

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

---

Кафедра антенн и устройств СВЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН В РЕЖИМАХ ИЗЛУЧЕНИЯ  
И РАССЕЯНИЯ В ПАКЕТАХ CST STUDIO, HFSS, FEKO  
И УЗКОСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММАХ**

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

по дисциплинам «Антенны и устройства СВЧ»,  
«Методы и устройства формирования информационных электромагнитных полей»,  
«Распространение радиоволн в антенно-фидерных устройствах»,  
«Техника СВЧ и КВЧ в медицинских приборах»

Минск БГУИР 2012

УДК 621.396.67(076)  
ББК 32.845я73  
М74

Авторы:

О. А. Юрцев, Ю. Ю Бобков., В. В. Кизименко,  
А. П. Юбко, Г. В. Герасимович

Рецензент:

М74 Моделирование антенн в режимах излучения и рассеяния в пакетах CST STUDIO, HFSS, FEKO и узкоспециализированных программах: Метод. пособие по дис. «Антенны и устройства СВЧ», «Методы и устройства формирования информационных электромагнитных полей», «Распространение радиоволн в антенно-фидерных устройствах», «Техника СВЧ и КВЧ в медицинских приборах». / Юрцев О. А. [и др.] – Минск.: БГУИР, 2012. – 62с. : ил  
ISBN 978-985-488-771-5.

Пособие содержит краткое описание программ CST Studio, HFSS, FEKO и примеры их использования для расчета характеристик и параметров антенн в режиме излучения и рассеяния. Рассмотрены варианты создания численных моделей наиболее распространенных конструкций антенн: рупорной, спиральной и микрополосковой.

Для студентов специальностей 1-39 01 01 «Радиотехника», 1- 39 01 02 «Радиоэлектронные системы», 1- 39 01 03 «Радиоинформатика», 1-39 01 04 «Радиоэлектронная защита информации» и магистрантов специальностей 1- 31 80 07 «Радиофизика», 1- 39 80 01 «Антенны».

**УДК 621.396.67(076)**  
**ББК 32.845я73**

**ISBN 978-985-488-771-5**

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2012

## Содержание

Введение .....	3
1. Моделирование антенн с помощью САПР CST Studio Suite .....	4
2. Моделирование антенн с помощью САПР FEKO и узкоспециализированных программ .....	30
3. Моделирование антенн с помощью САПР HFSS .....	59
Заключение .....	60
Литература .....	61

Библиотека БГУИР

## Введение

Современный темп исследований и разработок антенных систем невозможен без использования новых информационных технологий проектирования СВЧ структур на электродинамическом уровне.

Для трехмерного моделирования антенн в режиме излучения и рассеяния разнообразной формы на электродинамическом используются такие САПР, как CST Studio™, HFSS™, FEKO™. Эти программные пакеты разработаны различными компаниями и являются коммерческими программными продуктами. С демонстрационными версиями программ можно ознакомиться на сайтах фирм-разработчиков [1–3].

Каждый из пакетов программ содержит собственный трехмерный графический редактор, позволяющий создавать трехмерные модели анализируемых объектов путем объединения простых трехмерных объектов: параллелепипеда, сферы, конуса и др. Интегрированная среда каждой из САПР позволяет кроме геометрии анализируемого объекта задавать материал различных элементов объекта, граничные условия, источники возбуждения. Набор параметров, анализируемых в каждой САПР, и инструментов их отображения в виде графиков, двумерных и трехмерных изображений позволяет в полной мере провести анализ антенны в различных режимах работы: режиме излучения и режиме рассеяния.

Для электродинамического моделирования в каждом пакете реализовано несколько электродинамических методов. Самый большой набор методов (solvers) имеет САПР FEKO™. В нем реализованы такие методы, как метод конечных элементов во временной области (FDTD), метод конечных элементов во временной области (FDFD), метод геометрической теории дифракции, метод интегральных уравнений, метод физической оптики, метод физической теории дифракции. Каждый из методов имеет ограничения по размерам анализируемых структур, точности и требований к вычислительным ресурсам. Для анализа, оптимизации конструкций антенн в широком диапазоне частот наиболее удобно использовать метод конечных элементов во временной области, который реализован в каждой из названных САПР.

Настоящее пособие состоит из трех частей, в каждой из которых описываются отдельная САПР и приводятся примеры их использования для анализа антенн конкретного типа.

Первая часть посвящена CST Microwave Studio, входящей в САПР CST Studio Suite™ компании CST AG (Германия). Использование этой САПР для анализа антенн продемонстрировано на примере рупорной и спиральной антенн.

Во второй части приводится описание и пример использования САПР FEKO™ фирмы EMSS-SA (ЮАР). В качестве примеров использования приведено описание методики составления модели рупорной, вибраторной и директорной антенн и их анализа.

Третья часть пособия посвящена САПР HFSS™ фирмы Ansoft (США). В качестве примера использования САПР представлено описание методики разработки модели конической рупорной антенны.

## 1. Моделирование антенн с помощью САПР CST Studio Suite

### 1.1. Состав САПР

Пакет CST Studio Suite предназначен для решения широкого класса задач электродинамики и объединяет в себе следующие взаимосвязанные модули:



CST Microwave Studio – программа расчета СВЧ устройств (антенн, фильтров, делителей мощности, микрополосковых структур).



CST EM Studio – программа моделирования статических и низкочастотных электромагнитных полей в трансформаторах, электромеханических измерительных головках, экранирующих структурах. Имеется возможность анализа электро- и магнитостатических полей, вихревых и поверхностных токов.



CST Particle Studio – программа для анализа поведения заряженных частиц в электромагнитных полях, моделирования электронных пушек, катодных лучевых трубок, магнетронов.



CST Mphysics Studio – специализированный пакет для анализа тепловых и механических нагрузок. В высокочастотном электромагнитном поле наличие потерь в диэлектрике, омические потери в проводниках приводят к выделению тепла, которое в свою очередь является причиной механических деформаций анализируемых структур. Продукт CST MPHYSICS STUDIO позволяет решать такие задачи в рамках одной среды проектирования в неразрывной интеграции с другими вычислительными модулями.



CST Design Studio – инструмент, позволяющий разбить сложное устройство на отдельные части, промоделировать их по отдельности и затем интегрировать полученные данные в единое целое. Имеется возможность моделирования электрических схем и трехмерных электродинамических структур.



CST PCB Studio – инструмент для исследования электромагнитной совместимости в пределах печатной платы. Позволяет моделировать резонансы, отражения, перекрестные помехи как для простых однослойных, так и для сложных многослойных высокоскоростных плат.



CST Cable Studio – инструмент для исследования эффектов взаимодействия в кабельных системах, включая одиночные провода, витые пары, сложные кабельные системы.



CST Microstripes – альтернативный модуль трехмерного электродинамического моделирования во временной области, ориентированный на анализ электромагнитной совместимости (EMC).

Дальнейшее описание проводится для модуля CST Microwave Studio. Подробное оригинальное описание пакета приводится на сайте производителя [1]. Среди русскоязычных изданий описание по использованию пакета CST Suite для моделирования широкого класса СВЧ устройств изложено в [4].

## 1.2. Системные требования

Программное обеспечение CST предназначено для работы под управлением операционных систем Windows XP, Vista, Windows 7.

Процессор Intel Pentium или выше, совместимый с платформой IBM PC (настоятельно рекомендуется использовать процессор Intel Xeon).

Полная поддержка графической картой технологии OpenGL.

Минимум 512 Мб оперативной памяти (рекомендуется 4 Гб).

Минимум 8 Гб свободного пространства на жестком диске (рекомендуется 20 Гб).

## 1.3. Создание нового проекта

Для запуска пакета CST Design Environment необходимо выполнить команду «CST Design Environment» из раздела меню Пуск | Программы | CST Studio Suite.

После запуска пакета CST Studio Suite появляется окно (рис. 1.1) выбора модуля, в котором будет проходить дальнейшая работа. Выберем CST Microwave Studio и нажмем «ОК».

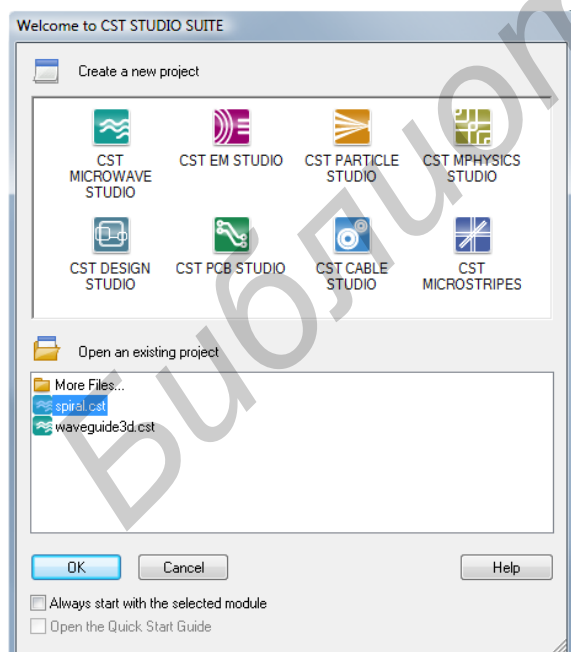


Рис. 1.1. Выбор модуля

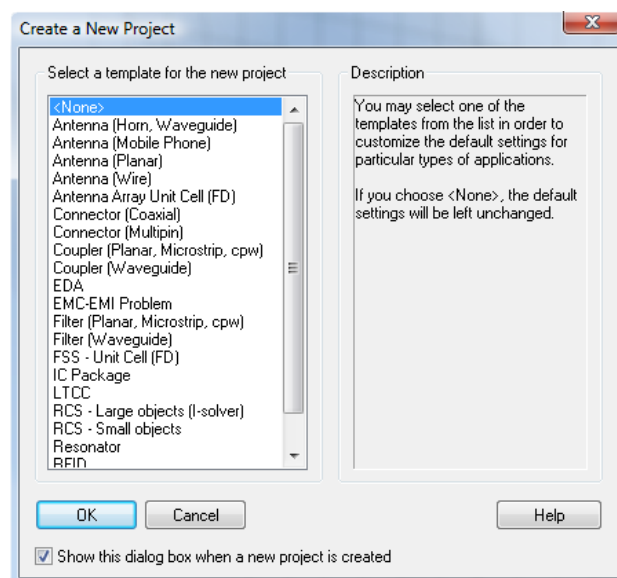


Рис. 1.2. Выбор шаблона начальных настроек

После загрузки модуля Microwave Studio появится окно выбора шаблона начальных настроек (рис. 1.2) создаваемого проекта. В зависимости от типа решаемой задачи в данном окне можно выбрать наиболее подходящий шаблон, содержащий настройки граничных условий, сетки разбиения, единицы измерения длины и частоты. Выберем вариант «None» – все необходимые настройки мы проведем вручную.

Сохраним проект с помощью меню «File» | «Save As...», укажем название проекта, например – waveguide.cst.

## 1.4 Обзор пользовательского интерфейса

Вид пользовательского интерфейса CST Microwave Studio приведен на рис. 1.3. В его состав входят:

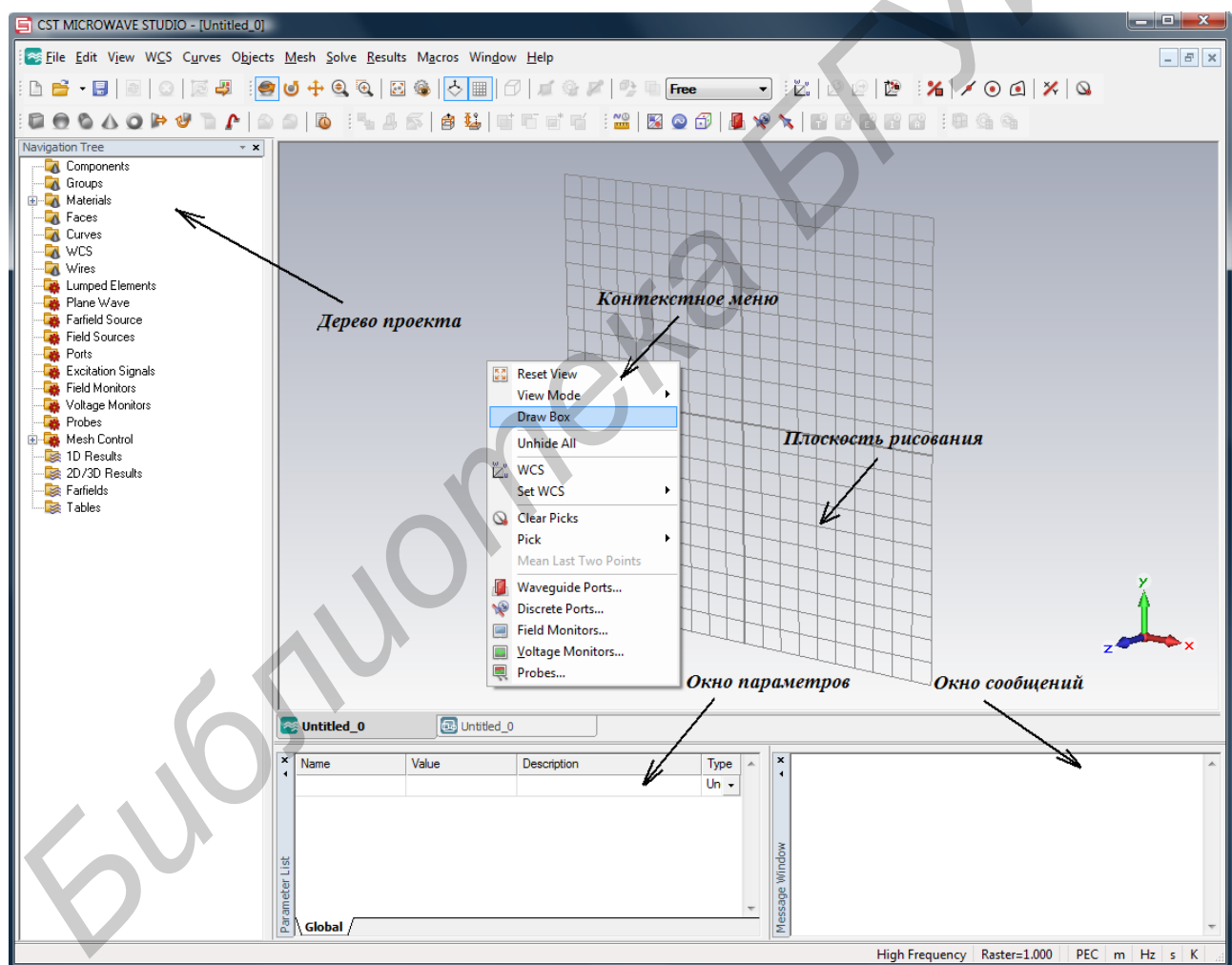


Рис. 1.3. Вид пользовательского интерфейса.

- *дерево проекта* (Navigation Tree), которое обеспечивает доступ ко всем частям проекта, например, моделируемым структурам или результатам расчета;
- *контекстное меню*, вызванное нажатием правой кнопки мыши и обеспечивающее удобный доступ к часто используемым командам, доступным

для данной части проекта. Содержание этого меню постоянно меняется в зависимости от объекта, с которым вы работаете;

– *плоскость рисования* — плоскость, на которой мы будем рисовать графические примитивы. Так как мышь работает только в двух проекциях даже когда мы разрабатываем трехмерные объекты, то все координаты должны быть спроектированы на плоскость рисования. Пользователь может изменить положение и ориентацию плоскости рисования.


В *окне параметров* отображается список определенных в проекте параметров (переменных) и их значения.


В *окне сообщений* отображается различная текстовая информация, например, выходные данные вычислительного модуля.

Остальные элементы пользовательского интерфейса являются стандартными для всех Windows-программ.

В только что созданном проекте перед созданием численной модели анализируемого объекта необходимо выполнить первоначальные настройки: установку единиц измерения и установку фонового материала.

## 1.5. Первоначальные установки

*Установка единиц измерения.* В программе имеется возможность задания единых единиц измерения для всего проекта. Выберите пункт меню Solve ⇨  Units. В появившемся окошке укажите в качестве единиц измерения длины – мм (Dimensions: mm), частоты – ГГц (Frequency: GHz). Нажмите кнопку «ОК».

*Установка фонового материала.* Новая можель появляется в пространстве, полностью заполненном идеально проводящим металлом. Для нашей модели сменим вещество окружающего пространства на вакуум с  $\epsilon = 1$ ,  $\mu = 1$  в меню Solve ⇨  Background Material. В пункте Material type выберите Normal.

## 1.6. Создание модели

Создание модели анализируемого объекта проиллюстрируем на примерах антенны в виде открытого конца прямоугольного волновода, рупорной микрополосковой и спиральной антенн. Первым примером является антенна в виде открытого конца прямоугольного волновода, общий вид которой приведен на рис.

1.4.



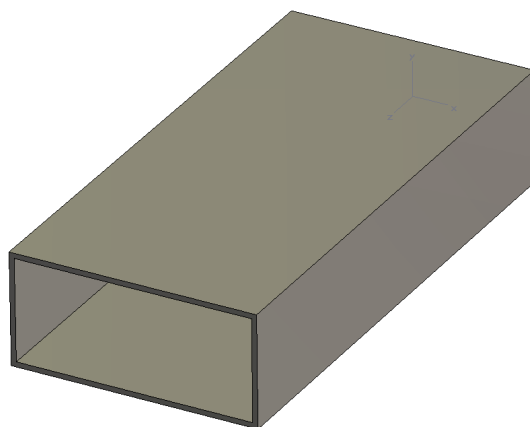


Рис. 1.4. Модель волновода

Для создание численной модели волновода в CST Microwaveoffice необходимо выполнить следующие операции: создать два пересекающихся параллелепипеда. Материал первого, большего, параллелепипеда задается идеальным проводником (PEC), материал второго – вакуум. Пересечение двух параллелепипедов образует стенки волновода, внутреннее пространство волновода представляет собой меньший параллелепипед. Алгоритм создания модели:

1. Выбрать в меню Objects  $\Rightarrow$  Basic Shapes  $\Rightarrow$  Brick
2. Нажать Shift+Tab для ввода координат первой точки основания параллелепипеда (X: минус 11,5; Y: минус 5).
3. Нажать Tab для ввода второй точки основания (X: 11,5; Y: 5).
4. Нажать Tab для ввода длины (Height: 50).
5. В появившемся окне в поле Material выберите PEC (Perfect Electric Conductor) и нажмите ОК.
6. Выбрать операцию Objects  $\Rightarrow$  Pick  $\Rightarrow$  Pick Face. Выделить два противоположных основания волновода, которые будут играть роль входа и выхода. После этого выделите в списке объектов ранее созданный параллелепипед.
7. Задать толщину стенок волновода. Выбрать пункт меню Objects  $\Rightarrow$  Shell Solid or Thicken Sheet. В появившемся окне выбрать Direction – Outside; Thickness: 0,5.

### 1.7. Задание частотного диапазона

Следующим шагом является установка диапазона частот. Для этого необходимо выбрать пункт меню Solve  $\Rightarrow$  Frequencies. Установите минимальную и максимальную границы частотного диапазона – соответственно 8 и 11 ГГц (рис. 1.5).

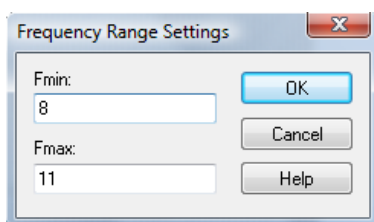




Рис. 1.5. Окно выбора частотного диапазона

## 1.8. Задание сторонних источников ЭМП

Для моделирования антенн могут применяться источники в виде возбужденных поверхностей (waveguide port) и сосредоточенные источники (lumped port). Для моделирования антенны в виде прямоугольного волновода будет использован источник в виде возбужденных поверхностей (waveguide port). Для его задания необходимо:

1. Выбрать **Objects** ⇒ **Pick** ⇒  **Pick Face**. Выделите тонкую грань на входе волновода.
2. Выбрать пункт меню **Solve** ⇒  **Waveguide Ports**.
3. Аналогично задать второй порт на противоположной грани.

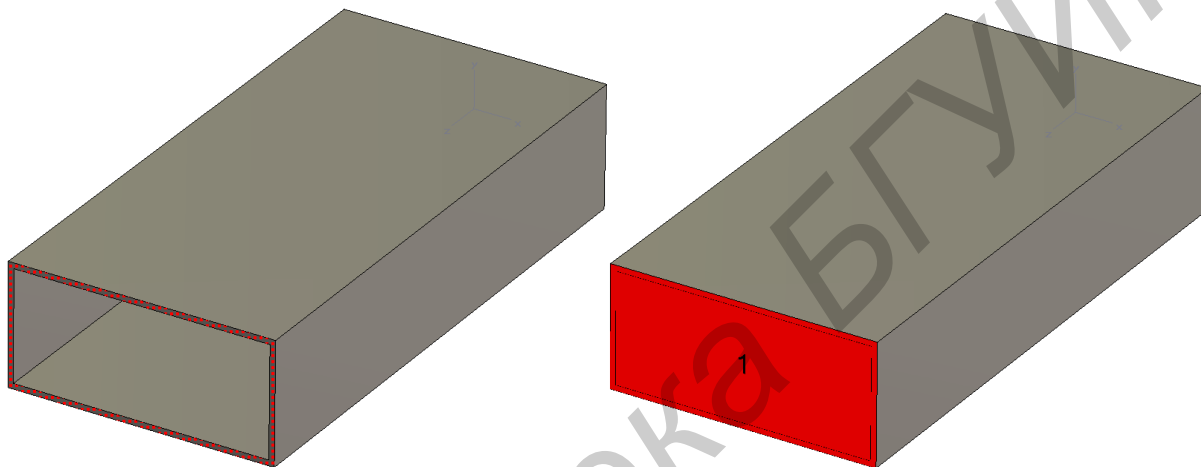





Рис. 1.6. Процесс задания порта

## 1.9. Установка граничных условий и параметров симметрии

Задание граничных условий является важным этапом составления модели антенны в любом из пакетов электродинамического проектирования. В CST Microwave Studio для задания граничных условий необходимо выбрать пункт меню **Solve** ⇒  **Boundary Conditions**. Установить во всех направлениях ( $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Z_{min}$ ,  $Z_{max}$ ) границу electric ( $E_t = 0$ ).

Нажать ОК. Перед запуском на расчет сохранить проект, нажав .

## 1.10. Запуск программы на моделирование

Выбрать **Solve** ⇒  **Transient Solver**. В выпадающем списке "Source type" выберем источник возбуждения – Port 1, число мод – Mode All. Нажать "Start" (рис.1.7).

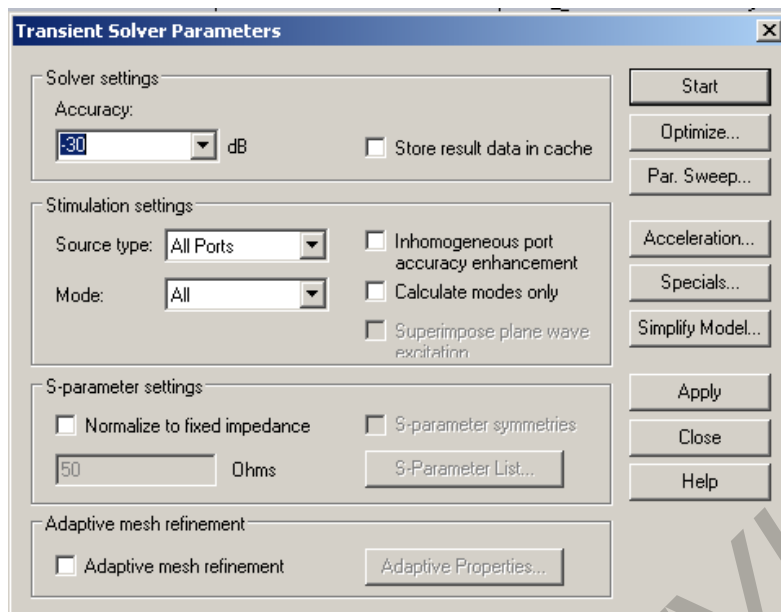


Рис. 1.7. Задание параметров решающей программы

### 1.11. Просмотр результатов моделирования

В дереве проекта откроем папку «1D Result» ⇒ |S|dB. В соответствии с названием здесь хранятся результаты расчета S-параметров в диапазоне частот. Для нашей модели это будут параметры S11 и S21. Выбрав один из этих параметров, мы увидим на экране график зависимости (рис. 1.8) для заданной ранее полосы частот.

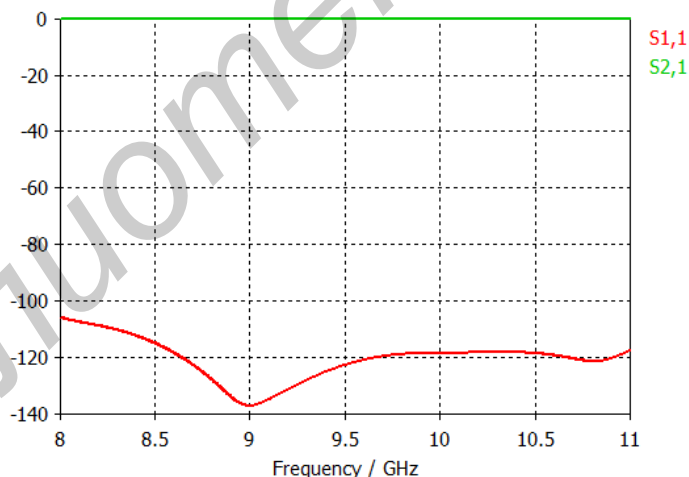


Рис. 1.8. График зависимостей S-параметров от частоты

Для пересчета S-параметров в KCB выберите пункт меню Result ⇒ S-parametr Calculations ⇒ Calculate VSWR. В ветке 1D Results дерева проекта появится папка VSWR с результатами расчета KCB (рис. 1.9).

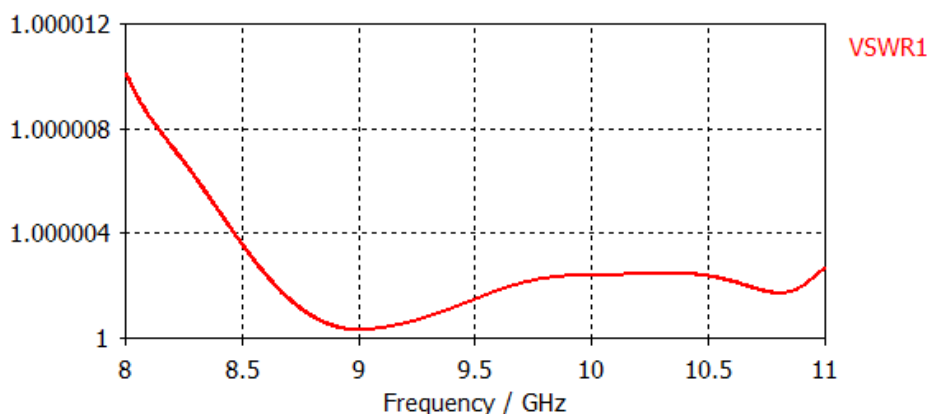


Рис. 1.9. График зависимости КСВ от частоты

## 1.12. Моделирование пирамидального рупора

Создадим модель пирамидального рупора со следующими размерами: сечение питающего волновода 23x10 мм, длина волновода 50 мм, угол раскрытия рупора 25°, высота рупора 50 мм.

## 1.13. Создание модели пирамидального рупора

Для создания модели необходимо в среде CST Microwave Studio необходимо:

1. Выбрать в меню Objects ⇨ Basic Shapes ⇨ Brick.
2. После нажатия Shift+Tab в появившемся окне ввести координаты первой точки основания параллелепипеда (X: минус 11,5; Y: минус 5).
3. Для ввода второй точки основания параллелепипеда нажать Tab и ввести координаты (X: 11,5; Y: 5).
4. Высота параллелепипеда вводится после нажатия Tab (Height: 50).
5. В появившемся окне в поле Material выбрать материал стенок волновода параллелепипеда, PEC (Perfect Electric Conductor).
6. По аналогии с п.п.1 - 5 создать параллелепипед соответствующий внутреннему заполнению волновода. Первая точка основания: (X: минус 12; Y: минус 5,5), вторая точка основания (X: 12; Y: 5,5), высота 50 мм. Материал заполнения волновода в этом случае выбрать vacuum.
7. Создание раскрытия рупора. Выделить в дереве объектов меньший параллелепипед и с помощью команды Objects ⇨ Pick ⇨ Pick Face выделить основание, соответствующее выходу волновода, которое будет расширяться. С помощью команды Objects ⇨ Extrude в появившемся окне в поле «Height» ввести высоту рупора – 50 мм, в графе «Taper» введем угол раскрытия рупора – 25° (рис. 1.10).
8. Аналогично п. 7 выделим грань второго (большого) параллелепипеда и применим к нему операцию Extrude с теми же параметрами.

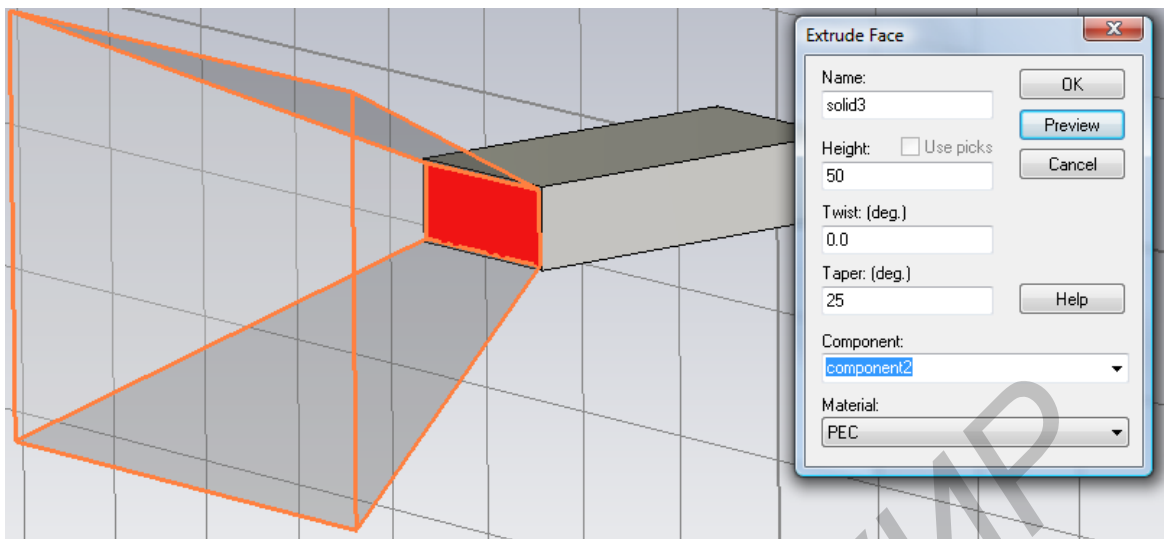


Рис. 1.10. Установка значения угла раскрытия рупора

9. Объединить меньший параллелепипед и меньшую призму, соответствующую раскрытию волновода. Для этого выделить их в дереве объектов и нажать клавишу «+» (либо команду Objects ⇔ Boolean ⇔ Add).

10. Аналогичным образом объединить оставшиеся большой параллелепипед и призму.

11. В результате проделанных операций получилось два объекта из разных материалов (PEC и vacuum). Для формирования рупора необходимо вычесть один из другого. Выделив в дереве объектов больший рупор, нажать клавишу «-» (либо команду Objects ⇔ Boolean ⇔ Subtract) и затем выделить меньший рупор. В результате получится рупор, изображенный на рис. 1.11.

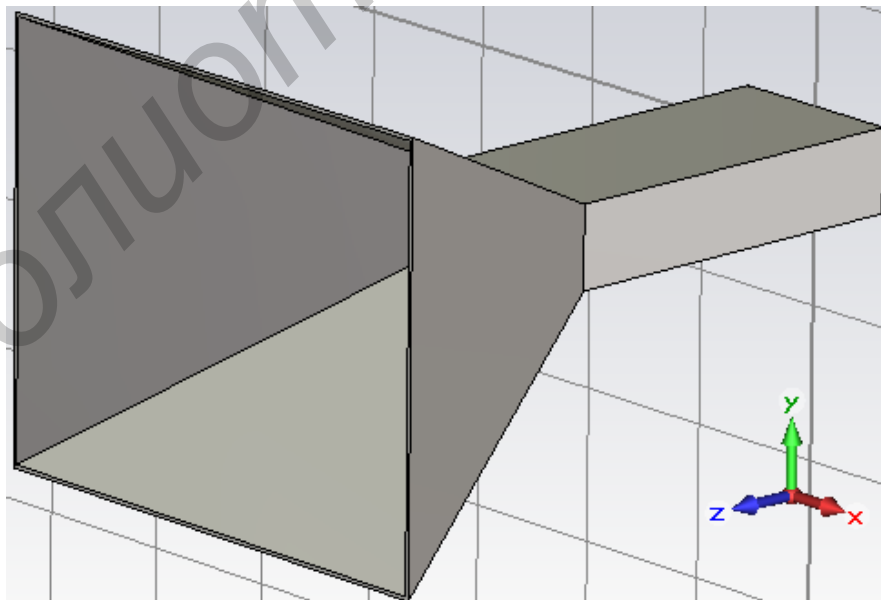




Рис. 1.11. Модель пирамидального рупора

## 1.14. Установка частоты, граничных условий и возбуждения


Как и в предыдущем проекте, рабочий диапазон частот 8–11 ГГц (см п.1.7), граничные условия: для всех направлений осей координат Open (в меню Solve ⇨  Boundary Conditions). Порт задается так же, как и в предыдущем примере.

## 1.15. Расчет структуры поля и диаграммы направленности

Для анализа характеристик излучения антенны необходимо задать дополнительные, не установленные по умолчанию, параметры процесса расчета, а именно:

1. Выбрать пункт Solve ⇨  Field Monitor.
2. В появившемся окне установить тип анализируемых данных: E-поле (Type – E-field), в разделе Specification выбрать частоту 9,5 ГГц, нажать для добавления в список анализируемых данных.
3. В том же окне выбрать тип: H-поле (Type – H-field), частоту расчета 9,5 ГГц, нажатием Apply добавить в список анализируемых данных.
4. Для расчета диаграммы направленности выбрать Farfield/RCS, частоту расчета 9,5 ГГц, нажать Apply и закрыть окно Monitor. Сохранить проект.

## 1.16. Запуск программы на моделирование

Выбрать Solve ⇨  Transient Solver. В выпадающем списке «Source type» выбрать источник возбуждения – Port 1, число мод – Mode All. Нажмем «Start».

## 1.17. Просмотр результатов моделирования

*Просмотр структуры H-поля.* В дереве проекта выбрать папку 2D/3D Results – H-Field – h-field ( $f = 9,5$ ). На экране отобразится трехмерное изображение соответствующего распределения (рис. 1.12).

*Вывод диаграммы направленности.* В дереве проекта выбрать папку Farfields – farfield ( $f = 9,5$ ). На экране отобразится трехмерная диаграмма направленности (рис. 1.13).

CST MWO позволяет рассчитать диаграмму направленности (в том числе для составляющих  $E_{\theta}$  и  $E_{\varphi}$ ), фазовую и поляризационные диаграммы. Для изменения типа диаграммы необходимо выбрать один из пунктов папки Farfields – farfield ( $f = 9,5$ ) дерева проекта.

Изменение способа представления диаграммы направленности (ДН) производится с помощью пункта Farfield Plot Properties контекстного меню, вызываемого нажатием правой кнопки мыши в области отображения.

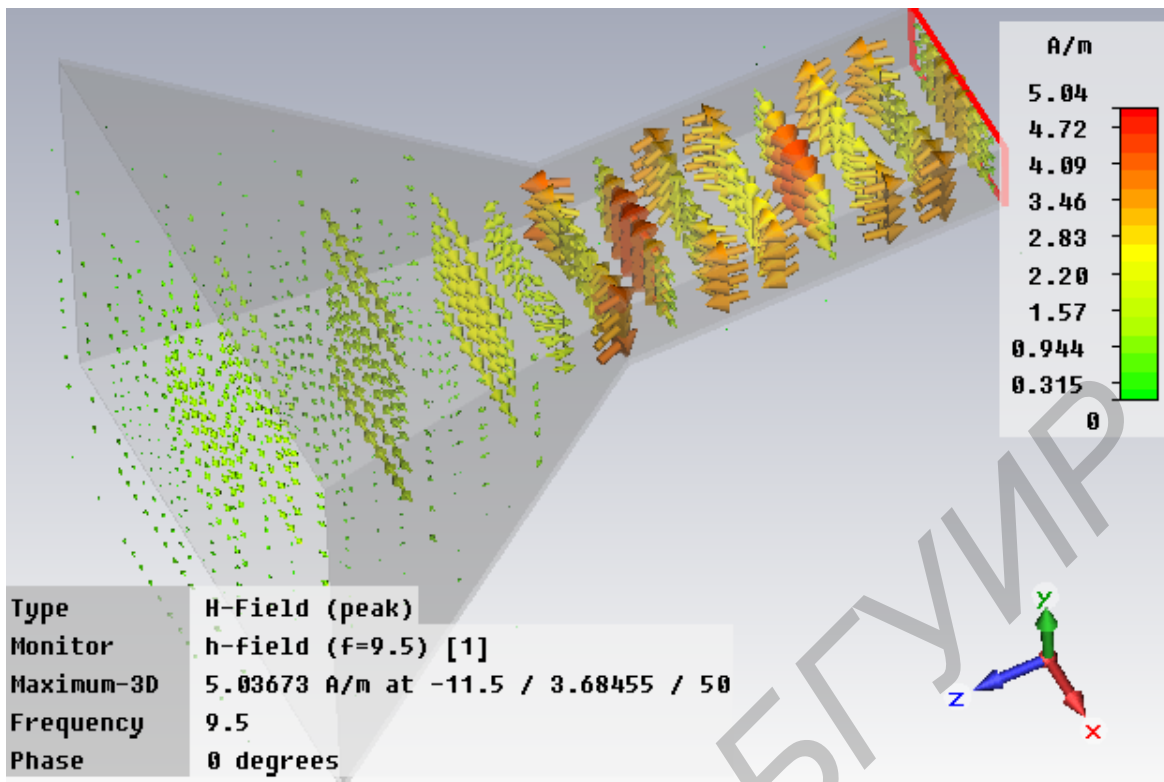


Рис. 1.12. Структура H-поля в пирамидальном рупоре

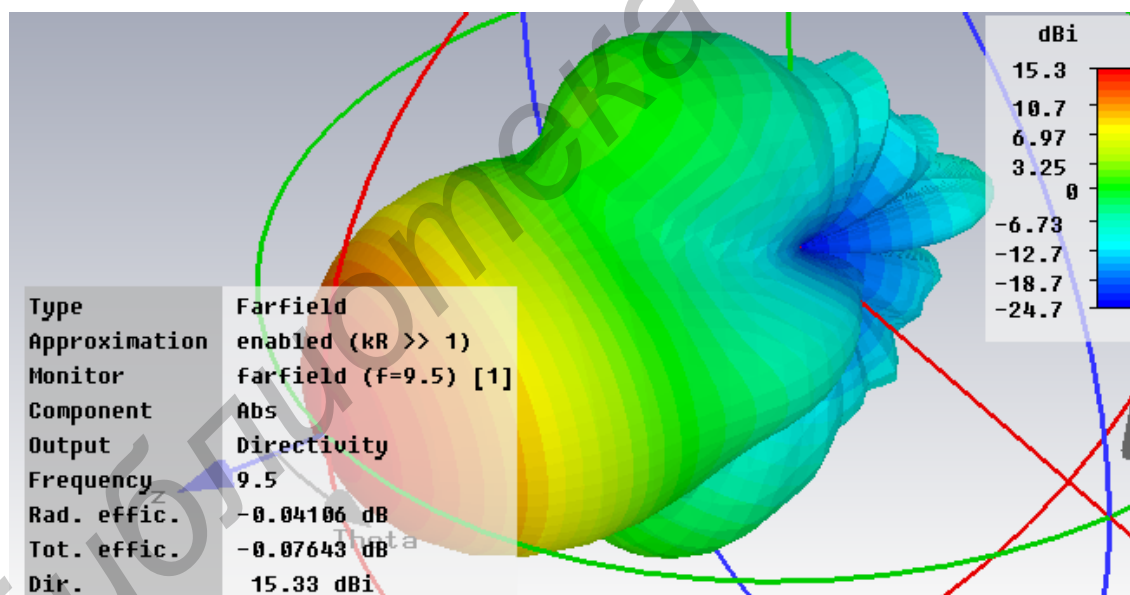


Рис.1.13. Диаграмма направленности рупора

Диаграмма направленности рупора (рис. 1.13) может быть представлена в нескольких видах (вкладка General окна Farfield Plot):

- полярная система координат (Polar);
- прямоугольная система координат (Cartesian);
- двумерный вид (2D);
- трехмерная система координат (3D).

Для диаграммы направленности (ДН), построенной в прямоугольной системе координат, доступен выбор угла, определяющего сечение, для которого строится ДН и шаг (поле Step) графика.

По умолчанию ДН строится в диапазоне  $0 - 180^\circ$ . Для построения ДН в диапазоне  $0 - 360^\circ$  нужно выбрать галочку «Plot range for polar angles 360 degree». Для того, чтобы сместить положения угла  $0^\circ$  в центр графика, следует выбрать галочку «Plot range  $-180...180$  degree».

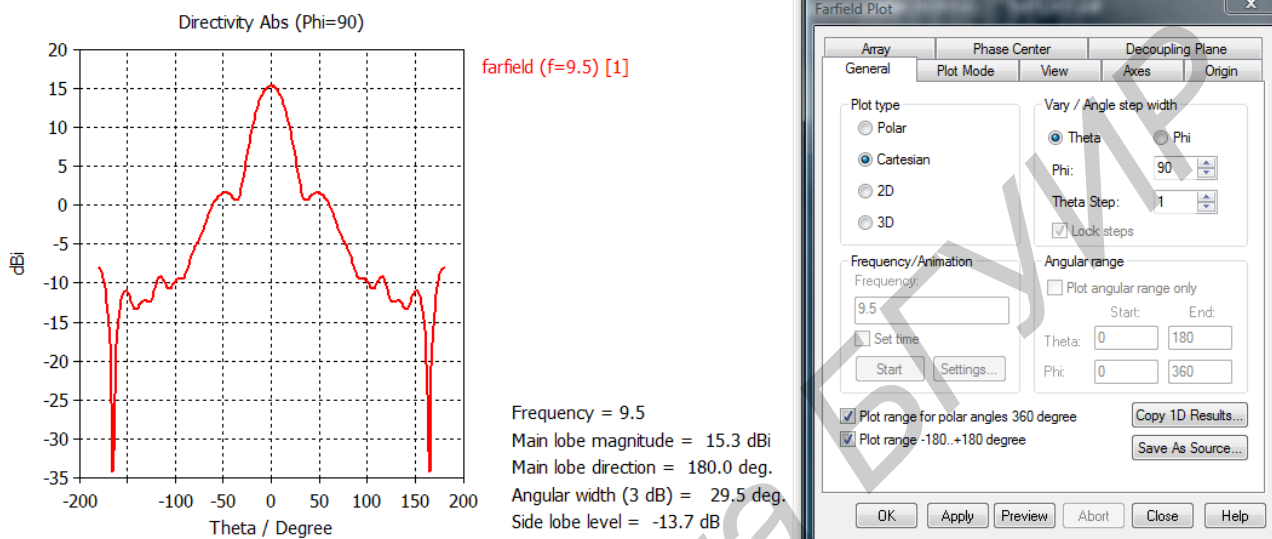


Рис. 1.14. Настройка способа отображения ДН

В правом нижем углу графика ДН указываются ее основные параметры:

- frequency – частота;
- main lobe magnitude – уровень главного максимума ДН;
- main lobe direction – направление главного максимума;
- angular width (3dB) – ширина главного лепестка ДН;
- side lobe level – уровень боковых лепестков.

ДН может быть выведена в линейном или логарифмическом масштабе в зависимости от положения переключателя Linear scaling вкладки Plot Mode. Для приведения графика ДН к нулю нажмите «Use current max» и «Apply».

### 1.18. Экспорт результатов моделирования в файл

Все полученные в процессе моделирования результаты могут быть сохранены в файл для дальнейшего анализа. Экспорт ДН производится в файл формата txt. Для экспорта нужно зайти в ветку Farfields дерева проекта и выбрать Export – Plot Data ASCII и указать имя сохраняемого файла. Полученный файл будет иметь структуру представленную в таблице.



### Структура файла ДН

Theta [deg.]	Phi [deg.]	Abs (Gain) [dB]	Abs (Theta) [dB]	Phase (Theta) [deg.]	Abs(Phi) [dB]	Phase (Phi) [deg.]	Ax.Ratio[dB]
-180	-90	2,873	2,873	261,434	-50,831	81,434	6,845
-175	-90	2,103	2,103	82,769	-50,876	262,136	6,845
-170	-90	-0,3367	-0,3367	87,889	-60,013	264,405	6,845
-165	-90	-4,794	-4,794	102,213	-60,243	269,186	6,845
-160	-90	-10,021	-10,021	143,807	-60,554	277,617	6,845

Аналогичным образом можно экспортировать информацию о S, Y, Z -параметрах, КСВ.

Файлы с полученными данными могут быть импортированы в программу Microsoft Excel для построения графиков. После запуска Excel выберем в меню: Данные ⇨Импорт внешних данных ⇨Импортировать данные.

### 1.19. Моделирование излучателя с круговой поляризацией

Применение антенн с круговой поляризацией требуется в тех случаях, если трудно заранее определить требуемую ориентацию антенны с линейной поляризацией. Наиболее типичные примеры такой ситуации – мобильная спутниковая связь с подвижными объектами, системы радионавигации.

Одним из вариантов антенны с круговой поляризацией является круглый микрополосковый излучатель (рис. 1.15) со смещенной точкой запитки и вырезами, предназначенными для возбуждения двух взаимортогональных колебаний со сдвигом фаз  $90^\circ$ .

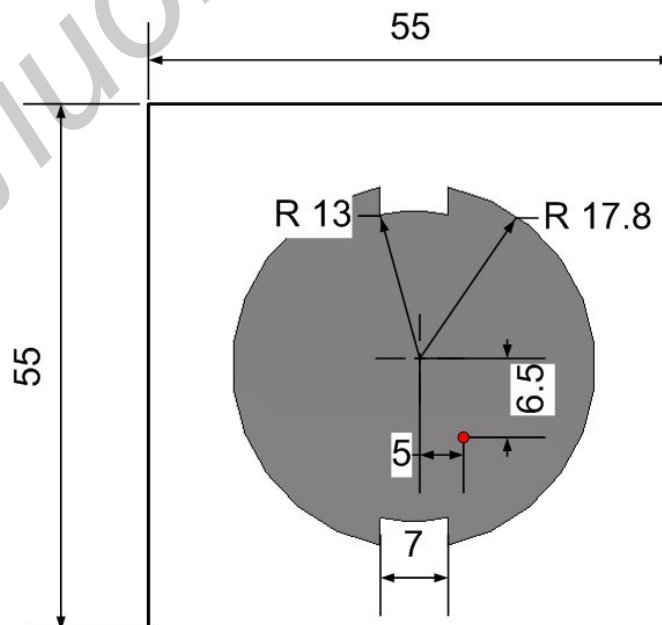


Рис.1.15. Модель микрополоскового излучателя

Настройка такого излучателя на резонансную частоту производится путем изменения ширины и глубины выреза, значения координат точки питания.

Геометрические параметры излучателя: размер печатной платы – 55x55мм, радиус внешней окружности 17,8 мм, радиус внутренней окружности – 13мм, ширина выреза –7мм, смещение точки возбуждения относительно центра – (минус 6,5; минус 5) мм, толщина диэлектрика –5 мм, диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon = 3,27$ . Рабочая частота –2,35 ГГц.

## 1.20. Создание модели микрополоскового излучателя

Для создания модели микрополоскового излучателя, конструкция которого приведена на рис. 1.15, необходимо:

1. Создать внешний цилиндр. Выбрать в меню Objects  $\Rightarrow$  Basic Shapes  $\Rightarrow$  Cylinder.

2. После нажатия Shift+Tab ввести координат центра основания цилиндра (X: 0, Y: 0).

3. После нажатия Tab для ввода радиуса и в поле Radius ввести «r1». После нажатия на кнопку ОК появится дополнительное окно создания новой переменной. В поле Value ввести значение радиуса: 17,8 (без указания единиц измерения). В поле Description можно внести краткое описание создаваемой переменной.

4. Аналогичным образом ввести высоту цилиндра, равную толщине металлизации (Height: 0,035).

5. После нажатия Tab ввести размер внутреннего радиуса (Radius: 0)

6. В появившемся окне в поле Material выбрать PEC.

7. Создать еще один цилиндр с центром в начале координат (0,0), радиусом 13мм и высотой 0.035мм. Радиус задать, создав еще одну переменную r2.

8. Создать вырезы в виде щели. Для этого выбрать в меню Objects  $\Rightarrow$  Basic Shapes  $\Rightarrow$  Brick

9. После нажатия Shift+Tab ввести координаты первой точки основания параллелепипеда (X: минус 30; Y: минус dp/2). В окне создания переменной dp указать 7. Эта переменная будет отвечать за ширину выреза.

10. После нажатия Tab ввести вторую переменную второй точки основания (X: 30; Y: dp/2).

11. Нажать клавишу Tab и ввести высоту (Height: 0.035)

12. Для формирования вырезов созданные прямоугольники необходимо вычесть из большего цилиндра. Для этого необходимо выделить цилиндр в дереве объектов, нажав клавишу « $\leftarrow$ » (либо выбрать команду Objects  $\Rightarrow$  Boolean  $\Rightarrow$  Subtract), выделить параллелепипед и нажать «Enter».

13. Далее необходимо объединить получившийся объект с меньшим цилиндром. Выделив их в дереве объектов, нажав клавишу « $\rightarrow$ » (либо командой Objects  $\Rightarrow$  Boolean  $\Rightarrow$  Add). Моделирование излучающего слоя завершено.

14. Создать диэлектрическую подложку для излучателя. Для этого в проект добавляем Box с размерами 55x55мм и высотой минус 5мм (для того, чтобы диэлектрик располагался ниже слоя металла).

15. Задать материал диэлектрика. В появившемся окне с параметрами параллелепипеда в списке Material выбрать Load from Material Library. В окне библиотеки материалов указать Rogers TMM 3 (lossy) с диэлектрической проницаемостью 3,27.

16. Создать в модели нижний слой металлизации (землю). Нажать клавишу «F» и выделить нижнюю грань параллелепипеда. Выбрать команду Objects  $\Rightarrow$  Extrude. В окне Extrude Face указать толщину Height: 0,035. В списке материалов указать PEC.

17. Создать внутреннюю жилу питающего коаксиального волновода. Для этого необходимо добавить в проект цилиндр с центром в точке (X: x0; Y: y0). Переменной x0 задать значение минус 6.5, переменной y0 – минус 5. Высота 8мм.

18. Добавить диэлектрик коаксиального волновода. Создать цилиндр с центром в точке (X: x0, Y: y0). Высота 3мм. Сместим получившийся цилиндр под диэлектрик. Для этого, выделить цилиндр в списке объектов, выбрать команду Objects  $\Rightarrow$  Transform. В поле Translation vector указать Z: минус 8. В списке материалов указать Teflon ( $\epsilon = 2,1$ ). Сделать копии объектов жилы и диэлектрика последовательно выделяя их в списке объектов и нажимая сочетание «Ctrl+C» и «Ctrl+V».

19. Вычесть копию центральной жилы из диэлектрической подложки с помощью команды Subtract.

20. Вычесть копию диэлектрика коаксиала из нижнего слоя металлизации (земли).


21. Создать еще одну копию центральной жилы и вычесть ее из диэлектрика коаксиального волновода.

22. Создать внешнюю оплетку коаксиального кабеля. Для этого выделить внешнюю грань цилиндра диэлектрика коаксиала и выполнить команду Objects  $\Rightarrow$  Extrude. В окне Extrude Face указать толщину Height: 0,035. В списке материалов укажем PEC.

23. Выделить нижнюю грань оплетки коаксиального волновода и назначить на нее волноводный порт.


### 1.21. Установка частоты, граничных условий

1. Выбрать пункт меню Solve  $\Rightarrow$   $\sim$  Frequencies. Установить диапазон частот 1–4 ГГц.


2. Задать граничные условия. Для всех направлений осей координат задать Open Add space (в меню Solve  $\Rightarrow$   Boundary Conditions).

3. Выбрать пункт Solve  $\Rightarrow$  Background Material и указать Material type: Normal.

## 1.22. Расчет диаграммы направленности

Выбрать пункт Solve ⇨  Field Monitor. Выбрать Farfield/RCS, частоту расчета 2.35 ГГц, нажатием Apply добавить в лист задания для расчета и закрыть окно Monitor.

## 1.23. Настройки сетки разбиения

Одним из важных параметров, влияющих как на точность, так и на скорость решения, является сетка (Mesh) конечных элементов. Для ее настройки необходимо выбрать пункт меню Mesh ⇨  Global Mesh Properties. Задать Lines per wavelength – 10, Lower mesh limit – 5, Mesh line ratio limit – 20. После нажатия на кнопку Specials откроется окно Special Mesh Properties, во вкладке General пункт Refine at PEC / lossy metal edges by factor установить равным 6.

Для настройки сетки разбиения можно использовать следующие параметры сетки:

*Lines per wavelength* (число линий сетки на длине волны). Это значение связано с длиной волны верхнего предела частотного диапазона моделирования. Оно определяет минимальное количество линий сетки вдоль каждой координатной оси, которые используются для расстояния, равного этой длине волны. Этот параметр имеет сильное влияние на качество результатов и на время расчета. Увеличение этого числа приводит к более высокой точности, но также увеличивает общее время расчета. Хорошим компромиссом между временем расчета и достижимой точностью является заданное значение по умолчанию 10.

*Lower mesh limit* (максимальный шаг сетки). Параметр позволяет определить максимальный шаг сетки, которая будет использоваться для создания сетки, независимо от установки в линиях на длине волны. Максимальная ширина шага сетки определяется путем деления диагонали наименьшей грани ограничительной рамки расчетной области на это число.

*Mesh line ratio limit* (предельное соотношение шагов сетки) При выборе сетки важным является не только абсолютное число линий сетки, но и расстояние между двумя соседними линиями. Наименьшее расстояние, существующее в сетке, напрямую влияет на ширину шагов во времени используемых в моделировании. Чем меньше минимальное расстояние, тем меньше шаг во времени и больше времени требуется для имитации одного периода электромагнитного поля.


Для некоторых моделей автоматический генератор сетки создает сетку линий, которые расположены очень близко друг к другу. Для очень точного моделирования такой выбор сетки может быть необходимым, но в результате время расчета может стать неприемлемым. Чтобы избежать такой ситуации необходимо определить это соотношение, что заставит модуль automesh не превышать абсолютное соотношение между самым большим и наименьшим рас-

стоянием между линиями сетки. Часто значение по умолчанию 10 является хорошим компромиссом.

Однако следует иметь в виду, что эта настройка выполняется для управления процессом построением сетки. Если вы расположите две «жесткие точки» (fixpoints) слишком близко друг к другу, то сетка линий не построится.

*Smallest mesh step* (наименьший шаг сетки). Устанавливает наименьший шаг сетки, определяемый для геометрии структуры. В случае, если в настройках локальной сетки (Local Mesh Properties) указано меньшее значение или если требуется уменьшение шага сетки из-за более короткой длины волны в диэлектрических материалах, то будет использовано требующееся для расчета минимальное значение шага.

## 1.24. Запуск программы на моделирование

Выбрать Solve ⇒  Transient Solver. В выпадающем списке "Source type" выберем источник возбуждения - Port 1, число мод - Mode All. Нажмем "Start".

## 1.25. Просмотр результатов моделирования

Для построение ДН в прямоугольной системе координат выбрать Farfields – farfield (f = 2,35) – Right Polarisation. Далее необходимо нажать правой кнопкой мыши и указать Farfield Plot Properties. Выделить Plot type – Cartesian. Нажать Apply (рис.1.16–1.18)

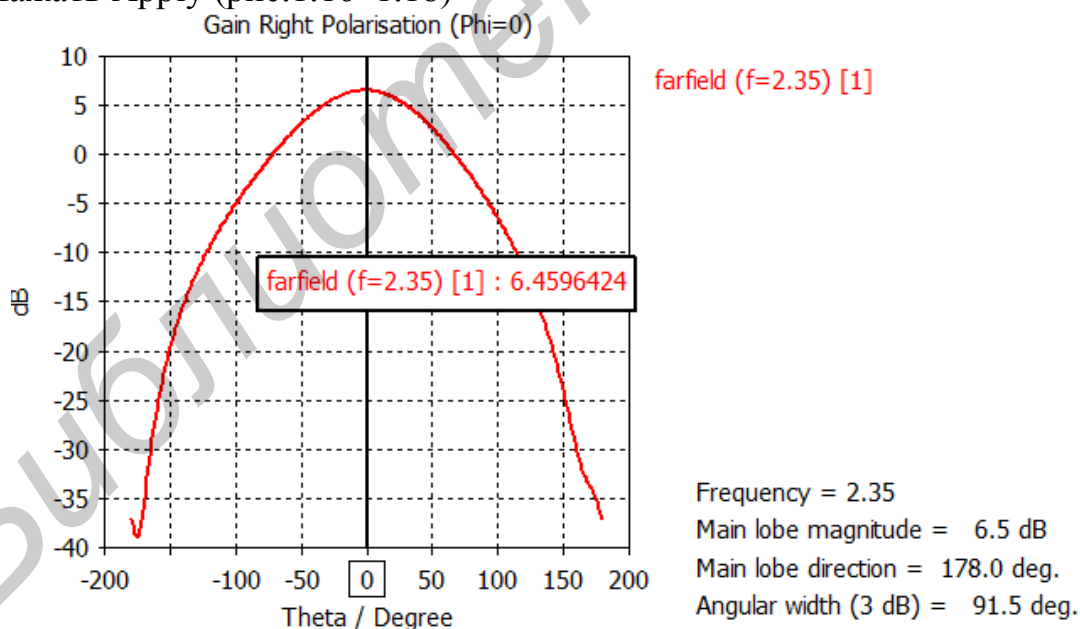


Рис. 1.16. Диаграмма направленности для правой круговой поляризации (частота 2,35 ГГц)

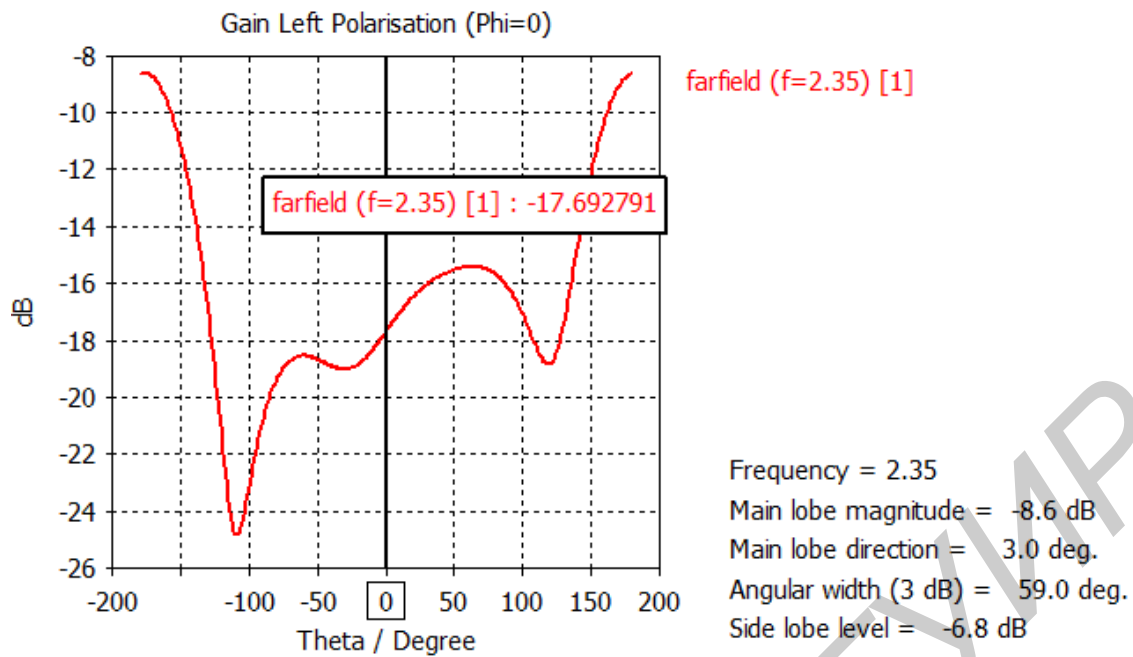


Рис.1.17. Диаграмма направленности для левой круговой поляризации (частота 2,35 ГГц)

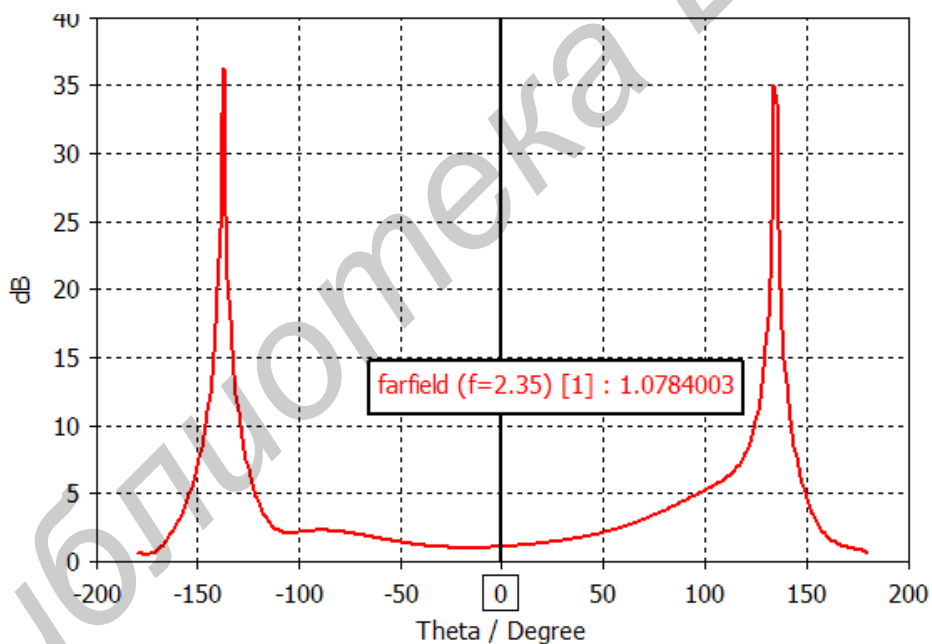


Рис. 1.18. Коэффициент эллиптичности

На центральной частоте диапазона (2,35 ГГц) развязка между правой и левой круговыми поляризациями в направлении максимума излучения составляет 24 дБ, а коэффициент эллиптичности – 1,08 дБ (рис. 1.16 – 1.17).

Расчет коэффициента эллиптичности (Axial Ratio) CST производится в соответствии со стандартом IEEE по формуле:

$$AR = \sqrt{\frac{|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_1^2 + E_2^2|}{|E_1|^2 + |E_2|^2 - |E_1^2 + E_2^2|}}$$

где векторы  $|E_1|$  и  $|E_2|$  – большая и малая оси поляризационного эллипса.

Круговой поляризации соответствует значение  $AR = 1$  (0 дБ), для линейной поляризации  $AR \rightarrow \infty$ .

На рис. 1.19 представлена зависимость КСВ излучателя от частоты.

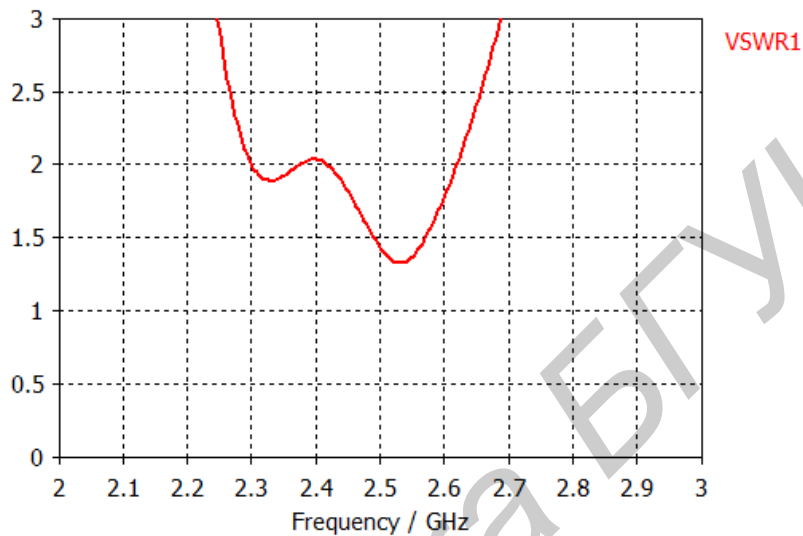


Рис. 1.19. Зависимость КСВ от частоты

### 1.26. Моделирование спиральной антенны

Создание модели спиральной антенны, общий вид которой приведен на рис. 1.20, после первоначальных установок единиц измерения и частотного диапазона выполняется в следующем порядке:

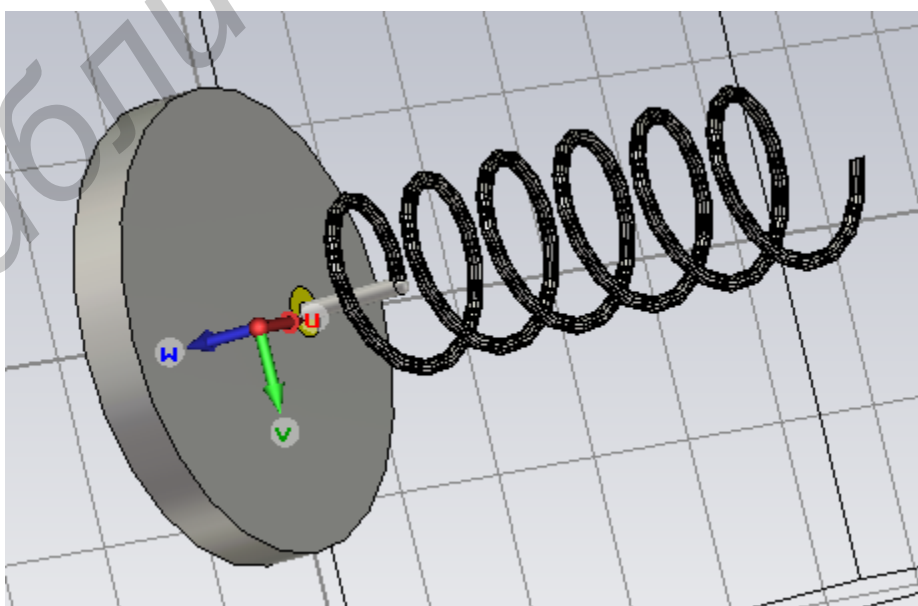




Рис. 1.20. Модели спиральной антенны

1. Создается профиль проводника спирали. Для этого нужно нажать  и  или Curves ⇨ New Curve ⇨ Circles и ввести следующие данные о координатах центра профиля проводника и его радиуса (рис.1.21).

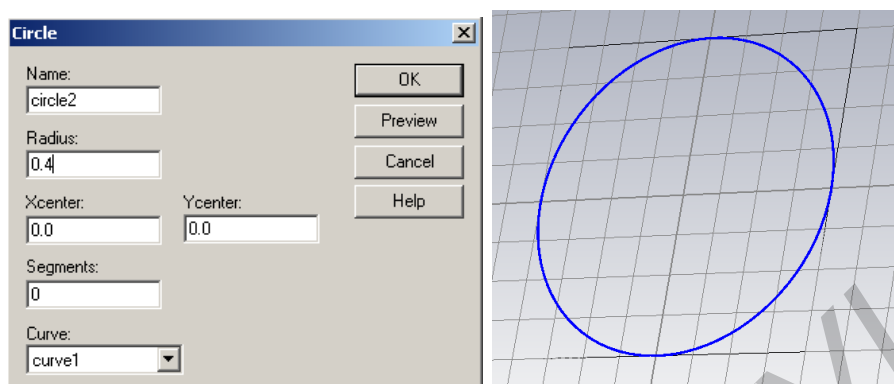



Рис.1.21. Создание профиля проводника

2. Заполнить профиль проводника. Нажать  или Curves ⇨ Cover Planar Curve и выбрать в рабочей области профиль проводника (рис. 1.22).

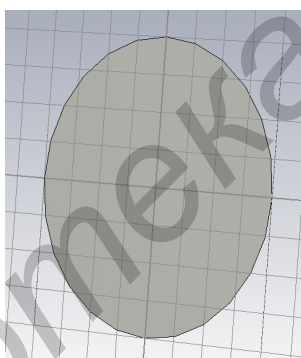


Рис.1.22. Вид профиля проводника после заполнения

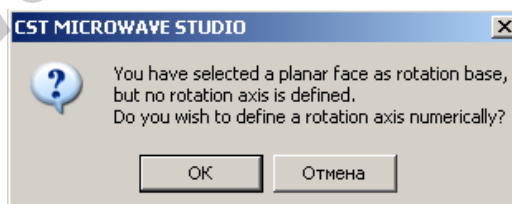





Рис. 1.23. Приглашение создания оси вращения

3. Выделить образованную плоскость, активируя  или Objects⇨Pick⇨Pick Face и двойным щелчком выделить любую точку на внутри образованной поверхности.

4. Вращение выделенной поверхности. Не снимая выделения с вращаемой поверхности, нажать  или также Objects⇨Rotate. При первом вращении необходимо задать ось вращения, о чем будет сообщаться в всплывающем окне



(рис. 1.23). При нажатии клавиши Esc появится окно численного задания координат двух точек оси вращения (рис. 1.24). Повторное нажатие пиктограммы  вызовет окно (рис. 1.25) в котором вводятся параметры вращения: угол поворота в градусах ( $6 \cdot 360$  – 6 полных витков), шаг витка ( $6 \cdot 4,77$  – 6 витков с шагом 4,77); коэффициент увеличения радиуса вращения [1].

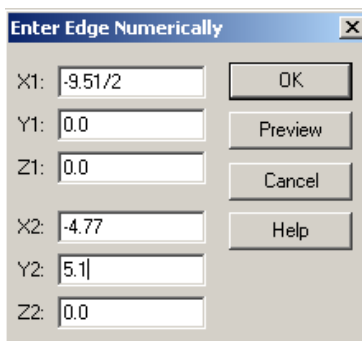


Рис. 1.24 Задание оси вращения

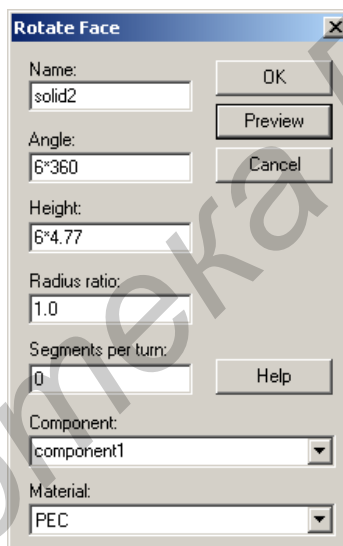






Рис.1.25. Ввод параметров вращения поверхности

5. Полученную спираль дополнить продольным проводником, соединяющим центральный проводник коаксиального кабеля и спираль. Для этого с помощью инструмента  или Objects  $\Rightarrow$  Pick  $\Rightarrow$  Pick Circle Center двойным щелчком на контуре проводника спирали выделить центр окружности.
6. В выделенную точку установить локальную систему координат WUV нажатием пиктограммы .
7. Вращение локальной системы координат осуществляется нажатием пиктограммы . В появившемся окне необходимо ввести углы поворота вокруг каждой оси. В рассматриваемом примере поворот осуществляется вокруг оси U на  $90^\circ$ .

8. Проводник, соединяющий спираль и центральный проводник коаксиального кабеля добавляется нажатием  или Objects⇒Basic Shapes⇒Cylinder. В появляющемся окне ввести координаты цилиндра, описывающего проводник (рис. 1.26).

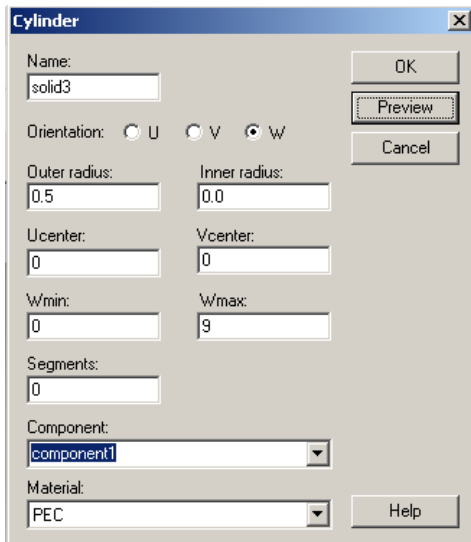


Рис.1.26 Окно ввода параметров цилиндра

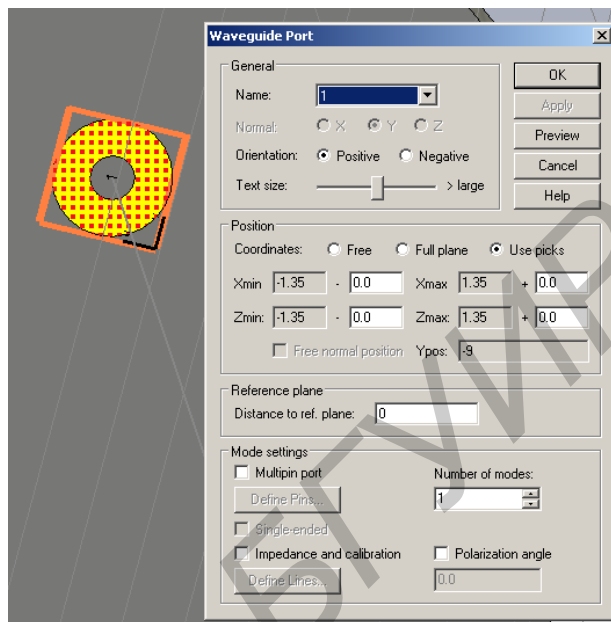


Рис. 1.27 Окно ввода параметров порта

9. Аналогичным образом задаются параметры остальных элементов антенны: металлического экрана с отверстием для коаксиального кабеля, внутреннее диэлектрическое заполнение коаксиального кабеля.

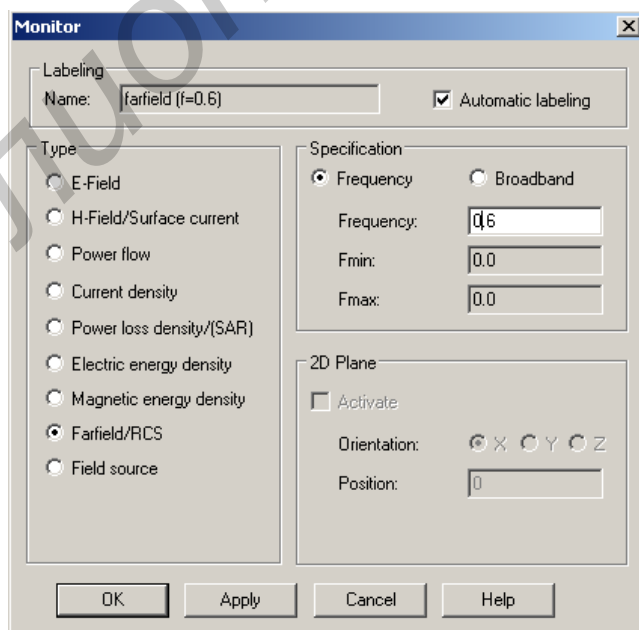





Рис. 1.28 Окно задание параметров отображения поля и ДН

10. Перед моделированием параметров антенны задается точка возбуждения антенны (Port). Для этого с помощью инструмента  выделяется поверхность внутренней части коаксиального проводника и с помощью инструмента  выделенная поверхность обозначается как поверхность содержащая сторонние источники (рис. 1.27).

11. С помощью инструмента Solve $\leftrightarrow$ Field Monitor  определяется задание для моделирования диаграммы направленности (рис. 1.28).

12. Моделирование во временной области начинается после нажатия  и задания параметров процесса моделирования (рис. 1.29).

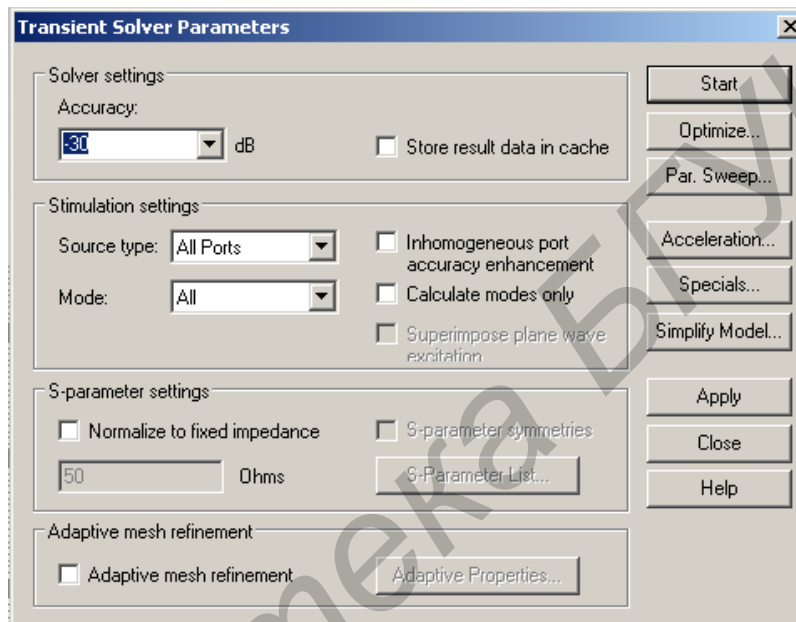


Рис. 1.29. Окно задания параметров процесса моделирования

13. Анализ результатов моделирования выполнить аналогичным образом как и в ранее описанных примерах.

## 2. Моделирование антенн с помощью САПР FEKO

Кроме рассмотренной ранее САПР CST Suite существует еще одна САПР для моделирования характеристики параметров антенн, не уступающая первой по функциональности точности моделирования. Такой САПР является программный пакет FEKO™ компании EMSS-SA (ЮАР). В настоящем разделе приводится описание пользовательского интерфейса и возможностей программы FEKO на примере моделирования директорной антенны. Более полная документация поставляется непосредственно с программой на английском языке [2,7]. Также в этом разделе приводится сравнение результатов расчета характеристик и параметров директорной антенны в режиме приема и передачи, полученных в программе FEKO и в узкоспециализированных программах, написанных на кафедре АиУСВЧ БГУИР.

### 2.1. Пользовательский интерфейс

В отличие от аналогичных пакетов (HFSS, CST Microwave studio) пакет FEKO в своем составе содержит несколько компонентов, каждый из которых выполняет свою функцию:

- CADFEKO – компонент для создания геометрии, «меширования» (создания сетки), установки параметров модели (частоты, окружающего пространства, симметрии, и т.д.), целей моделирования (ДН, импеданс и т.д), параметров оптимизации;
- Дополнительные электромагнитные параметры и требования могут быть установлены также в компоненте EDITFEKO, который представляет собой редактор скриптов. Данный инструмент очень гибок и позволяет создавать геометрию и установки «с нуля» (без использования CADFEKO), имеет все возможности, которые доступны в CADFEKO, а также другие, использование которых в последнем не предусмотрено;
- Интерфейс POSTFEKO используется для предпросмотра установок созданной модели и для просмотра результатов моделирования;
- FEKO – непосредственно вычислительное ядро программы;
- PREFEKO – компонент, отвечающий за создания сетки и подготовки геометрии и установок модели для вычислительного ядра;
- ADAPTFEKO – средство, позволяющее более тщательно моделировать частотные зависимости параметров вблизи резонансов путем адаптации шага сетки частоты и методов интерполяции;
- OPTFEKO – компонент, служащий для оптимизации модели по заданным критериям;
- TIMEFEKO – инструмент, позволяющий решать задачи электродинамики во временной области;

## 2.2. Создание проекта

Выше было упомянуто, что создание модели возможно двумя способами:

- использованием CADFEKO;
- использованием EDITFEKO.

Первый способ наиболее простой (далее он и будет использован), обладает достаточными инструментами, в то время как второй способ предоставляет некоторые дополнительные возможности.

### Примечание:

*Хотя вопросы оптимизации не рассматриваются в данном пособии, хотелось бы отметить следующее: в версиях FEKO < 5.3 оптимизация задавалась исключительно в компоненте EDITFEKO (т.е. CADFEKO данной возможности не имело) на основании переменных параметризированной геометрии. Начиная с версии 5.3, оптимизацию перенесли в CADFEKO, что с одной стороны упростило данный процесс, однако избавило от необходимости оптимизировать модель «из-под» EDITFEKO. Данный ход разработчиков не вполне понятен.*

## 2.3. Создание геометрии в CADFEKO

Первый шаг в каждом проекте – создание конструкции модели. Конструкция модели может создаваться как в компоненте CADFEKO, так и в EDITFEKO. Далее будет использоваться первый способ. CAD-модель хранится в файле с расширением \*.cfx. Чтобы начать работу с CADFEKO в Microsoft Windows, достаточно выбрать:

*Пуск -> Программы -> FEKO -> CADFEKO.*

С целью быстрого ознакомления с процессом моделирования откроем готовый проект и разберемся в деталях.

Из главного меню выберем *File* → *Open* и в папке готовых проектов по следующему адресу (если путь при установке не изменялся):

*Program Files\Feko\_5.4examples\GetStarted\_models\Project1-Rectangular\_Horn\_Antenna* выбираем файл *horn.cfx*. После открытия увидим геометрию рупора в рабочей области окна.

В окне программы видно несколько панелей инструментов, содержащих команды для создания геометрии, ее модификации, установки параметров модели, целей моделирования.

Панель инструментов непосредственно над окном 3D вида управляет свойствами, которые относятся к этому окну: установки рабочей области, установки видимости различных деталей геометрии.

Выше расположена панель инструментов, элементы которой определяют, какие элементы станут активными при клике мышью в рабочей области (например, грани, ребра и т.д.).

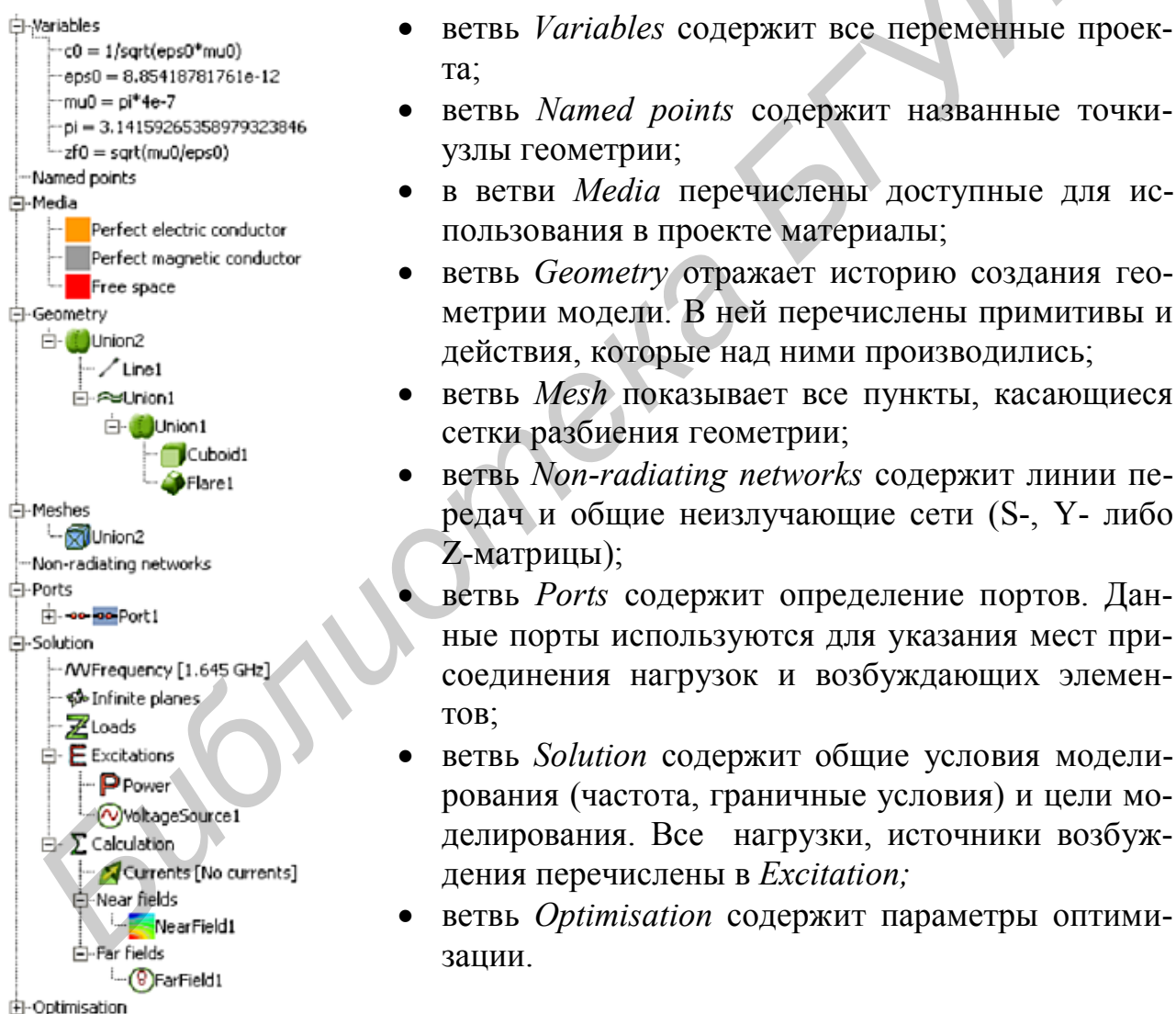
В левой части окна программы находится *дерево проекта (дерево содержимого)*, ниже его находится *дерево деталей*.

Назначение всех кнопок приведено в оригинальном руководстве *FEKO User's Manual*. Однако назначение некоторых самых необходимых и часто используемых кнопок будет пояснено ниже.

## 2.4. Дерево проекта

Дерево проекта находится в левой части окна программы и содержит историю процесса создания геометрии, а также результаты меширования, установки параметров модели, цели моделирования, цели оптимизации.

Типичное дерево проекта можно увидеть на рис. 2.1:



- ветвь *Variables* содержит все переменные проекта;
- ветвь *Named points* содержит названные точки-узлы геометрии;
- в ветви *Media* перечислены доступные для использования в проекте материалы;
- ветвь *Geometry* отражает историю создания геометрии модели. В ней перечислены примитивы и действия, которые над ними производились;
- ветвь *Mesh* показывает все пункты, касающиеся сетки разбиения геометрии;
- ветвь *Non-radiating networks* содержит линии передач и общие неизлучающие сети (S-, Y- либо Z-матрицы);
- ветвь *Ports* содержит определение портов. Данные порты используются для указания мест присоединения нагрузок и возбуждающих элементов;
- ветвь *Solution* содержит общие условия моделирования (частота, граничные условия) и цели моделирования. Все нагрузки, источники возбуждения перечислены в *Excitation*;
- ветвь *Optimisation* содержит параметры оптимизации.

Рис. 2.1. Дерево проекта FEKO

## 2.5. Дерево деталей

Если какая-то часть конструкции или сетки выбрана в дереве проекта, в дополнительное окно, расположенное под деревом проекта, выводится детальная информация о данном объекте. Данное окно содержит *дерево деталей*.

## 2.6. Настройка параметров решения

Добавление источников и нагрузок к геометрическим портам необходимо. Порты определяют те позиции в модели, к которым будут «прикрепляться» нагрузки и источники. Подробнее назначение портов рассматривается в примерах.


## 2.7. Моделирование полуволнового вибратора в режиме излучения

Для начала необходимо выбрать единицы измерения, используемые в проекте: в окне *Model Unit* (рис. 2.2) по адресу *menu->model->model unit*. По умолчанию линейные размеры измеряются в метрах.

Затем для дальнейшего удобства введем несколько переменных. Для добавления переменной достаточно щелкнуть правой кнопкой мыши на название ветви *Variables* и выбрать *Add variable*. Далее в появившемся окне (см. рис. 2.2) указать имя переменной и значение (в виде формулы, либо числовое). Стоит упомянуть, что некоторые переменные, соответствующие необходимым физическим константам (таким, как скорость света  $c_0$ ), уже введены. Частоту вводим в Гц.

Аналогично вводим остальные переменные:

- $freq_0$  – центральная частота. Значение  $75e6$  (соответствует  $75 \cdot 10^6$  Гц);
- $lambda_0$  – длина волны на центральной частоте. Значение  $c_0/freq_0$ ;
- $lv$  (от Length of Vibrator) – длина вибратора. Значение  $lambda_0/2$ ;
- $r$  – радиус проводника. Значение  $2e-3$  (2 мм).

Далее необходимо начертить линию, соответствующую диполю. Для этого щелкнуть по пиктограмме Line  на панели инструментов, затем ввести координаты и имя в появившемся окне (рис. 2.4).

После нажатия кнопки Create в рабочей области программы появится изображение линии, а также в дереве проекта в ветви Geometry появится пункт *dipole*, соответствующий линии.

Щелкнув на данный пункт, внизу в окне дерева деталей получить ветвь *edges*, содержащую пункт *wire1*, соответствующий единственному проводнику – нашему диполю.

Далее задать порт на данном проводнике, щелкая правой кнопкой мыши по названию *Wire1* и выбирая *Create port -> Wire port* (рис. 2.5).

Затем необходимо привязать к данному порту источник, щелкая правой кнопкой мыши по имени порта и выбирая *Add voltage source*.

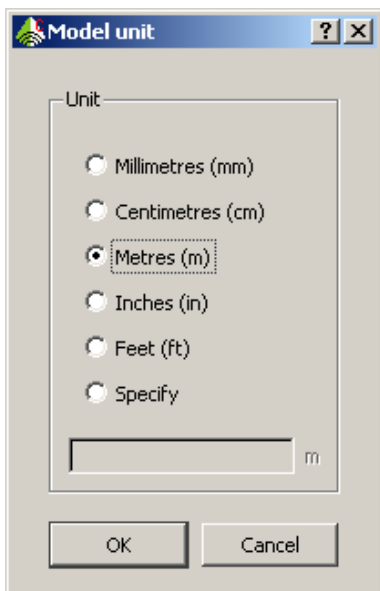


Рис. 2.2 Окно задания единиц измерений

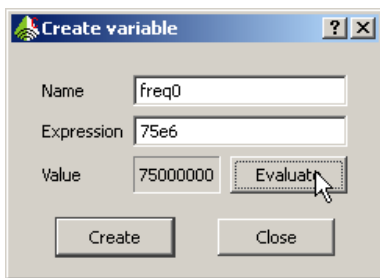


Рис. 2.3 Создание переменной

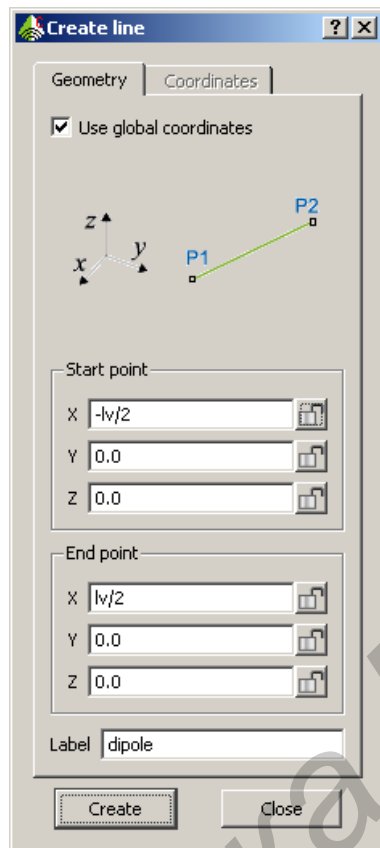



Рис. 2.4. Задание координат линии

В появившемся окне указать амплитуду, фазу и имя (рис. 2.6).

Далее необходимо настроить параметры построения диаграммы направления.

Выбрав на панели инструментов команду Request a far field calculation , необходимо указать в диапазоне каких телесных углов необходимо вывести ДН. Ограничимся тремя плоскостями: XY, YZ, XZ. В полях *Increment* можно указать шаг угла. Для добавления плоскостей щелкнуть на соответствующую «зарезервированную» кнопку и подтвердить создание кнопкой *Create*.

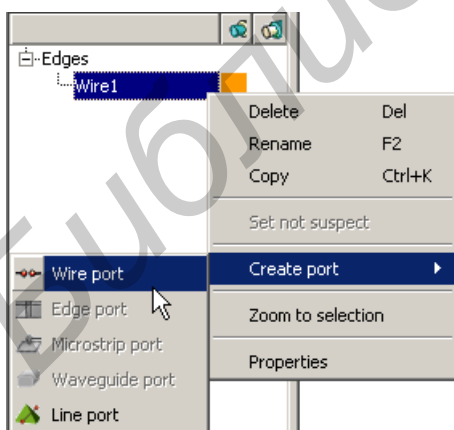


Рис. 2.5 Задание портов

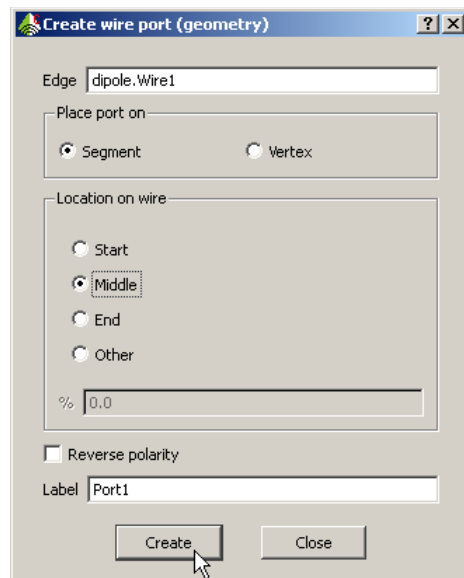


Рис. 2.6 Задание порта на проводе

Далее нужно создать сетку разбиения (*Mesh*). Данная процедура довольно ответственная, так как точность результатов будет зависеть от размера элементарных ячеек и сегментов. Существует также ряд требований программы



для максимальных и минимальных линейных размеров сетки и радиуса сегмента. Данные требования приведены в таблице.

Для генерации сетки воспользуемся командной *Menu->Mesh->Create mesh* (или комбинация клавиш *Ctrl+M*). С помощью данного окна можно генерировать сетку как для геометрии, так и для отдельных предварительно выделенных частей. За это отвечает соответственно переключатель *Mesh what* (Данный пункт оставляем по умолчанию).

Далее в секции *Global mesh sizes* (Общие размеры сетки) нужно указать соответствующие значения.

- *Edge length*: длина ребра треугольника при разбиении поверхности (оставим как есть);
- *Segment length*: длина сегмента при разбиении проволоки (введем  $\lambda/20$ );
- *Wire segment radius*: радиус сегмента при разбиении проволоки (введем  $r$ ); Этого достаточно. Щелкаем кнопку *Create*. Более подробно о настройках сетки разбиения можно прочесть в оригинальном руководстве.

В завершение необходимо указать частоту (или диапазон), на которой будет производиться расчет. Для этого в дереве проекта правой кнопкой щелкнуть по пункту *Frequency* и выбираем *Set frequency*. В появившемся окне выбрать расчет на одной частоте *single frequency* (для простоты) и ввести переменную, соответствующую нашей частоте – *freq0*.

В итоге окно с моделью должно выглядеть примерно как на рис. 2.7.

После всего этого остается запустить программу на расчет командой *Menu->Run->Feko*.

По завершению расчета результаты можно наблюдать в компоненте *POSTFEKO*. Для этого нажать *Menu->Run->PostFeko*.

Интерфейс данного компонента – более-менее интуитивно понятный, с богатыми возможностями, среди которых что нас интересует первую очередь:



- входное сопротивление;
- ДН.

Входное сопротивление можно посмотреть, нажав на кнопку *Add a source data graph*.

В Секции *Quantity* выбрать *Impedance*. Внизу в текстовых полях появится полное сопротивление, на графике – та часть, которая указана в секции *Part*.

ДН можно посмотреть как в 3D режиме, так и в 2D.

Для 3D режима: выбрать на верхней панели инструментов *Add 3D view*

 . Затем на левой вертикальной панели выбрать *View 3D far fields*  . В этом режиме с помощью кнопок «+» (*add*) и «-» (*remove*) можно добавить несколько ДН (в разных плоскостях).

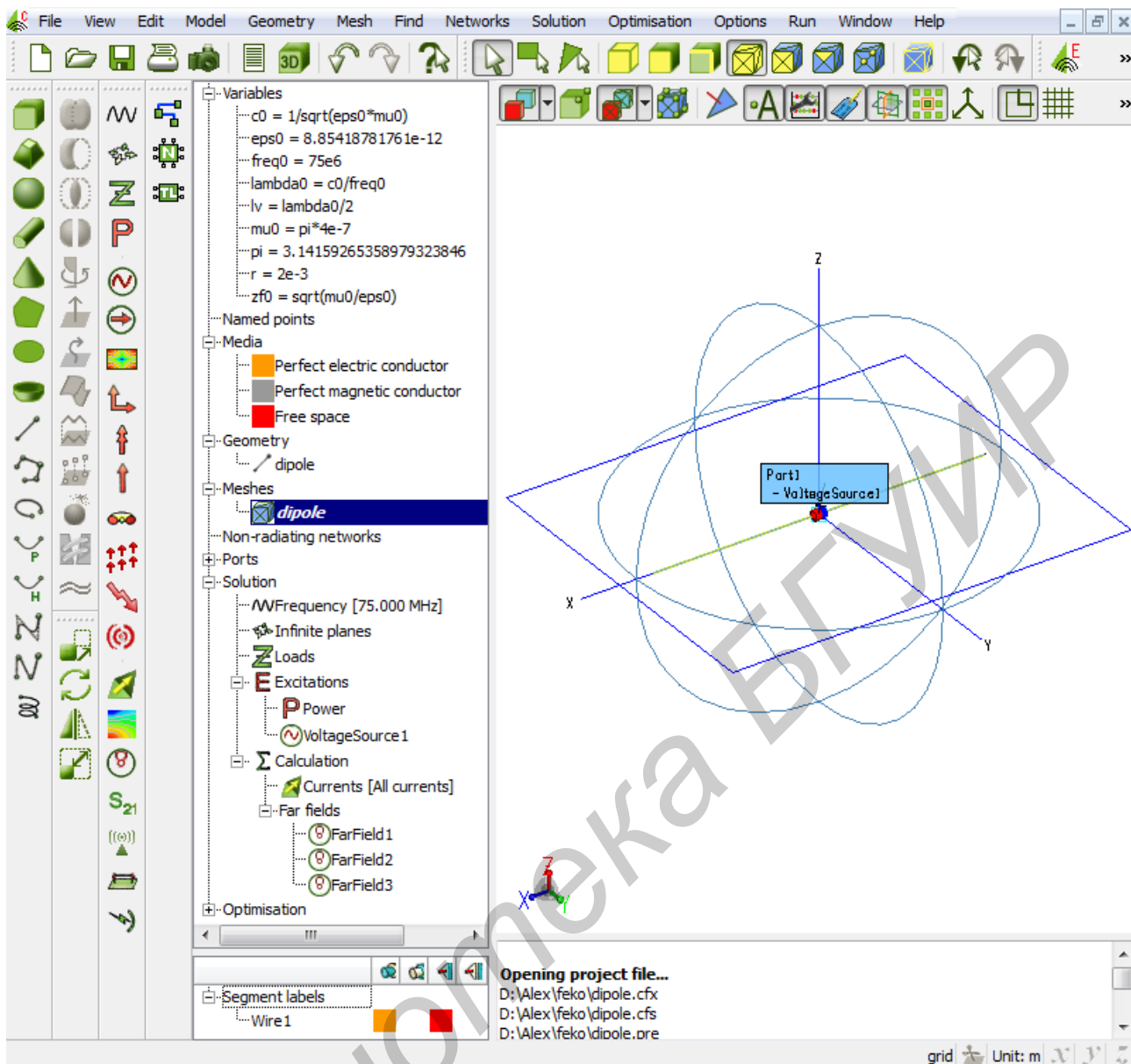


Рис. 2.7. Окно проекта. Общий вид.

Так, в нашем варианте для существующей серии данных (вкладка *FF\_0*) указывать данные, соответствующие плоскости XY. Затем клавишей кнопкой «+» добавить новую серию данных и выбрать в поле *Block no.* данные «2», соответствующие ДН в плоскости XZ. Аналогично добавляется ДН в плоскости YZ.

Масштаб, компоненты поляризации ДН, остальные данные, а также опции отображения настраиваются ниже во вкладках *Data* и *Options*.

Для 2D режима: выбрать на верхней панели инструментов *Add a far field graph*.


Настройки отображения серий данных сходны с 3D режимом. Опции отображения настраиваются «через» вертикальный ряд кнопок слева

Рассмотрим довольно типичный случай настройки представления ДН: нормированную настройку в полярной СК, логарифмический масштаб.

Для этого выбрать *graph settings* . В секции *plot type* выбрать *polar* (полярную СК).

Затем в *left axis*  в секции *Normalise to* выбрать опции нормализации *Series maximum*.

После чего указать логарифмический масштаб переключатель *dB*. Наконец, целесообразно отменить автоматическое масштабирование и ввести в полях *Min & Max* приемлемые значения. В нашем случае соответственно минус 20 и 0. В этом случае центр СК будет иметь минус 20дБ.

Для читабельности можно дать имена графикам. Для этого в *series settings*  в поле *Legend* дать названия каждому графику, соответствующему сериям данных: *series\_1...3* (условимся, что направление излучения совпадает с осью Z):

- *series\_1* -> Plane XY;
- *series\_2* -> Plane XZ (E);
- *series\_3* -> Plane YZ (H).

В итоге наше окно должно выглядеть, как на рис. 2.8.

В данном примере рассмотрен расчет диаграммы направленности и входного импеданса для простейшего полуволнового вибратора, изображенного на рис. 2.9.

На рис. 2.9 изображен диполь с возбуждением с помощью источника напряжения, а также показаны плоскость симметрии (на рисунке она расположена горизонтально) и плоскость, в которой будет рассчитана диаграмма направленности (на рисунке – окружность).

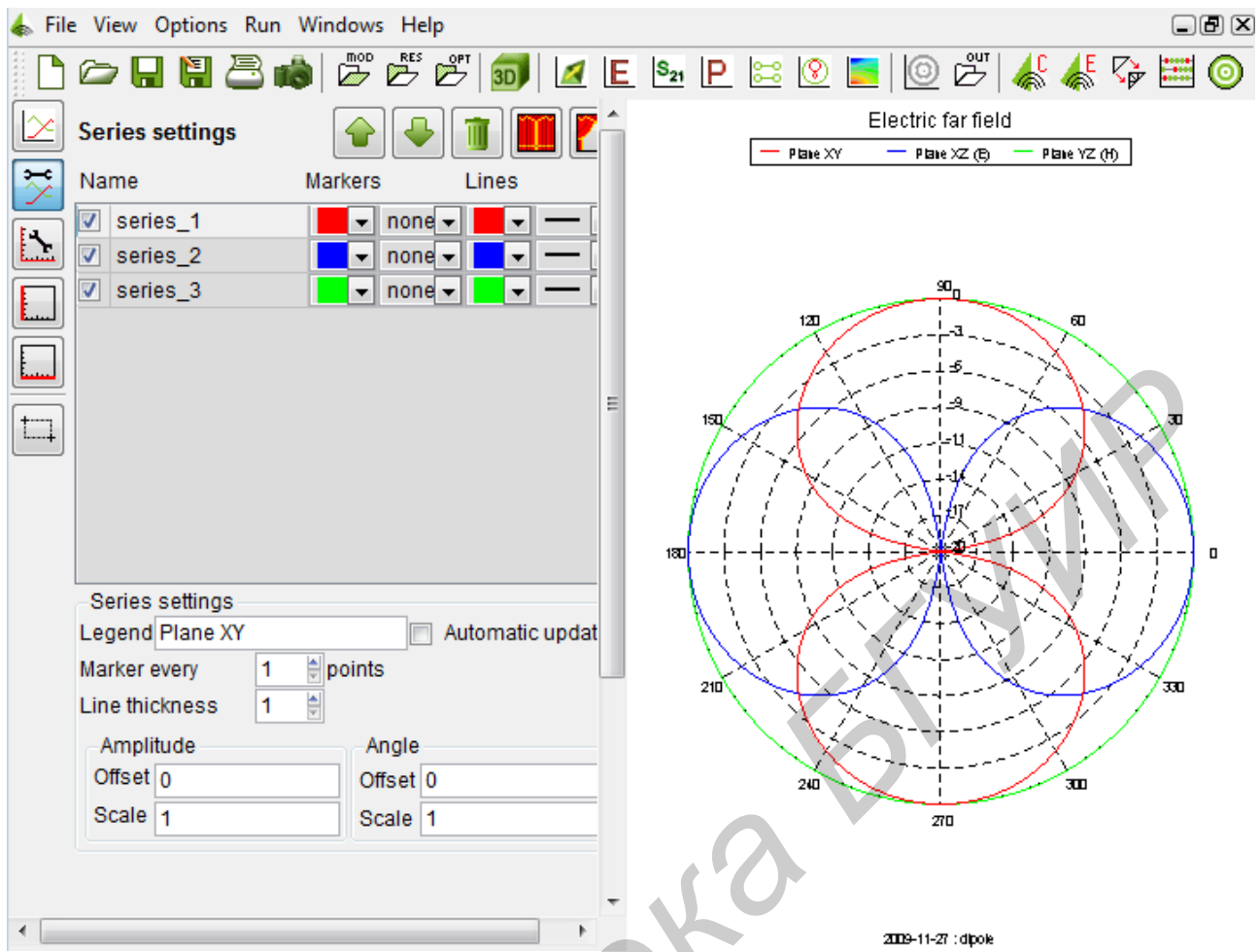


Рис. 2.8. Результаты моделирования. Общий вид

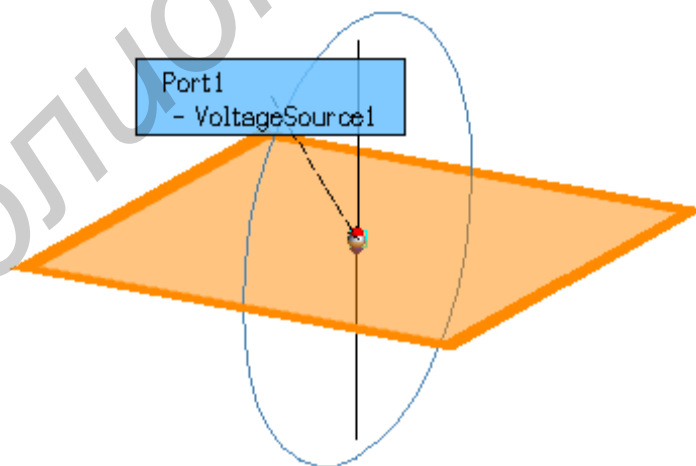





Рис. 2.9 Вид объекта с расположением источников

## 2.8. Моделирование директорной антенны в режиме излучения

В этом разделе кратко и упрощенно без использования переменных изложен порядок создания модели директорной антенны для частоты 300 МГц с входным сопротивлением 50 Ом, в ее состав входит:

- активный вибратор длиной  $L_v = 456$  мм;
- линейный рефлектор длиной  $L_r = 493$  мм;
- три директора длиной:  $L_{d1} = 409$  мм;  $L_{d2} = 380$  мм;  $L_{d3} = 380$  мм;
- расстояние между элементами:  
вибратор – рефлектор  $VR = 252$  мм;  
вибратор – 1-й директор  $VD1 = 210$  мм;  
вибратор – 2-й директор  $VD2 = 410$  мм;  
вибратор – 3-й директор  $VD3 = 618$  мм;  
вибратор – рефлектор .

2. Открыть новый проект, щелкнув по элементу .
3. Щелкнуть по элементу  и в открывшемся окне задать геометрию вибратора (рис. 2.10). Справа появляется картинка – рис. 2.11.
4. Щелкнуть по элементу  и в открывшемся окне задать геометрию рефлектора – рис. 2.12. Справа появляется картинка – рис. 2.12.
5. Аналогично задать все остальные элементы антенны. В итоге получается модель, показанная на рис. 2.15. Появившаяся слева в окне проекта картинка показана на рис. 2.14.
6. Задать port вибраторе (line 1), частоту и сетку так, как указано в примере 1.
7. Задать углы для расчета диаграммы направленности:  
в плоскости E –  $\theta = 0...360^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$  и  
в плоскости H –  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0...360^\circ$  с дискретом  $2^\circ$ .  
В результате на экране в окне проекта и на поле модели получают картинки, показанные на рис. 2.16, 2.17.
8. Произвести расчет.
9. Загрузить POSTFEKO и вывести диаграммы направленности в полярных координатах в плоскостях E и H и входное сопротивление (рис. 2.18, 2.19).
10. КНД антенны  $D=9,95$  (9,97 дБ), входное сопротивление  $Z = 50,3 - i17,7$  Ом  
На рис. 2.20 представлены результаты расчета той же антенны методом интегральных уравнений.

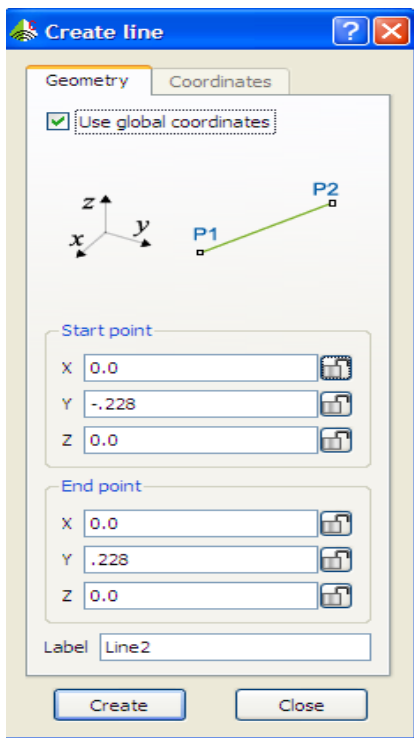


Рис. 2.10 Задание проводника

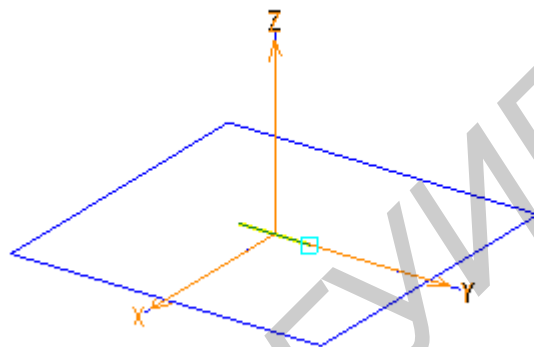


Рис. 2.11 Расположение проводника в пространстве

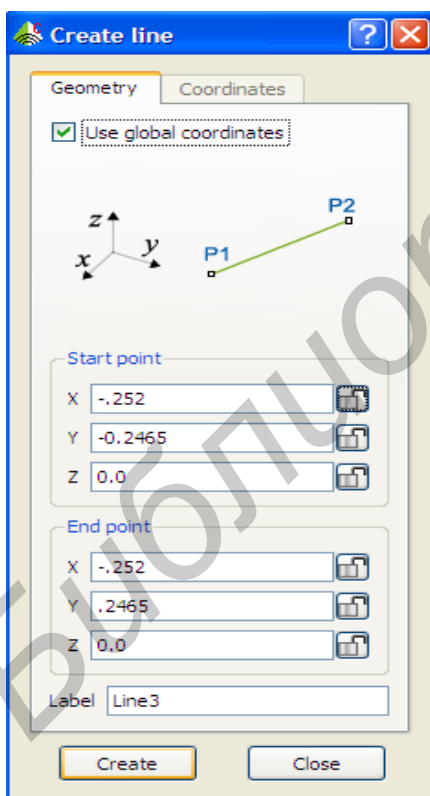


Рис. 2.12 Задание проводника

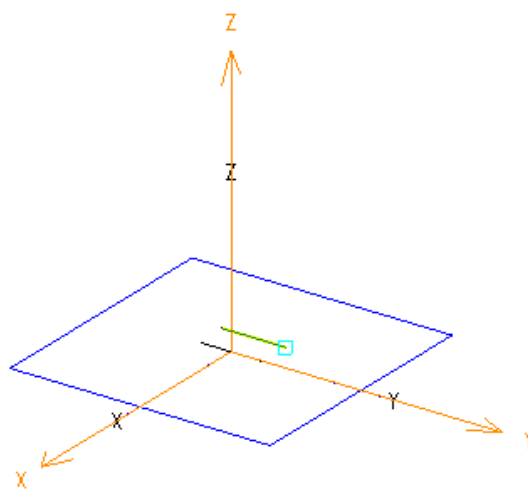


Рис. 2.13 Расположение проводника в пространстве

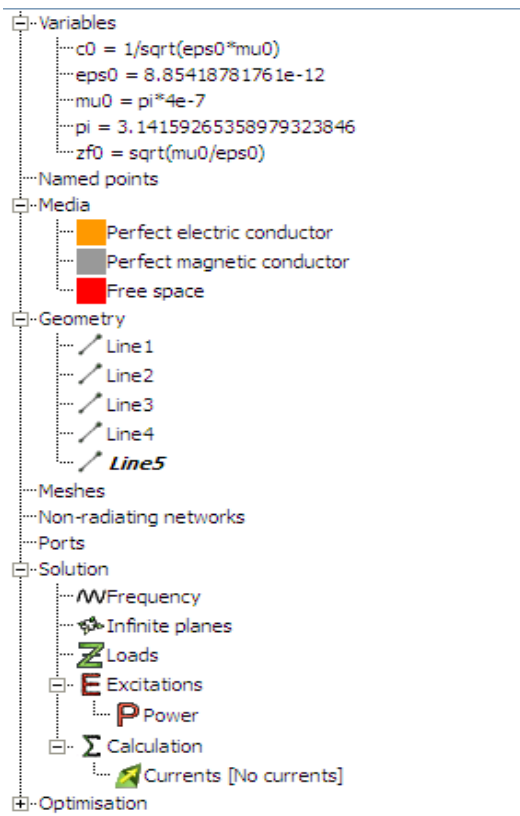


Рис. 2.14 Дерево проекта

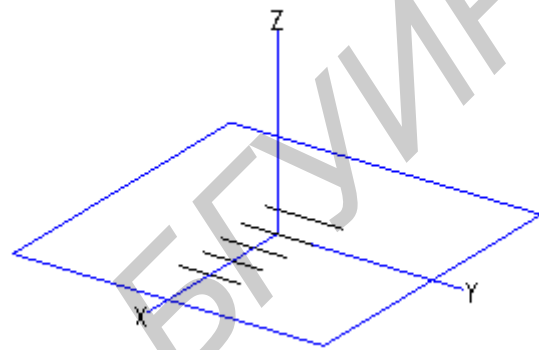


Рис. 2.15 Директорная антенна

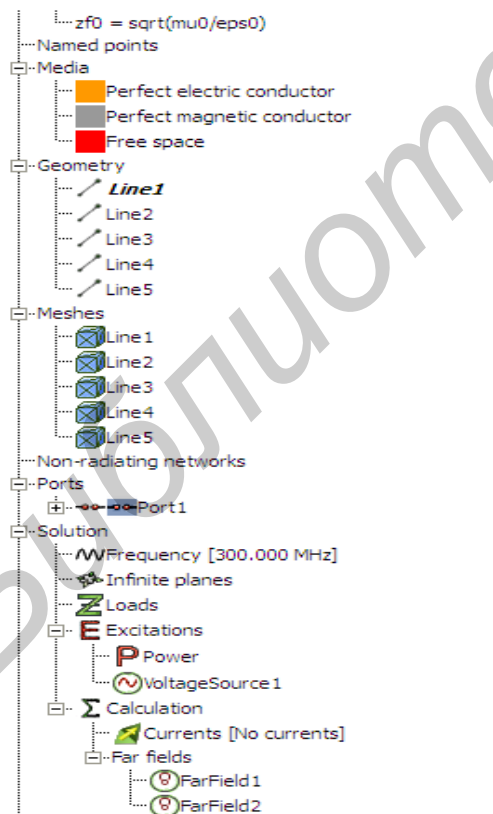


Рис. 2.16 Дерево проекта

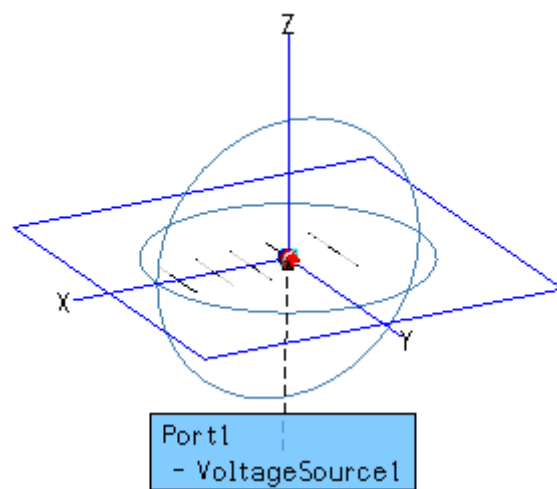


Рис. 2.17 Директорная антенна с источником возбуждения

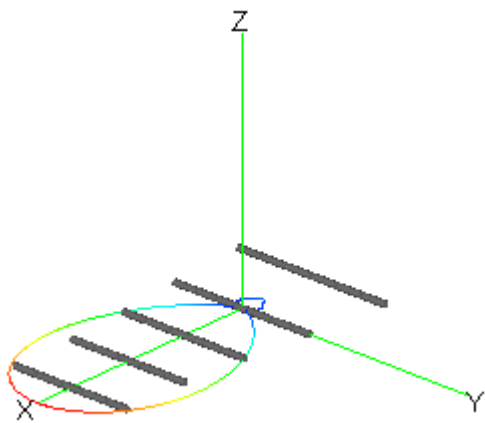


Рис.2.18 ДН директорной антенны

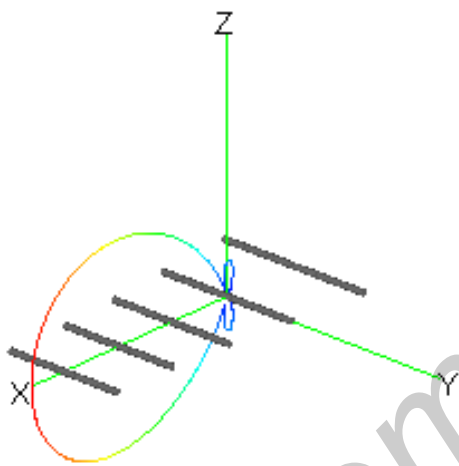
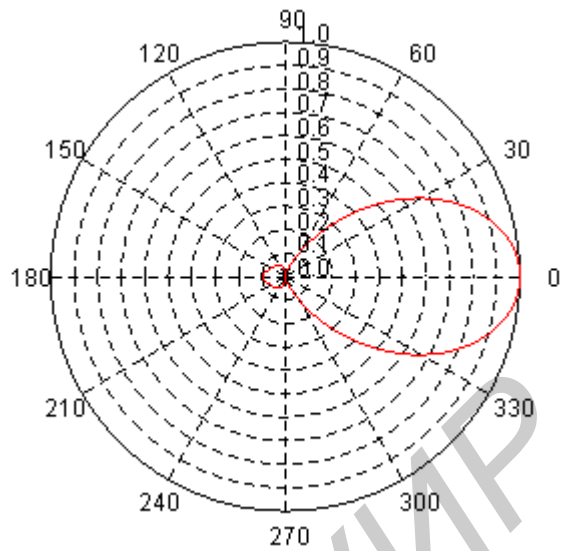
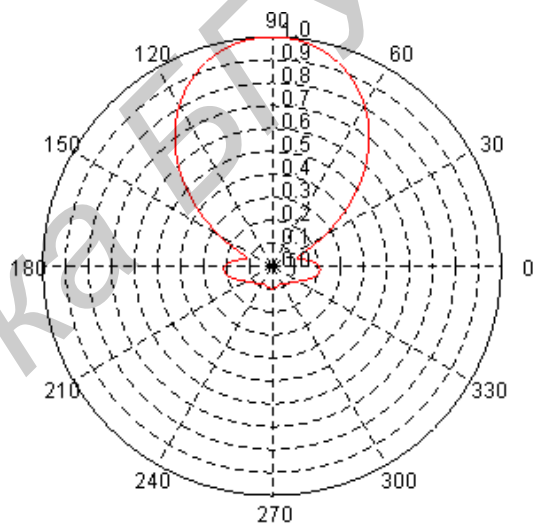
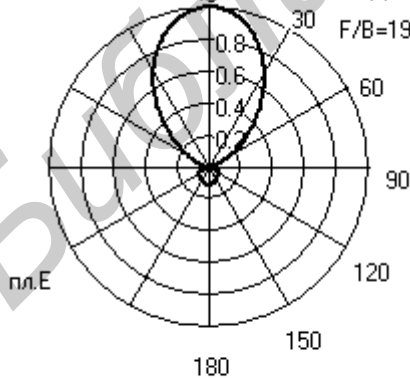


Рис.2.19 ДН директорной антенны

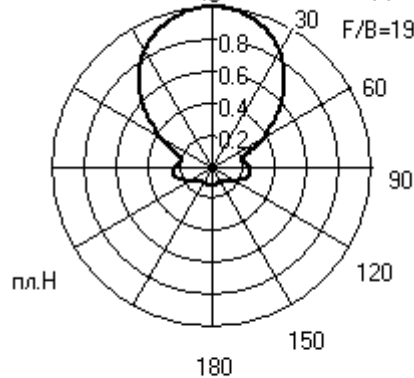


Частота= 300.0 МГц  
КНД= 9.45 дБ  
F/B=19.12 дБ



R= 50.4 Ом X= 0.0 Ом  
КСВ/50=1.008 КСВ/75=1.488

Частота= 300.0 МГц  
КНД= 9.45 дБ  
F/B=19.12 дБ



R= 50.4 Ом X= 0.0 Ом  
КСВ/50=1.008 КСВ/75=1.488

Рис. 2.20 ДН директорной антенны рассчитанной в методе ИУ



## 2.9. Моделирование директорной антенны в режиме рассеяния

1. Создать модель антенны в соответствии с пунктами 1 – 5 предыдущего примера. Для удобства взять такие же геометрические параметры, как в предыдущем примере.

2. Задать частоту и сетку разбиения, как в пункте 6 примера 2.

3. Задать поляризацию и направление распространения облучающей плоской электромагнитной волны. Для этого:


- слева в строке инструментов (рис. 2.21) щелкнуть по элементу ;
- в появившемся окне (рис. 2.22) ввести значения углов  $\theta$  и  $\varphi$ , задающих направление распространения волны. Например,  $\theta = 90$ ,  $\varphi = 0$ , что соответствует распространению волны навстречу оси X. Ввести значение Polarisation angle =  $90^\circ$ , что соответствует горизонтальной поляризации. В итоге модель антенны принимает следующий вид (рис. 2.23).



Рис.2.21 Панель инструментов

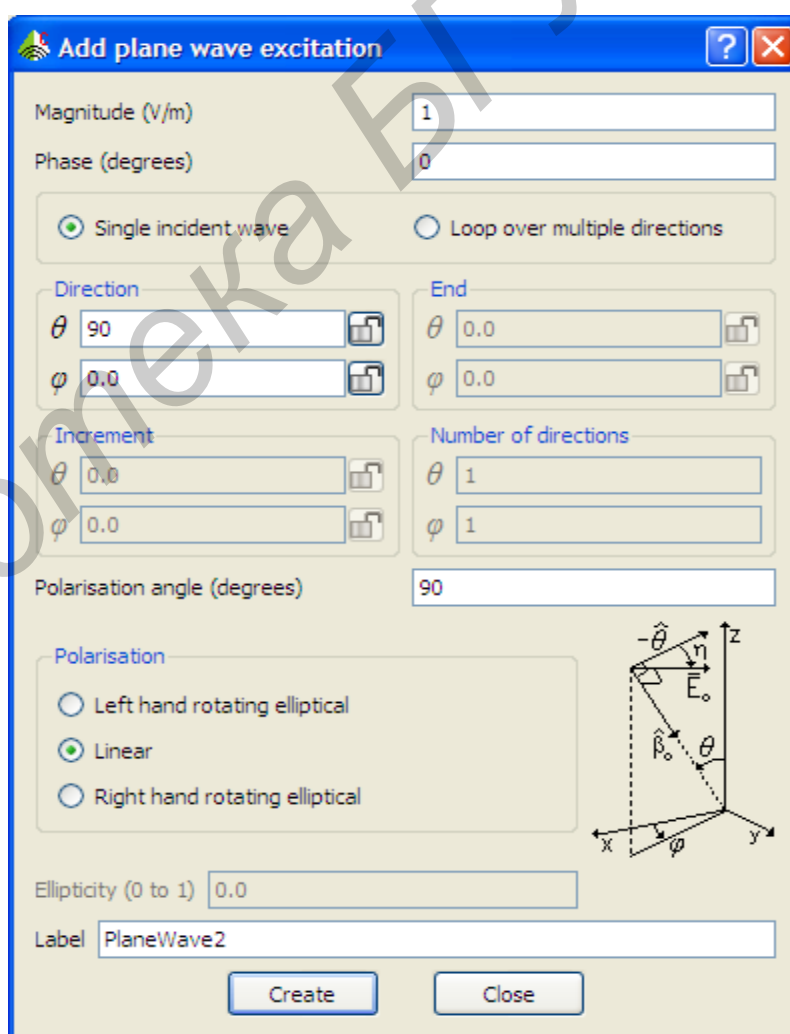


Рис.2.22 Задание плоскости возбуждения

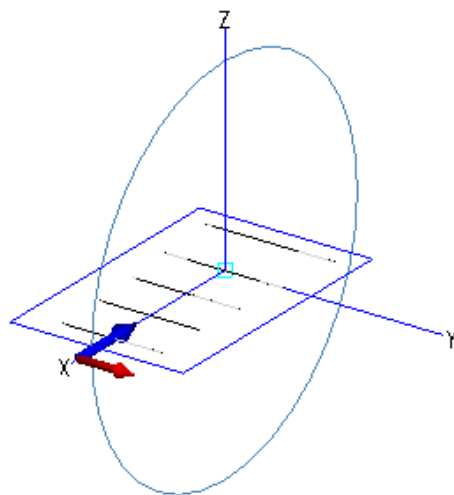


Рис. 2.23 Директорная антенна и ориентация векторов падающей волны

На рис. 2.23 красным цветом показано вектор  $E$  волны, синим цветом – вектор фазовой скорости.

4. Задать углы для расчета диаграммы рассеяния

в плоскости  $E$  –  $\theta = 0 \dots 360^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$  и

в плоскости  $H$  –  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0 \dots 360^\circ$  с дискретом  $2^\circ$ . Произвести расчет.

5. Загрузить POSTFEKO и вывести диаграммы рассеяния (нормированные и в значениях ЭПР) в полярных координатах в плоскостях  $E$  и  $H$  (рис. 2.24, 2.25).

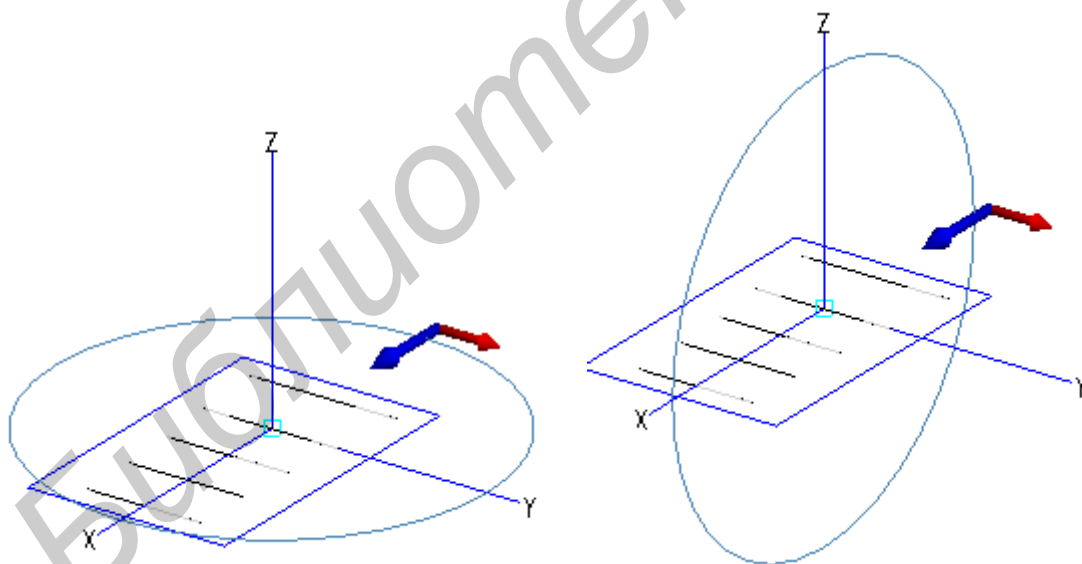


Рис. 2.24 Директорная антенна в полярных координатах

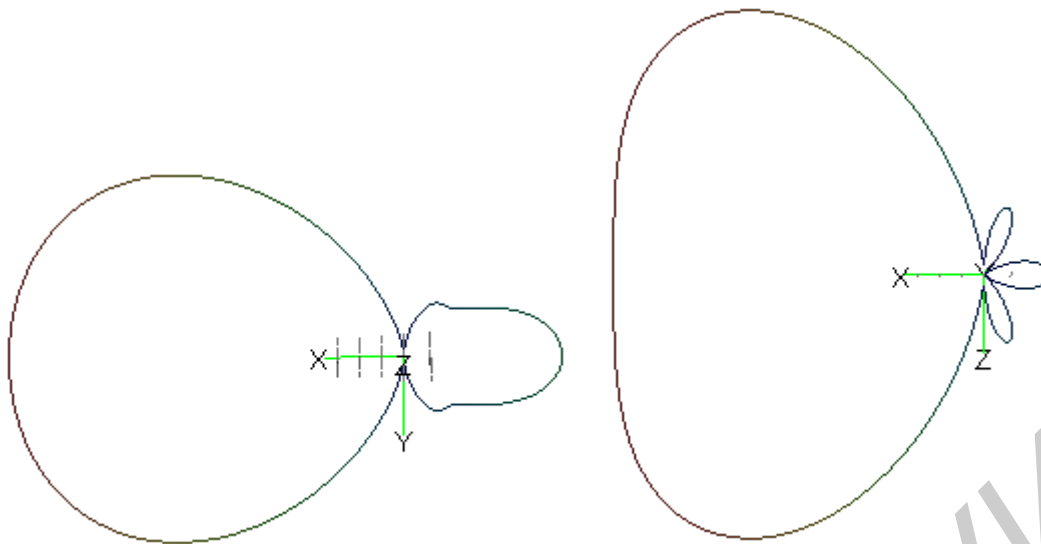


Рис. 2.25. ЭПР/ $\lambda^2 = 4,4$

На рис. 2.26 показаны результаты, полученные методом интегральных уравнений.

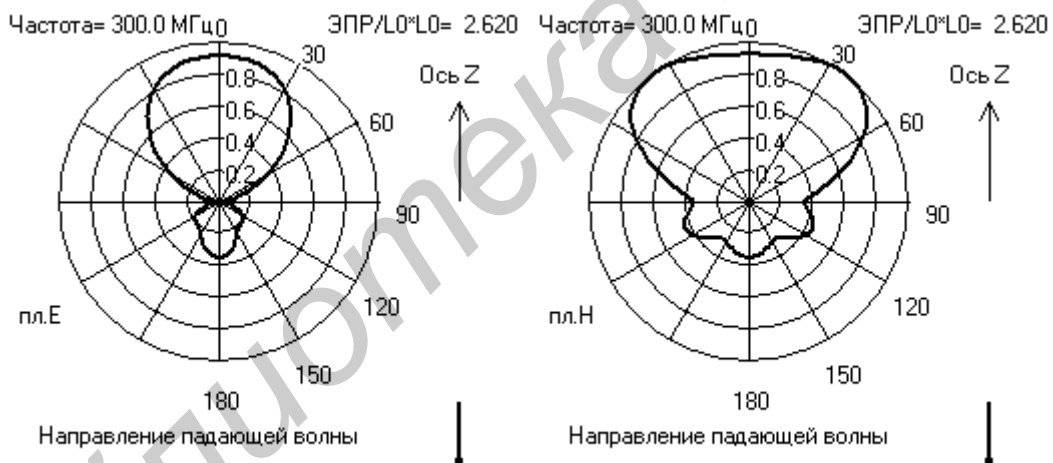



Рис. 2.26 Результаты моделирования рассчитанные методом ИУ

## 2.10. Моделирование излучателя в виде открытого конца прямоугольного волновода

1. Загрузить CADFEKO.

2. Щелкнуть по элементу  (Cuboid). На экран выводится окно (рис.2.27). Задать размеры волновода: широкая стенка — 24 мм; узкая стенка – 12 мм; высота – 50 мм (для работы в диапазоне частот со средней частотой 10 ГГц). Эти размеры введены на рис. 2.27.

3. Щелкнуть по кнопке  , затем по кнопке .

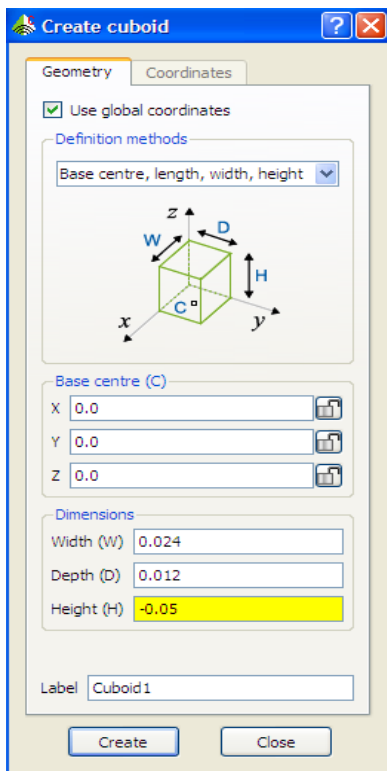



Рис. 2.27 Задание параметров куба



Рис. 2.28 Вид куба

На экране появляется модель волновода. При необходимости можно увеличить ее размер, поставив указатель мыши на модель и вращая ролик мыши. В результате на экране появляется модель, показанная на рис. 2.28.

4. Сделать модель прозрачной. Для этого щелкнуть по галочке справа элемента . Откроется меню (рис. 2.29). В результате модель приобретает следующий вид (рис. 2.30).

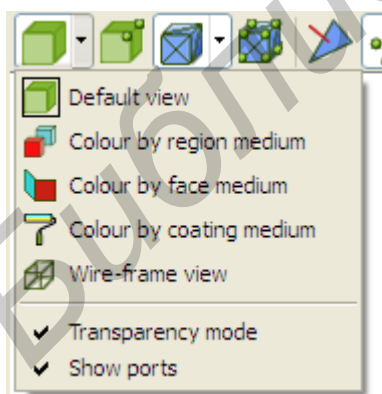


Рис. 2.29 Задание свойств отображения объектов

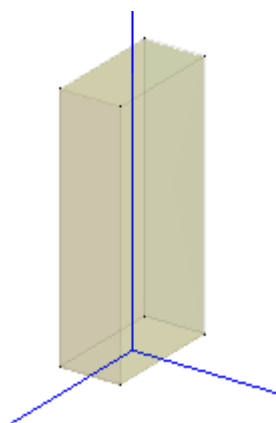


Рис. 2.30 Вид объекта

5. Созданная модель сделана из металла. Ее надо сделать пустой. Для этого щелкнуть по знаку + элемента Regions в левой нижней части экрана (рис. 2.31). В результате появляется дополнительная запись (рис. 2.32).



Рис. 2.31. Задание свойства объекта

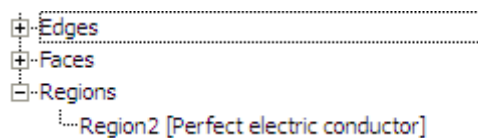


Рис. 2.32. Изменение свойств заполнения области

6. Правой клавишей мыши открыть Region2 и далее Properties (рис. 2.33). В результате открывается окно (рис. 2.34). В окне надпись

Perfect electric conductor заменить на надпись Free space. Далее ОК.

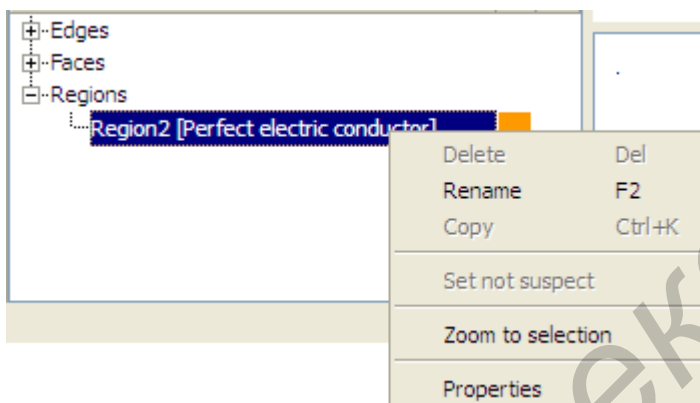


Рис. 2.33. Изменение свойств объекта

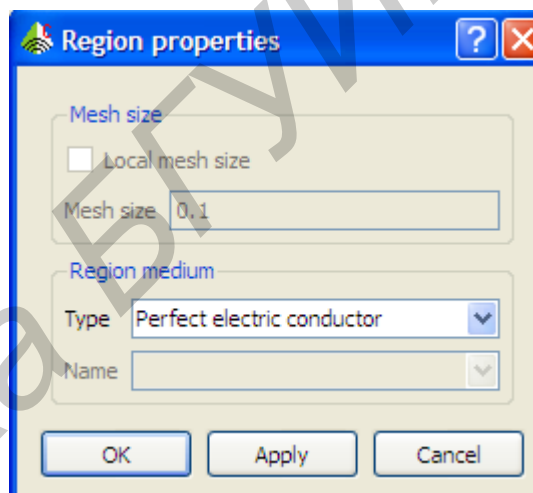


Рис. 2.34. Изменение свойств объекта

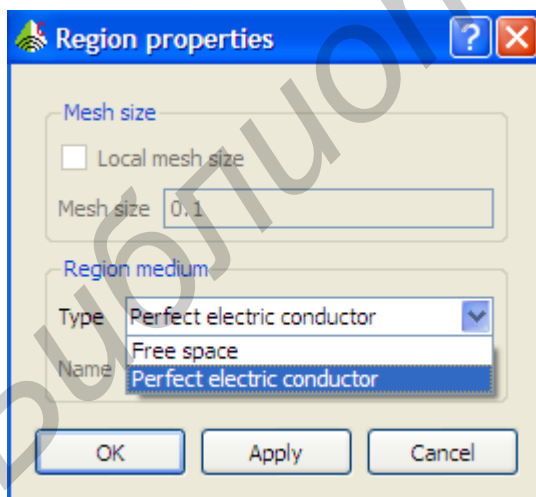


Рис. 2.35. Изменение свойств объекта

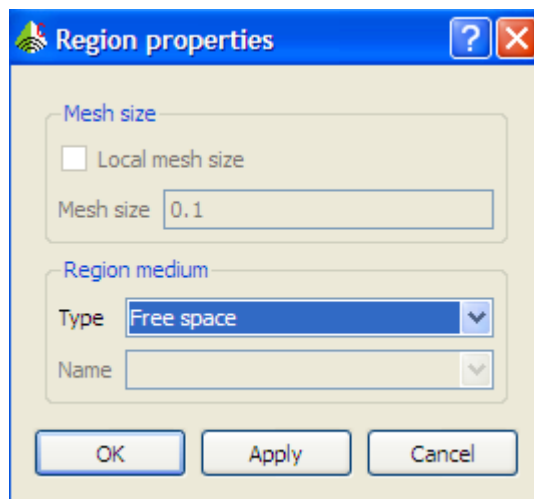


Рис. 2.36. Изменение свойств объекта

7. Удалить верхнюю грань (сделать волновод открытым сверху). Для этого:

- щелкнуть по знаку «+» позиции Faces (см. рис. 2.33);
- последовательно щелкая по Face1, Face2... и наблюдая за рисунком модели, найти верхнюю грань (рис. 2.37).

- щелкнуть правой клавишей по Face6 и удалить ее (рис. 2.38);
- в результате модель принимает вид как на рис. 2.39, а после снятия галочки в  Transparency mode (рис. 2.40) – вид как на рис. 2.41.

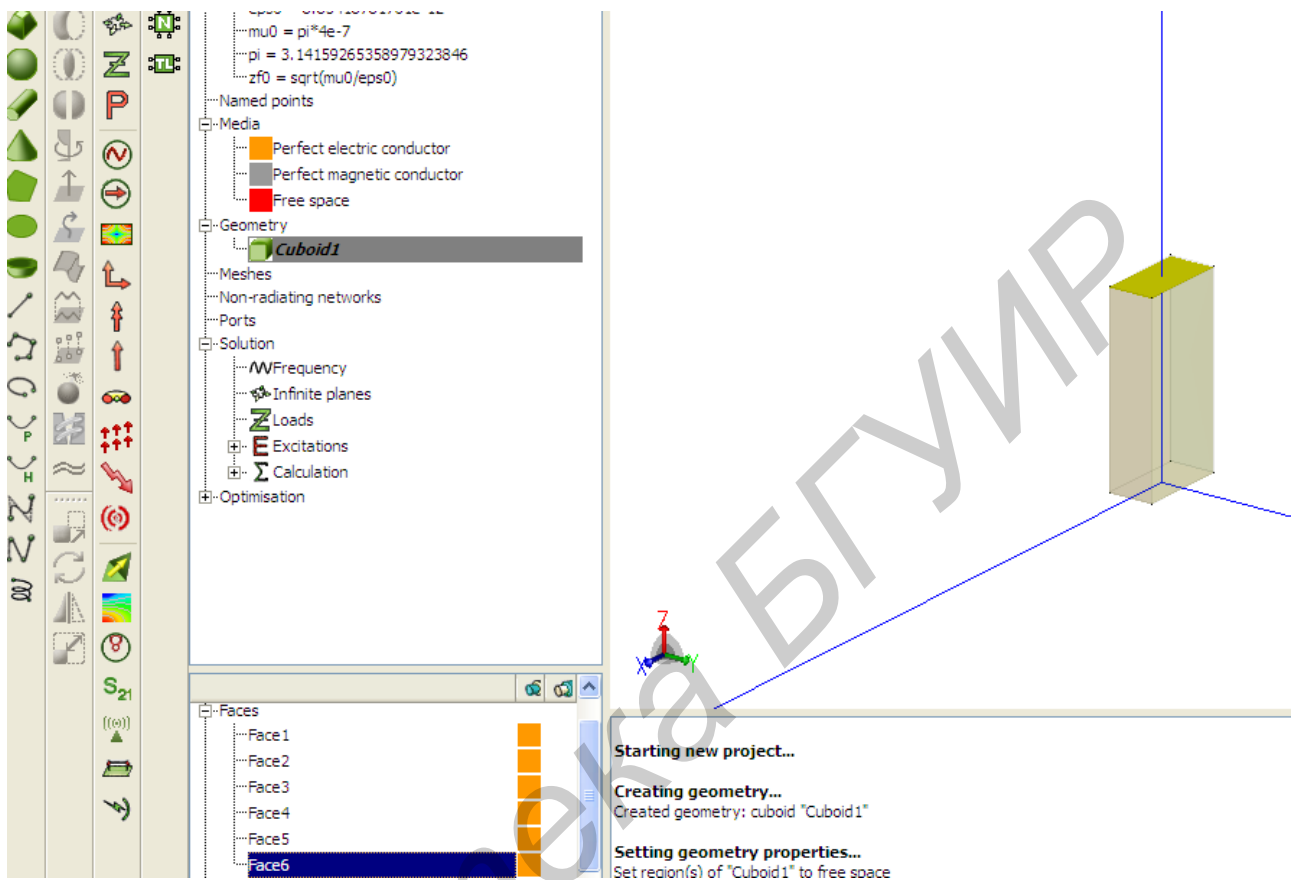


Рис. 2.37 Окно проекта. Общий вид

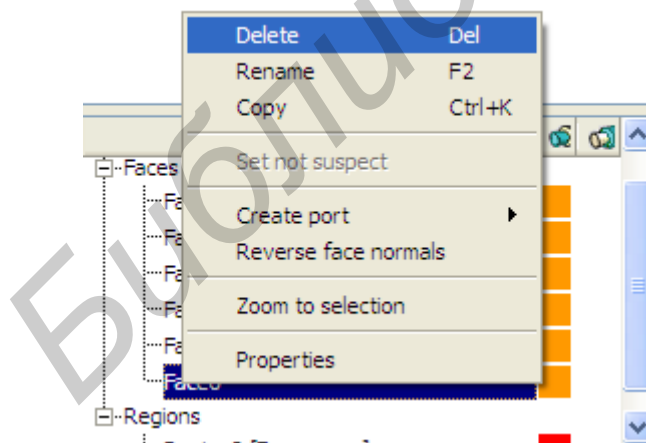


Рис. 2.38 Удаление стенок

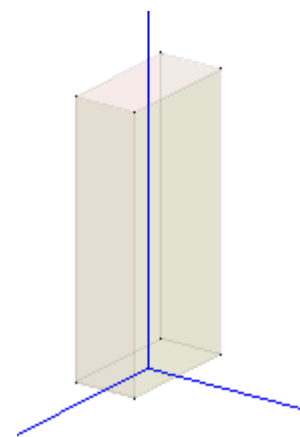


Рис. 2.39 Вид объекта

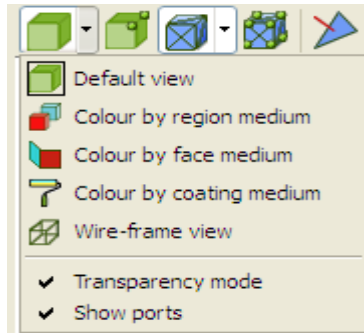


Рис. 2.40 Задание параметров отображения

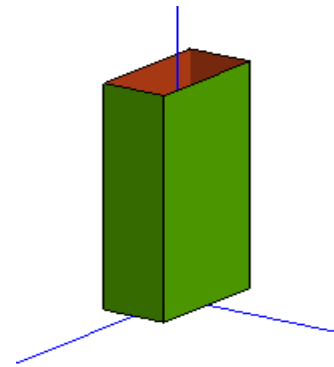


Рис. 2.41 Вид полновода

8. Установить возбуждающий Port на нижней грани. Для этого:

- выделить нижнюю грань (рис. 2.42, 2.43);

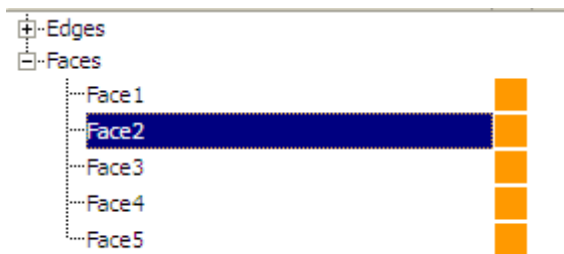


Рис. 2.42 Выбор плоскости

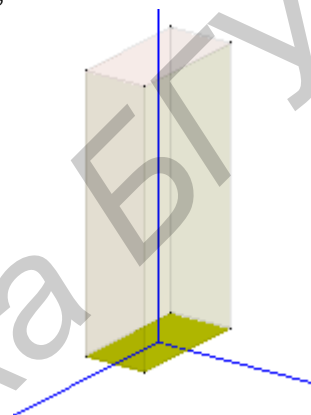


Рис. 2.43 Отображение плоскости на объекте

- щелкнуть правой клавишей мыши по Face2 (рис. 2.44), далее – по Properties; в появившемся окне щелкнуть по Create port, выбрать Waveguide port (рис. 2.45);

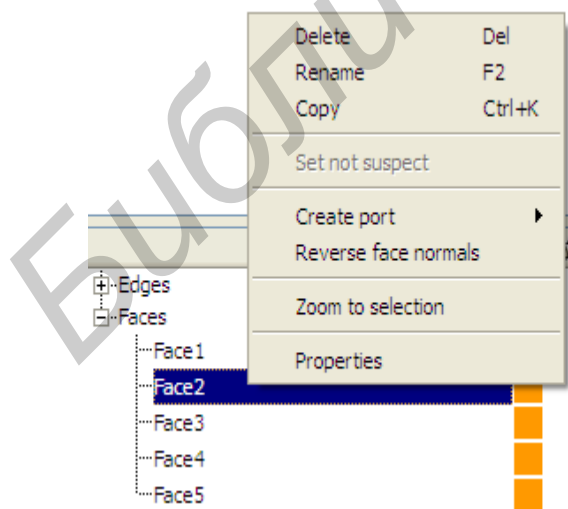


Рис. 2.44 Задание волноводного порта. Шаг 1.

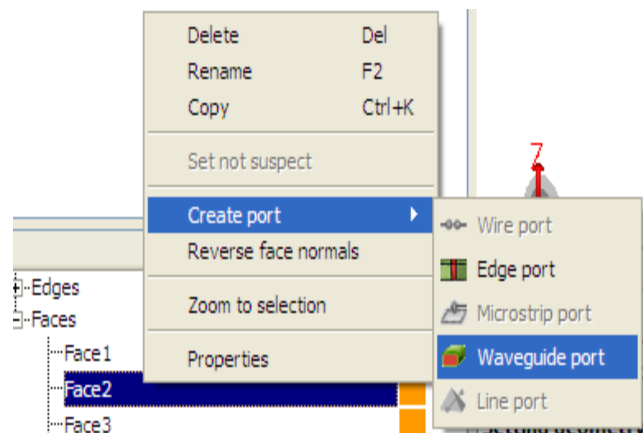


Рис. 2.45 Задание волноводного порта. Шаг 2.

- в появившемся окне (рис. 2.46) щелкнуть левой клавишей по 90 degrees, далее **Create** и **Close**; в результате модель принимает вид изображенный на рис. 2.47;
- в дереве проекта (рис. 2.48) щелкнуть правой клавишей по Port1 и в появившемся меню выбрать **Waveguide excitation**; в появившемся окне можно задать амплитуду и фазу возбуждения, но если порт один, то в этом окне ничего менять не надо, только щелкнуть по **Create** и **Close**; в результате модель принимает вид изображенный на рис. 2.49.

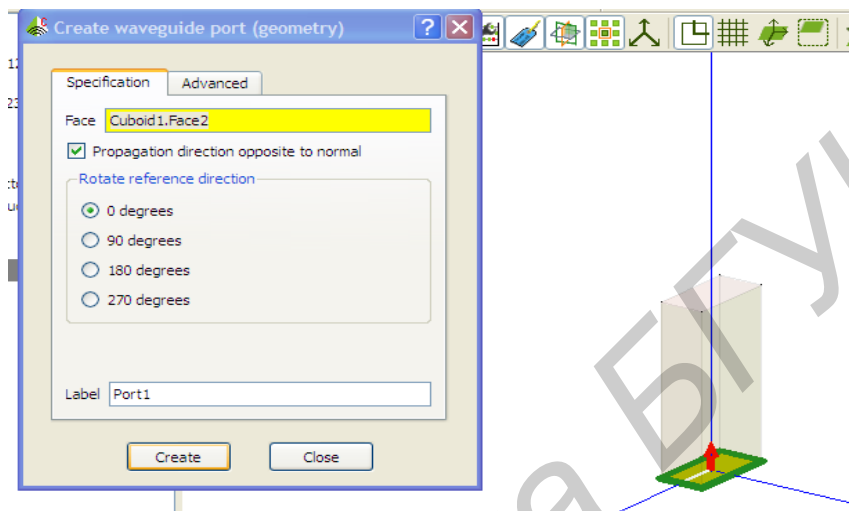


Рис. 2.46 Задание волноводного порта. Шаг 3.

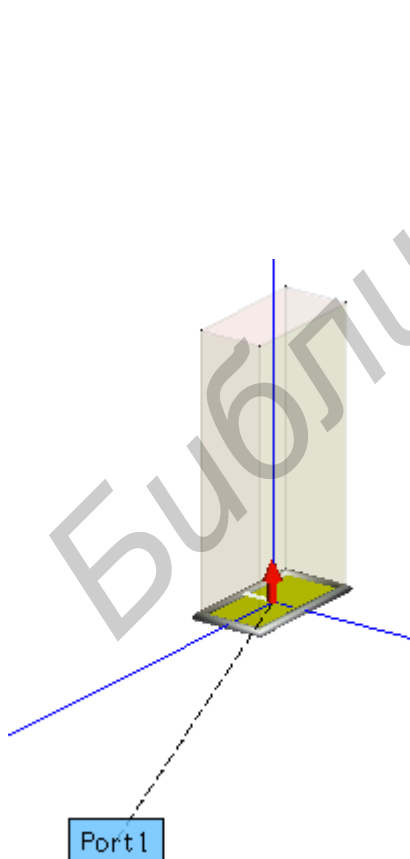


Рис. 2.47 Вид волноводного порта

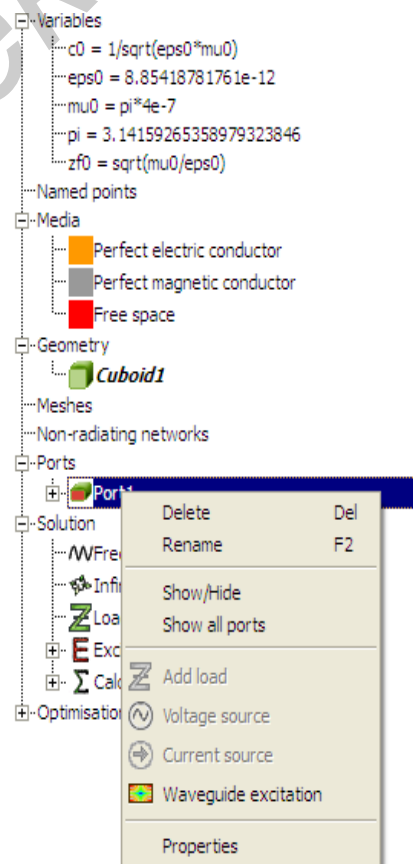


Рис. 2.48 Задание свойств порта



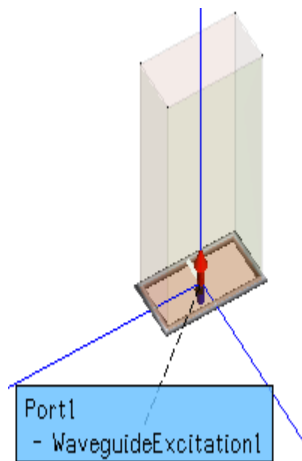


Рис. 2.49 Вид волноводного с заданными параметрами

9. Задать частоту (для созданной модели 10 ГГц).
10. Сделать сетку разбиения, как указано ранее.
11. Задать пределы изменения углов наблюдения  $\theta, \varphi$  (можно задать 3D Pattern).
12. Сохранить проект.
13. Запустить на расчет. Если в процессе расчета появится указание на наличие ошибки типа о том, что сегменты на грани с установленным портом слишком большие, то задать на этой грани локальную сетку. Для этого:
  - вернуться к п. 8, выбрать Properties, щелкнуть правой клавишей, в появившемся окне (рис. 2.50) поставить галочку Local mesh size, задать в окне Mesh size значение длины сегмента в долях длины волны (введено значение 0,002); далее ОК, Cancel;
  - повторить пункт 10 и расчет.
14. Загрузить POSTFEKO и вывести результат – 3D диаграмму направленности (рис. 2.51).

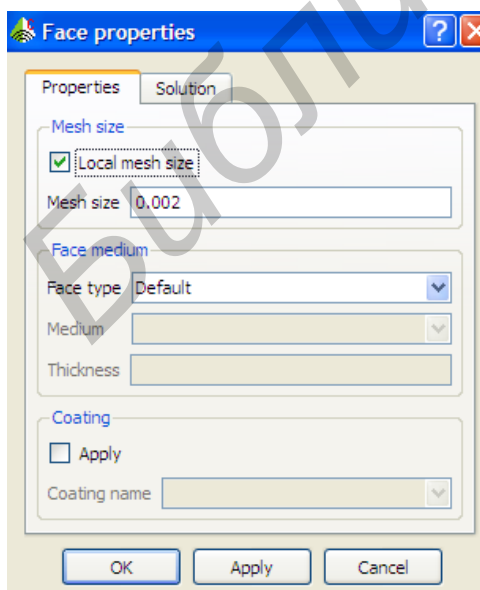


Рис. 2.50. Задание параметров сетки

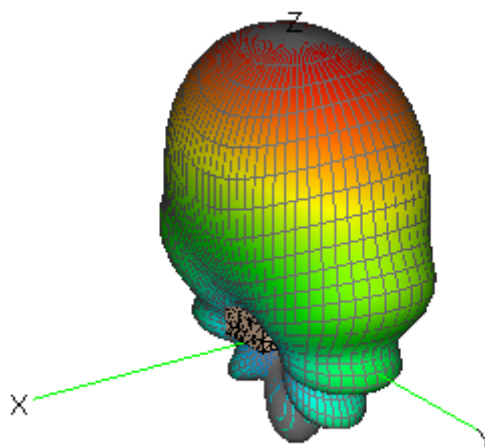


Рис. 2.51. Диаграмма направленности

## 2.11. Моделирование излучателя в виде конического рупора, возбуждаемого круглым волноводом


Рассматривается рупорная антенна с геометрическими параметрами:


- внутренний диаметр круглого волновода 22 мм;
- длина волновода 50 мм;
- диаметр раскрытия рупора 100 мм;
- высота рупора 50 мм.

Частота возбуждения 10 ГГц.

Для создания модели необходимо:

1. Загрузить САДФЕКО.

2. Создать модель волновода. Для этого щелкнуть по элементу . Задать в появившемся окне значения радиуса и высоты волновода (рис.2.52). Далее щелкнуть  и . После изменения размеров модели картинка модели получается такой, как показано на рис. 2.53.

3. Создать модель рупора. Для этого щелкнуть по элементу . В открывшемся окне задать размеры рупора (рис.2.54). Далее нажать  и . Картинка модели показана на рис. 2.55.

4. Сделать все стенки прозрачными (для удобства выделения нужной грани).
5. Задать материал волновода и конуса Free space.
6. Удалить нижнее основание конуса и верхнее основание волновода.
7. На нижнем волноводе установить порт.
8. Далее повторить п.п. 9–14 предыдущего примера.

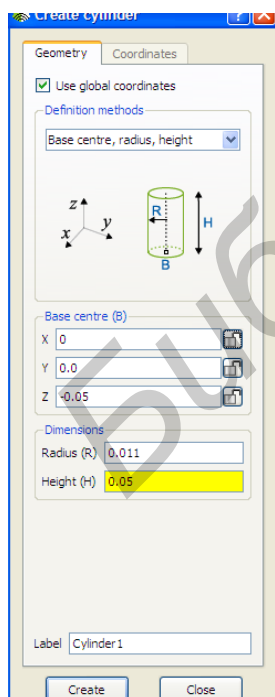


Рис. 2.52. Ввод параметров цилиндра

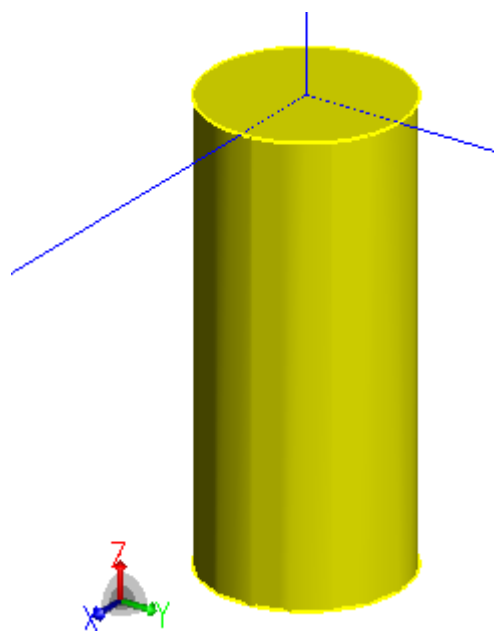



Рис. 2.53. Цилиндр. Общий вид

На рис. 2.56 показана 3D– диаграмма рупора. Для вывода 2D–диаграммы в прямоугольных или полярных координатах сделать следующее.

*Вывод ДН в прямоугольных координатах:*

– На экране с POSTFEKO (рис. 2.57) в верхней части щелкнуть по элементу . В результате на экран выводится ненормированная ДН в прямоугольных координатах (рис. 2.58).

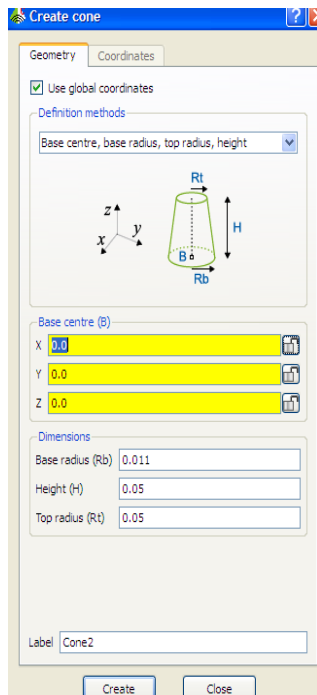


Рис. 2.54. Задание параметров конуса

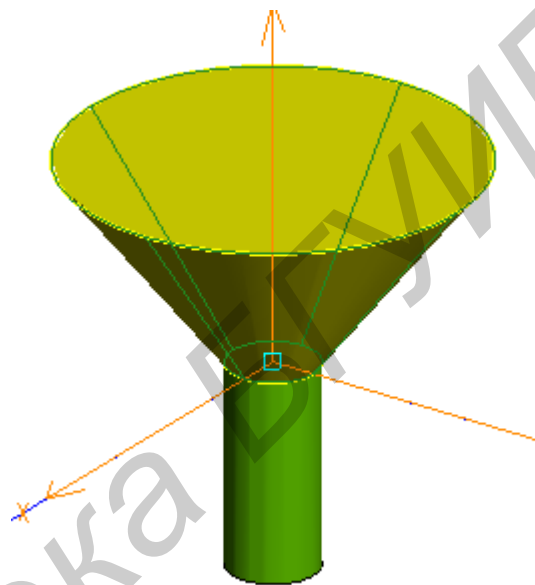


Рис. 2.55. Конус. Общий вид

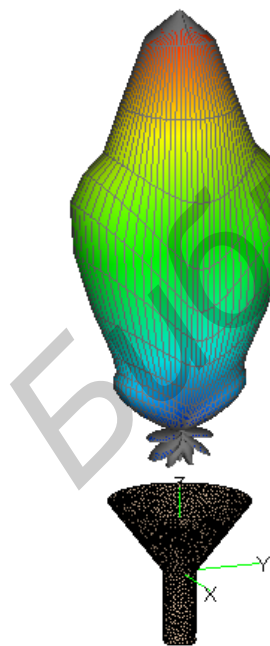


Рис. 2.56 3D– диаграмма рупора

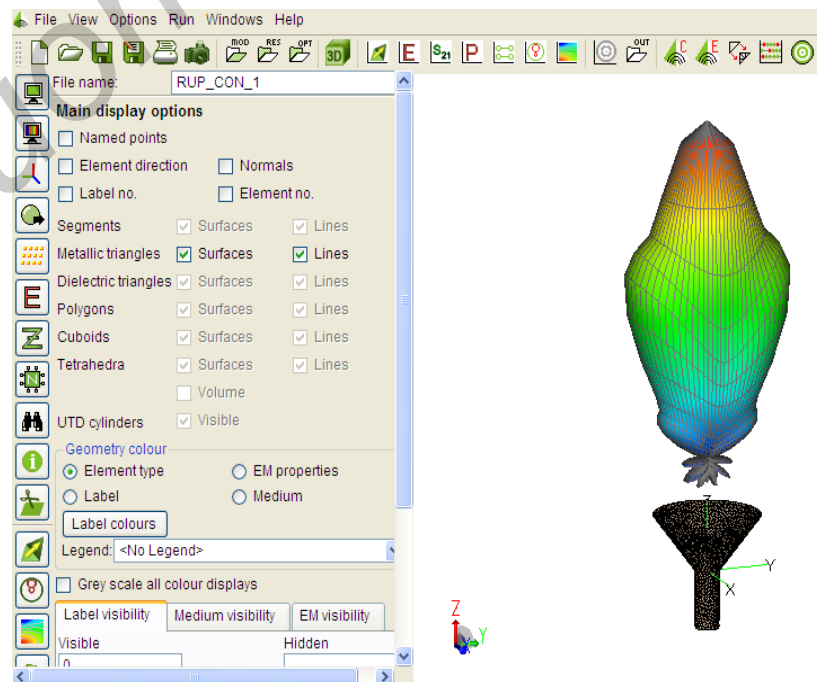


Рис.2.57 Окно POSTFEKO.

– Для нормировки ДН, вывода зависимости КНД и КУ от угла Theta найти соответствующие элементы управления в группе инструментов слева от графика, показанного на рис. 2.59.

Три примера показаны на рис. 2.60 (нормированная ДН в прямоугольных координатах), рис. 2.61 (зависимость коэффициента усиления от угла Theta ), рис. 2.62(нормированная ДН в полярных координатах).

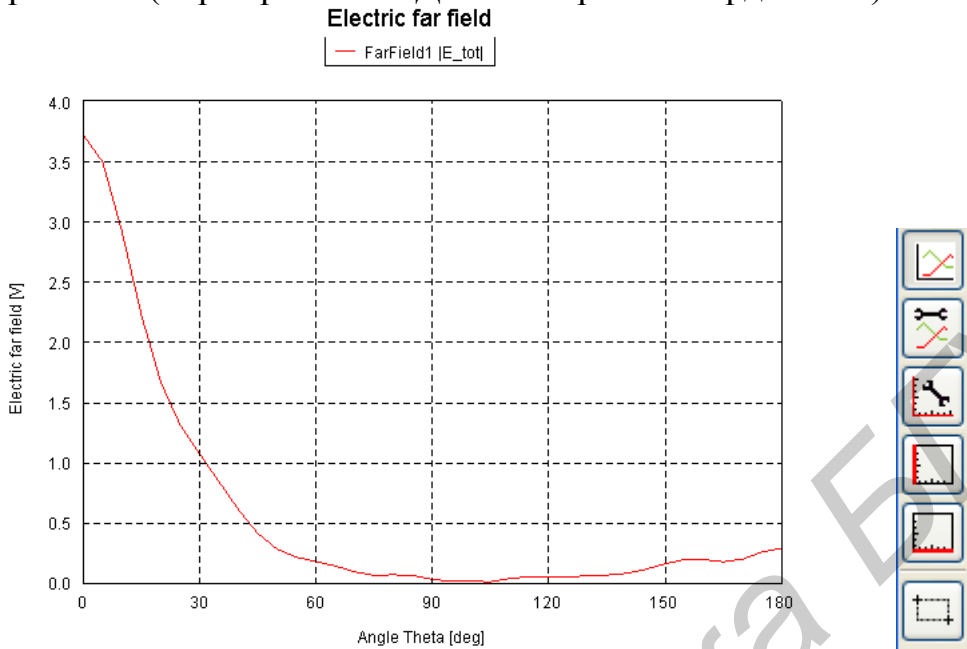


Рис. 2.58 Ненормированная ДН

Рис. 2.59 Группа инструментов модификация вида графика

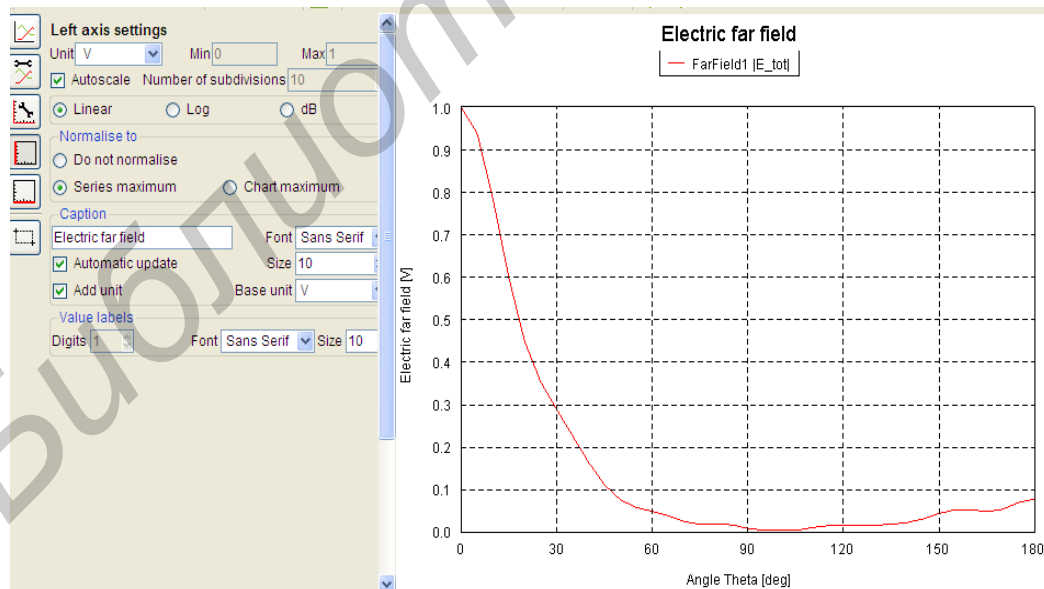


Рис. 2.60 Нормированная ДН в прямоугольных координатах

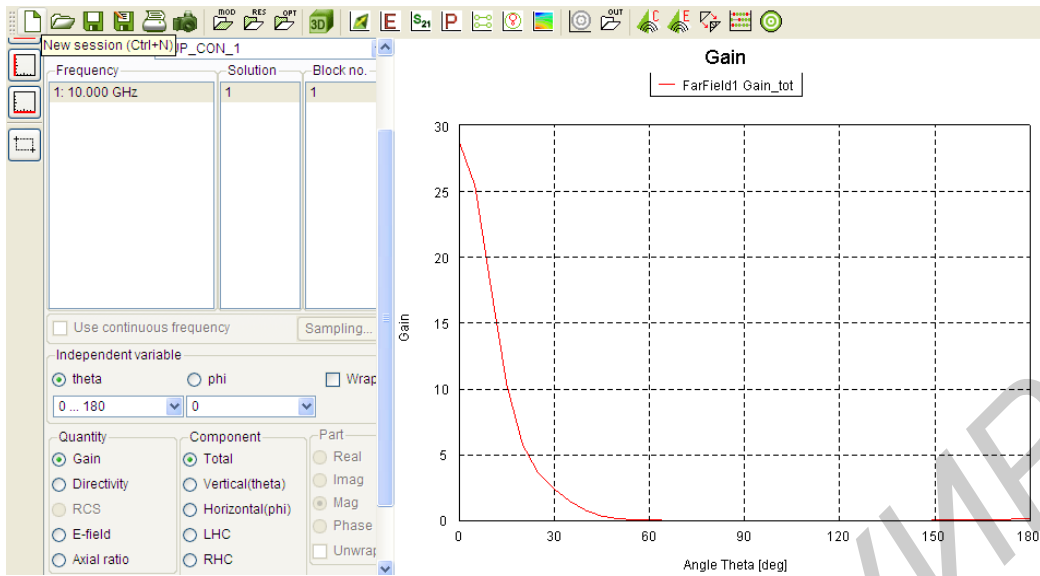


Рис. 2.61 Зависимость коэффициента усиления от угла Theta

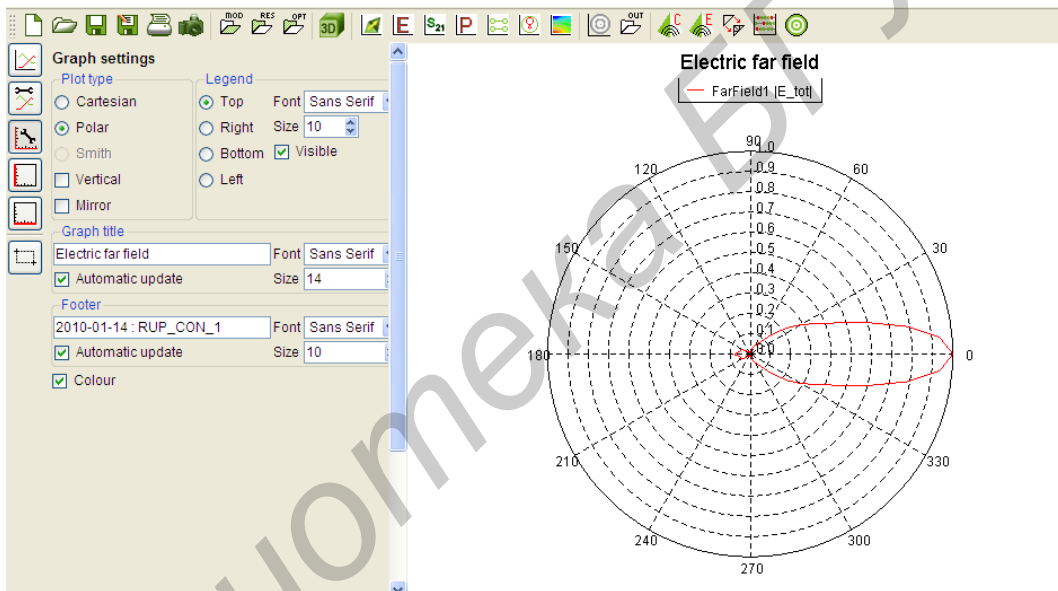


Рис. 2.62 Нормированная ДН в полярных координатах

### 3. Моделирование пирамидального рупора в пакете HFSS

#### 3.1. Описание интерфейса

HFSS – это пакет программ, предназначенный для моделирования СВЧ устройств и расчета их характеристик, в том числе моделирования характеристик и параметров антенн. Конструктивный модуль HFSS позволяет сделать это, используя набор графических примитивов. Расчетный модуль, использующий метод конечных элементов, проводит расчет электромагнитного поля для построенной модели.

В процессе конструирования виртуальной модели необходимо начертить анализируемое устройство, указать материалы для каждого объекта, определить порты и задать граничные условия на поверхностях.

Кроме того, постановка задачи включает установку частотного диапазона для анализа и определение условий сходимости решения.

Для ознакомления с HFSS рассмотрим пример создания модели пирамидального рупора и его анализа.

После запуска исполнительного модуля на экране монитора появится рабочий стол HFSS (рис. 3.1).

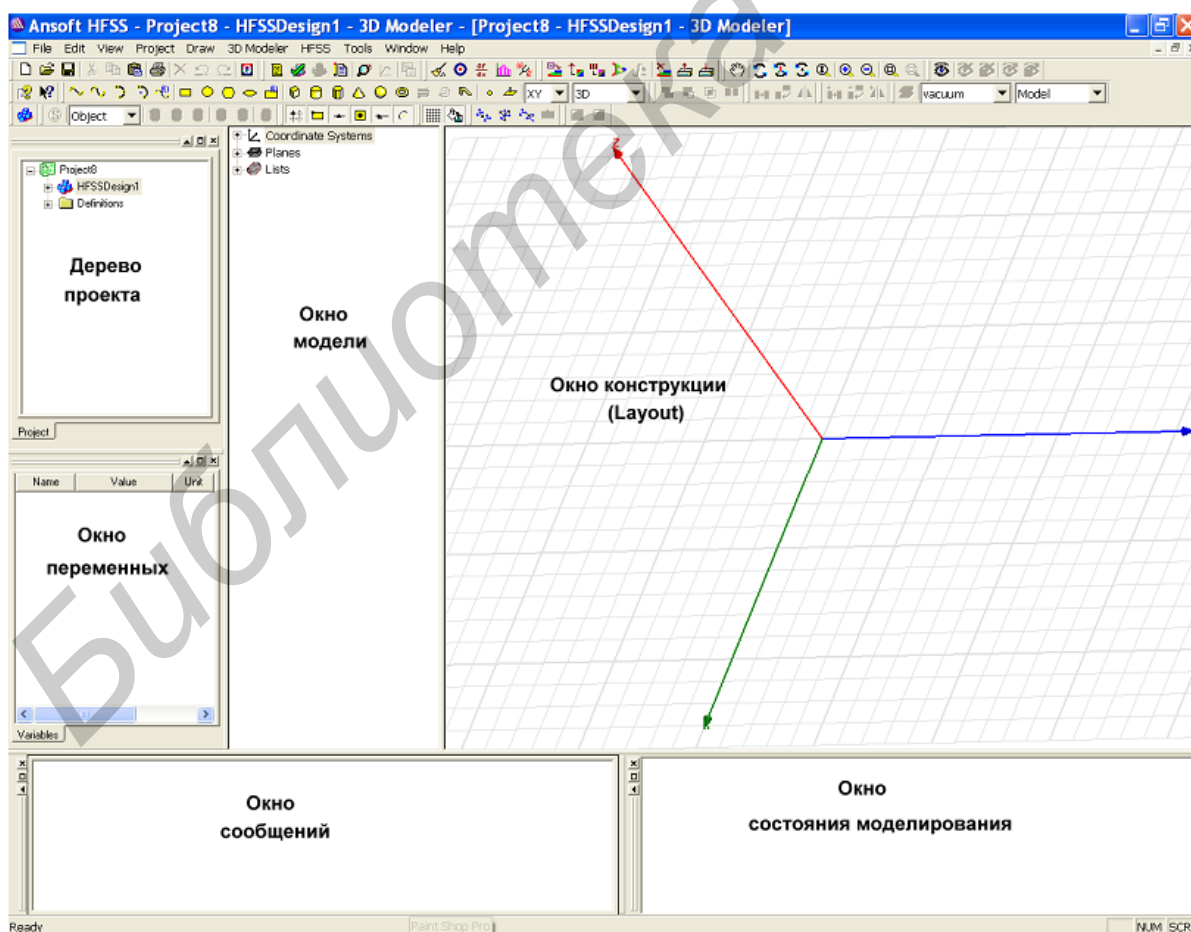


Рис. 3.1 Общий вид окна HFSS

Для того чтобы начать работать с проектом, в него необходимо включить хотя бы одну модель. Чтобы добавить в текущий проект новую модель, необходимо, используя меню, дать команду Project → Insert HFSS Design, либо на панели инструментов нажать кнопку. В результате выполнения этой команды в дерево проекта будет добавлен второй узел, которому по умолчанию присваивается имя HFSS Modeln, где n – порядковый номер модели, добавленной в текущий проект. В этом узле содержится вся информация о модели, включая граничные условия, рассчитанную структуру поля и результаты пост-процессорной обработки.

Нижний узел дерева проекта будет содержать перечень материалов, использованных при построении модели.

Включение в проект новой модели приведет к открытию окна 3D конструктора (3D Modeler), которое появится справа от окна менеджера проекта (Project Manager). При помощи 3D конструктора создается геометрия модели. Окно 3D конструктора разбито на две области – окно модели и окно конструкции.

Окно модели содержит дерево модели, в котором отражаются все действия пользователя в процессе построения модели.

Окно конструкции содержит графическое изображение модели.

Для работы с 3D конструктором необходимо задать единицу измерения размеров модели. Этой цели служит команда меню 3D Modeler → Units. В открывшемся диалоговом окне из списка выберем в качестве единицы измерения mm (миллиметр) и нажмем кнопку ОК.

Интерфейс стола HFSS содержит еще три дополнительных окна.


Окно переменных отображает либо параметры выделенного элемента в модели, либо данные выделенного пункта дерева проекта.

В окне сообщений выводятся сообщения, связанные с развитием проекта, такие, как сообщения об ошибках, возникающих в ходе конструирования модели, или информационные сообщения о ходе выполнения анализа модели.

Окно состояния отображает процесс решения задачи анализа построенной модели.

В качестве примера рассмотрим создание модели пирамидального рупора со следующими размерами: сечение питающего волновода – 23x10 мм, длина волновода – 50 мм, размеры апертуры рупора – 60x50мм, высота рупора – 150 мм, частота – 18 ГГц (рис. 3.2).

### 3.2. Создание модели пирамидального рупора

1. Начертить волновод. Выбрать в меню Draw ⇔  Box
2. Щелкнуть мышью в трех произвольных местах окна 3D проекции. Будет построен параллелепипед Box1 со случайными размерами сторон.
3. В дереве объектов развернуть ветвь Solids, найти объект Box1 и щелкнуть по подпункту «Create Box».

4. В окне Properties исправить значение начальной точки (строка Position) на минус  $a/2$ , минус  $b/2$ ,  $0\text{mm}$ . Нажать Enter. В появившемся окошке Add Variable для переменной a в поле Value ввести значение  $23\text{ mm}$ , для переменной b –  $10\text{mm}$ .

5. Последовательно исправить значения размеров параллелепипеда (окно Properties) – установите XSize равным a, YSize – b, ZSize – 75.

6. Создать еще один параллелепипед Box2. Отредактируйте его размеры – в поле начальной точки – Position ввести минус  $a/2$  минус  $0,5\text{mm}$ , минус  $b/2$  минус  $0,5\text{mm}$ ,  $0\text{mm}$ . Установить XSize равным  $a+1\text{mm}$ , YSize –  $b+1\text{mm}$ , ZSize – 75.

7. Вычесть из большего параллелепипеда меньший. Последовательно выделить Box2 и Box1. Выбрать пункт меню Modeler  $\Rightarrow$  Boolean  $\Rightarrow$   Subtract. Переименовать объект в Waveguide (изменить значение поля Name в окне Properties).

8. Создать раструб рупора. Начертить прямоугольник. Выбрать Draw  $\Rightarrow$   Rectangle. Щелкнуть в двух произвольных местах окна проекции, чтобы создать прямоугольник. Отредактировать параметры прямоугольника. В поле начальной точки – Position ввести минус  $a/2$ , минус  $b/2$ ,  $75\text{ mm}$ . Установим XSize равным a, YSize – b.

9. Создать еще один прямоугольник. Изменить параметры прямоугольника. В поле начальной точки – Position ввести минус 30, минус 25,  $75$ . Установить XSize равным 60, YSize – 50. Выделить прямоугольник и переместить его вдоль оси Z: выбрать пункт Edit  $\Rightarrow$  Arrange  $\Rightarrow$  Move. Указать начальную точку  $X = 0$ ,  $Y = 0$ ,  $Z = 0$  и смещение  $dx = 0$ ,  $dy = 0$ ,  $dz = 75$ .

10. Выделить два созданных прямоугольника и соединить их, выбрав пункт Modeler  $\Rightarrow$  Surface  $\Rightarrow$  Connect. Будет построена пирамида, соответствующая раструбу рупора. Переименовать объект в Pyramid1.

11. Начертить прямоугольник. Отредактировать параметры прямоугольника. В поле начальной точки – Position ввести минус  $a/2 - 0,5\text{mm}$ , минус  $b/2 - 0,5\text{mm}$ ,  $75\text{mm}$ . Установим XSize равным  $a+1\text{mm}$ , YSize –  $b+1\text{mm}$ .

12. Создать еще один прямоугольник. Изменить параметры прямоугольника. В поле начальной точки – Position ввести минус 31, минус 26,  $75$ . Установить XSize равным 62, YSize – 52. Выделить прямоугольник и переместить его вдоль оси Z: выбрать пункт Edit  $\Rightarrow$  Arrange  $\Rightarrow$  Move. Указать начальную точку  $X = 0$ ,  $Y = 0$ ,  $Z = 0$  и смещение  $dx = 0$ ,  $dy = 0$ ,  $dz = 75$ .

13. Выделить два созданных прямоугольника и соединить их выбрав пункт Modeler  $\Rightarrow$  Surface  $\Rightarrow$  Connect. Переименовать объект в Pyramid2.

14. Вычесть из большей пирамиды меньшую. Последовательно выделить Pyramid2 и Pyramid1. Выбрать пункт меню Modeler  $\Rightarrow$  Boolean  $\Rightarrow$   Subtract.

15. Объединить раструб и волновод. Выделить объекты Waveguide и Pyramid2, выбрать Modeler  $\Rightarrow$  Boolean  $\Rightarrow$   Unite.

16. Назначить материал. Выделить рупор и выбрать Assign Material. В списке материалов выбрать Silver и нажать «Ok». Рупор готов.



17. Создать объект, который будет ограничивать расчетную область. Начертить параллелепипед с начальной точкой минус 35 ,минус 30 ,0, размерами XSize – 70, YSize – 60, ZSize – 200. В качестве материала выбрать vacuum.

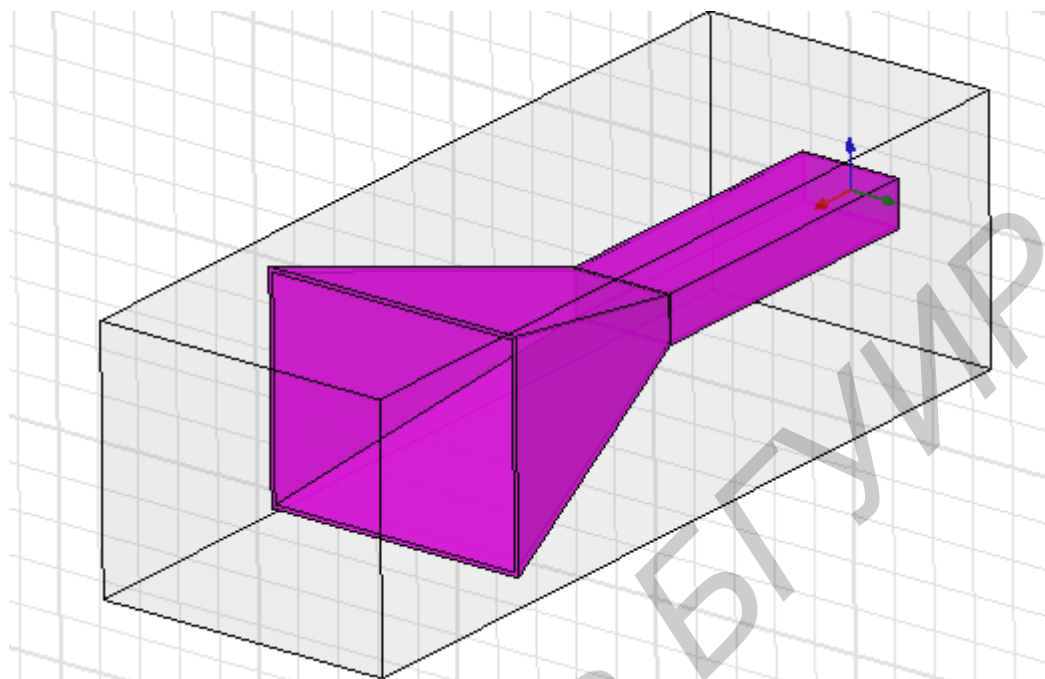


Рис. 3.2. Модель пирамидального рупора

### 3.3. Установка частоты, граничных условий и возбуждения

1. Задать рабочую частоту 18 ГГц. Выбрать меню HFSS  $\Rightarrow$  Analysis Setup  $\Rightarrow$  Add Solution Setup. В поле Solution Frequency установить 18 GHz, Maximum Number of Passes – 10.
2. Выделить воздушный параллелепипед и щелкнув правой кнопкой мыши, выбрать в контекстном меню пункт Assign Boundary  $\Rightarrow$  Radiation. Для всех направлений осей координат задать граничные условия Open (в меню Solve  $\Rightarrow$  Boundary Conditions).
3. Создать порт, который будет возбуждать рупор. Начертить прямоугольник с начальной точкой минус  $a/2$  , минус  $b/2$  ,0 mm и размерами a,b. Выделить порт и в контекстном меню (открывается щелчком правой кнопки мыши) выбрать Assign Excitation  $\Rightarrow$  Wave Port.
4. Пропустить пункт изменения имени порта, т.е. нажать «Далее». В поле Integration Line выбрать New Line. Навести курсор на середину нижнего ребра внутренней части волновода, курсор примет форму треугольника, щелкнуть мышью. Провести линию характеристического сопротивления к середине верхнего ребра и щелкнуть мышью – поле Integration Line примет значение Defined (если этого не произошло – провести линию заново). Нажать «Далее» и «Готово» (рис. 3.3).

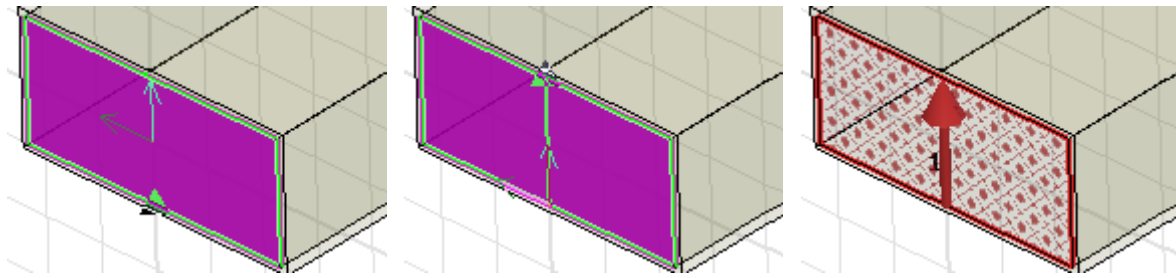


Рис. 3.3. Черчение линии характеристического сопротивления

### 3.4. Расчет диаграммы направленности и структуры поля

1. Установить параметры для расчета диаграммы направленности. В дереве проекта выбрать пункт Radiation  $\Rightarrow$  Insert Far field Setup  $\Rightarrow$  Infinite Sphere.

2. Установить начальные и конечные значения углов наблюдения  $\phi$  и  $\theta$  (например,  $\phi$  start = 0, stop = 360, step = 10;  $\theta$  start = 0, stop = 90, step = 3).

3. В дереве проекта выбрать пункт Results  $\Rightarrow$  Create Far field Reports  $\Rightarrow$  3D Polar Plot. В появившемся окне можно выбрать тип графика. В списке Category выделить пункт rE (rE Total) – диаграмму направленности по полю.

4. Выбрать нижнюю грань воздушного параллелепипеда (при необходимости перейти в режим выделения граней с помощью «горячей» клавиши «f»). Щелкнув правой кнопкой мыши, выбрать в контекстном меню Plot Fields  $\Rightarrow$  E  $\Rightarrow$  Mag E.

### 3.5. Запуск программы на моделирование

1. Проверить правильность создания модели, нажав Validate.

2. Запустить программу на расчет кнопкой Analyze All (в панели инструментов либо в меню HFSS  $\Rightarrow$  Analyze All).

### Просмотр результатов моделирования

*Просмотр структуры E-поля.* В дереве проекта выбрать Field Overlays – E-Field – Mag\_E1. На экране мы увидим соответствующую картину (рис. 3.4).

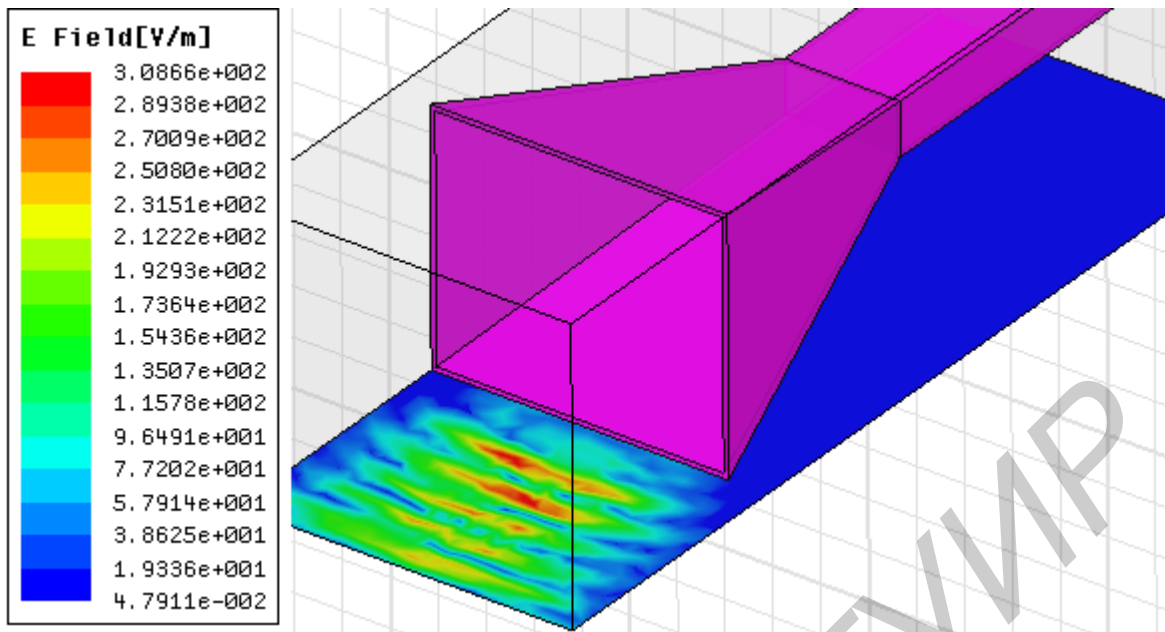


Рис. 3.4. Картина напряженности E-поля вблизи рупора

*Вывод диаграммы направленности.* В дереве проекта выбрать Results ⇨ 3D Polar Plot ⇨ rE Total. На экране отобразится трехмерная диаграмма направленности (рис. 3.5).

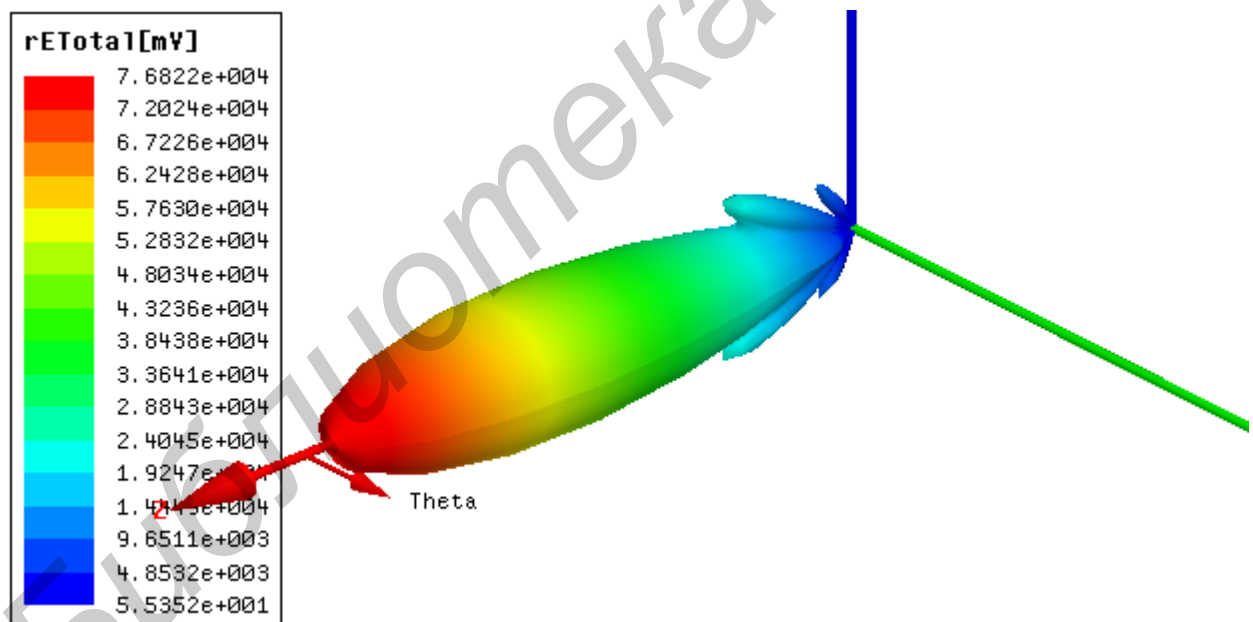


Рис. 3.5. Диаграмма направленности рупора

## Заключение

Процесс освоения современного программного обеспечения на студенческой скамье, доведенный до понимания тонкостей процесса проектирования – это новый и очень перспективный шаг в обучении и подготовке специалиста высокой квалификации.

В настоящее время можно сказать, что внедрение в процесс проектирования численных методов, реализованных на персональных компьютерах, получает все более широкое распространение.

К концу XX в. все методы решения получили достойное воплощение в программах ведущих компаний мира. Это программы HFSS, CST, MWO, ADS, FEKO и др. Внедрение в процесс обучения названных систем можно считать важным этапом инженерного образования.

Описанные в пособии программы уникальны в нашей республике тем, что освоение их предполагает глубокое знание теоретической базы.

Решение одной и той же задачи методами, принципиально отличающимися друг от друга, например с помощью метода конечных элементов (HFSS), метода FDTD (CST), метода моментов и методов геометрической оптики (FEKO), позволяют нам сделать вывод (если решение получаются близкими или точно равными) о том, что именно чисто компьютерное моделирование в конечном итоге дает точное решение задачи. Это, возможно, еще одно доказательство того, что мир устроен из одного центра, что научные идеи создания мира принципиально переплетаются и создаются по одним принципам. Надеемся, что решение разнообразных задач, которые приведены в данном пособии, закрепит теоретические знания о современных методах проектирования, которые представлены в программах CST, FEKO, HFSS.

## Литература

1. CST Product Range [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.cst.com/Content/Products/Products.aspx>. – Дата доступа: 25.10.2011.
2. FEKO offers many features to enhance the productivity and performance of the simulations. [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.feko.info/product-detail>. – Дата доступа: 25.10.2011.
3. 3D Full-wave Electromagnetic Field Simulation. [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>. – Дата доступа: 25.10.2011.
4. Курушин, А. А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio/ А. А. Курушин, А.Н. Пластиков. – М. Издательство МЭИ, 2010.
5. Банков, С.Е. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS / С.Е.Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг. – М.: Солон-Пресс. 2005.
6. Банков, С.Е. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft/ С.Е. Банков, А.А. Курушин – М, ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009.
7. Банков, С.Е. Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO/ С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М., ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009.
8. Разевиг, В.Д. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office / В.Д. Разевиг, Ю.В. Потапов, А.А. Курушин. – М.: Солно-Пресс. 2003.

Св. план 2011. поз. 84(вед.)

Учебное издание

**Юрцев Олег Анатольевич,  
Бобков Юрий Юрьевич,  
Кизименко Вячеслав Владимирович и др.**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН В РЕЖИМАХ ИЗЛУЧЕНИЯ  
И РАССЕЯНИЯ В ПАКЕТАХ CST STUDIO, HFSS, FEKO И  
УЗКОСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММАХ**

**МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

по дисциплинам «Антенны и устройства СВЧ», «Методы и устройства формирования информационных электромагнитных полей», «Распространение радиоволн в антенно-фидерных устройствах», «Техника СВЧ и КВЧ в медицинских приборах» для студентов специальностей 1-39 01 01, 1- 39 01 02, 1- 39 01 03, 1-39 01 04, 1- 31 80 07, 1- 39 80 01

Редактор Т. П. Андрейченко.....

---

Подписано в печать  
Гарнитура «Таймс».  
Уч. - изд. л. 3,0

Формат 60 × 84 1/16.  
Отпечатано на ризографе.  
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л.  
Заказ 364

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6