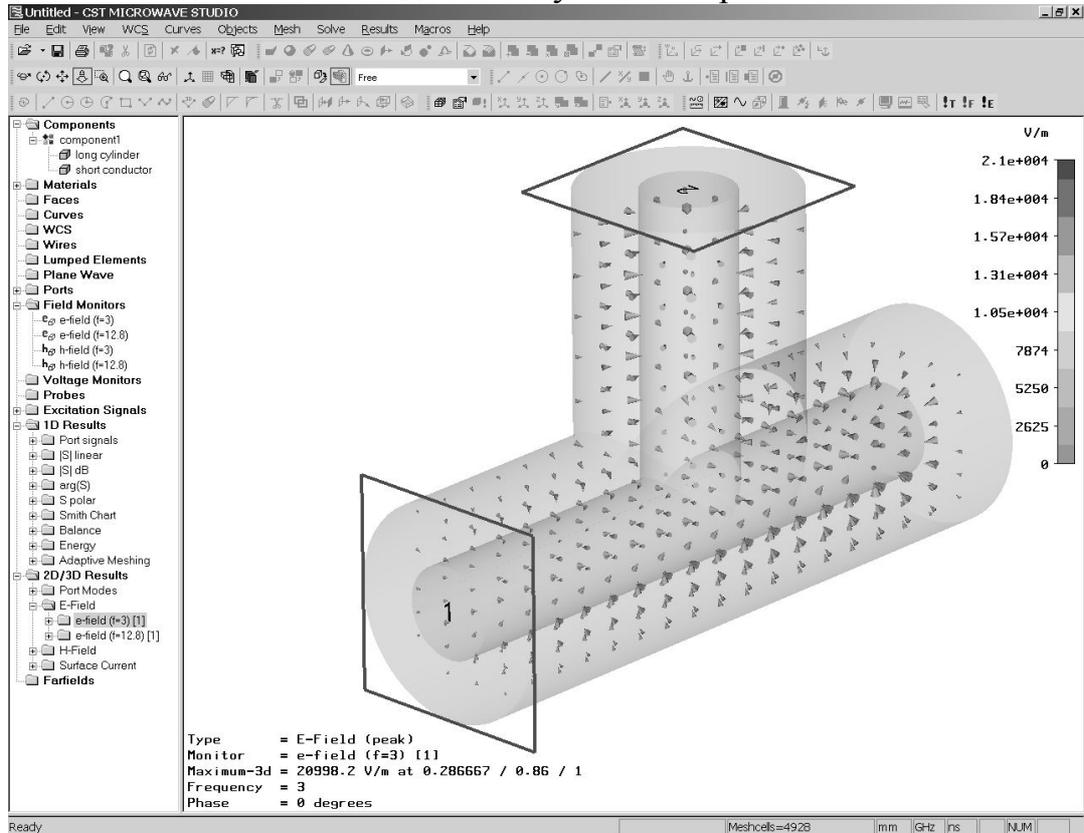


Рисунок 98

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:

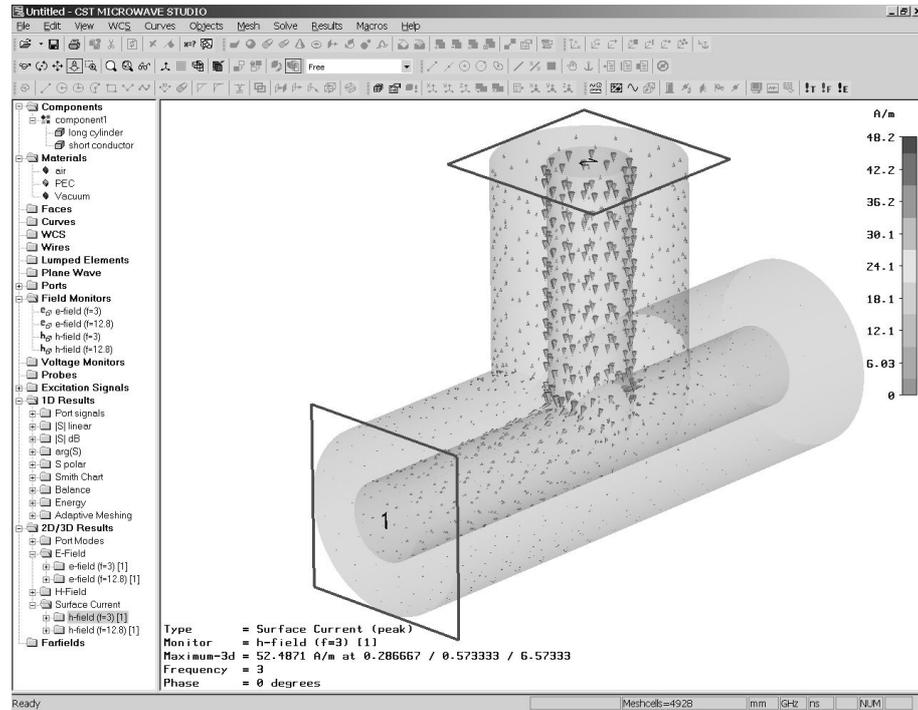


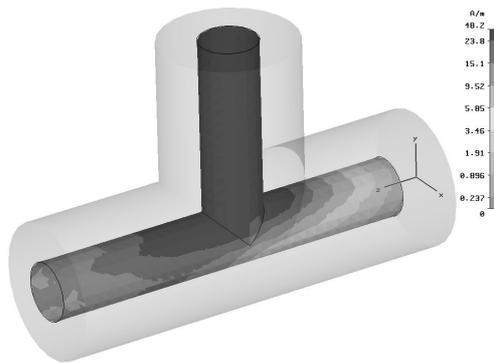
Рисунок 99

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.

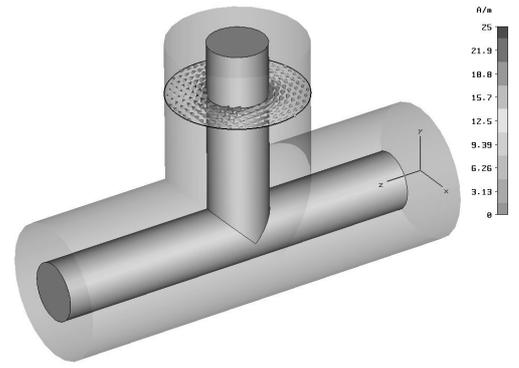
Вы можете увидеть электрический ток на частоте 3 ГГц. Если Вы посмотрите эту же картину на частоте 12.8 ГГц, то сможете увидеть, что на втором проводнике коаксиального (перпендикулярном основному) ток практически не проходит.

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.

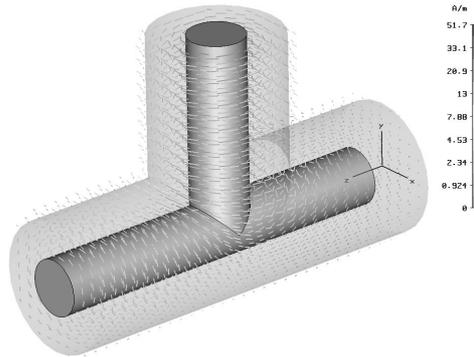
Из-за ограниченного объема данного справочника, мы не можем полностью описать здесь все возможные графические операции. Однако на следующем изображении представлены различные виды визуализации. А Вы сможете воспроизвести их всех?



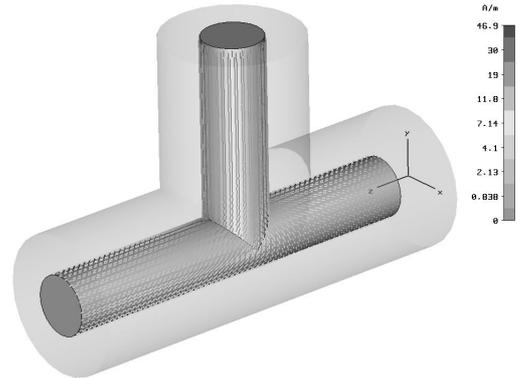
Type = Surface Current (peak)
 Monitor = h-field (f=3) (11)
 Component = Tangential
 Frequency = 3
 Phase = 0 degrees



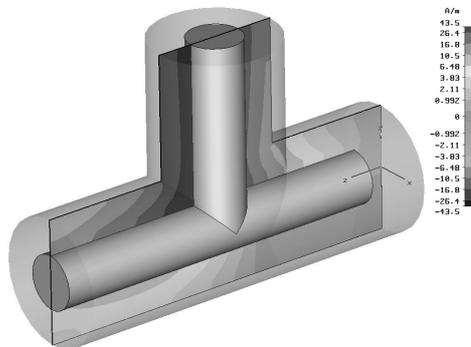
Type = H-Field (peak)
 Monitor = h-field (f=3) (11)
 Maximum = 23.1395 A/m
 Plane at y = 4.38929
 Frequency = 3
 Phase = 0 degrees



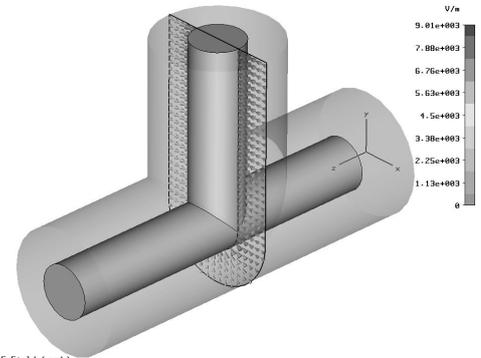
Type = H-Field (peak)
 Monitor = h-field (f=3) (11)
 Maximum = 69.5863 A/m
 Max. H-flow = 51.7314 A/m
 Frequency = 3
 Phase = 0 degrees



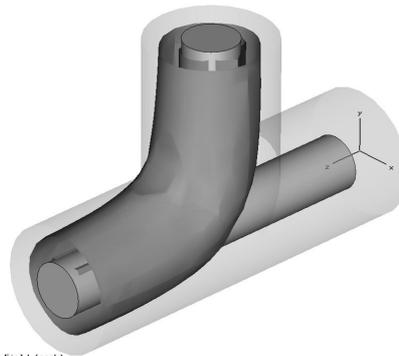
Type = Surface Current (peak)
 Monitor = h-field (f=3) (11)
 Maximum = 46.9872 A/m
 Frequency = 3
 Phase = 0 degrees



Type = H-Field (peak)
 Monitor = h-field (f=3) (11)
 Component = x
 Plane at x = 0
 Frequency = 3
 Phase = 0 degrees



Type = E-Field (peak)
 Monitor = E-Field (f=3) (11)
 Maximum = 18685.5 V/m
 Plane at z = 5
 Frequency = 3
 Phase = 0 degrees



Type = H-Field (peak)
 Monitor = h-field (f=3) (11)
 Component = Hc
 Value = 14.2546 A/m
 Frequency = 3
 Phase = 135 degrees

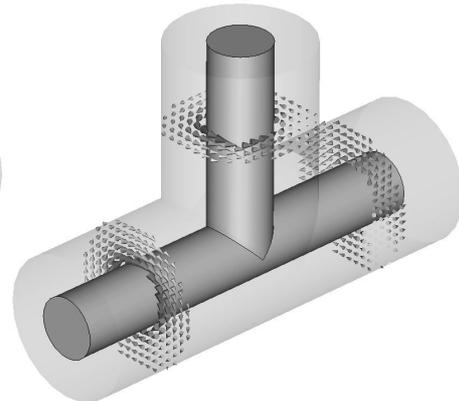


Рисунок 100

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.

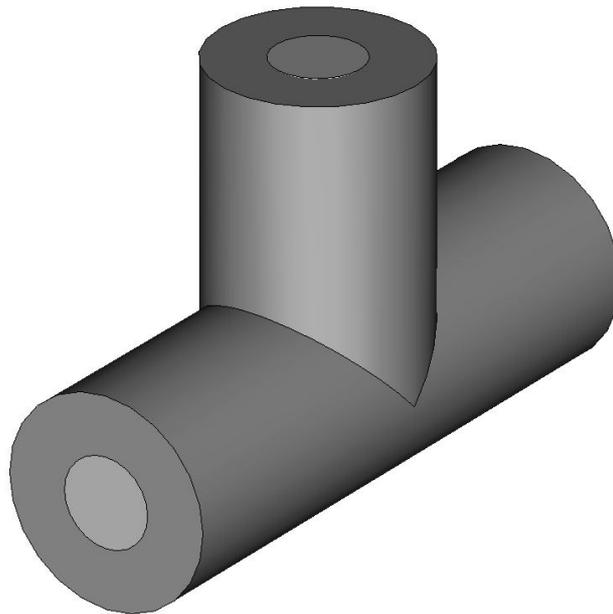


Рисунок 101

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

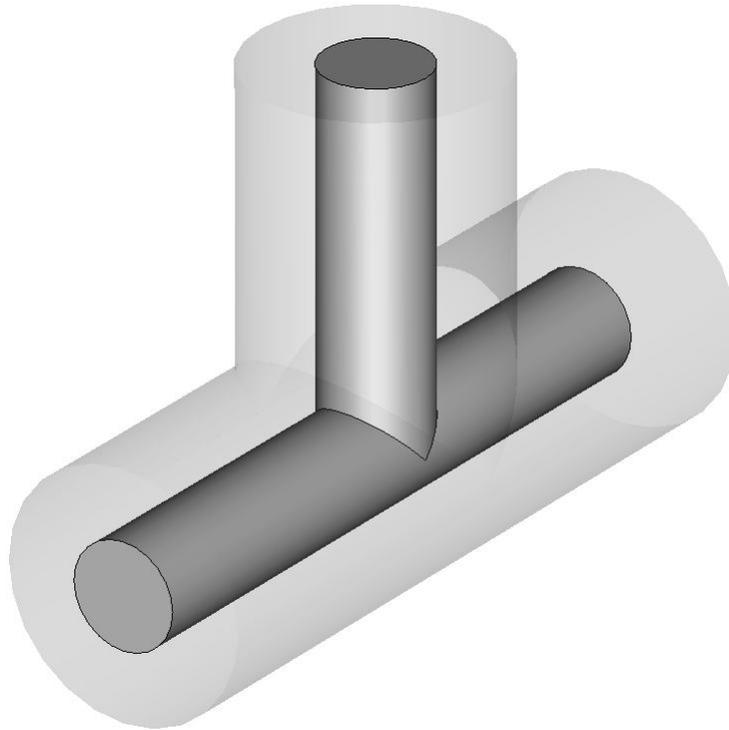


Рисунок 102

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



Рисунок 103

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

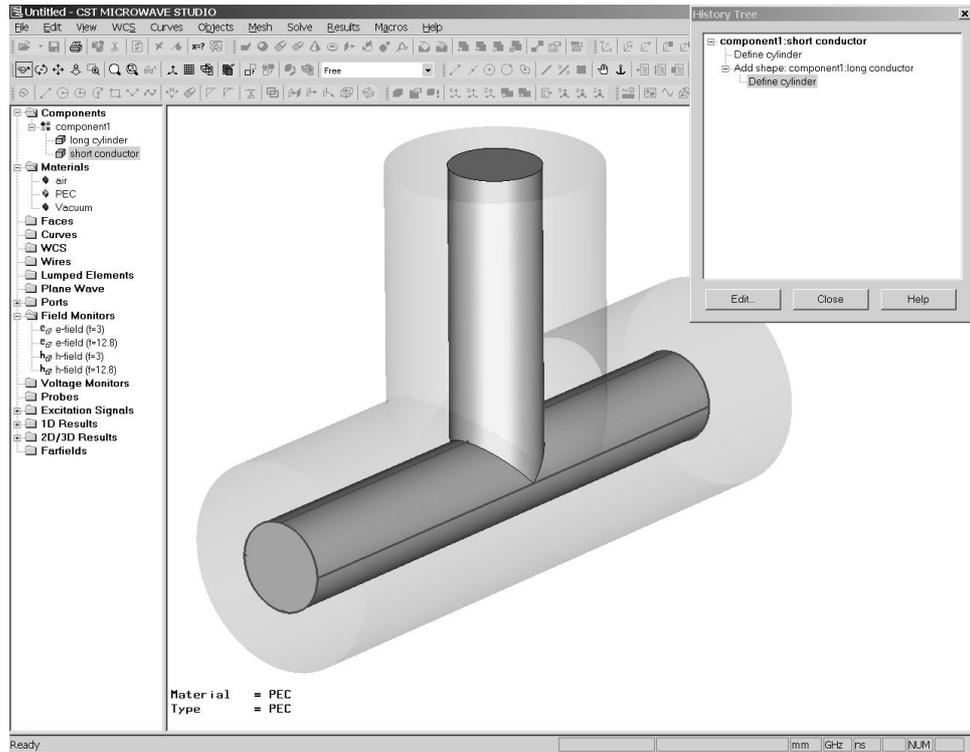


Рисунок 104

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

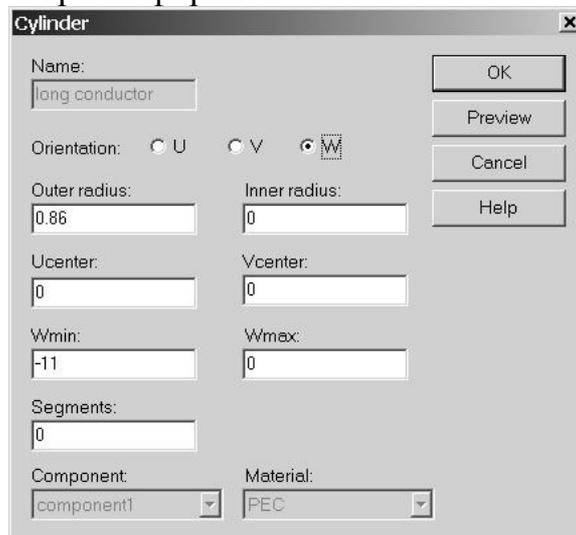


Рисунок 105

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:

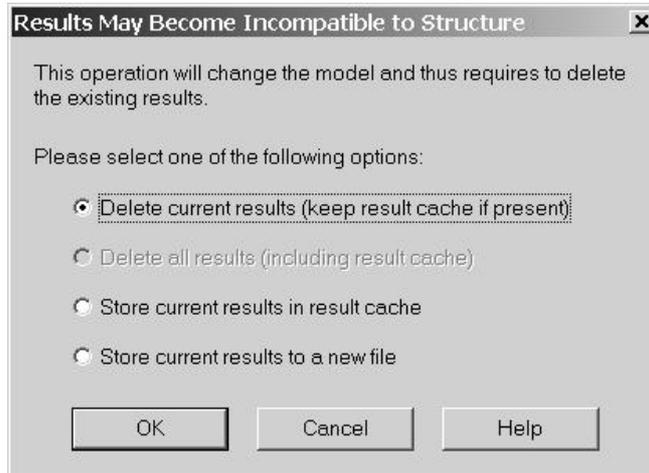


Рисунок 106

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:

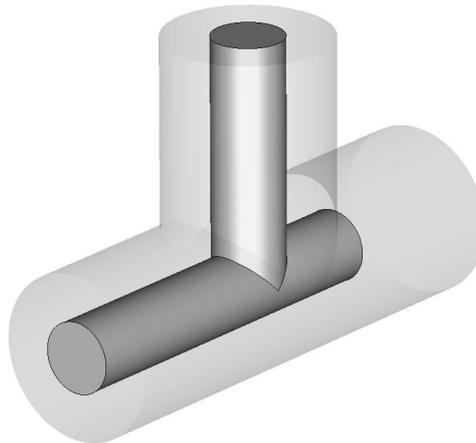


Рисунок 107

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*, ):

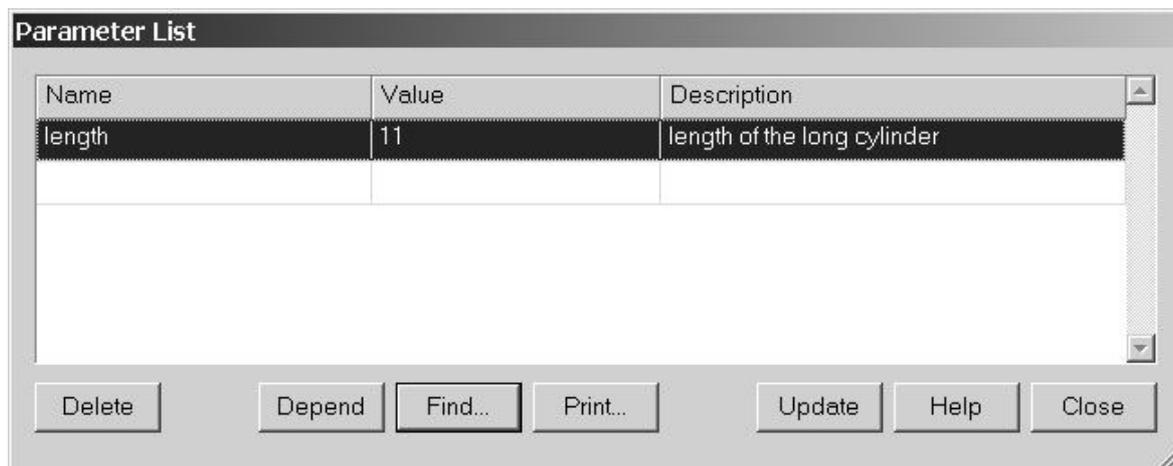


Рисунок 108

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 параметризовали 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:

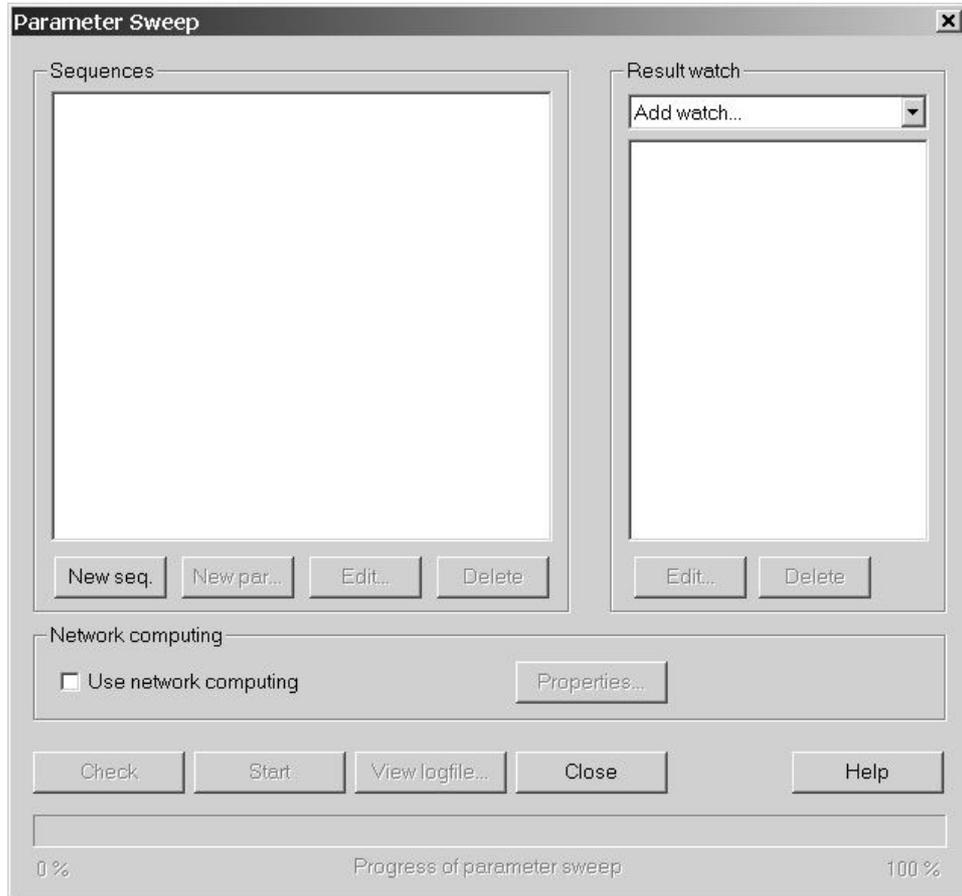


Рисунок 109

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:

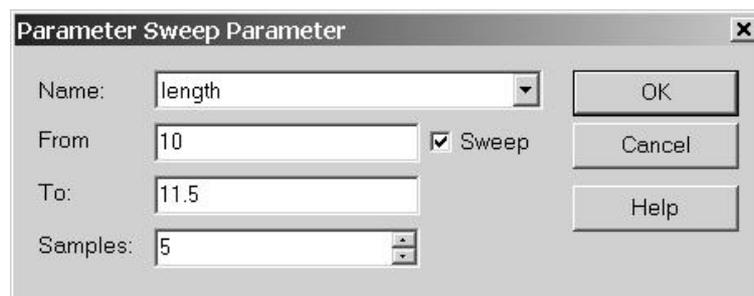


Рисунок 110

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:

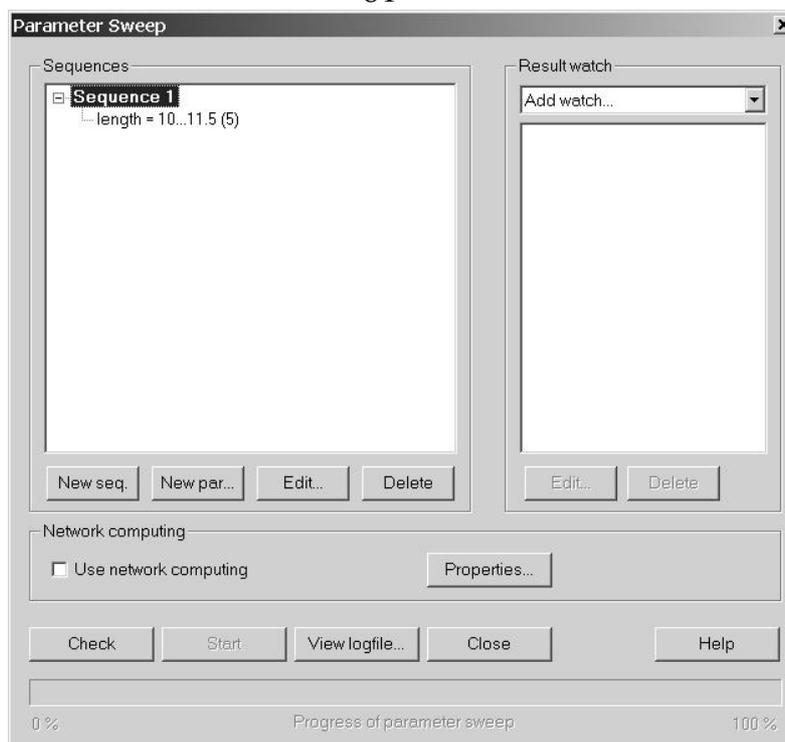


Рисунок 111

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:

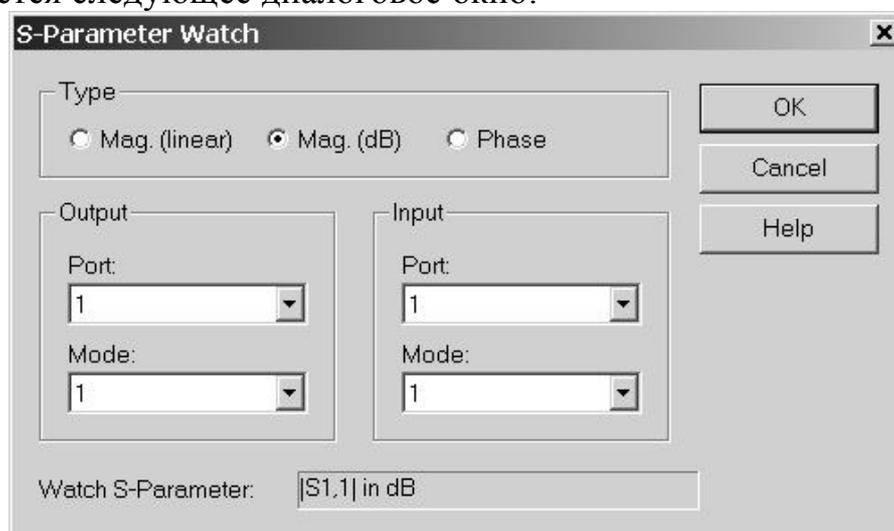


Рисунок 112

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*.

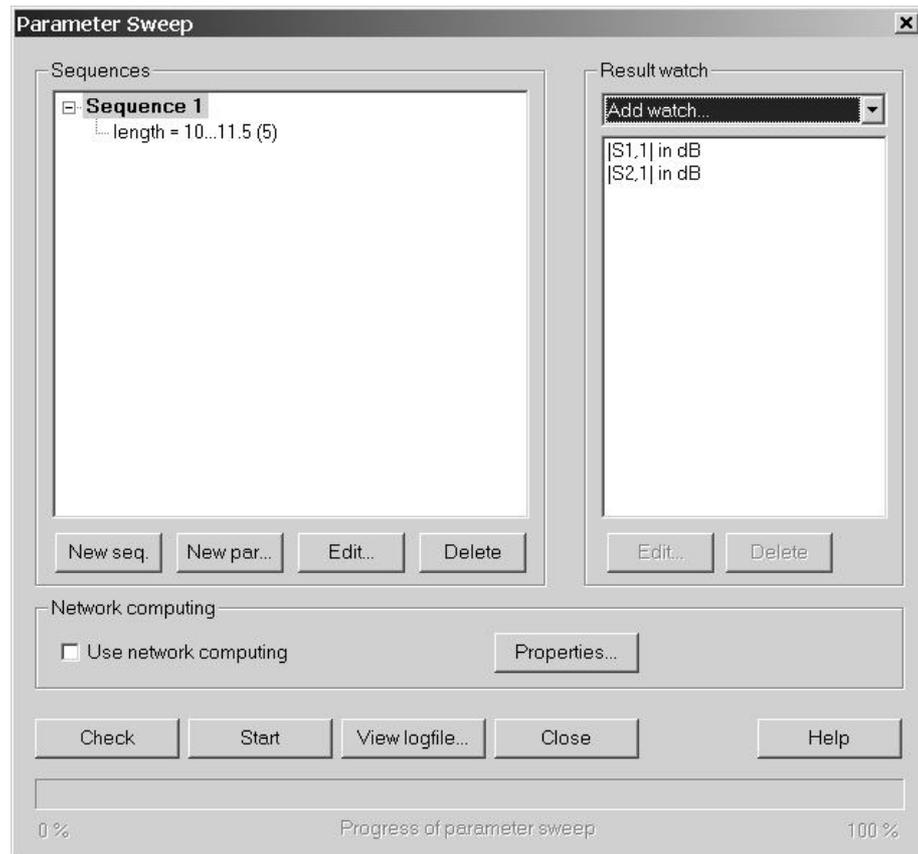


Рисунок 113

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.

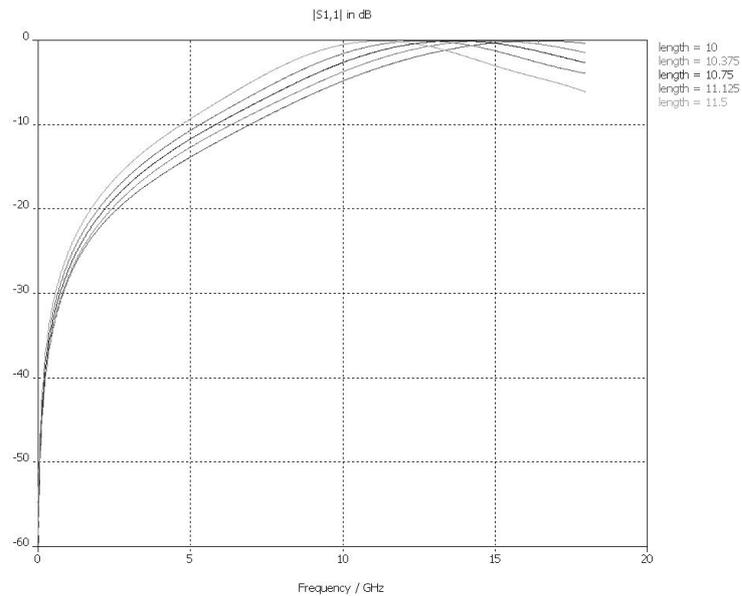


Рисунок 114

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

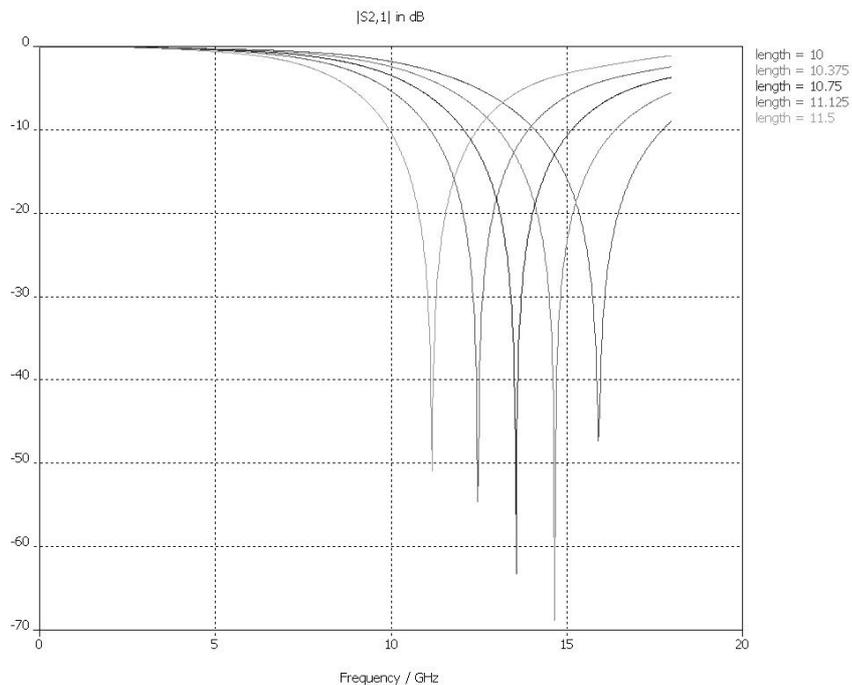


Рисунок 115

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* (🔍).

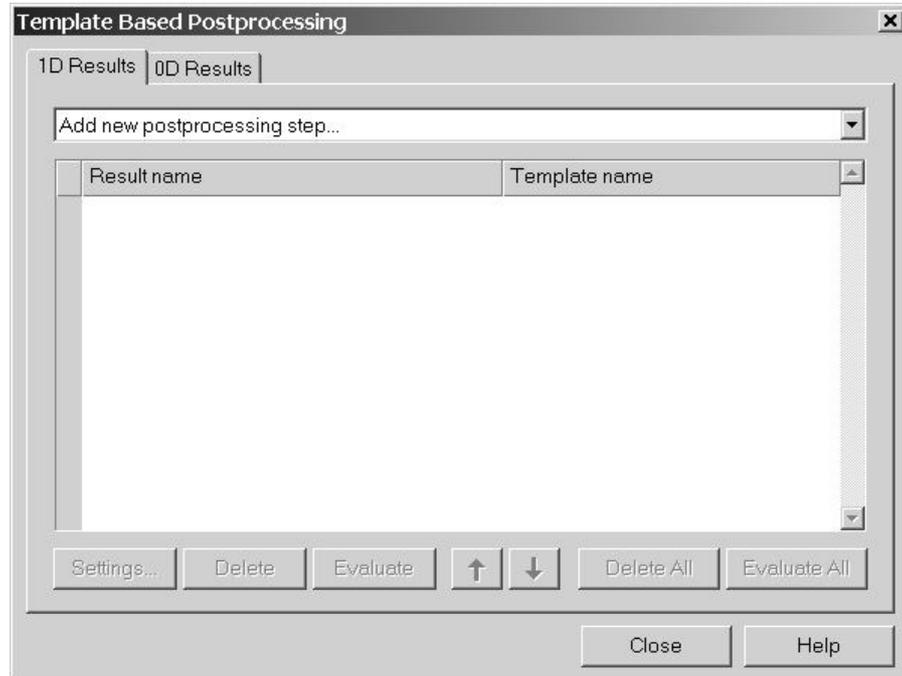


Рисунок 116

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

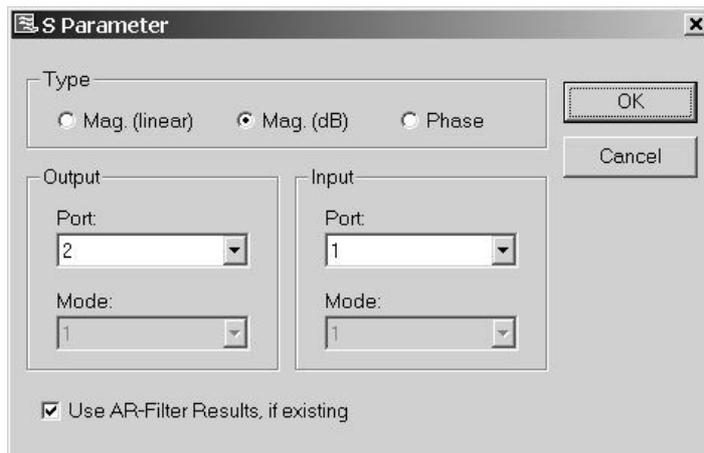


Рисунок 117

В этом окне задайте параметр S2,1, величина измерения в дБ. Нажмите *OK*. Диалоговое окно примет вид:

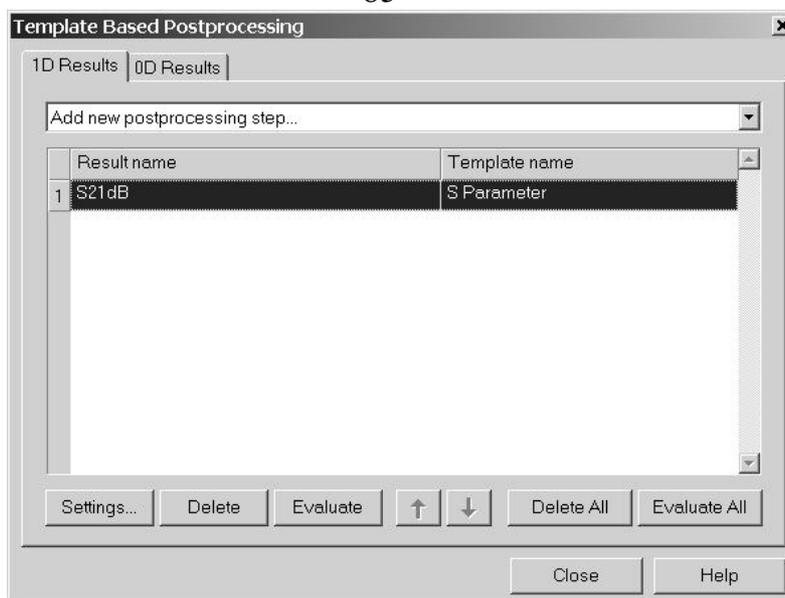


Рисунок 118

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:

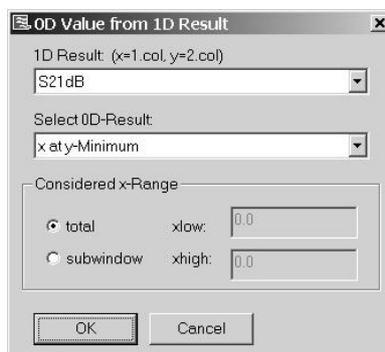


Рисунок 119

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):

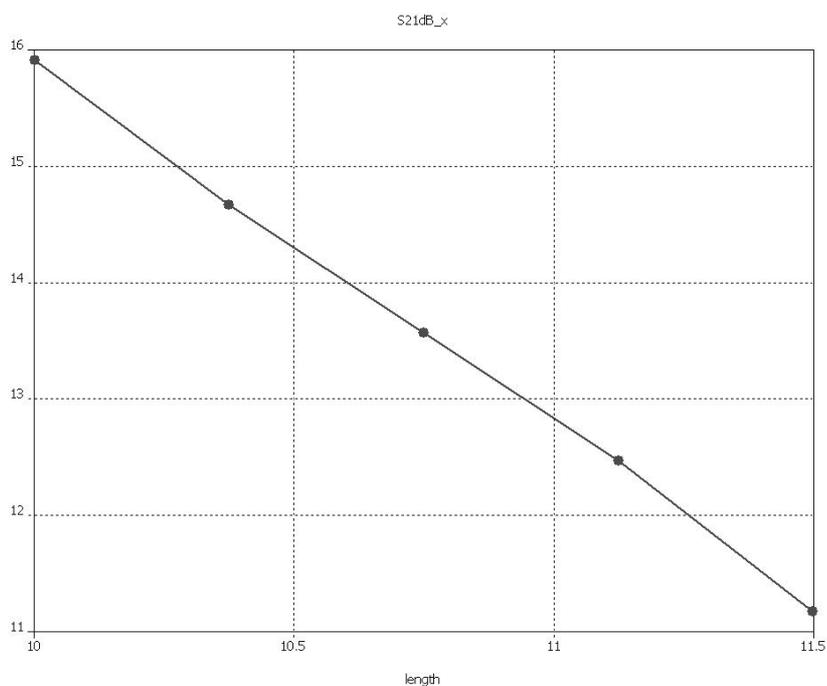


Рисунок 120

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).

Пример расчета антенны

Расчет антенны обычно выполняется при помощи использования анализа переходных процессов, и таким образом осуществляется подобным образом, что и пример, описанный выше.

В редких случаях более эффективным является применения решающего устройства частотной области (*Frequency domain*). Для дополнительной информации, обратитесь, пожалуйста, к сетевой документации.

Что касается анализа переходных процессов, то основное различие в нем при расчете антенны и S-параметров заключается в определении граничных

условий. Так как антенна излучает в свободное пространство, то должны быть применены открытые (или поглощающие) граничные условия. Поэтому просто выберите граничные условия «*open*» в диалоговом окне команды *Solve - Boundary Conditions* (🔍):

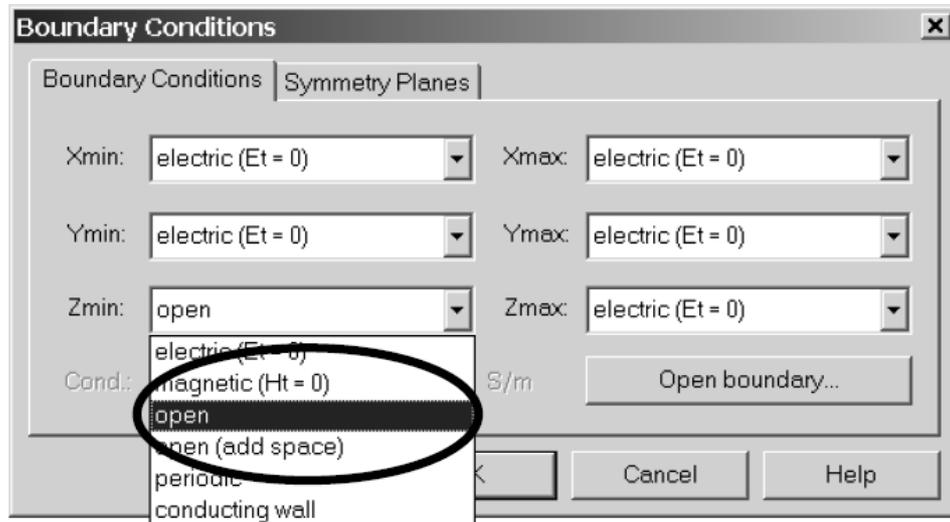


Рисунок 121

Пожалуйста, заметьте, что открытые граничные условия, для оптимальной производительности, требуют некоторого пространства между прибором и граничными плоскостями. Так как открытые граничные условия очень точны, то необходимо только небольшое расстояние. Однако если Вы не уверены в количестве достаточного пространства, то Вы можете просто выбрать пункт «*open (add space)*» в граничных опциях. В этом случае, необходимое пространство будет вычислено автоматически.

Для расчета усиления антенны или ее диаграммы направленности (распределение поля в сферической системе координат или в системе координат Людвига, осевое отношение), прежде чем будет начата имитация, должны быть определены, так называемые, мониторы поля в дальней зоне. Подобно формированию картин поля при помощи других мониторов, в данном случае тоже может быть определено произвольное их количество на произвольных частотах. Это означает, что Вы можете вычислить распределение поля антенны в различных точках, лишь за одно выполнение анализа переходных процессов. Мониторы поля в дальней зоне определяются в диалоговом окне команды *Solve - Field Monitors* (🔍):

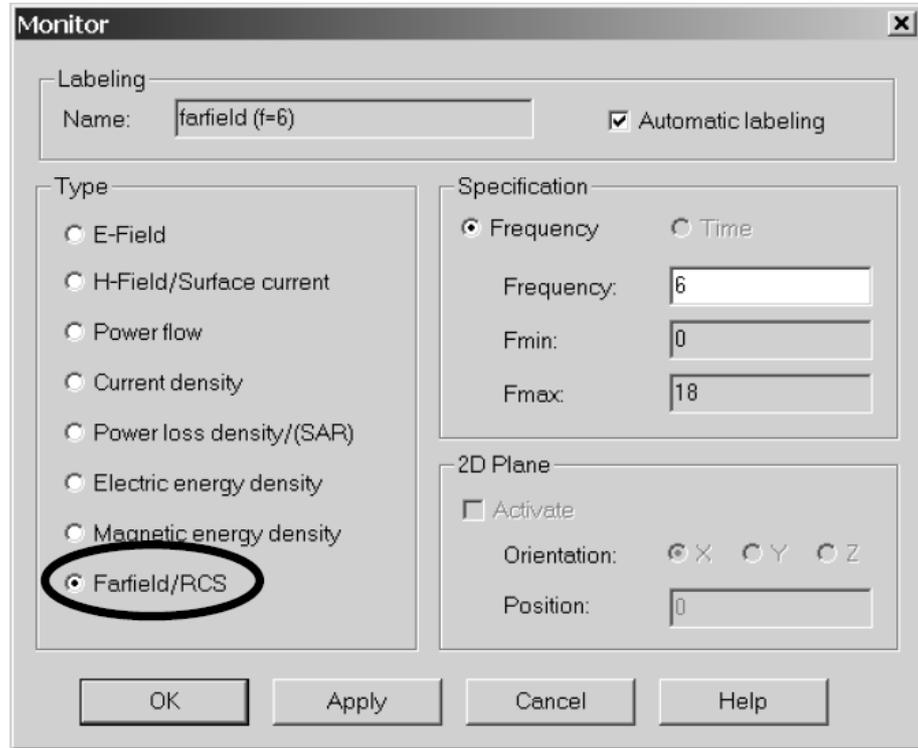


Рисунок 122

После того, как анализ переходных процессов будет завершен, Вы можете открыть папку *Farfields* в дереве навигации. При этом будут автоматически отображены такие характеристики антенны как направление основного лепестка, усиление, подавление бокового лепестка диаграммы направленности и так далее. Для получения дополнительной информации обратитесь к примеру *Patch antenna*.

Мониторы поля в дальней зоне, описанные выше, эффективны, когда поле в дальней зоне должно быть вычислено для широкого углового диапазона (θ , ϕ), но только в нескольких частотных точках. С другой стороны, в некоторых приложениях требуется вычисление поля в дальней зоне должно быть описано как функция частоты в некоторых точках (θ , ϕ). В этих случаях эффективно использование «зондов» *Solve - Probes*, *Field = E-field (farfield)* или *Hfield (farfield)*:

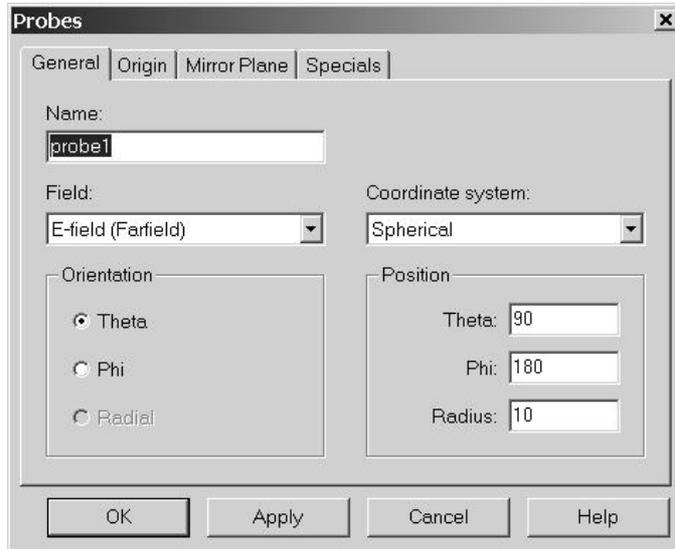


Рисунок 123

В этом диалоговом окне Вы можете определить тип поля в дальней зоне, размещение и ориентации «зонда» в сферической системе координат или системе координат Льюдвига. Пожалуйста, обратись к сетевой документации для получения дополнительной информации по этому вопросу.

Другие очень интересные функциональные возможности с использованием расчета поля в дальней зоне, является и использование опции *Result Templates*, функциональные возможности которой были описаны выше. В папке *1D Result* имеются результаты, доступные для дальнейшей обработки поля в дальней зоне, например *Farfield (single frq.)*. После выбора данного пункта из папки *1D Result* дерева навигации (или команда *Results - Template Based Postprocessing*) откроется следующее диалоговое окно:

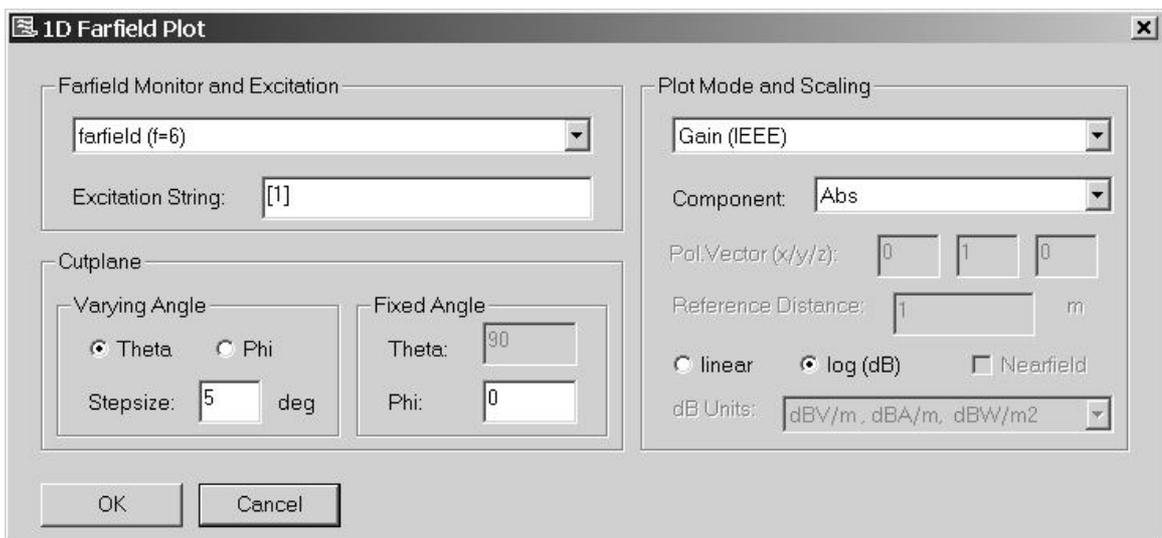


Рисунок 124

Здесь Вы можете определить, какой из ранее выбранных мониторов поля дальней зоны должен быть обработан, а также какой компонент поля дальней зоны и возбуждение ([1] соответствует возбуждению в порте 1) должны быть рассмотрены. Кроме того, Вы должны определить плоскость сечения в

сферической системе координат, чтобы получить одну пространственную характеристику монитора поля дальней зоны. Характеристика, полученная в результате данной обработки, будет единственной характеристикой, которая сможет быть обработана далее опцией *Result templates*.

В качестве примера, Вы можете извлечь максимум при использовании *0D result template* (от значения 0D до 1D Result), а затем использовать это значение для оптимизации направления главного лепестка к определенному угловому значению или величине. За более подробной информацией, обратитесь, пожалуйста, к сетевой документации.

Ниже приведен примерный порядок проведения расчета антенны:

1. Создание нового проекта с шаблоном *Antenna*;
2. Выбор единиц измерения;
3. Выбор основного материала;
4. Определение структуры;
5. Определение частотного диапазона;
6. Выбор граничных условий;
7. Определение портов возбуждения;
8. Выбор мониторов поля дальней зоны и/или «зондов»;
9. Настройка характеристик моделирования;
10. Запуск анализа переходных процессов;
11. Исследование результатов анализа.

Упрощение расчёта поля в дальней зоне

Во многих случаях, когда характеристика поля дальней зоны антенны представляет больший интерес, чем импеданс точки питания, нет необходимости в моделировании фактической конфигурации данной точки. Но если Вас интересует очень точный результат величины входного отражения антенны, то конфигурацию точки питания следует задавать с предельной точностью.

В случаях, когда Вы квалифицированно сможете использовать упрощенную модель, Вы можете использовать дискретный, а не волноводные порты (см. раздел *Discrete port* ниже).

Если Вы запускаете анализ новой антенны, то обычно, довольно оптимальным решением будет начать с использования дискретного порта. Так как такую модель проще встроить, Вы получите S-параметры и результат поля дальней зоны довольно быстро. Это позволит Вам получить основные характеристики антенны, прежде чем, Вы займетесь ее уточнением ее параметров, создавая детальную модель конфигурации питающей точки.

На следующих рисунках, в качестве примера, приведены питающие точки простой антенны.

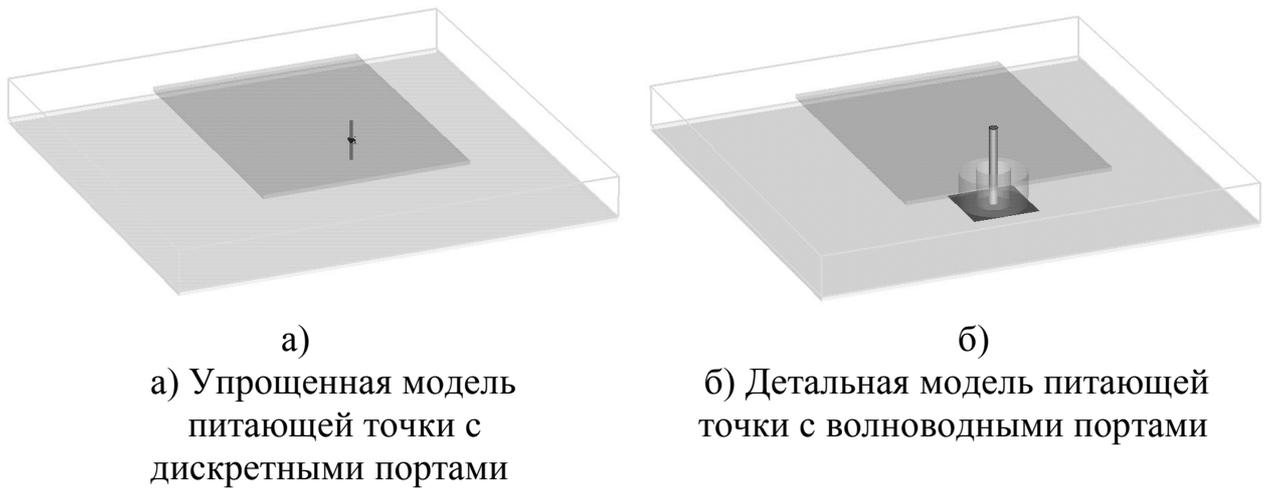


Рисунок 125

На рисунке 125 а представлена антенна с дискретными портами питания, которые представляют источник тока с внутренним сопротивлением. Эта технология дает точные результаты расчет поля дальней зоны, однако, при этом, S-параметры могут не совсем соответствовать действительности.

На рисунке 125 б питание антенны обеспечивается коаксиальной линией (что соответствует реальной структуре), что обеспечивает точность результатов расчета, как поля дальней зоны, так и S-параметров.

Расчет в частотной области

Процедура анализа частотной области довольно схожа с анализом переходных процессов. Данная процедура может, главным образом, разделена на вычисление S-параметров и расчет антенны.

Основное отличие решающего устройства переходных процессов и частотной области может быть видно по различию диалоговых окон их запуска. Для запуска анализа частотной области необходимо выполнить команду *Solve – Frequency Domain Solver*, после чего будет открыто следующее диалоговое окно:

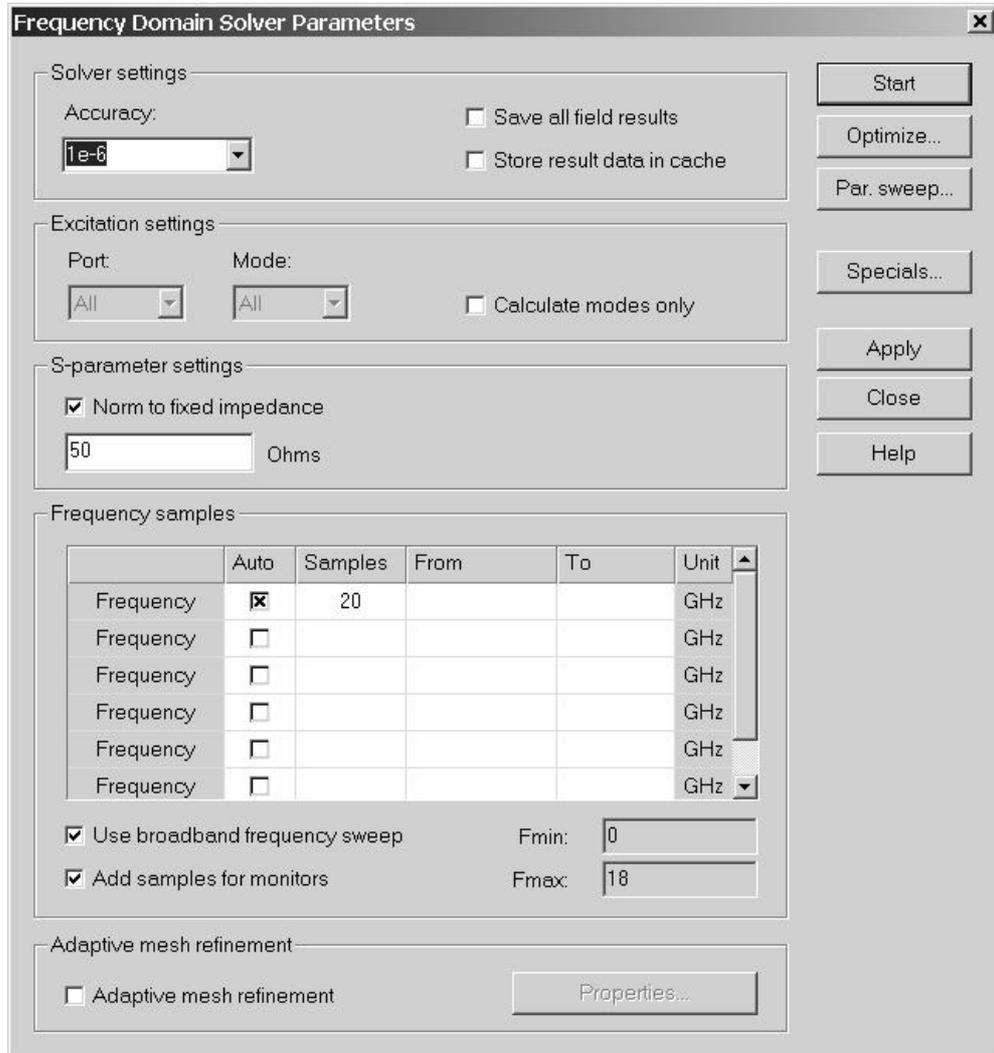


Рисунок 126

Самым же главным отличием данных решающих устройств, является количество выборок при моделировании. Принимая во внимание, что во временной области количество частотных выборок практически не влияет на время моделирования, то классическое вычисление частотной области выполняет симуляцию от точки к точке. При этом каждая частотная точка требует отдельного процесса симуляции.

Однако решающее устройство CST Microwave Studio использует методику широкополосного качания частоты, что позволяет получить полный спектр из относительно небольшого количества частотных выборок.

Чтобы использовать эту методику, Вы должны позволить автоматическое осуществление выборки достаточно большого количества частотных точек (значение 20, установленное по умолчанию, является недостаточным для решения многих задач), а затем активировать опцию *Add samples for monitors*. Решающее устройство в этом случае будет автоматически адаптировать выбор частотной точки таким образом, чтобы широкополосная характеристика была получена при минимальном числе выборок.

Пожалуйста, заметьте, что решающее устройство частотной области не может вычислить значение поля при нулевой частоте. По этой причине, нулевая частота будет автоматически преобразована к разумно небольшому значению.

К S-параметрам и полю можно обратиться как обычно – через элементы навигационного дерева.

Для проведения анализа частотной области необходимо:

1. Выбор шаблона;
2. Выбор единиц измерения;
3. Определение основного материала;
4. Определение структуры;
5. Установка частотного диапазона;
6. Определение граничных условий;
7. Определение портов возбуждения;
8. Установка мониторов;
9. Запуск анализа частотной области;
10. Исследование результатов.

Даже если типичный спектр прикладных задач, решаемых при помощи анализа частотной области покрывает только небольшие электрические структуры, он тем не менее может быть полезен и при исследовании следующих задач:

1. *Периодические структуры со сдвигом фаз, отличным от нуля*: решающее устройство анализа переходных процессов может обрабатывать структуры только с нулевым сдвигом фаз, таким образом, решающее устройство частотной области должно быть использовано иначе. Сдвиг фаз между граничными плоскостями или геометрическим углом падения должен быть определен в диалоговом окне граничных условий. Пожалуйста, заметьте, что электрический сдвиг фаз между граничными плоскостями и геометрический угол падения не идентичны.

2. *Вычисление S-параметров для структур с большими потерями в волноводных портах*: решающее устройство частотной области может обработать порты с потерями, а также вычислить волноводные моды порта для волноводов с потерями.

3. *Вычисление полной S-матрицы для структур с относительно разреженной сеткой, но с большим количеством портов или мод*: вычисление полной S-матрицы во временной или частотной области требует решение задачи при помощи проведения имитации для каждого порта/моды. Решающее устройство частотной области использует, так называемое, прямое матричное разложение для относительно разреженной сетки (менее чем 15000 клеток, по умолчанию). Как только прямое матричное разложение будет получено, решение задачи для каждого порта может быть получено достаточно быстро. Для использования этой опции необходимо в диалоговом окне анализа частотной области, нажать кнопку *Specials*, а затем в поле *Solver Type* выбрать пункт *Direct*. Пожалуйста, заметьте, что использование прямого разложения может потребовать достаточно большой объем оперативной памяти.

Вычисление собственных колебаний (Eigenmode)

Решающее устройство собственных колебаний вычисляет конечное число модального распределения поля в закрытом устройстве. CST Microwave Studio снабжен двумя типами решающих устройств собственных колебаний: по методам *AKS* и *JD (lossy) / JD (loss free)*.

Эти методы основаны полностью на математической основе. Решающее устройство *JD* можно рассматривать как более устойчивое, в то время как *AKS*, как более быстрое (если необходимо вычислить несколько мод). Поэтому, в случае небольшого количества мод (1-5), мы рекомендуем использование решающего устройства *JD*, в противном случае – решающего устройства *AKS*.

Решение задач свободных колебаний с потерями в данном случае, является весьма стимулирующей, так как подразумевает, что надлежащее рассмотрение потерь, весьма замедлит имитацию. В таких случаях, даже если напрямую доступен метод решения *JD (с потерями)*, иногда желательно (специально для очень небольших потерь) сначала вычислить данную задачу с использованием метода *JD (без потерь)* или *AKS*, а затем получить потери и добротность прибора при помощи использования метода *JD (с потерями)*.

Так как анализ собственных колебаний не требует формирования рисунков портов возбуждения, данный шаг может быть просто опущен. В формировании рисунков мониторов также нет необходимости, потому что сами моды содержат всю необходимую информацию о приборе.

Таким образом, после настройки модели, Вы можете немедленно перейти к диалоговому окну анализа собственных колебаний (*Solve - Eigenmode Solver*), которое выглядит следующим образом:

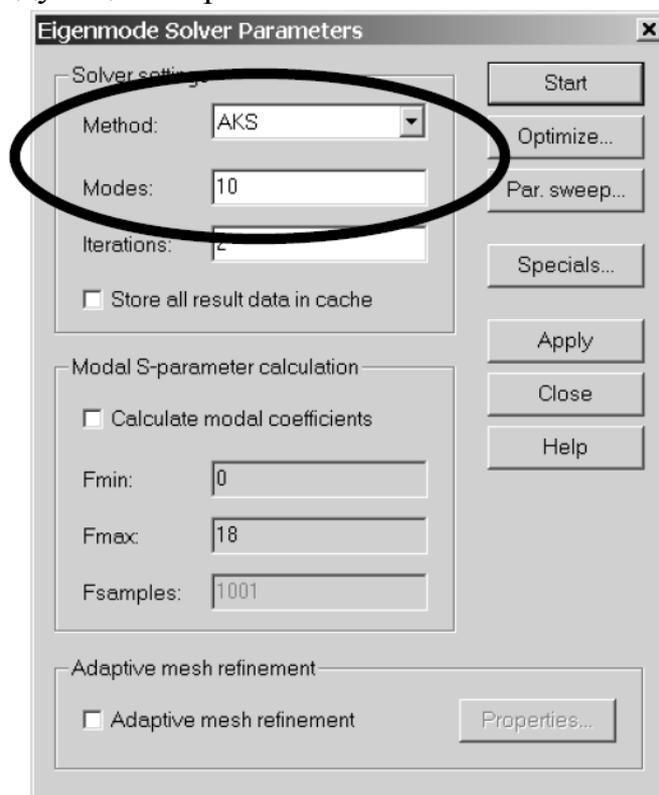


Рисунок 127

В этом диалоговом окне самыми важными элементами управления – метод *Method* (что было описано выше) и количество мод *Modes*.

Типичная процедура имитация следующая:

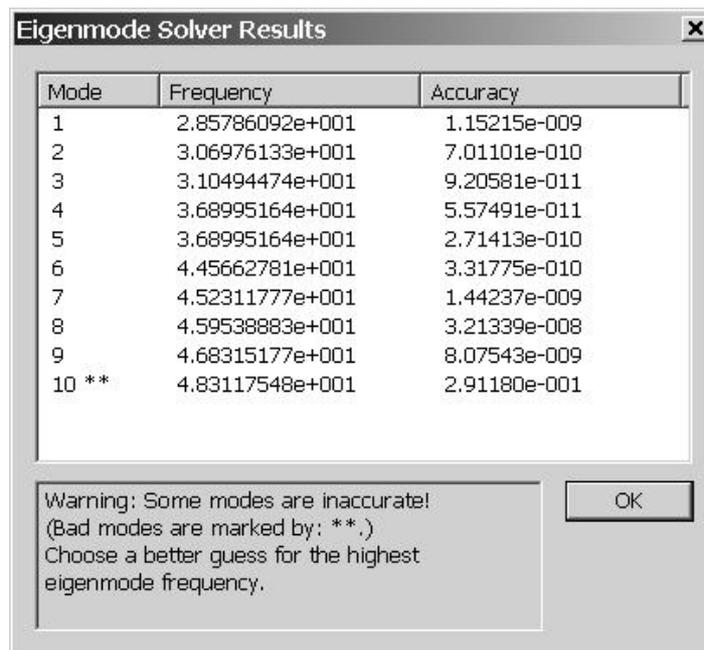
1. В зависимости от количества мод выберите нужный тип модели решающего устройства:

- а) для задач с потерями необходимо выбрать модель *JD* (с потерями);
- б) для задач без потерь с небольшим количеством мод (1-5) – *JD* (без потерь);
- в) для задач без потерь с большим количеством мод (более 5) – *AKS*.

2. Введите заданное количество мод n . Решающее устройство вычислит первые n моды данного устройства. Для решающего устройства *AKS* часто более эффективно ввести большее число мод, нежели в котором Вы нуждаетесь фактически (например, вместо необходимых 15, введите 20). В большинстве случаев, это хороший выбор, чтобы вычислить, по крайней мере, 10 мод.

3. Нажмите кнопку *Start*.

После того, как работа решающего устройства будет завершена, появится диалоговое окно, отображающее частотные моды и соответствующую точность решения:



Mode	Frequency	Accuracy
1	2.85786092e+001	1.15215e-009
2	3.06976133e+001	7.01101e-010
3	3.10494474e+001	9.20581e-011
4	3.68995164e+001	5.57491e-011
5	3.68995164e+001	2.71413e-010
6	4.45662781e+001	3.31775e-010
7	4.52311777e+001	1.44237e-009
8	4.59538883e+001	3.21339e-008
9	4.68315177e+001	8.07543e-009
10 **	4.83117548e+001	2.91180e-001

Warning: Some modes are inaccurate!
(Bad modes are marked by: **.)
Choose a better guess for the highest
eigenmode frequency.

Рисунок 128

Иногда, при использовании решающего устройства *AKS* несколько из высших мод не будут вычислены с достаточной точностью, и будут иметь указание на это в виде значка **. Однако это не влияет на точность низших мод, и объясняет, почему число вводимых мод должно быть больше фактически необходимого.

Решающее устройство *AKS* нуждается в оценке частоты самой высокой моды, представляющей интерес. Обычно эта частота оценивается автоматически и улучшается в случае необходимости.

Выполнение данной оценки приводит к увеличению времени работы решающего устройства. Чтобы ускорить вычисление в этих случаях, Вы можете

вручную ввести предположительную частоту самой высокой моды, подлежащей исследованию. *AKS* устройство автоматически выводит такое предположительно значение, из ранее рассчитанных результатов, и записывает его в журнал регистрации, который можно вывести на экран, путем выполнения команды *Results - View Logfiles - Solver Logfile*. В результате Вы увидите следующую информацию:

```
-----
Optimum guess for the highest eigenfrequency would be: 48.31
-----
```

Вы можете установить данное предполагаемое значение в диалоговом окне, которое открывается нажатием на кнопку *Specials* в диалоговом окне решающего устройства анализа собственных колебаний. Там, в поле *Guess* установите предположительное значение 48,31 ГГц. Если Вы не уверены в этом значении, Вы должны нажать ноль, для того чтобы оценка осуществлялась автоматически. Пожалуйста, заметьте, что данные предположительное значение влияет только на метод *AKS*.

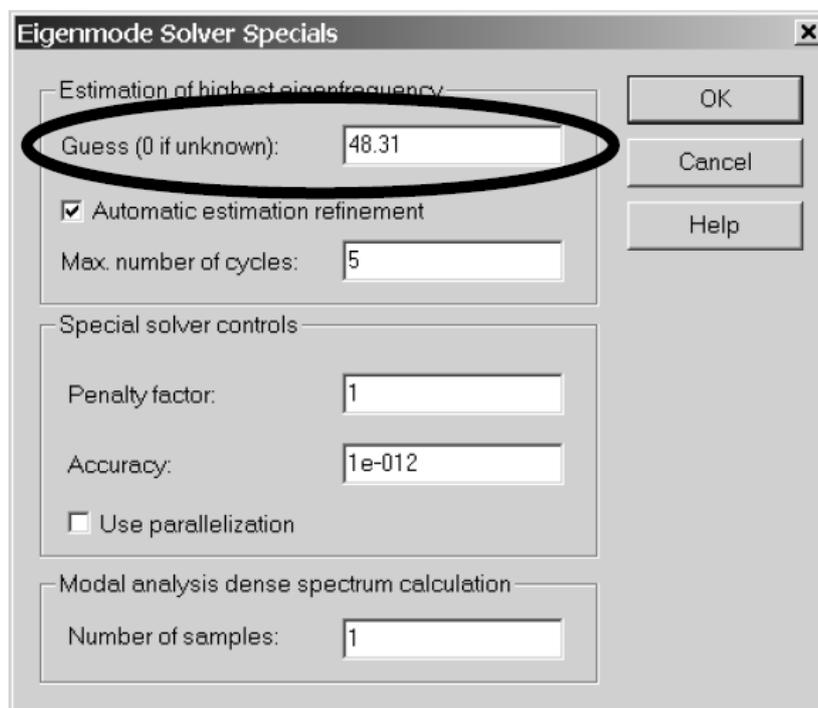


Рисунок 129

Ввод данного предположительного значения должен теперь значительно ускорить работу *AKS* метода.

Для исследования результатов расчета любой n -ой моды необходимо обратиться к папке навигационного дерева *2D/3D Results – Modes – Mode N – e* (для электрического поля) или *2D/3D Results – Modes – Mode N – h* (для магнитного поля).

Пожалуйста, обратитесь к обучающей программе *Cavity* для получения дополнительной информации по обработке результатов.

Порядок действий, для проведения анализа собственных колебаний:

1. Выберите соответствующий шаблон;
2. Выберите единицы измерения;
3. Выберите основной материал;
4. Определите структуру;
5. Выберите частотный диапазон;
6. Определите граничные условия;
7. Запустите решающее устройство анализ собственных колебаний;
8. Исследование результатов.

Проведение анализа собственных мод резонатора

По сравнению с вычислением S-параметров при помощи анализа переходных процессов, в данном случае пропускается определение мониторов. Сама имитация может быть запущена с диалогового окна команды *Solve - Eigenmode Solver*

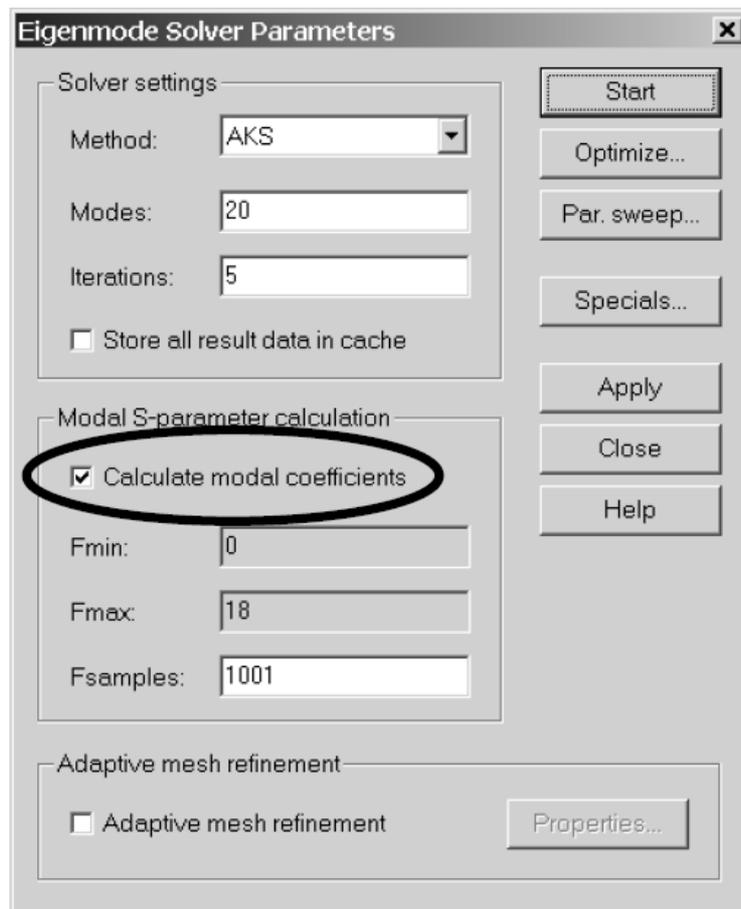


Рисунок 130

Настройки для решающего устройства анализа собственных колебаний те же, что были описаны выше. Единственный новый параметр - *Modal S-parameter calculation*.

Первым шагом установите флажок в поле *Calculate modal coefficient*. Далее Вы должны будете определить количество выборок в диапазоне указанных частот. С последними настройками время моделирования было небольшим, поэтому количество выборок можно установить достаточно большим (в данном случае 1001).

В завершении нажмите кнопку *Start*. После того, как имитация будет закончена, Вы должны проверить точность решения, как это описано в предыдущем разделе.

Результаты можно посмотреть в папке *2D/3D Results – Modes* дерева навигации.

К S-параметрам можно обратиться как обычно через папки дерева навигации *1D Results - |S| linear, |S| dB, arg(S), S polar, Smith Chart and Balance*.

Самая критическая настройка в модальном анализе – определение количество рассматриваемых мод, необходимых для вычисления S-параметров.

Пожалуйста, заметьте: для резонансных приборов типично будет требоваться только несколько мод (например, 10 – 20). Однако для слаборезонансных структур может быть необходимо большое количество мод, что делает данный вид анализа неэффективным в данных приложениях (хотя и он может быть применен).

Самый достоверный способ определения необходимого количества мод состоит в том, чтобы проводить моделирование сначала с небольшим количеством (например, 10-20), постепенно увеличивая это число. При этом, после каждого моделирования необходимо смотреть на величину сходимости полученных результатов S-параметров. Данная процедура проводится до тех пор, пока результаты вычисления S-параметров не станут достаточно устойчивыми. После этого, полученное значение Вы можете, в дальнейшем, использовать для оптимизации структур такого же типа.

AKS метод лучше всего подходит для решения задач, связанных с собственными колебаниями, с 10 модами или более. Таким образом, это хороший выбор, чтобы увеличить число итераций расчета модального анализа до 5.

Для получения дополнительной информации, обратитесь к примеру *Narrow Band Filter*.

Таким образом, модальный анализ осуществляется в следующем порядке:

1. Выберите соответствующий шаблон;
2. Выберите единицы измерения;
3. Выберите основной материал;
4. Определите структуру;
5. Выберите частотный диапазон;
6. Определите граничные условия;
7. Определите порты возбуждения (волноводные);
8. Запустите модальный анализ;
9. Проанализируйте результаты.

Дискретные порты

Существует два различных типа порта для анализа переходных процессов и частотной области. В примере анализа переходных процессов, который был описан ранее, используются, так называемые, волноводные порты.

Этот вид порта имитирует собой бесконечно длинный волновод, подключенный к структуре. Волноводные моды перемещаются от структуры к поверхностям раздела и, таким образом, оставляет область вычисления с очень низкими уровнями отражения.

Хотя использование волноводных портов определенно повышает точность моделирования, однако, использование дискретных портов иногда бывает намного удобнее. Дискретный порт состоит из источника тока с внутренним сопротивлением и двух выводов, которые могут быть подключены к структуре.

Данный вид порта часто 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.

Типичным способ определения дискретного порта, является простой выбор двух точек на Вашей структуре (при помощи средств указки), и затем открытие диалогового окна дискретных портов:

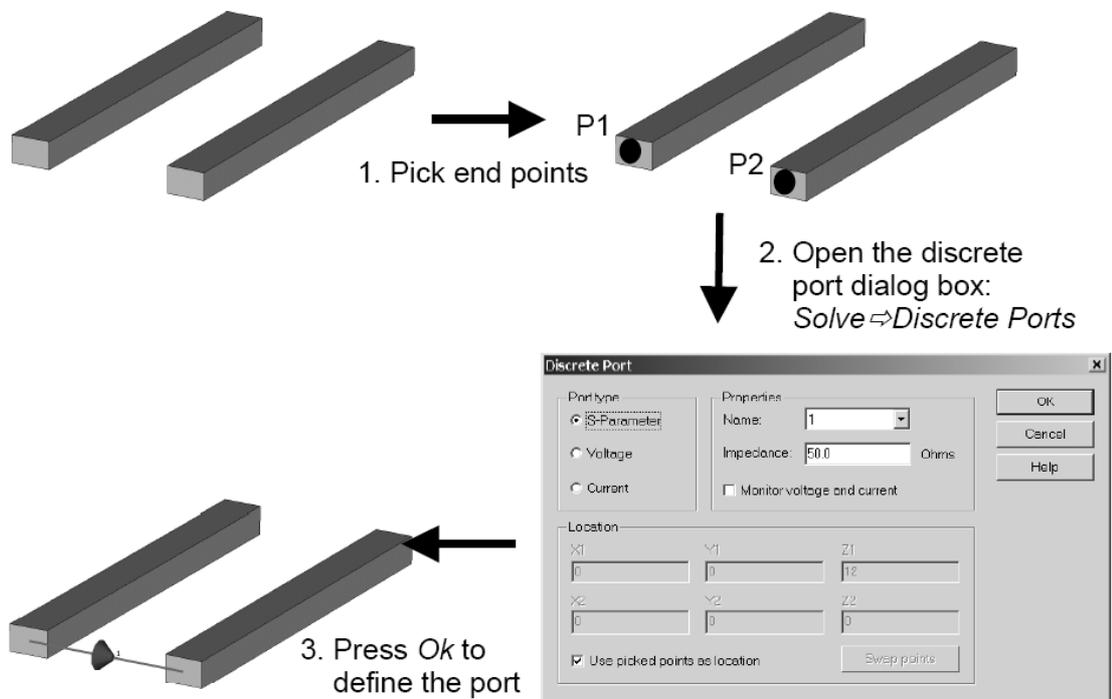


Рисунок 131

Для анализа переходных процессов или частотной области, дискретные порты могут использоваться так же, как и волноводные.

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 антенн и устройств СВЧ**

Учебно-методическое 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.