СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Банков С.Е., Курушин А.А.

Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO

РОДНИК
СИСТЕМНЫЙ ИНТЕГРАТОР

СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Банков С.Е., Курушин А.А.

Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO

ЗАО «НПП «РОДНИК»
Ведущий поставщик систем
проектирования и моделирования
СВЧ-устройств на территории
России, СНГ и стран Балтии

Поставка
Техническая поддержка
Обучение. Консультации
www.rodnik.ru , sales@rodnik.ru
8 (499) 613-7001; 8 (499) 613-2688

Москва 2009

УДК 621.3.049.77.029:681.3.06

Банков С.Е., Курушин А.А.
Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO – М., ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009, 200 стр.

Данная книга представляет собой первое учебное пособие для систематического освоения одной из самых мощных современных программ электродинамического моделирования FEKO. Программа FEKO предоставляет новый подход к проектированию трехмерных СВЧ устройств, основанный на нескольких методах расчета. FEKO - это универсальная платформа, которая объединяет утилиты EDITFEKO, POSTFEKO, PREFEKO, OPTFEKO, TIMEFEKO для проектирования систем больших электрических размеров.

В книге рассмотрены более десяти задач, которые решаются пошагово, с полным пояснением действий и выводом результатов после каждого шага решения. В этих задачах используются самые современные структуры антенн и конструкций. Рассматривается оптимизация СВЧ структур, значительно повышающая эффективность проектирования.

Пособие предназначено для широкого круга специалистов, студентов и аспирантов, изучающих проектирование СВЧ приборов и различные методы расчета электромагнитных полей в неоднородных средах.

При необходимости более детального ознакомление с предложенным САПР, Вы можете принять участие в семинарах, проводимых авторами в Учебно-консультационном центре «ЗАО «НПП «РОДНИК». Предварительную заявку на обучение, а также на приобретение программы Вы можете направить по эл. адресу: anisimov@rodnik.ru, телефону 8 (499) 6137001, факсу 8 (499) 3179754.

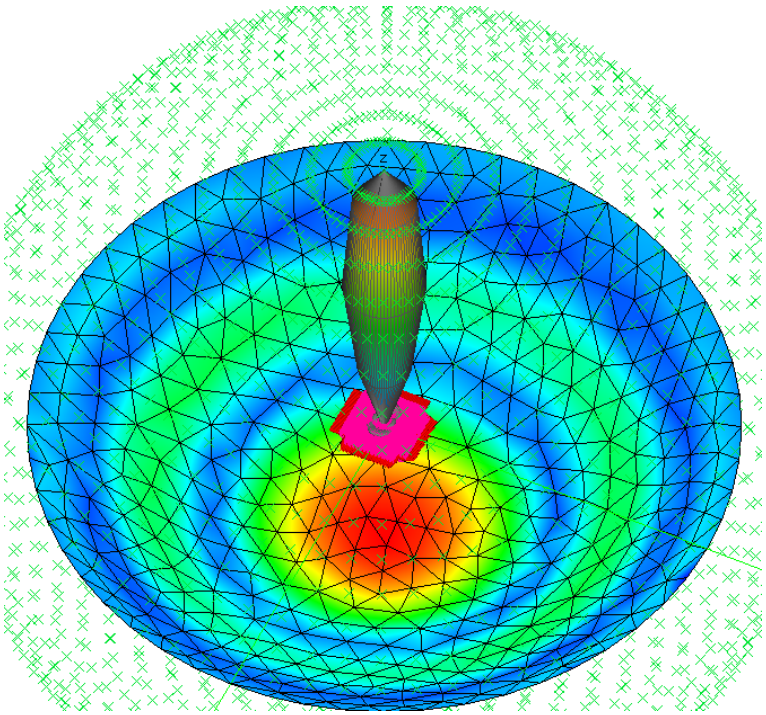
Авторы выражают признательность ЗАО «НПП «РОДНИК» за финансовую поддержку при издании пособия.

УДК 621.3.049.77.029:681.3.06

© Банков С.Е.,
© Курушин А.А.
© ЗАО «НПП «РОДНИК» – макет, издание

1. Введение

Освоение методов проектирования СВЧ систем начинается с изучения теоретических основ распространения радиоволн, и продолжается в процессе практического решения задач. В данном пособии рассматривается ряд ключевых задач, которые можно считать шаблонами для будущей работы инженера и исследователя.



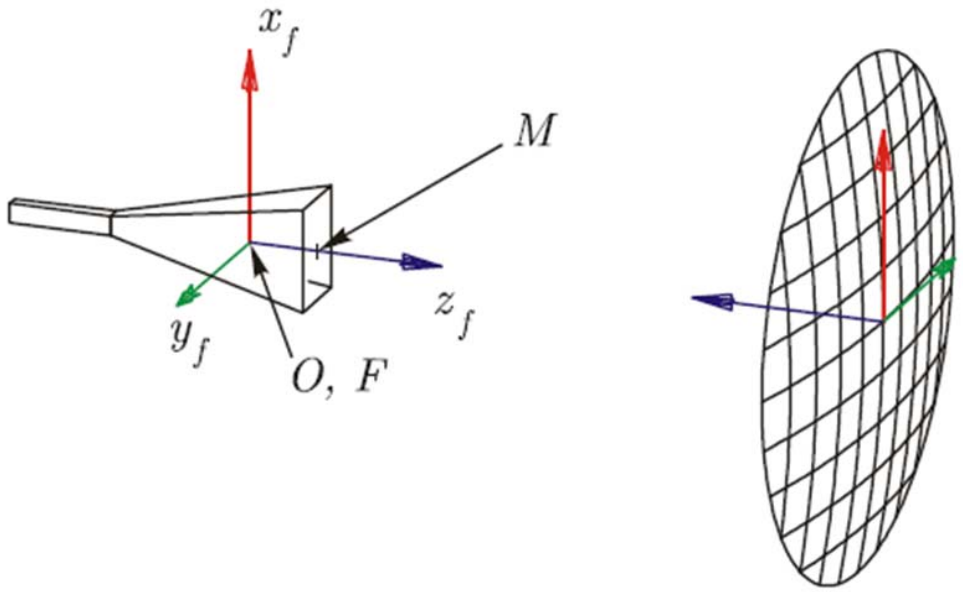
Главным инструментов будет программа FEKO, которая нашла много сторонников, работающих в области проектирования СВЧ устройств, вместе с HFSS, CST, MWO и другими коммерческими программами. Работа и усвоение алгоритмов расчета могут стать базой для создания собственной узкоспеция-лизированной программы.

Особое место среди задач, решаемых САПР РЭА занимают задачи излучения и рассеяния электромагнитных волн. Их отличие от задач анализа печатных или волноводных схем состоит в необходимости определения поля в области больших электрических размеров (под электрическим размером понимается отношение геометрического размера к длине волны в свободном пространстве). Дискретизация больших областей порождает задачи огромной размерности. Поэтому использование таких методов, как МКИ и FDTD [3] здесь заведомо неэффективно. Более того, часто оказывается неэффективным существенно более экономичный МОМ. В этом случае строгие методы электродинамики необходимо дополнить, так называемыми,

асимптотическими методами: физической оптики (ФО), геометрической теории дифракции (ГТД) и т.д. Гибридные подходы, использующие ФО и ГТД, реализованы в системе FEKO.

Программа FEKO [1,2] предназначена для решения широкого круга задач, связанных с проектированием СВЧ устройств и антенн, рассеянием электро-магнитных волн на сложных объектах, распространением радиоволн в городских условиях и т.д.

Главной особенностью программы FEKO (в пособии в основном рассматривается версия 5.2, но отдельные положения распространяются и на версию 5.4), отличающей ее от других коммерческих программ электромагнитного проектирования, является удачное сочетание базового метода моментов (МОМ) [3], с приближенными аналитическими методами: методом физической оптики (МФО) и однородной теории дифракции (ОТД). Такое сочетание позволяет преодолеть главный недостаток программ компьютерного моделирования высокочастотных структур: большие затраты ресурсов при моделировании объектов с размерами много большими длины волны. В результате появляется возможность решения таких задач, как рассеяние радиоволн на самолете или корабле и распространение радиоволн в городских условиях с хорошей точностью. Ключевой задачей в сборнике можно считать задачу облучения параболической антенны, которая описана методом геометрической оптики, рупорной антенной.



Рупорная антенна, облучаемая рефлекторную параболическую антенну

В последнее время опыт СВЧ проектирования все больше обогащается и убеждает, что на многих этапах проектирования исключение экспериментальных измерений не ухудшает конечный результат. Это означает, что точное моделирование приведет, в конце-концов, к полностью компьютизированному проектированию радиотехнических систем большой сложности.

Опыт внедрения САПР СВЧ показал, что лучшей программой для разработчика становится та, которую он лучше всего знает, быстрее осваивает. Жизнь описания программ соизмерима с жизнью очередной версии программы и сокращается до года. Поэтому, представляя эту книгу, мы отмечаем, что не вносим в неё теоретический материал, а ограничиваемся подробным описанием последовательности работы на программе.

Надеемся, что данная книга будет важным дополнением к уже имеющейся литературе по FEKO и САПР СВЧ, и будет полезной для студентов радиотех-нических специальностей и инженеров, специализирующихся в области проектирования широкого класса устройств СВЧ и антенн.

Работа над книгой распределилась следующим образом. Д.т.н. Банков С.Е. выработал и отредактировал теоретические положения, относящиеся к методам расчета, применяемым в FEKO: методу моментов, методу физической оптики и теории дифракции. Отработку выбранных примеров на занятиях 6 курса радиотехнического факультета МЭИ выполнил к.т.н. Курушин А.А. Остальная работа выполнена авторами совместно.

Благодарим к.т.н. Давыдова А.Г, к.т.н. Грибанова А.Н., студента РТФ МЭИ А.Пластикова за большую помощь и обсуждение рукописи.

Отзывы просим направлять в адрес ЗАО «НПП «РОДНИК», по эл. адресам: anisimov@rodnik.ru, kurushin@mail.ru.

2. Моделирование пирамидальной рупорной антенны

Рассмотрим последовательность моделирования рупорной антенны на частоте 1.645 ГГц с помощью программы FEKO v. 5.2. Рекомендуется ознакомиться с демонстрационным видео роликом[1], в котором показывается создание и анализ именно этой антенны (Демонстрационный видеофильм находится в папке инсталляции FEKO).

Прямоугольный рупор состоит из пирамидальной части и короткого волновода. Моделирование начинается с черчения конструкции, используя различные компоненты и приемы в CADFEKO. После расчета следует анализ результатов. Пример находится в каталоге examples\projects\horn.

2.1. Создание геометрии рупорной антенны в CADFEKO

Первым шагом при решении задачи в FEKO является черчение геометрии. Геометрия создается с помощью утилиты CADFEKO и заносится в файл ***.cfx**. Чтобы запустить CADFEKO (рис. 2.1), выберите команду *Programs → FEKO → CADFEKO*.

Появляется главное окно программы CADFEKO (рис. 2.1).

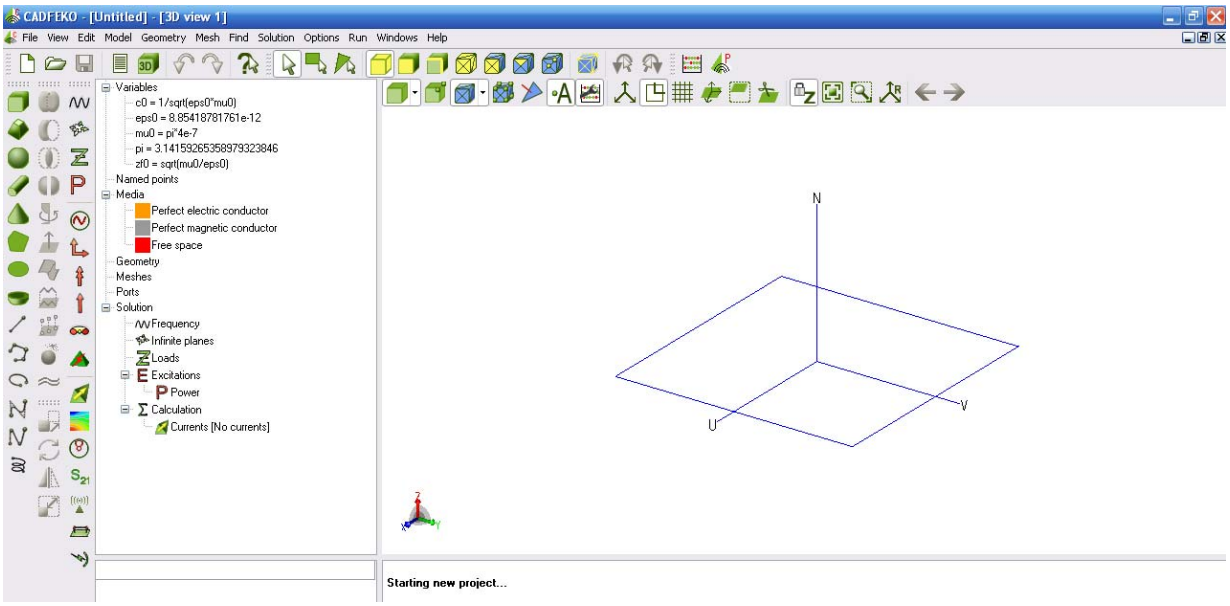


Рис. 2.1. Интерфейс программы CADFEKO

[1] Этот пример невозможно рассчитать на FEKO LITE. Пользователи FEKO LITE могут, однако, выполнить большинство этих шагов, в этом начальном примере.

Для просмотра готовой структуры рупорной антенны, задайте команду *File → Open* из главного меню в CADFEKO и выберите файл **horn.cfx** в директории **examples\projects\horn**.

Имеется ряд панелей, видимых на окне CADFEKO при запуске. Инструментальные панели слева связаны с созданием новой геометрии, редактированием геометрии, установкой параметров на решение и получением выходных данных от решающего устройства. Инструментальная панель мгновенно отражает любые изменения трехмерного представления в разделе реквизитов, типа установок рабочей плоскости, и установок, управляющих видимостью. Выше этой инструментальной панели – находится панель инструментов выбора для выбора объектов и его частей: фасок, граней и т.д. На панели также находится дерево проекта слева, и дерево подробностей ниже его (рис. 2.2). Информационное окно о каждом шаге действия пользователя находится ниже трехмерного представления рупора.

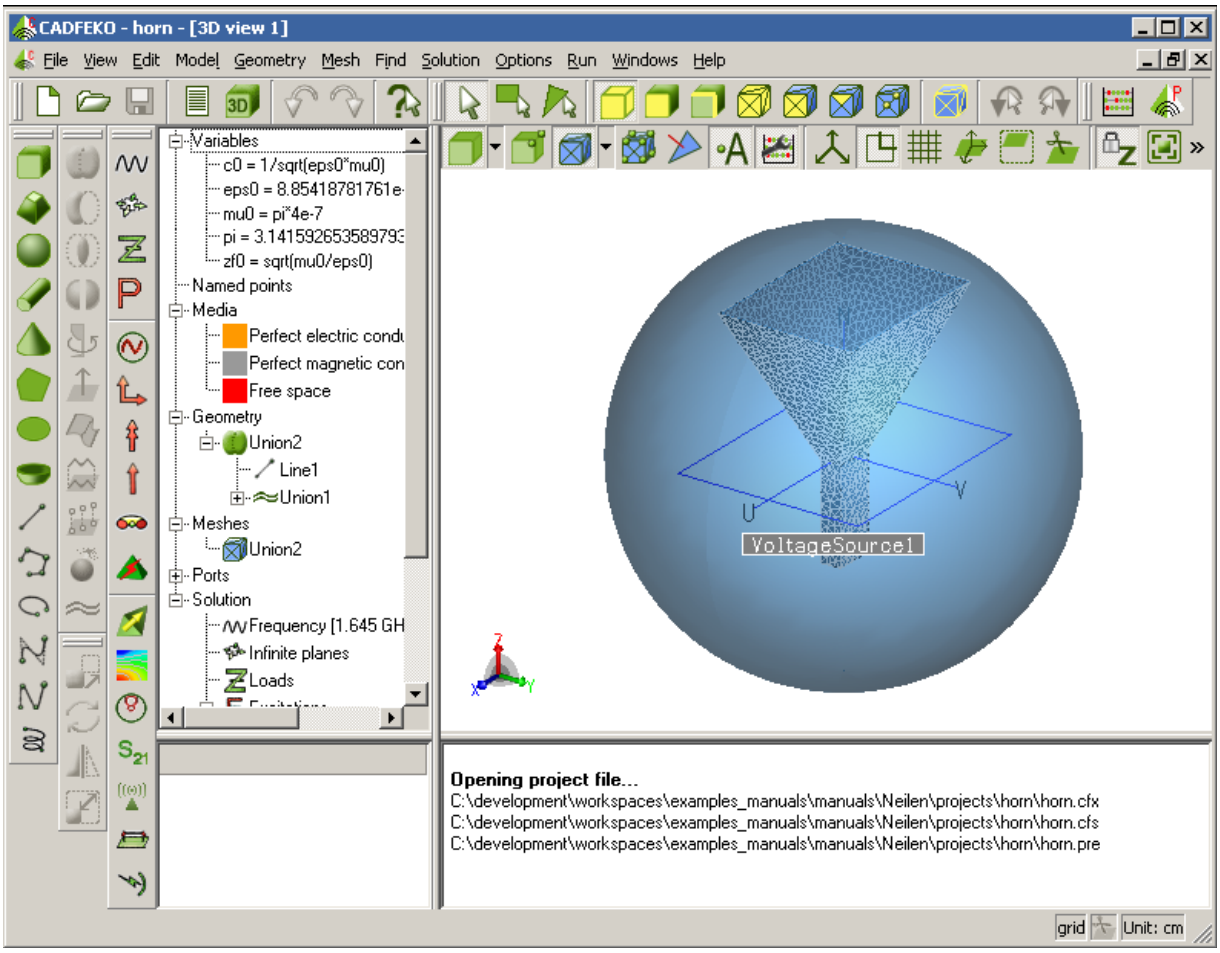


Рис. 2.2. Интерфейс программы CADFEKO

Размер изображения меняется, вращая колесо мыши. Нажатие мыши сдвигает и при перемещении вращает модель. Контекстно-зависимая справка вызывается в CADFEKO, нажимая <F1>.

2.2. Содержание дерева проекта

Дерево проекта (рис. 2.3) в FEKO находится слева от трехмерного представления. Оно содержит хронологию процесса создания геометрии, а также информацию о разбиении на сетку, точках порта, переменных, которые использовались во время процесса создания модели.

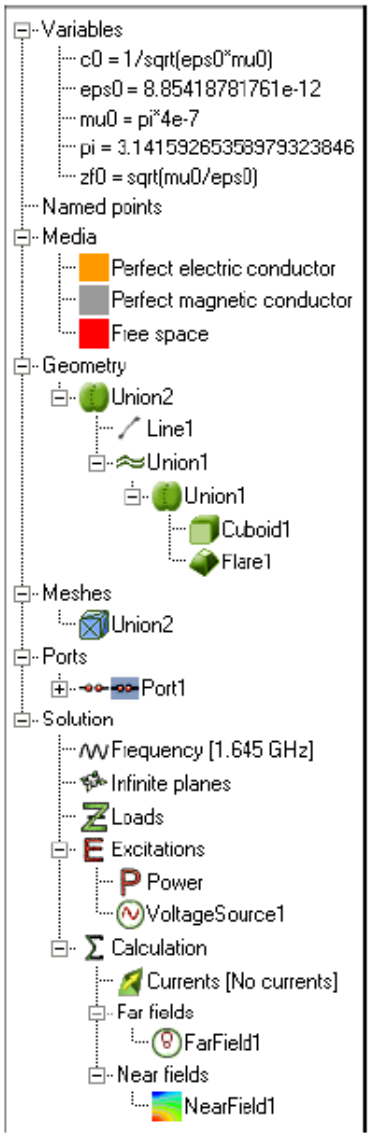


Рис. 2.3. Дерево проекта рупорной антенны

• раздел **Variables** содержит все переменные модели, а также физические константы.

• раздел **Named Point** содержит поименованные точки, используемые в модели – в этом примере не имеется ни одной точки.

• раздел **Media** перечисляет все среды, которые могут использоваться в этой модели. Здесь, никакие дополнительные материалы не были определены - доступны только значения по умолчанию.

• раздел **Geometry** содержит хронологию создания геометрии. В данном примере (рис. 2.3) она содержит одну компоненту с именем **Union2.** Эта компонента была сделана из двух частей, а именно **Line1** и **Union1**. Line1 –

линия, созданная без использования примитивов. Union1 имеет одну компоненту, также названную Union1, которая создана из двух примитивов, а именно Cuboid1 и Flare1.

• раздел **Meshers** содержит все параметры разбиения на ячейки в модели. Любые сетки разбиения, созданные на геометрии или разбиении импортированных объектов будут показываться в этой ветви.

• раздел **Ports** содержит порты. Эти порты используются для подключения к этим выводам нагрузок и источников возбуждений.

• раздел **Solvers** содержит все электромагнитные опции и запросы результатов расчета. Все источники и установка мощности перечислены в разделе *Excitations. Р*асчеты выполняются по команде Run -> FEKO .

Чтобы начать пример создания антенны с нуля, выберите команду **File -> New**.

Единицы длины (сантиметры) выбираются в диалоге **Model unit** (рис. 2.4), который появляется по команде *Model -> Units.*

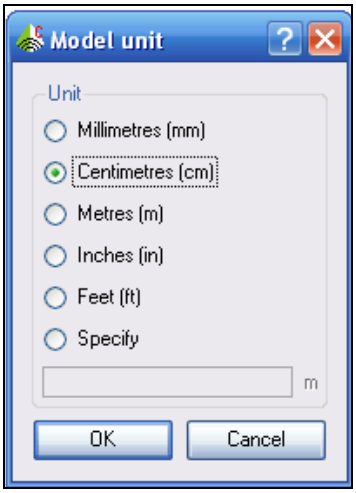


Рис. 2.4. Выбор единиц измерения (сантиметры)

Чтобы начертить отрезок волновода с размерами 12.96 см x 6.48 см x 30.2 см, нажмите на изображение куба . В появившемся диалоге **Create cuboid** (рис. 2.5) введем параметры параллелепипеда.

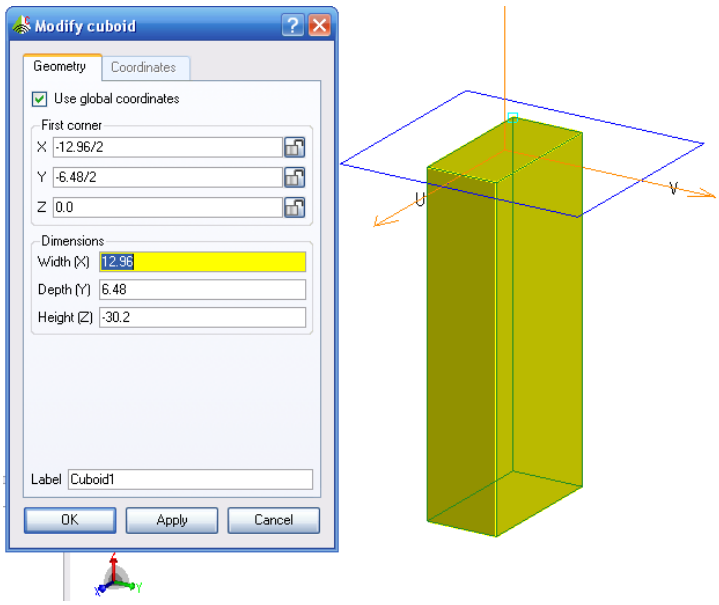


Рис. 2.5. Диалог параметров куба, служащего базой рупорной антенны

Выбрав режим глобальных координат, заполните диалог, внося в него координаты первой точки параллелепипеда, а также его геометрические размеры: ширину, глубину, высоту. После нажатия на OK, в разделе **Geometry** в дереве проекта (рис. 2.6) появляется имя ***Cuboid1***. После создания любого объекта, можно изменить его параметры: размеры, положение куба и его имя.

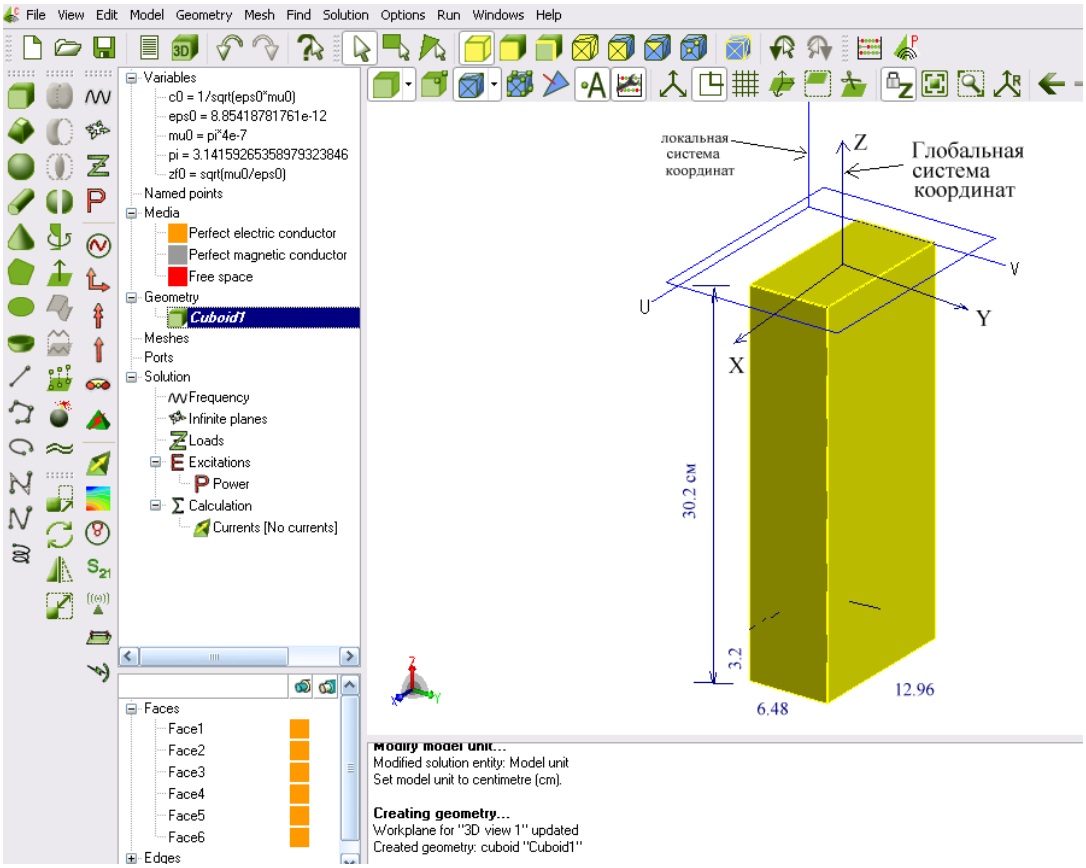


Рис. 2.6. Куб в дереве проекта и его фаски в разделе ниже дерева

Если в дереве проекта выбрать Geometry или Meshes, то в дереве подробностей, находящемся ниже дерева проекта, показывается дополнительная информация.

В окне подробностей (рис. 2.6) видим все составляющие параллелепипеда: его ребра, фаски, а также трехмерную область заполнения **Region**.

Выделим закладку **Region** в окне подробностей модели, выберем воздушное заполнение параллелепипеда (рис. 2.7).

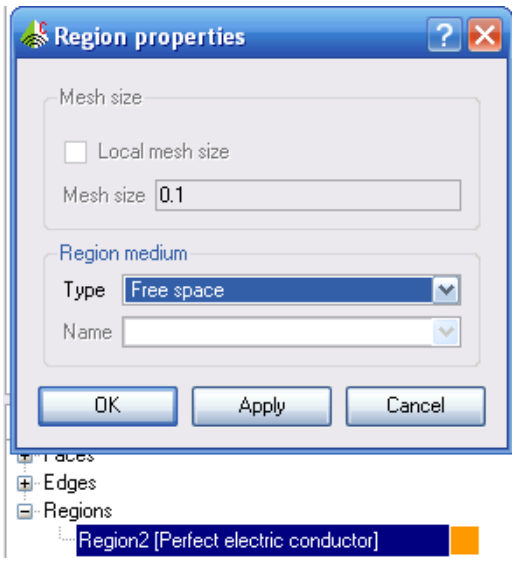


Рис. 2.7. Задание свойств объема (региона)

По умолчанию, что видно в дереве подробностей, стороны Face1…Face6 имеют идеальную проводимость (рис. 2.6). Свойство сторон можно видеть также по цвету кубика, который соответствует цвету кубика «Perfect electric conductor» в разделе **Media** дерева проекта (рис. 2.6).

Черчение рупора антенны

Далее, используя готовые шаблоны – примитивы, построим рупор антенны, для чего нажимаем кнопку пирамиды ***flare*** , и появляется диалог рис. 2.8.

Обратим внимание, что в этом примитиве центром базы будет (0,0,0). После черчения, придадим конусу заполнение рупора как воздушное (Region2=Free space).

Фаски пирамиды, идущие под номерами 8, 9, 11, 12 остаются металлом. Самой пирамиде придадим свойства свободного пространства в диалоге **Region properties** (рис. 2.7).

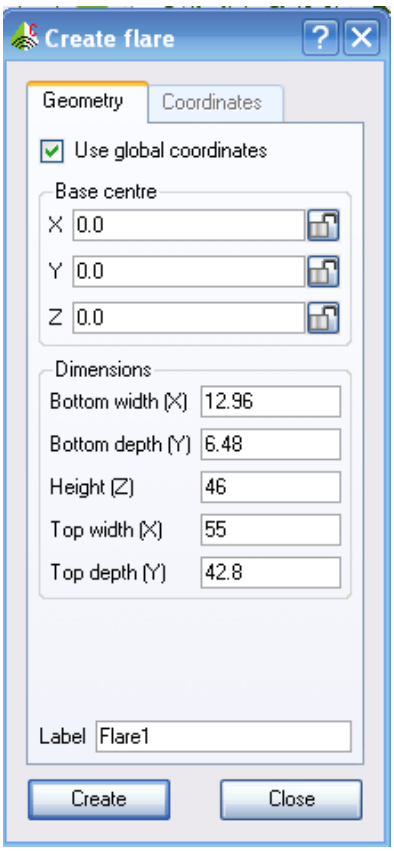


Рис. 2.8. Параметры пирамидальной части рупорной антенны

Теперь объединим обе части антенны – пирамиду и базовый параллелепипед командой **Unit,** выделив сначала обе части антенны в дереве проекта. Вся рупорная антенна, состоящая из двух частей, приобретет имя **Union1**.

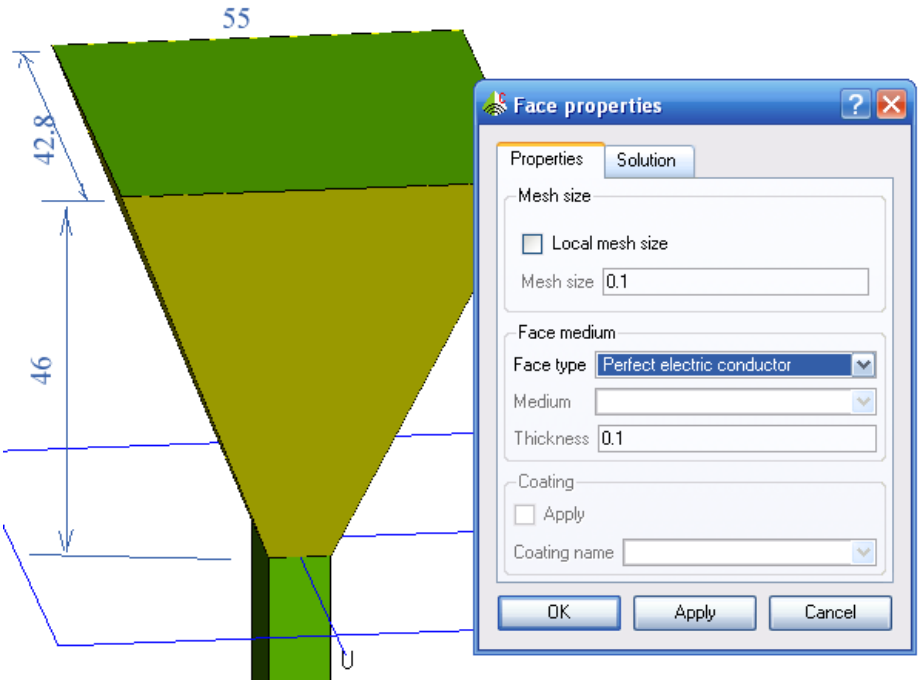


Рис. 2.9. Пирамидальная антенна, состоящая из пирамиды и базового параллелепипеда

Далее выполним, не обязательное в общем случае, упрощение геометрии командой **Geometry -> Symplify**. По этой команде появляется диалог **Simplify geometry** (рис. 2.10), в котором оставим все опции по умолчанию. По этой команде геометрия антенны упрощается, удаляются ребра на металлических фасках, ребра на диэлектрических поверхностях, провода внутри металлических областей, фаски между металлическими областями, фаски между одинаковыми диэлектрическими областями (рис. 2.10).

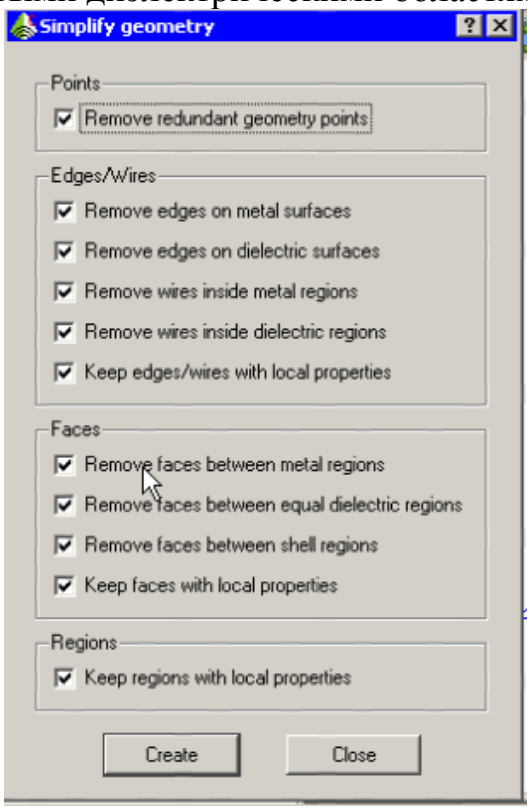


Рис. 2.10. Диалог упрощения геометрии

Чтобы «открыть» рупор для излучения, нужно удалить верхнюю фаску (растр), для чего выделим эту сторону пирамиды и удалим её командой **Delete** (рис. 2.11).

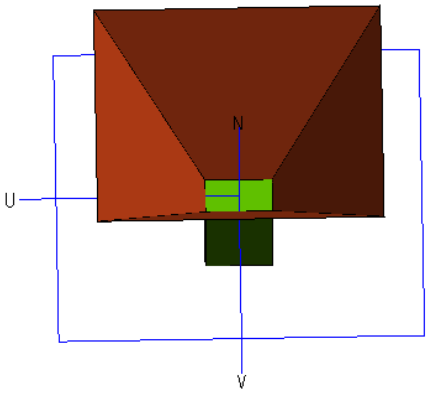


Рис. 2.11.Поворот рупорной антенны для того, чтобы выделить и удалить сторону

Если в ветви **Geometry** выбрана папка **Union1**, что означает выделение полностью объединенной структуры антенны, то видно, что дерево подробностей содержит две ветки **Faces** и **Edges**. Если геометрия содержит объем, то имеется ветвь **Region**. Выбирая грани, фаски или поверхности в этом дереве, могут быть установлены свойства этих компонентов. Для удобства дальнейшего построения, сделаем разрезание в плоскости ZoX, нажатием на кнопку . Появляется диалог, показанный на рис. 2.12.

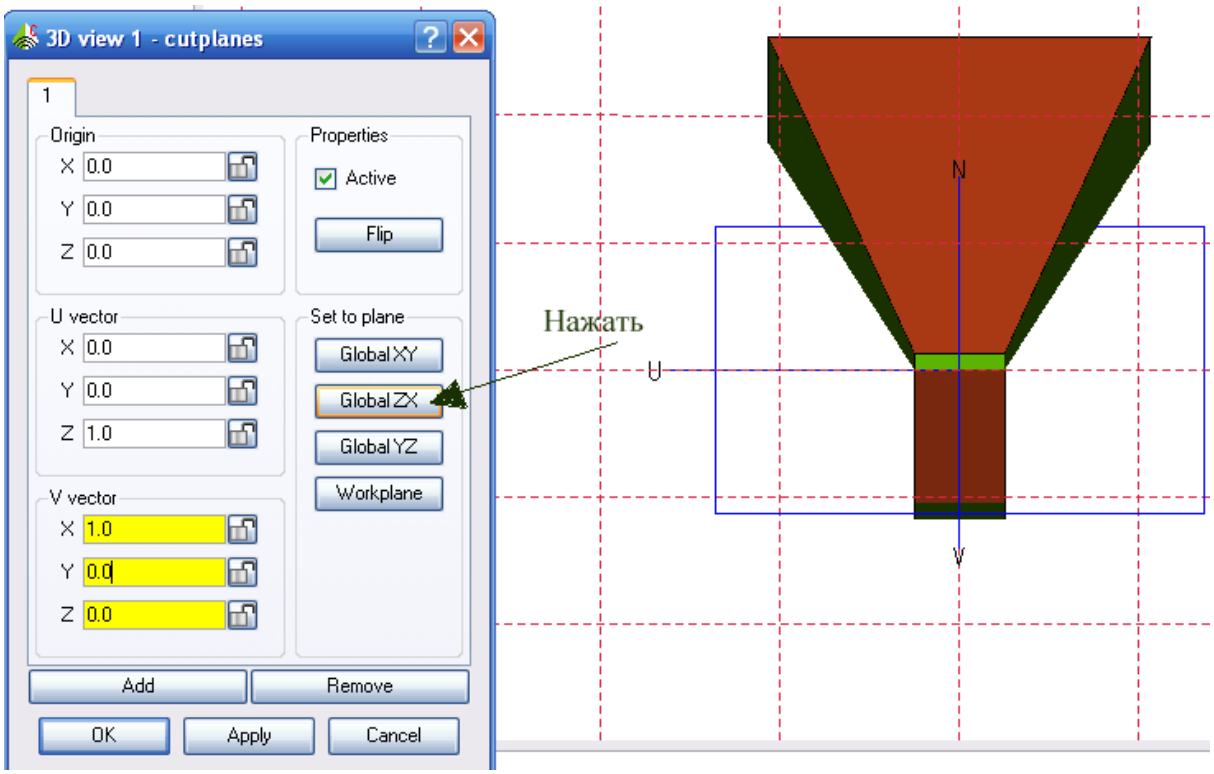


Рис. 2.12. Рупорная антенна и диалог просмотра трехмерного объект с разрезанием изнутри

Для получения нужного сечения нажмите кнопку **Global ZX** в диалоге. Теперь полость антенны будет открыта для создания фрагментов, лежащих внутри. Создадим линию провода, на который в последствии будет установлен источник напряжения, командой **Geometry -> Curve -> Line**) . В появившемся диалоге (рис. 2.13) введем координаты начала и конца линии.

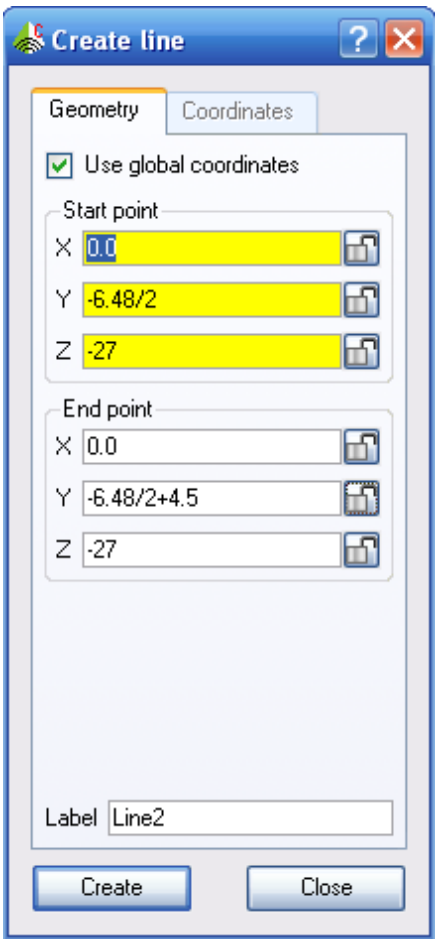


Рис. 2.13. Создание линии, по которой будет создан порт

Теперь создадим проводной порт командой **Creare port -> Wire port.** В отличие от программ HFSS, CST, в текущей версии FEKO не реализован волноводный порт. В данной модели рупорной антенны в волновод помещается проводной порт, в виде линейного тока возбуждения. Порт создается, выбирая его в ветви **Ports** дерева проекта (рис. 2.14) и заполняя диалог (рис. 2.15)

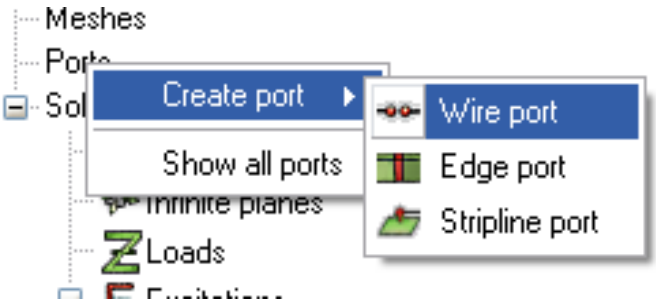


Рис. 2.14. Задание команды создания проводного порта

Выберите линию порта, дважды нажимая на нее в дереве подробностей (рис. 2.15). Тогда в разделе **Edge** появляется имя этой линии **Line2.Wire46**.

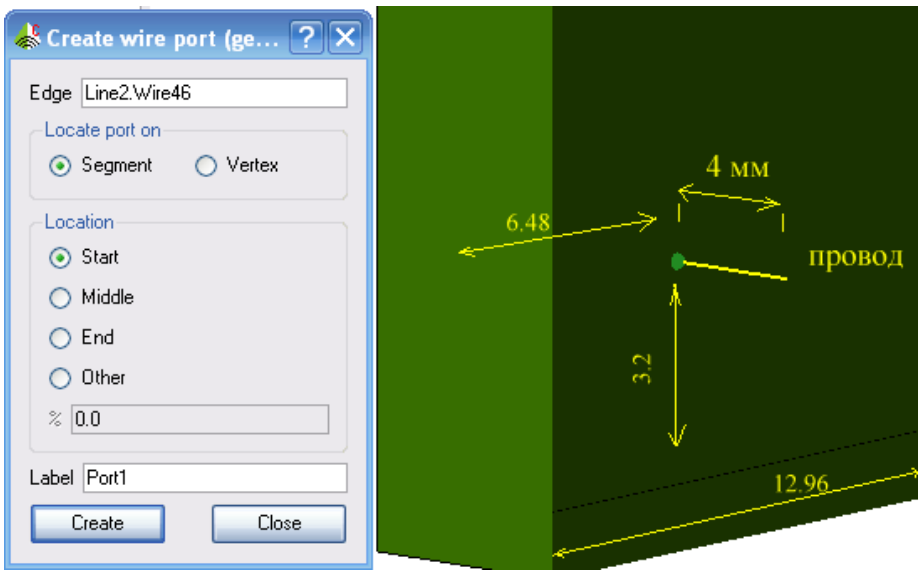


Рис. 2.15. Выделение провода, на который ставится проводной порт

Далее нужно указать, в каком месте провода будет установлен источник напряжения: в начале, середине или конце этой линии. Оставим опцию Start.

Теперь нужно задать источник возбуждения порта. Правильное подключение линии, на который ставится порт тогда, если начало порта входит точно в узел треугольников, на которые разбиты стороны (рис. 2.16).

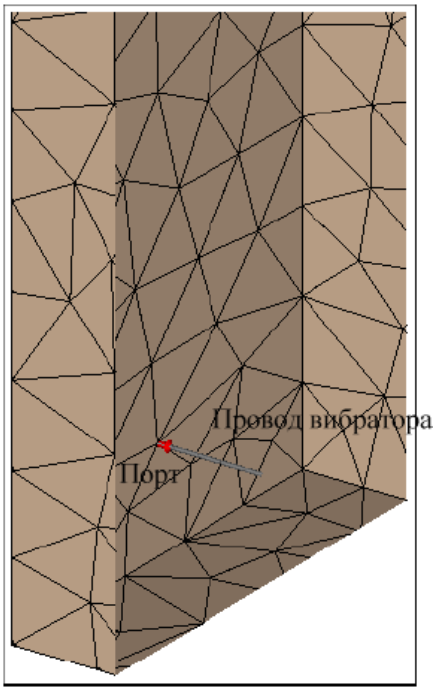


Рис. 2.16. Просмотр линии порта возбуждения

Выберите источник напряжения **Voltage source**, который будет установлен в порт, выбирая эту опцию правой кнопкой мыши в разделе **Excitation** (рис. 2.17).

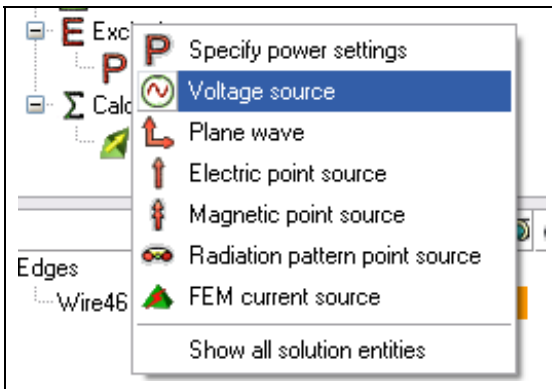


Рис. 2.17. Различные реализации порта: источник напряжения, плоская волна

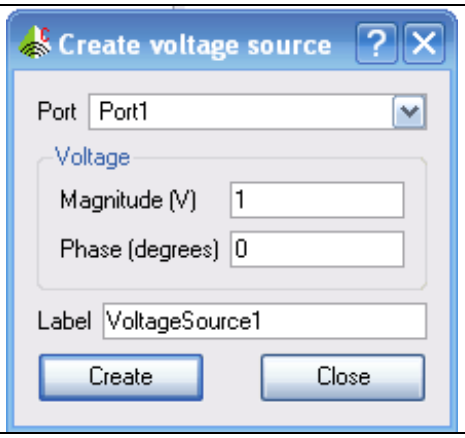


Рис. 2.18. Установка модуля и фазы источника напряжения

Появляется диалог рис. 2.18, в котором задаем модуль и фазу источника возбуждения антенны. В разделе **Excitation** дерева проекта появляется имя источника напряжения **Voltage Source 1**.

Теперь удаляем плоскость разреза, снимая свойство Active в диалоге **3D view -Cutplane**. Его можно вызвать (рис. 2.19), нажимая на кнопку .

Далее объединим линию и рупорную антенну булевой функцией **Unite**. Это нужно для того, чтобы при последующем разбиении на сетку это разбиение было выполнено правильно. Все ребра должны заканчиваться в узлах сетки.

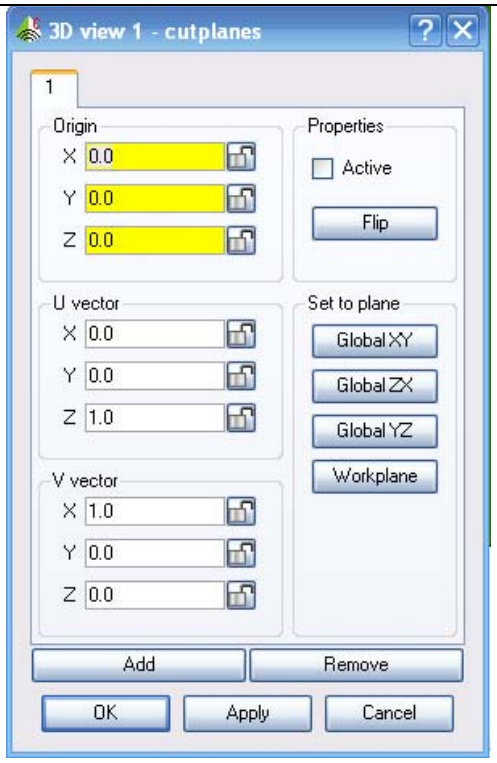


Рис. 2.19. Снятие разрезания плоскости

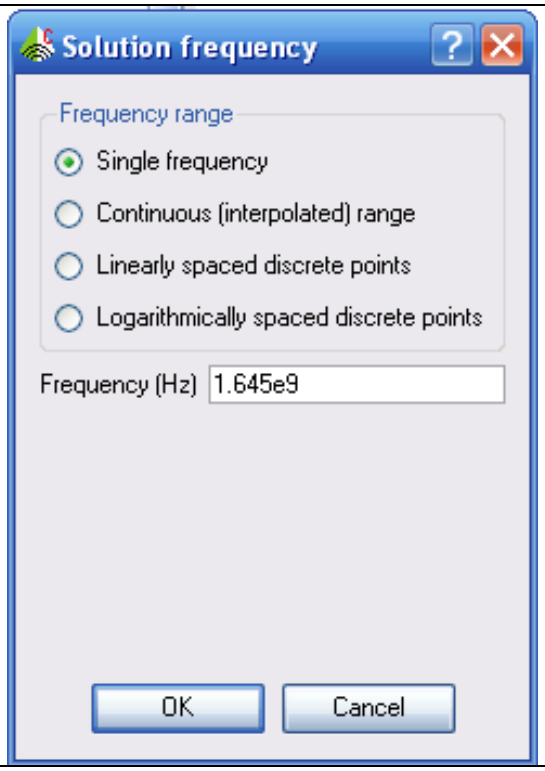


Рис. 2.20. Задание частот расчета

Зададим частоту, на которой будет выполнен расчет характеристик рупорной антенны. В пункте **frequency** в дереве проекта нужно задать частоту установки. Расчет можно выполнить на одной частоте (рис. 2.20), а также в полосе частот, выбирая опции **Continuous, Linearly spaced discrete points**.

Рассчитываемые характеристики также находятся в дереве проекта. Имеется установка *Far field* and *Near field* о расчете поля в дальней зоне и расчета ближнего поля. Зададим параметры расчета: Ближние поля в растре рупорной антенны. Для этого в дереве проекта правой кнопкой мыши нажмем **Calculation** и активизируем **Request near fields**.

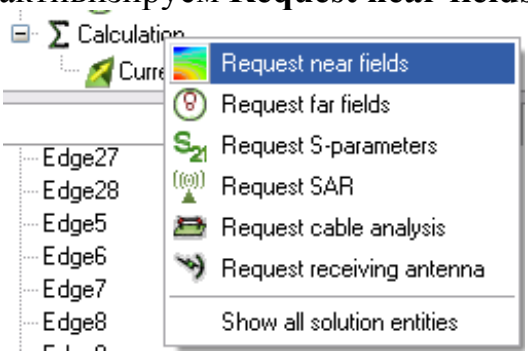


Рис. 2.21. Список добавления рассчитываемых характеристик

В появившемся диалоге (рис. 2.22) введем диаметральные точки прямоугольника, с размером рупора на высоте 46 мм, равному 54 мм на 42 мм, и точ-ки, в которых будут выведены данные о ближнем поле антенны. Что задать шаг следования этих точек, в которых будет рассчитано поле в раскрыве, введем в качестве опции **Increment** размеры, деленные на количество точек – 20.

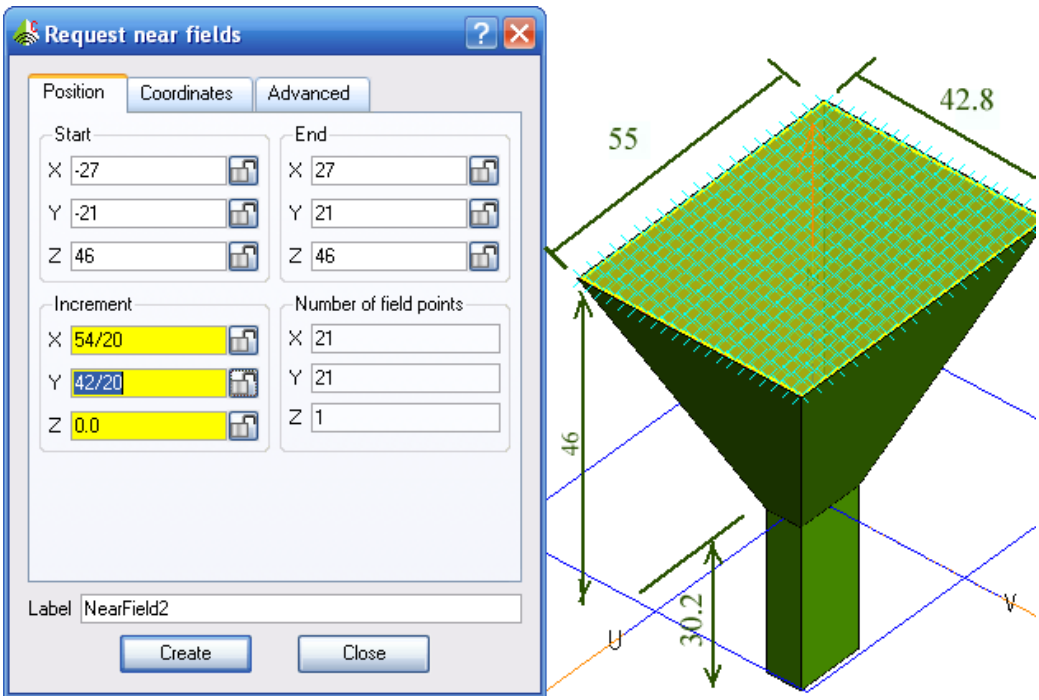


Рис. 2.22. Разбиение апертуры рупорной антенны на площадки, в которых будет рассчитываться ближнее поле

Чтобы рассчитать усиление антенны, выберем параметры дальнего поля (рис. 2.23) по запросу **Request far fields**.

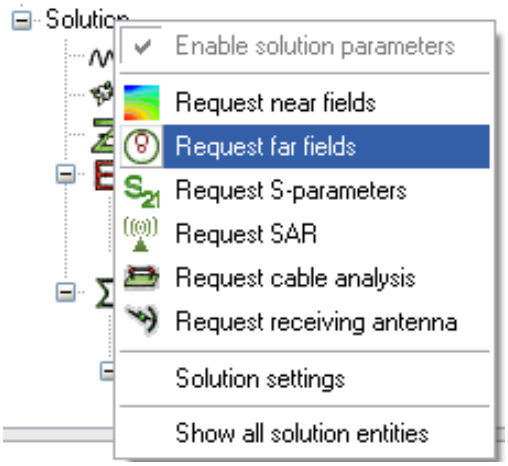


Рис. 2.23. Задание параметров дальнего поля

В появившемся диалоге, показанном на рис. 2.24, нужно выбрать разбиение по углу месту и азимуту, и таким образом точки, в которых будут рассчитаны параметры дальнего поля.

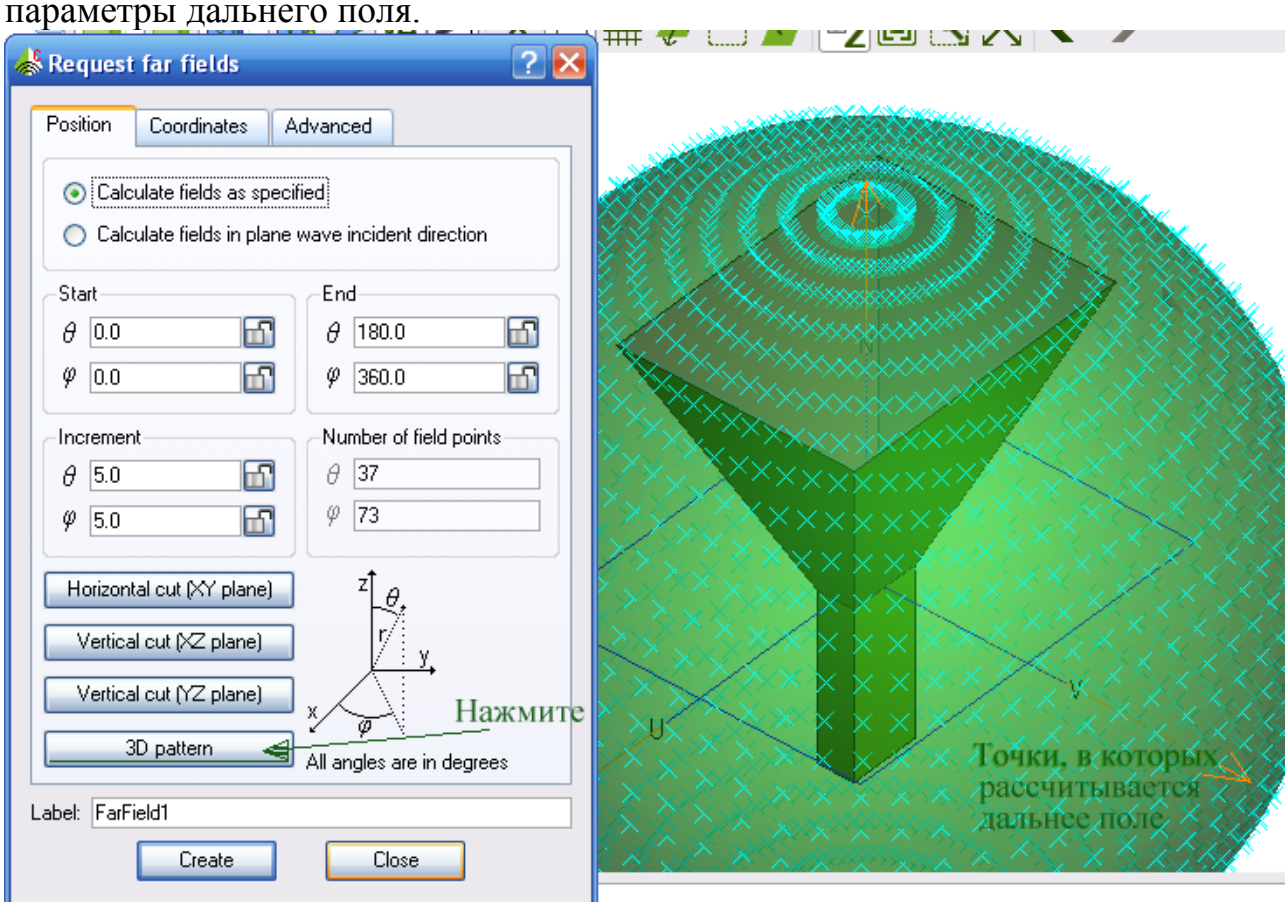


Рис. 2.24. Задание параметров дальнего поля для расчета диаграммы направленности

Теперь нужно выполнить разбиение всей конструкции антенны на сетку. По команде **Create Mesh** открывается диалог (рис. 2.25), в котором нужно выбрать все опции разбиения и нажать на **Create**. Можно также нажать на кнопку 3D pattern, для задания расчета 3-хмерной диаграммы направленности, а также горизонтальную и вертикальную плоскости сечения для расчета двумерных ДН.

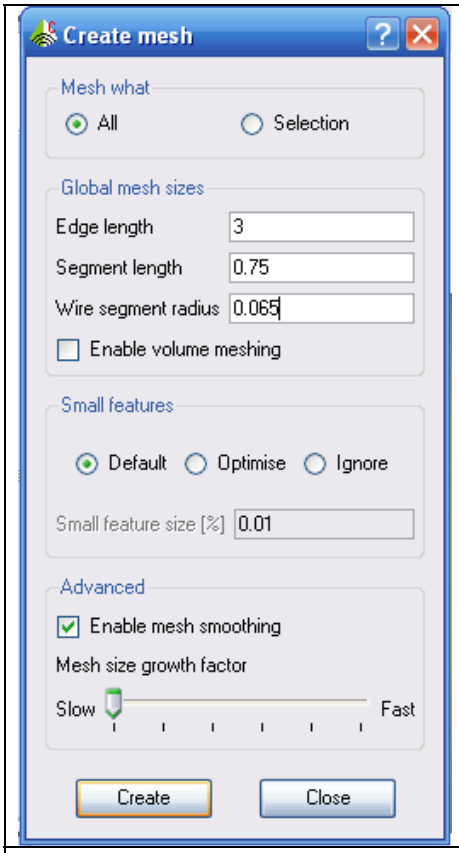


Рис. 2.25. Задание параметров разбиения на ячейки

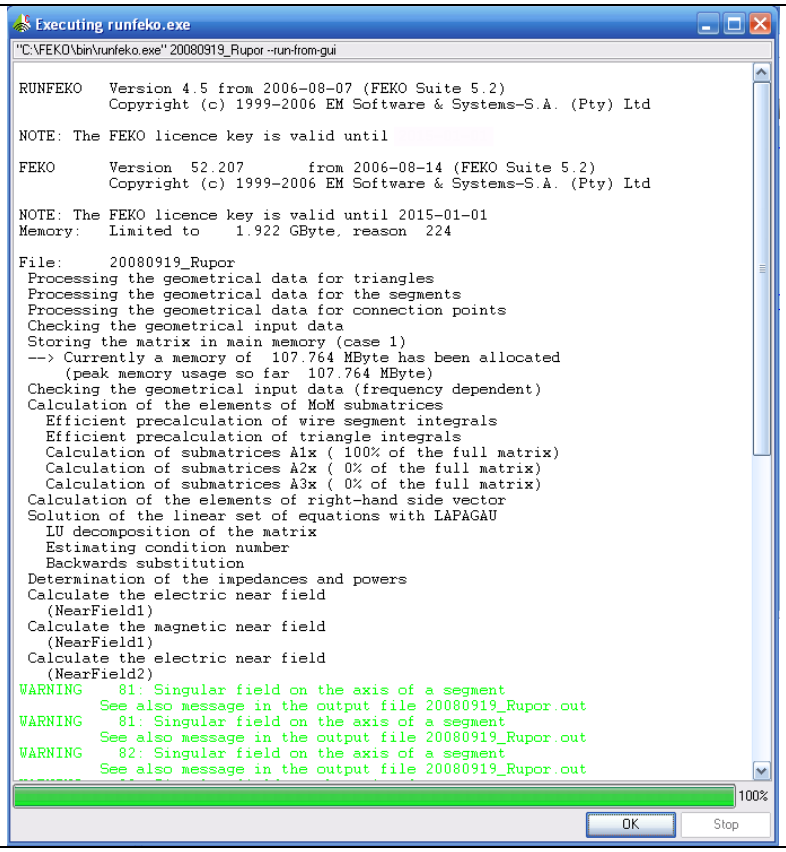


Рис. 2.26. Сообщение о процессе расчета

Отметим, что опции **Edge lengh** и **Sement lengh** (рис. 2.25) нужно выбрать так, чтобы длины ребер треугольников сетки разбиения равны примерно десятой части от длины волны.

Сохраним проект, и выполним команду Hide для результатов дальнего поля и ближнего поля. Это скроет сферу дальнего поля и раскроет вид рупорной антенны.

Теперь запустим программу решения FEKO, нажимая кнопку . Процесс решения можно видеть в появившемся диалоге, показанном на рис. 2.26.

После успешного выполнения расчета нужно запустить постпроцессор, чтобы проконтролировать конструкцию и вывести на графики результаты расчета.

2.5. Просмотр модели и результатов

Программа постпроцессорной обработки результатов расчета **POSTFEKO** используется для обоснования адекватности модели (процесс проверки, что рассчитанная модель верно описывает задачу) и просмотра результатов расчета.

Чтобы запустить POSTFEKO, выберите **Run -> POSTFEKO** из меню CADFEKO или нажмите кнопку POSTFEKO на инструментальной панели.

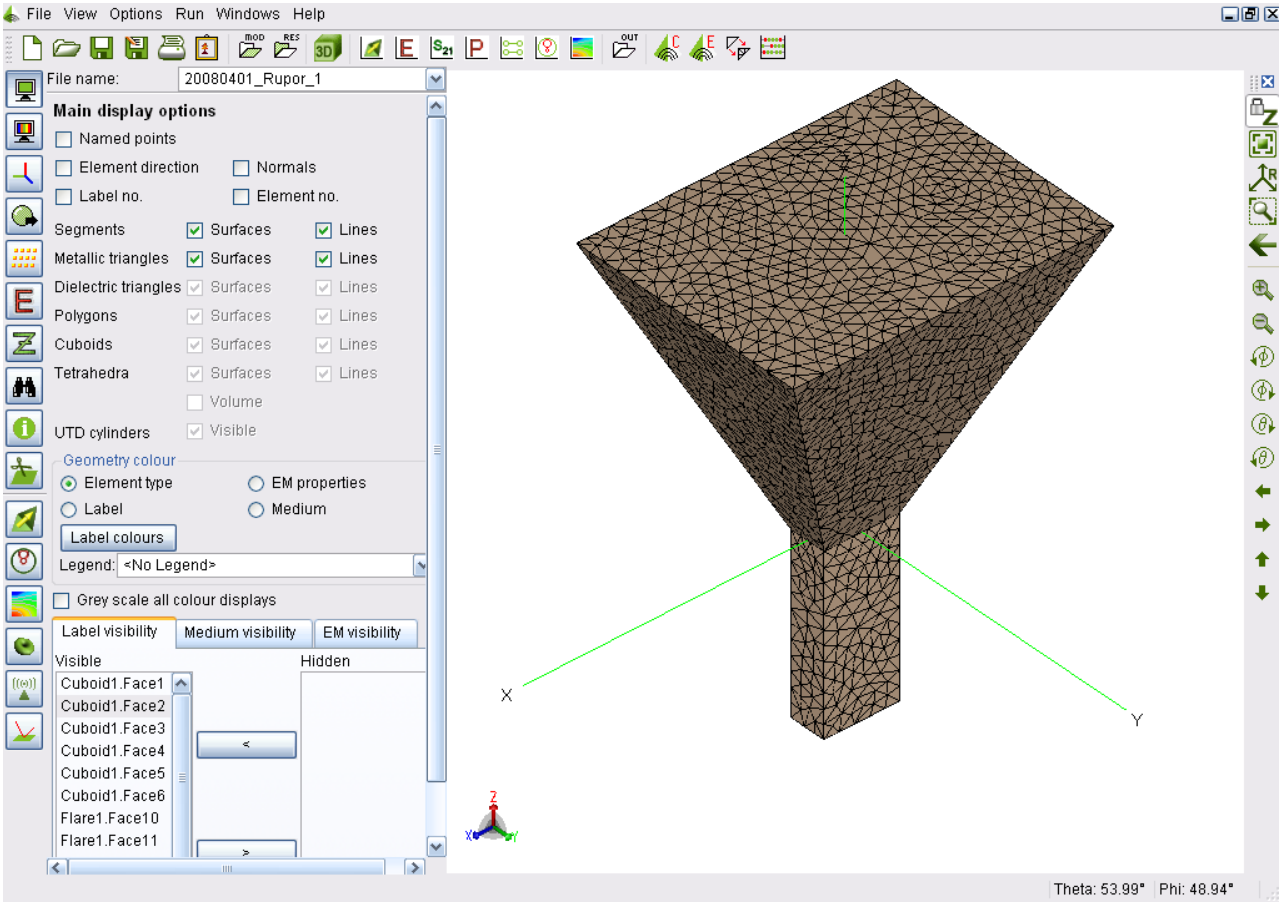


Рис. 2.27. Окно постпроцессорной обработки

POSTFEKO имеет панель управления слева от трехмерного представления. Эта панель используется, компонуют текущее представление. Параметры сгруппированы основными функциональными возможностями. Инстру-ментальная панель слева используется для выбора параметров, чтобы установить трехмерное окно просмотра.

Инструментальная панель справа от представления используется управлением видом. Инструментальная панель выше представления используется, чтобы добавить двумерные графики в текущий сеанс расчета или запускать другие компоненты FEKO.

2.5.1. Проверка модели

Моделирование требует существенные вычислительные ресурсы. Поэтому нужно быть уверенным, что модель была начерчена правильно. POSTFEKO имеет специальные инструментальные средства для проверки адекватности модели. Два инструментальных средства, которые будут использоваться для проверки этой модели – показ возбуждения и показ поля в определенных заданных точках.

Выберите кнопку возбуждения слева на инструментальной панели. Вращайте и уменьшайте поле зрения трехмерного представления так, чтобы был видим зонд питания. Возбуждение может быть скрыто снова, снимая Visible наверху панели.

Опция **C**utplanes на левой инструментальной панели может использоваться как ‘вырезка’, чтобы видеть зонд питания. Первый сегмент (соединяющийся стенку волновода к оставшейся части зонда) будет иметь красную стрелку на этом указывающий размещение источника.

Заметим, что панель **Cutplanes** открывается автоматически, и создает сечение плоскости. Сечение может быть удалено кнопкой **Delete** сверху панели, или снято, удаляя режим **Active** сверху страницы Cutplane.

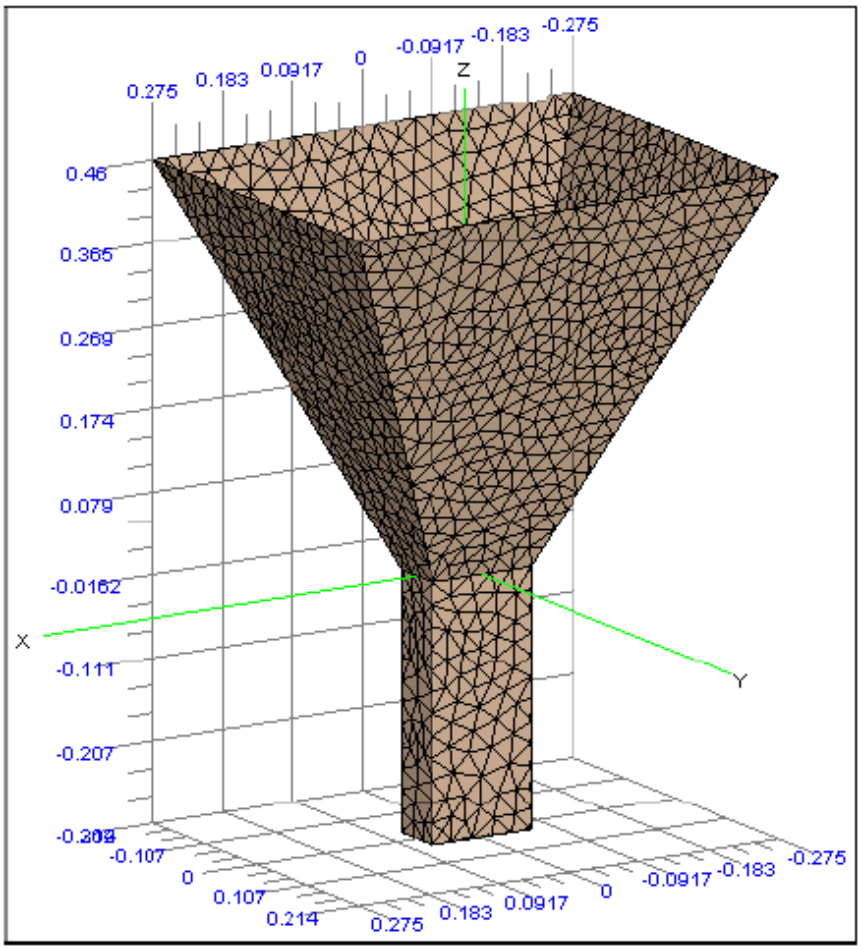


Рис. 2.28. Пирамидальная рупорная антенна с координатной сеткой размеров

Возвратитесь к окну по умолчанию, изменяя масштаб изображения. Нажмите кнопку R*equested Near Field* слева на инструментальной панели. Требуемые точки ближнего поля показываются, используя желтые крестики, и требуемые точки поля в дальней зоне показываются с зелеными крестиками.

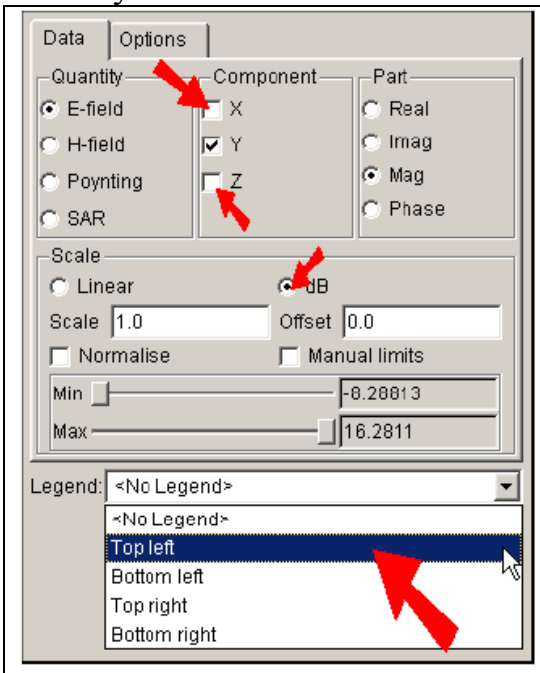
Заметьте, что хотя точки поля в дальней зоне показываются около антенной структуры, они вычисляют поле в дальней зоне. Не отмечайте *Visible* , чтобы скрыть требуемые полевые точки.

Последний шаг состоит в проверке размеров. Можно включить координат-ную сетку значком , чтобы проверить, что размеры структуры прибли-зительно верные, в случае, если ошибки были сделаны при черчении модели (рис. 2.28).

Чтобы включить координатную сетку размеров, нажмите кнопку *Axis settings* на левой инструментальной панели. В группе *Grid options*, выберите сетку XY, и настройте движок позиции, пока сетка не грубо совпадающая с апертурой рупорной антенны. Как только размер был проверен, координатная сеть может быть выключена, снимая опцию. Обоснование адекватности модели теперь закончено. Заметим, что этот шаг не обязателен, а просто хорошая практика моделирования.

2.5.2. Результаты расчета ближнего поля

Значения ближнего поля, которые требовались ранее в этом примере сохраняются. Чтобы показывать эти данные в трехмерном виде, выберите кнопку *View Near field ortho-slices* на левой инструментальной панели.



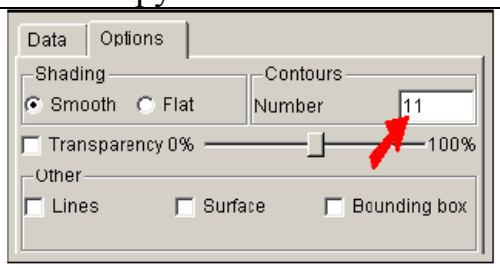


Рис. 2.30. Установка 11 уровней при нанесении ближнего поля

Чтобы нанести линии равного значения на график, выберите закладку *Options*. Установите число 11 для задания числа контуров. Эти линии контуров теперь соответствуют величинам в таблице.

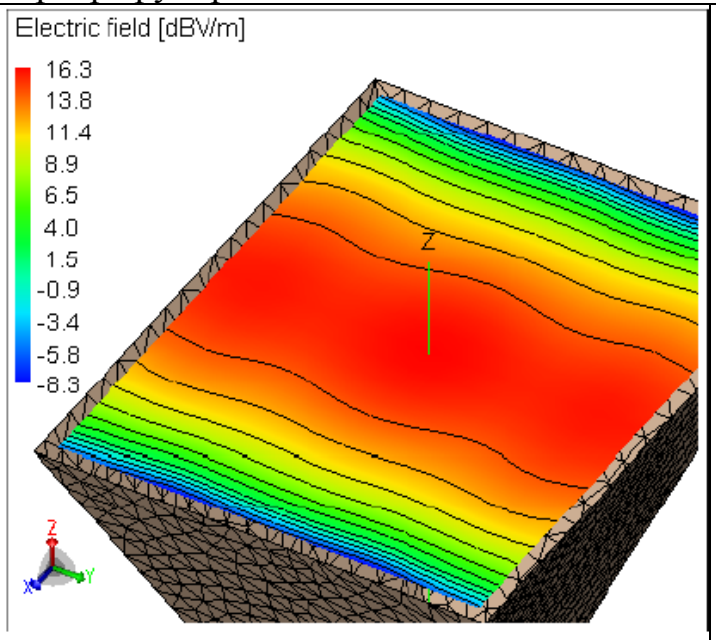
Рис. 2.29.Выбор данных ближнего поля	

Для этого примера, модуль компоненты поля Ey должен быть в dB, вместе с условными обозначениями и несколькими контурными линиями (рис. 2.33).

В группе *Component*, нужно снять X и Z компоненты. Кнопку DB должна быть выбрана в группе *Scale*. В самом низу панели находится список *Legend*. Выберите *Top Left* из этого списка.

Результаты расчета ближнего поля можно показать на двумерной графике для сравнения, или для вывода данных, которые просто читать. Кнопка *Add a near field graph* на панели задач, зафиксированная выше трехмерного представления используется для запроса такого чертежа.

Этот пример сравнивает компоненты поля *Ey* и *Ex* по направлению X (ортогональный к поляризации) на расстоянии около четверти длины волны от ребра рупора.



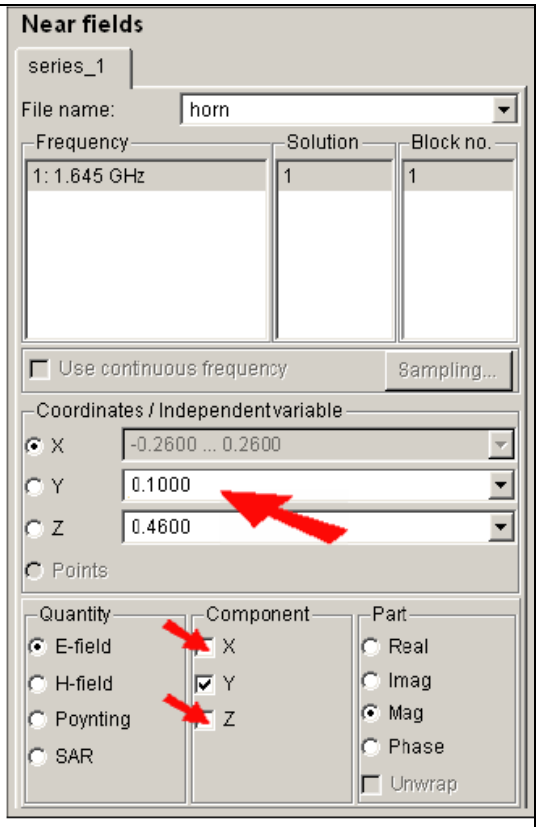


Рис. 2.31. Ближнее поле в рупоре антенны	*Рис. 2.32.Выбор компоненты для вывода ближнего поля на двумерный график*

Когда нажата кнопка *Add a near field graph*, по умолчанию чертится линия графика. В этом представлении по умолчанию, измените компоненту на $\mathbf{E_y}$. Убедитесь, что независимое направление идет по оси X, а положение Y установите на 0.1000 (рис. 2.32). Будет показана компонента $\mathbf{E_y}$. На рис. 2.33

в сечении рупора выводится полное поле. Заметно, что волна в сечении рупора имеет сферическую выпуклость.

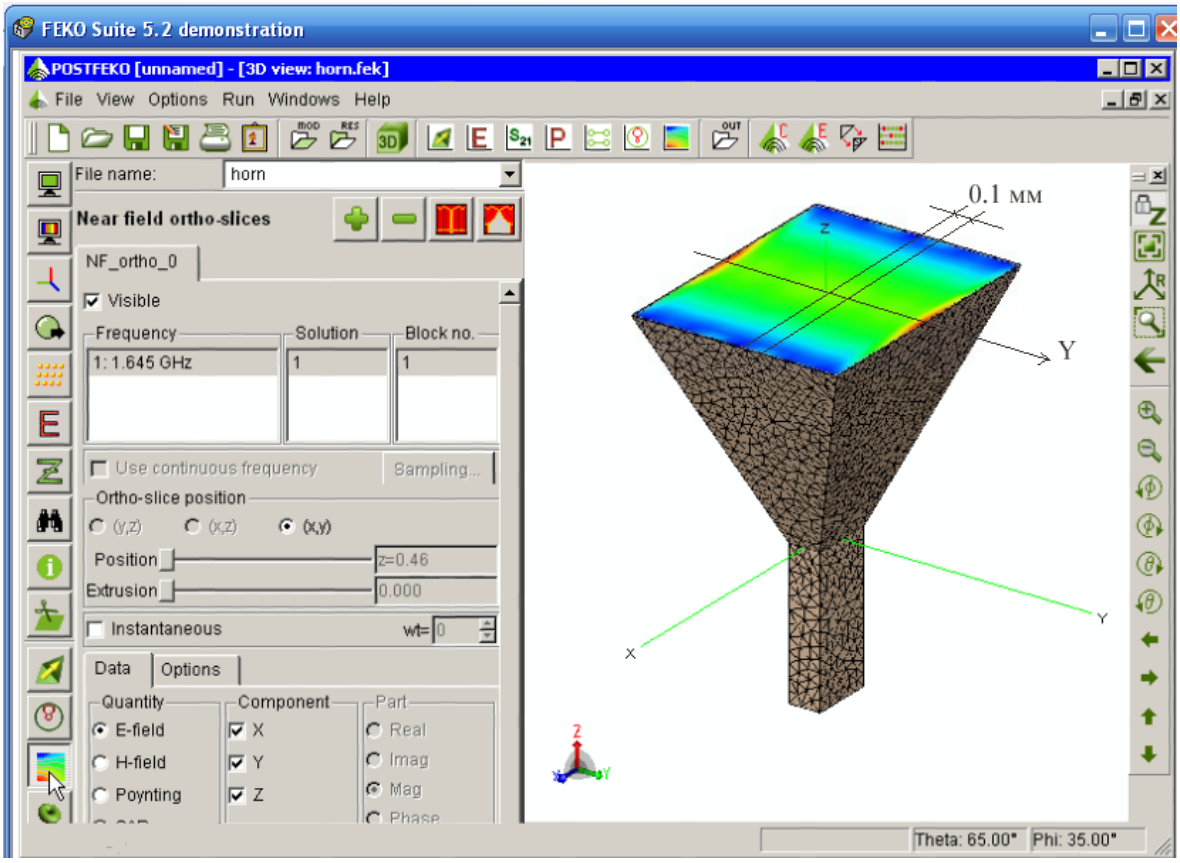


Рис. 2.33.Ближнее поле в сечении растра рупорной антенны

Кроме трехмерного представления, значения ближнего поля можно вывести на двумерный график. В этом случае можно вывести модуль и фазу компоненты ближнего поля (рис. 2.38) по любой линии в сечении рупора.

Откройте вторую закладку для выбора второй характеристики *series 2,* которая будет нанесена на тот же график.

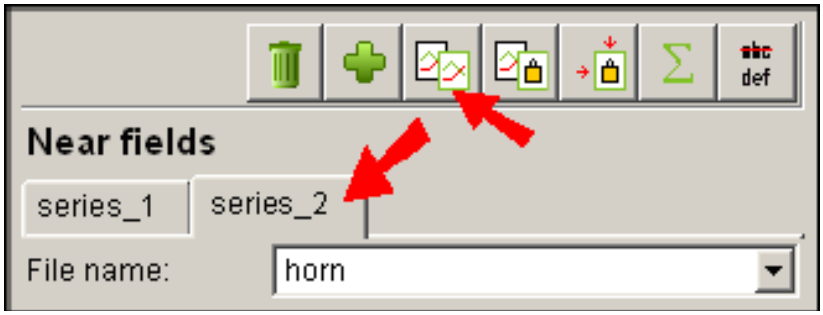


Рис. 2.34.Добавление характеристик на график

Измените установку *Component* только по X, чтобы показать компоненту *Ex (рис. 2.35)*.

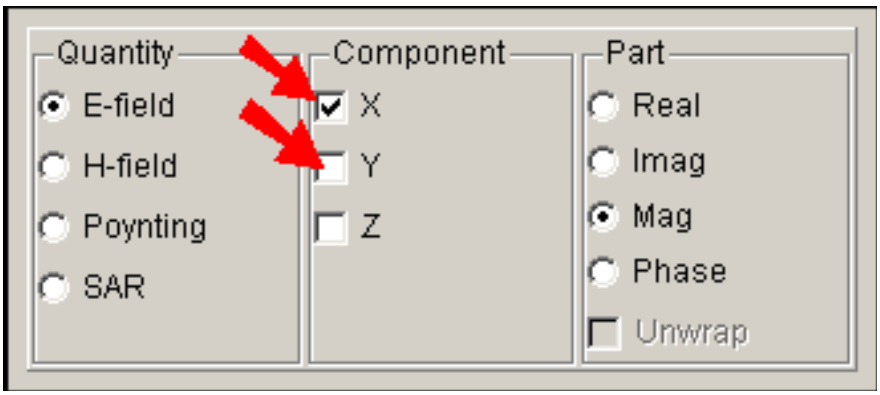


Рис. 2.35. Задание компоненты Ex рассчитываемого поля

Для большинства пространственных точек, компонента ближнего поля *Ex* намного меньше, чем *Ey* (рис. 2.36). Эти величины лучше сравнивать в dB. Это делается при изменении опции установок левой оси координат. Нажмите кнопку *Left axis* и выберите опцию *dB* слева панели *Left axis settings*. Этот эффект очень маленькой величины в центре может быть уменьшен снятием опции *Autoscale* и установкой *Min* на величину -30 дБ.

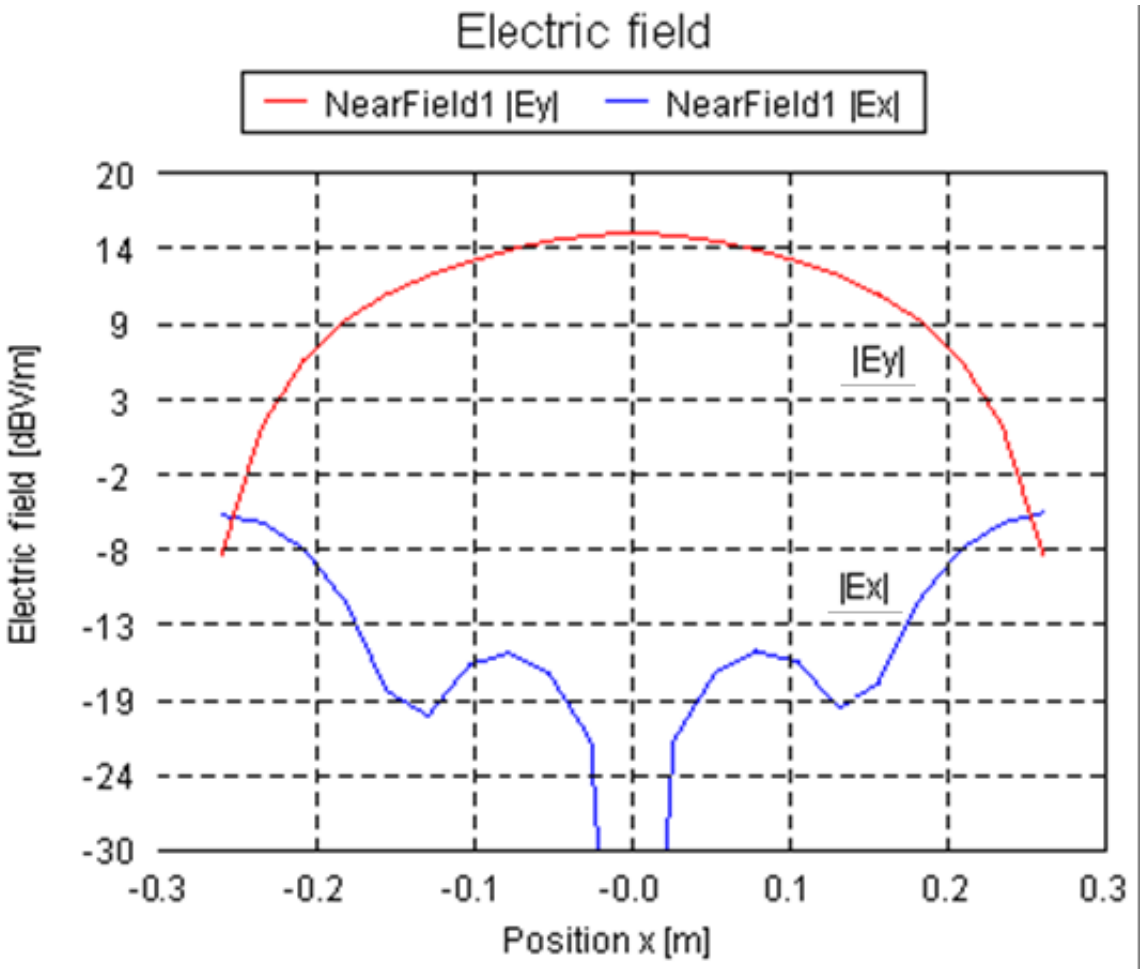
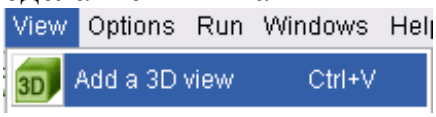


Рис. 2.36.Сравнение компонент ближнего поля в растре рупора

2.5.3. Результаты расчета дальнего поля

Дальнее поле антенны можно представить в трехмерном и двумерном виде диаграммы направленности и ее сечений в меридиональной и азимутальной плоскостях. Чтобы вывести ДН в трехмерном представлении, сделайте активным окно трехмерного представления



в POSTFEKO. Теперь выберите команду *View 3D far fields* для представления поля в дальней зоне слева инструментальной панели . Одновременно с конструкцией антенны, отображается трехмерный график дальнего поля, характеристика которого выбирается на панели в списке параметров. На панели конфигурации, имеется две закладки - одна, чтобы управлять отображенными данными, и другая, чтобы изменять опции отображения этих данных.

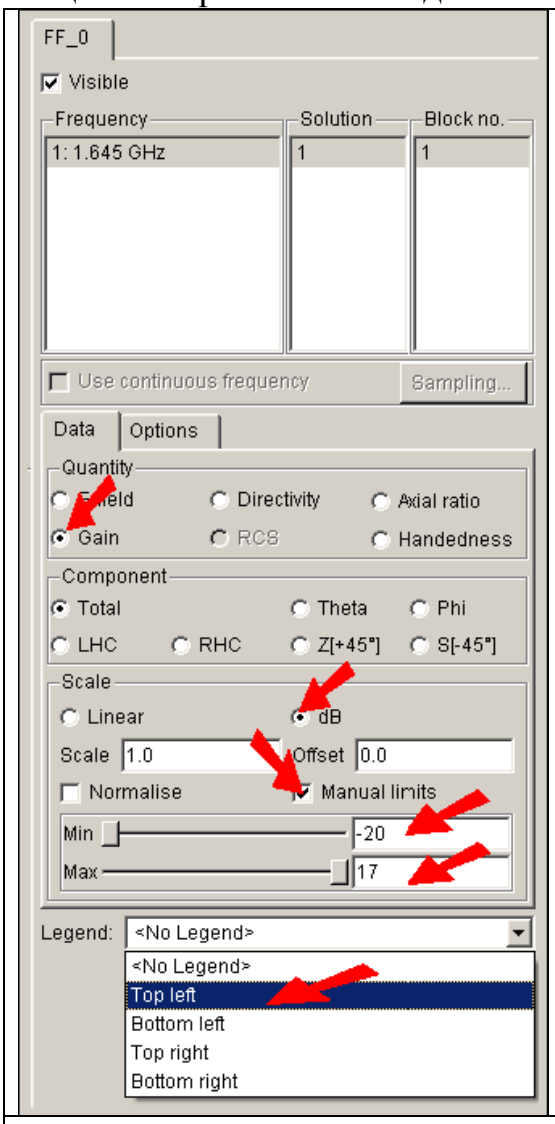


Рис. 2.37. Выбор установок дальнего поля для вывода диаграммы направленности рупорной антенны

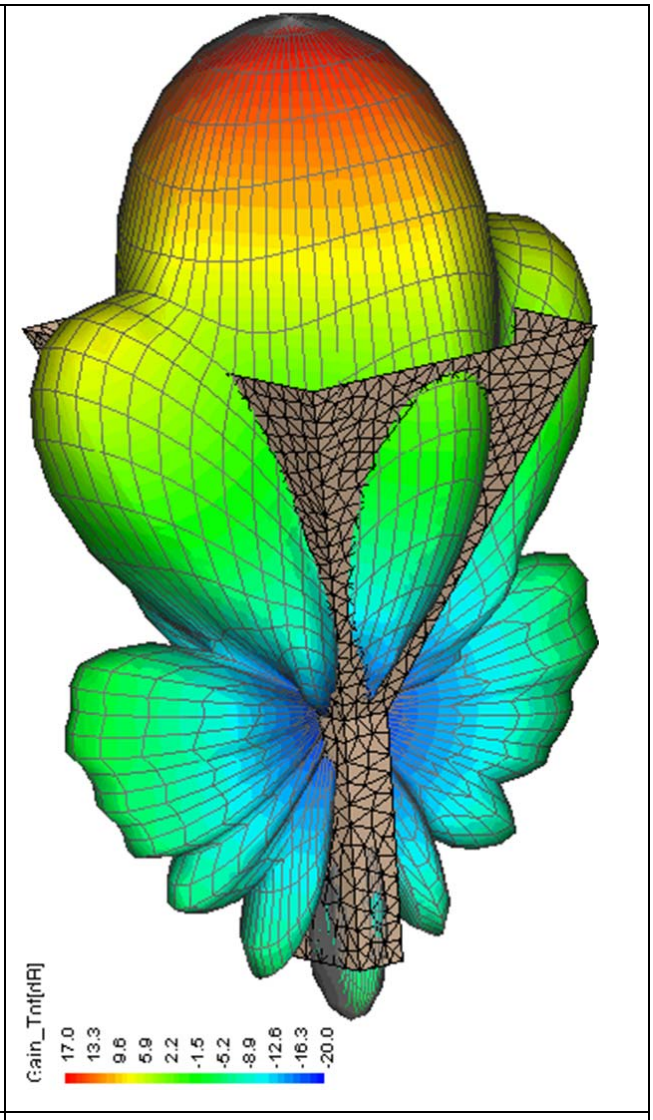


Рис. 2.38. Трехмерная диаграмма направленности рупорной антенны

В закладке **Data**, отображаемая характеристика может быть выбрана из группы **Quantity**. Выберите **Gain** из этой группы. Выберем опцию **DB** из группы **Scale**, чтобы показать усиление в dB. Чтобы установить диапазон изменения характеристики, выберите пределы, и введите значения для минимального и максимального значений (рис. 2.37). В данном случае установим минимум -20dB и максимум 17dB. Внизу панели показаны условные обозначения, выбираемые из раскрывающегося списка. (Обозначения ближнего поля должен быть выключен прежде, чем условные обозначения поля в дальней зоне могут быть помещены в то же самое размещение.)

В закладке **Parameters** может быть изменен размер чертежа. Переместите движок **Scale** так, чтобы результаты поля соответствовали нужной величине. Диаграммы направленности поля излучения в дальней зоне часто отображаются на двумерных полярных графиках. Так как полные трехмерные данные требуются в этом моделировании, можно создать двумерный срез ДН. Чтобы открыть новую двумерную диаграмму, выберите кнопку **Add** графика поля в дальней зоне от инструментальной панели выше трехмерного представления.

В этом случае требуется начертить усиление G в YZ плоскости на полярной диаграмме. Это соответствует графику относительно θ при φ = 90º. Данные должны быть начерчены в dB, используя диапазон от -20dB к 17 dB.

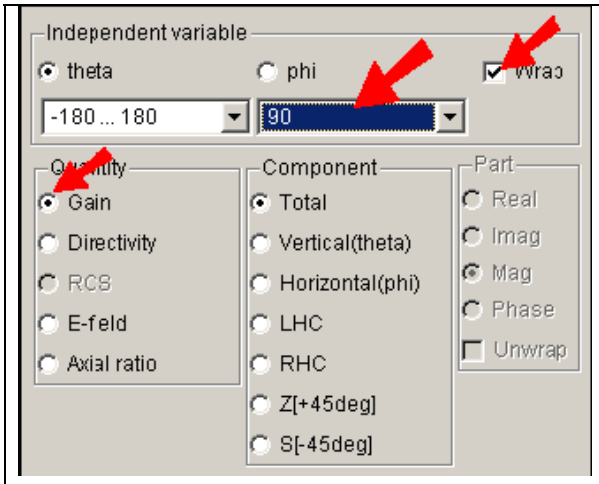


Рис. 2.39. Выбор параметров для вывода ДН на полярную систему координат

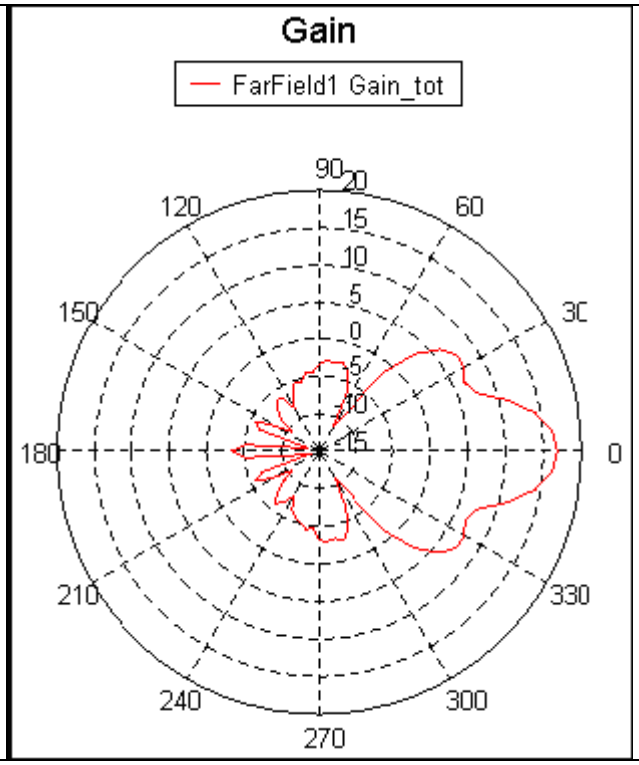


Рис. 2.40. ДН в полярной системе координат

Тогда в группе *Independent variable*, (рис. 2.39) выберем переменную θ. Значение угла φ, равного 90º, выбирается из раскрывающегося списка. *Gain*

выбрано из группы **Quantity**. Когда требуется выполнить расчет в диапазоне изменений, нужно отметить опцию ***Wrap,*** чтобы начертить ДН в широком диапазоне углов.

Выберите кнопку *Graph settings* на левой инструментальной панели, чтобы установить *Plot type* к полярной системе координат *Polar*.

Установки радиальных осей теперь управляются с помощью панели установки осей. Выберите кнопку *left axis* на панели. Выберите *dB*. Заметим, что автонормировка уже выбрана для отображения корректного диапазона в этом примере.

Также можно вывести сечение диаграммы направленности рупорной антенн-ны, включая модуль (рис. 2.41), фазу, а также другие характеристики антенны.

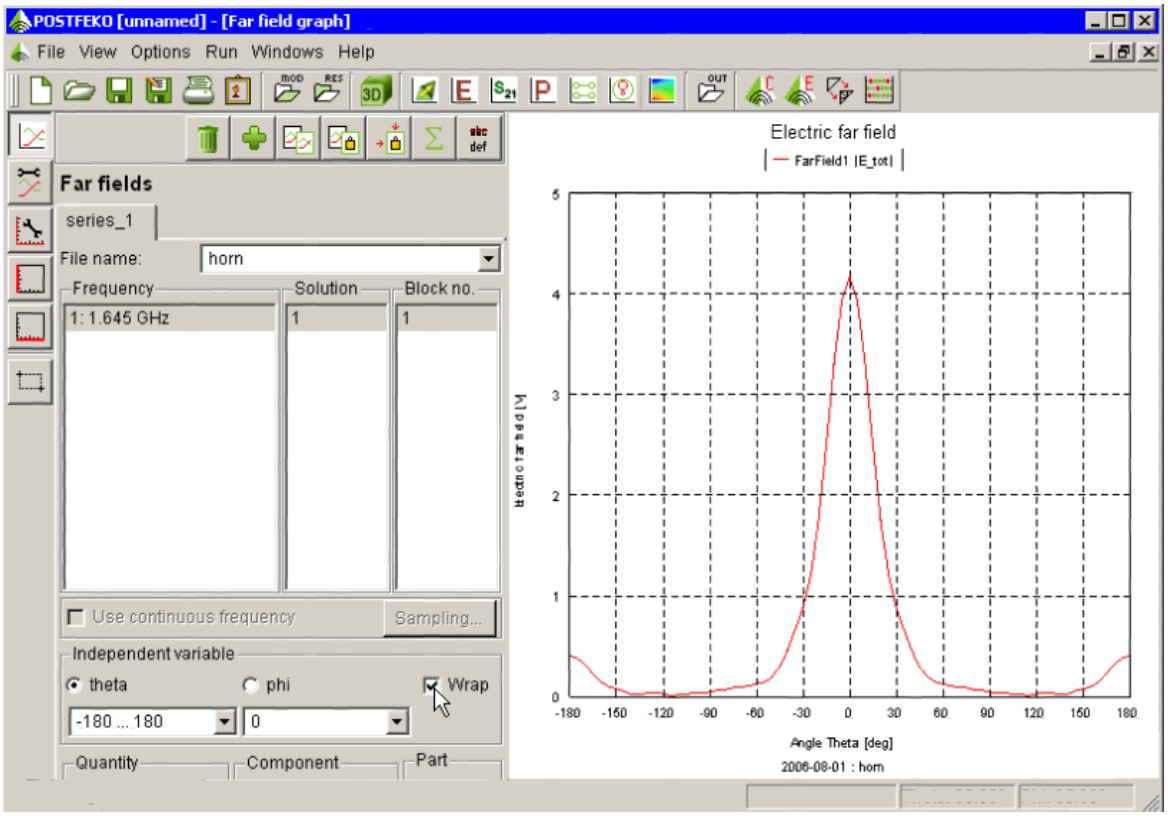


Рис. 2.41.Сечение диаграммы направленности излучения рупорной антенны

Выберем в разделе **Graph setting** полярный график **Polar**, который будет иметь вид, показанный на рис. 2.42. В этом случае получаем азимутальную или угломестную ДН.

Для того, чтобы вывести на одну полярную систему координат несколько графиков, нужно нажать . Тогда в разделе **Far fields** добавляется еще одна закладка series_2 (рис. 2.42).

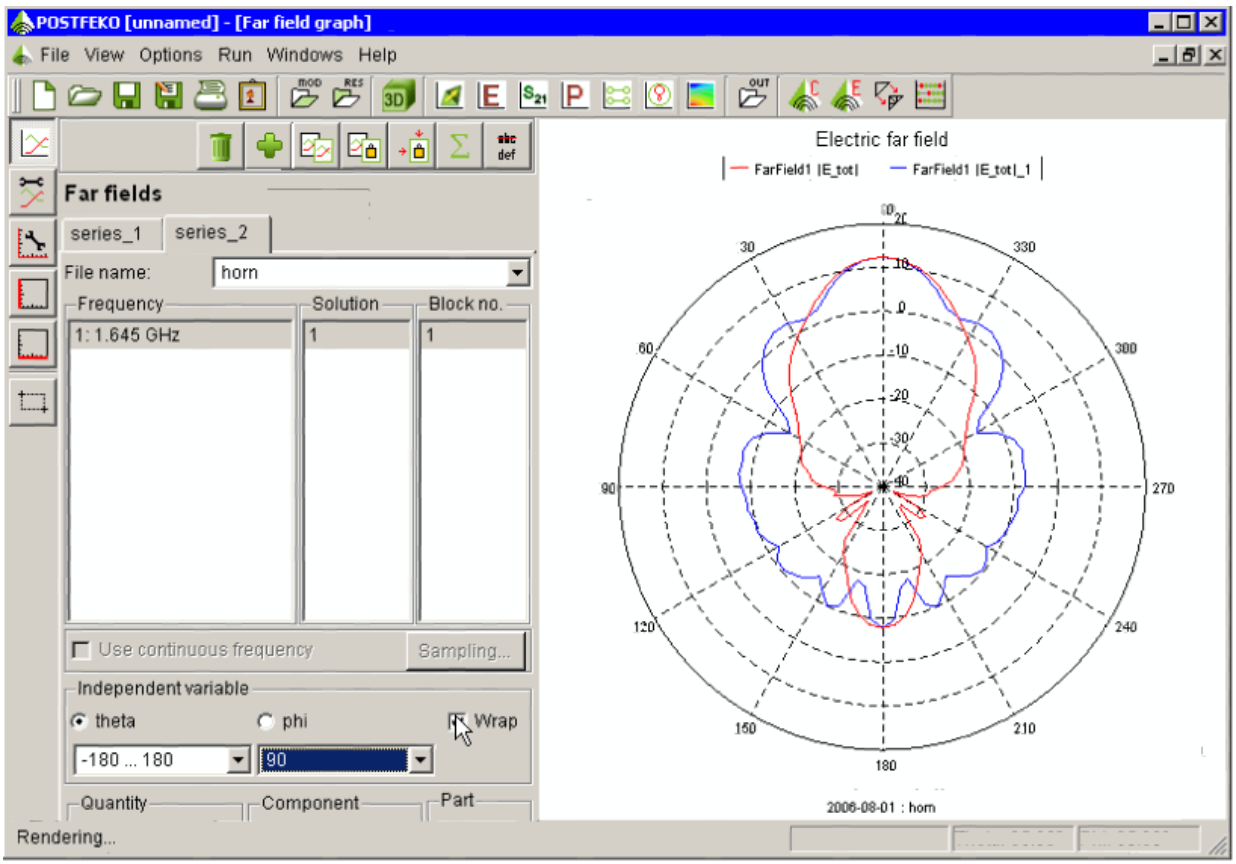


Рис. 2.42. Азимутальная и меридиональная диаграммы направленности рупорной антенны

Итак мы рассмотрели пример, в котором исследовали многие аспекты проектирования в FEKO, от предпроцессорной до постпроцессорной обработки результатов расчета, на примере построения и расчета модели рупорной антенны.

Использование симметрии в примере пирамидальной рупорной антенны

Чтобы использовать симметрию рупорной антенны и уменьшить размер задачи, нужно использовать т.н. скрипты, или карты, которые задаются в подпрограмме EDITFEKO.

Пример рупорной антенны, представленный в демонстрационном ролике и первом примере этого справочника предоставляет себя использованию симметрии, чтобы уменьшить вычислительные ресурсы. Этот пример вводит EDITFEKO и объясняет, как использовать это вместе с CADFEKO, чтобы эксплуатировать эту симметрию.

2.6. Создание симметричной геометрии в CADFEKO

Сначала изменим существующую модель рупорной антенны. Командой *File → Open* из меню CADFEKO выберем файл **horn.cfx** в каталоге

примеров FEKO examples\projects\horn. Сохраните новую копию этого примера, используя *File → Save as. ...*

Решение дальнего поля в дальней зоне будет отображено как полупрозрачная синяя сфера, которая окружает геометрию. Чтобы упростить работу, эту сферу можно скрыть. Для этого выберите ее в дереве и щелкните правой кнопкой мыши и выберите **Hide** (рис. 2.43).

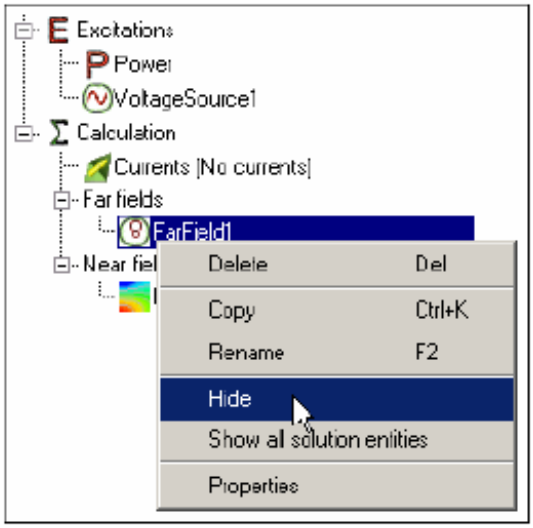


Рис. 2.43. Сокрытие результатов расчета дальнего поля

В результате редактирования геометрии, наличие порта может быть недопустимо. Поэтому он должен быть удален. Прежде, чем порт может быть удален, генератор напряжения, приложенный к нему, должен быть удален. (Объекты не могут быть удалены, если другие объекты их используют). Чтобы удалить источник, сделайте щелчок правой кнопкой на нем и выберите **Delete**. Потом, в картах, источник будет установлен в разделе управляемых карт.

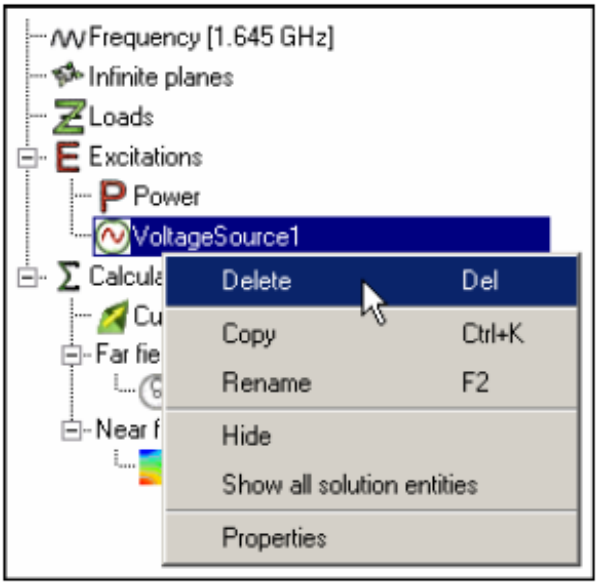


Рис. 2.44. Удаление источника

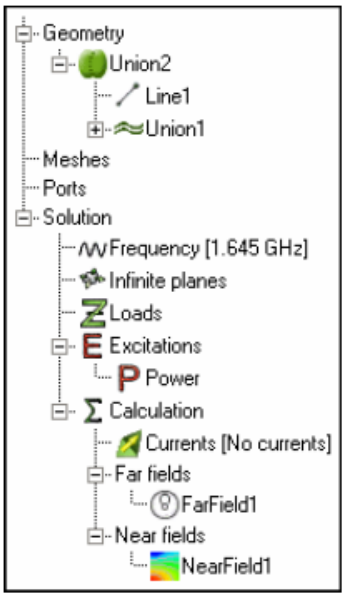


Рис. 2.45. Дерево проекта

напряжения	

Порт *Port1* и сетка разбиения *Union2* должны быть удалены точно таким же способом. Содержание дерева теперь выглядит как на рис. 2.51.

В этом примере используется симметрия модели в плоскости YoZ. Всю геометрию с одной стороны этой плоскости нужно удалить. Чтобы удалить геометрию, вначале нужно расщепить её вдоль плоскости (рис. 2.52).

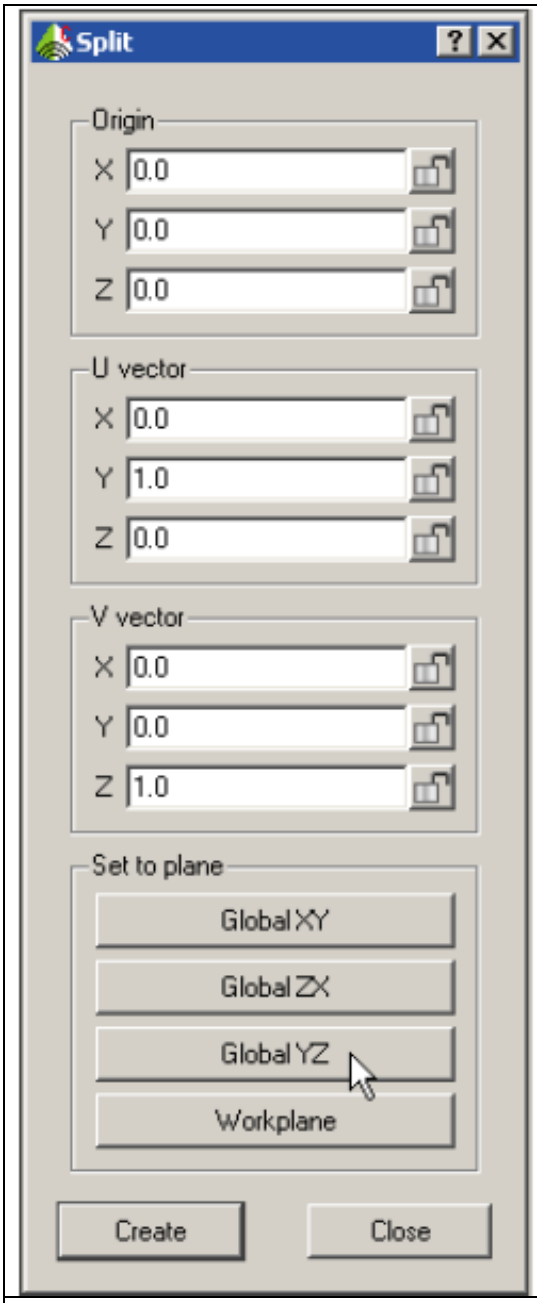


Рис. 2.46. Расщепление модели

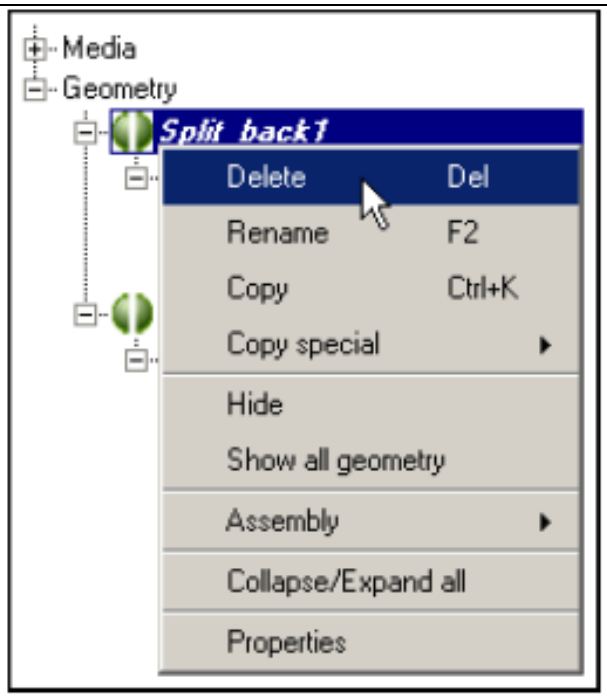


Рис. 2.47. Удаление задней части при расщеплении рупорной антенны

Чтобы расщепить антенну, выберите объект *Union2* в дереве и нажмите на кнопку *Split* на инструментарии модификации геометрии. В диалоге *Split*,

выберите опцию *Global YZ* , чтобы установить плоскость расщепления по глобальной YoZ плоскости и нажмите *Create*.

Часть, которая будет разделена на две новые части, одна называется *Split back1,* а другая называется *Split front1*.

Ненужная часть может теперь быть удалена. В этом случае половина антенны, направленная в положительное направление X сохраняется, а другая удаляется. Выберите часть *Split back1*, и кликните правой кнопкой и выберите *Delete (рис. 2.47)*.

Чтобы пересоздать порт для модели, выберите его в дереве проекта, и выберите ребро, соответствующее проводу пробника питания. Это будет ребро, обозначенное словом *Wire*, и будет названо *Wire66,* если все шаги этого примера были выполнены. Сделайте клик правой кнопкой и выберите *Create port → Wire port* из выплывающего меню. Используйте установки порта по умолчанию. Нажмите *Create* и *Close*.

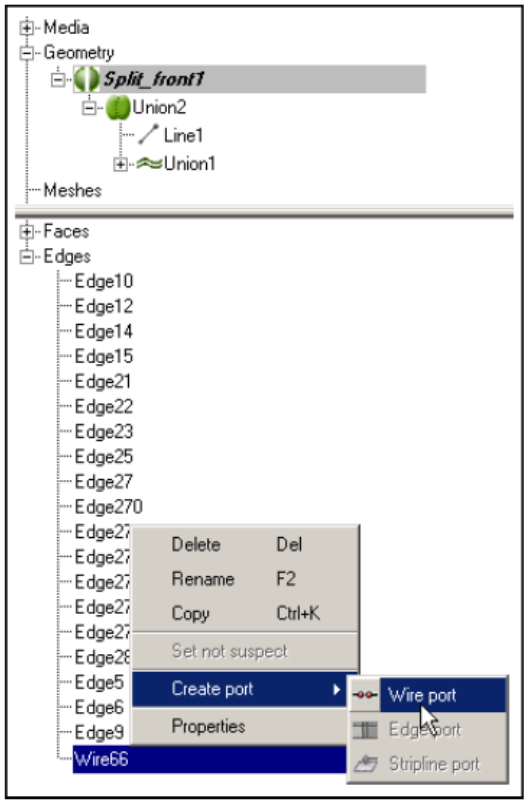


Рис. 2.48. Выбор провода в объединенном объекте для создания порта

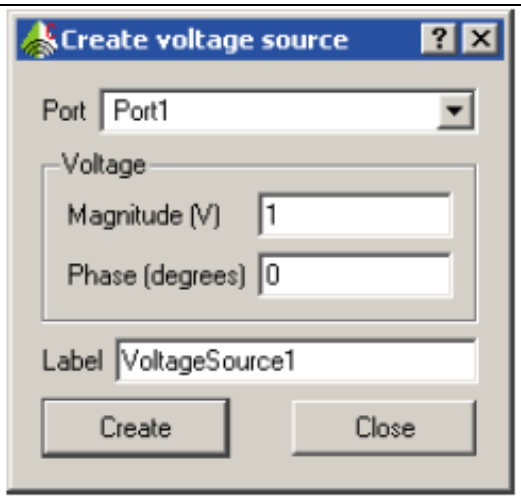


Рис. 2.49. Диалог задания источника напряжения

Теперь на порт нужно поставить источник напряжения. Чтобы добавить источник, нажмите кнопку *Voltage source* на инструментарии. Можно использовать установки источника напряжения по умолчанию. Нажмите *Create* и *Close*.

Половина рупора должны быть разбита на ячейки. Выберите команду *Mesh → Create mesh* из меню. Установки должны быть корректными. Нажмите *Create* и *Close*.

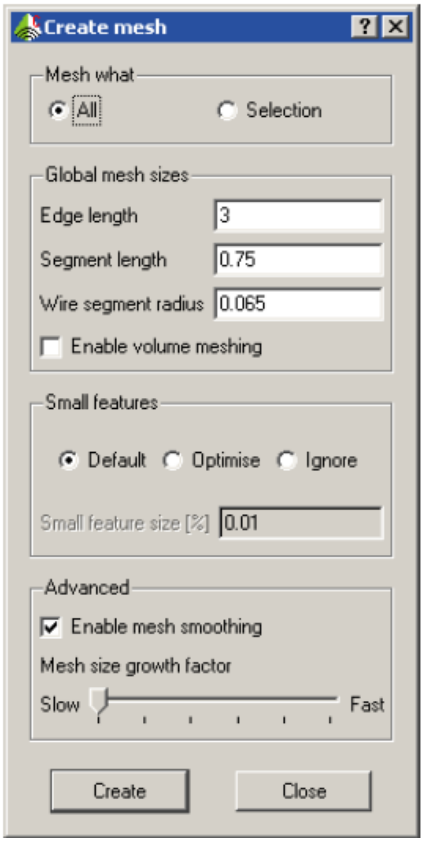


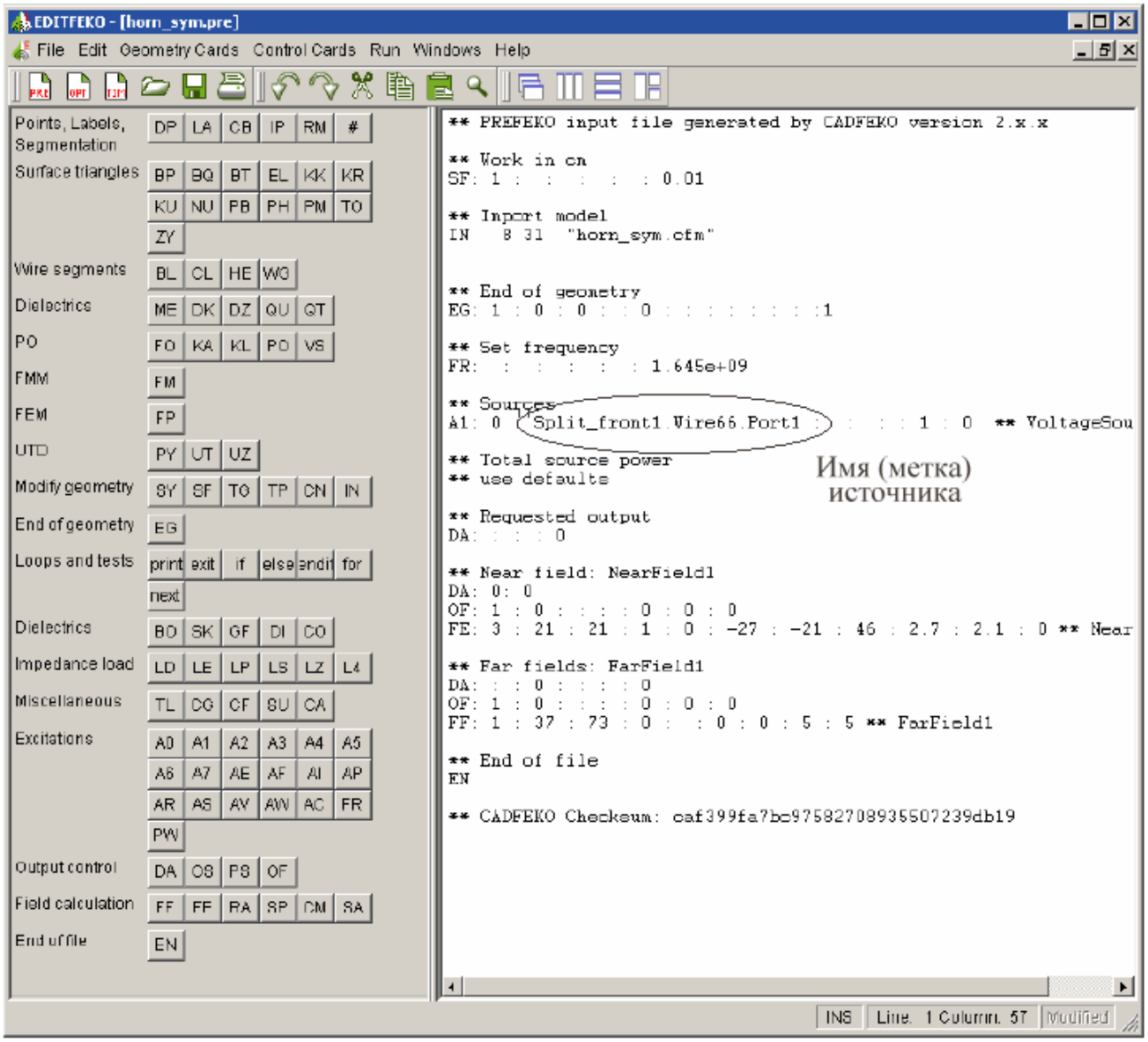
Рис. 2.50. Мешировании всех объектов проекта (All)

Теперь CADFEKO разбивает все металлические поверхности и проводники модели на сетку. Чтобы выполнить разбиение на сетку, должна быть запущена утилита по имени PREFEKO. Она запускается командой *Run → PREFEKO* из меню.

Теперь эту модель можно просмотреть в POSTFEKO, а также исследовать ближние, дальние поля и токи на поверхности антенны.

2.7. Добавление симметрии, используя EDITFEKO

Управление моделью можно выполнить, используя текстовый скрипт, находящегося в файле модели ***.pre**. Увидеть скрипт можно в интерфейсе программы EDITFEKO. Чтобы открыть EDITFEKO для этого примера, нажмите кнопку *Run EDITFEKO* в меню запуска программ. EDITFEKO запустится (рис. 2.51) и создаст скрипт модели, созданной в CADFEKO.


EDITFEKO - [horn_sym.pre]
File Edit Geometry Cards Control Cards Run Windows Help
Points, Labels, Segmentation
Surface triangles
Wire segments
Dielectrics
PO
FMM
FEM
UTD
Modify geometry
End of geometry
Loops and tests
Dielectrics
Impedance load
Miscellaneous
Excitations
Output control
Field calculation
End of file
** PREFEKO input file generated by CADFEKO version 2.x.x
** Work in cm
SF: 1 : : : : : 0.01
** Import model
IN 8 31 "horn_sym.cfm"
** End of geometry
EG: 1 : 0 : 0 : : 0 : : : : : : : :1
** Set frequency
FR: : : : : : 1.645e+09
** Sources
A1: 0 Split_front1.Wire66.Port1 : : : : 1 : 0 ** VoltageSou
** Total source power
** use defaults
** Requested output
DA: : : : 0
** Near field: NearField1
DA: 0: 0
OF: 1 : 0 : : : : 0 : 0 : 0
FE: 3 : 21 : 21 : 1 : 0 : -27 : -21 : 46 : 2.7 : 2.1 : 0 ** Near
** Far fields: FarField1
DA: : : 0 : : : : 0
OF: 1 : 0 : : : : 0 : 0 : 0
FF: 1 : 37 : 73 : 0 : : 0 : 0 : 5 : 5 ** FarField1
** End of file
EN
** CADFEKO Checksum: caf399fa7bc97582708935507239db19
Имя (метка) источника
INS
Line: 1 Column: 57
Modified

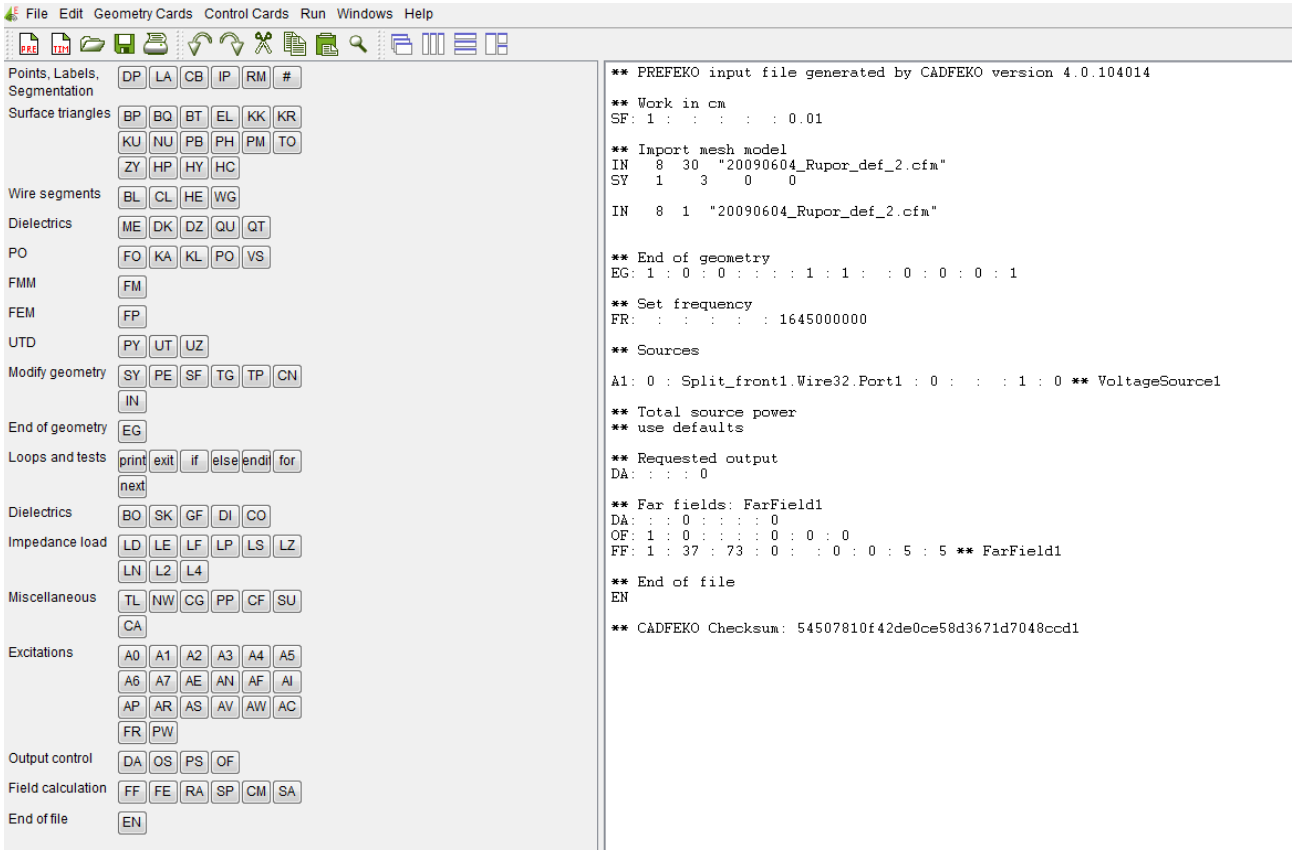


Рис. 2.51. Интерфейс программы EDITFEKO, в которой поставлена магнитная стенка

Каждая линия в файле ***.pre** представляет конкретную команду для решающего устройства FEKO. Формат команды не нужно запоминать для пользователя программы. Чтобы модифицировать команду, просто сдвиньте курсор к этой линии и нажмите <F1>. Откроется панель с левой стороны окна. Эта панель используется для редактирования команды пользователя очень просто. Имя команды дается двумя первыми буквами в каждой строке. Команды, которые используются в данном примере:

• ** описание комментария.
• **SF** (scale factor). Эта команда задает нормировку размеров так, что перевести их в метры. В этом примере все размеры вводятся в см, поэтому коэффициент преобразования должен быть **scale factor = 0.01**.
• **IN** (insert) Эта команда позволяет импортировать геометрию и сетку разбиения, используя файл, полученный из CADFEKO.
• **EG** (end geometry) Эта команда разделяет информацию на геометрические команды и команды управления.
• **FR** (frequency) Число частотных точек расчета. Эта команда задает метод, который будет использоваться и параметры, связанные с ним. В данном случае расчет требуется на одной частоте 1.646 e^9.

• **A1** - каждый тип возбуждения в FEKO описывается, начиная с A. Например, тип A1 возбуждения задает напряжение на заданном сегменте. Если выполняется импорт, то надо задать метку Split_front1.Wire89.Port1.
• **OF** - команда **OF** используется для определения фазового центра для расчета дальнего поля, или для задания начала локальной системы координат при расчете ближнего поля.
• **FE** (fields) эта команда инструктирует расчет ближнего поля. Для этого нужно задать точки, в которых будут рассчитаны значения ближнего поля. Рассчитываются и поля E и H.
• **FF** (far fields) - эта команда используется для инструктирования программы для расчета диаграммы направленности излучения антенны.
• **EN** - эта последняя команда завершает описание модели.

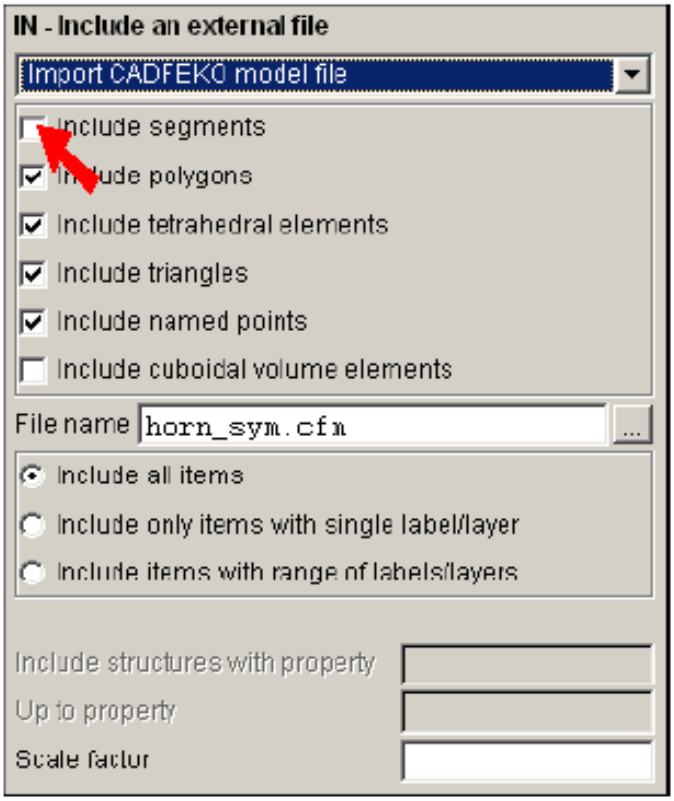


Рис. 2.52. Диалог карты IN для включения всей модели без сегментов

Поскольку в данном примере должна быть добавлена команда **SY** (symmetry), то сценарий строится так, чтобы сначала выполнить импорт только той части геометрии, к которой будет применяться операция симметрии. Сегменты пробника, которые лежат на плоскости симметрии, должны быть исключены из импорта, и импортированы только после того, как симметрия была применена. Если это не выполнено, команда симметрии создаст дубликаты пробных элементов.Сегменты, на которые разбивается провод (*segments)* сливаются с плоскостью симметрии. Поэтому при импорте сетки разбиения из CADFEKO (картой **IN**), нужно исключить эти элементы.

Чтобы изменить команду, установите курсор в ту же самую строку как команда IN, и нажмите <F1>. Панель слева покажет параметрам для команды. Удалите опцию, снимая *Include segments*, и нажмите OK (рис. 2.52).

Теперь можно применить симметрию. Установите курсор ниже карты **IN**, и нажмите кнопку **SY**. Плоскость x = 0, для нашей рупорной антенны, является плоскостью магнитной симметрии. Выберите опцию **Magnetic** в плоскости x = 0 (рис. 2.53) и нажмите **OK**.

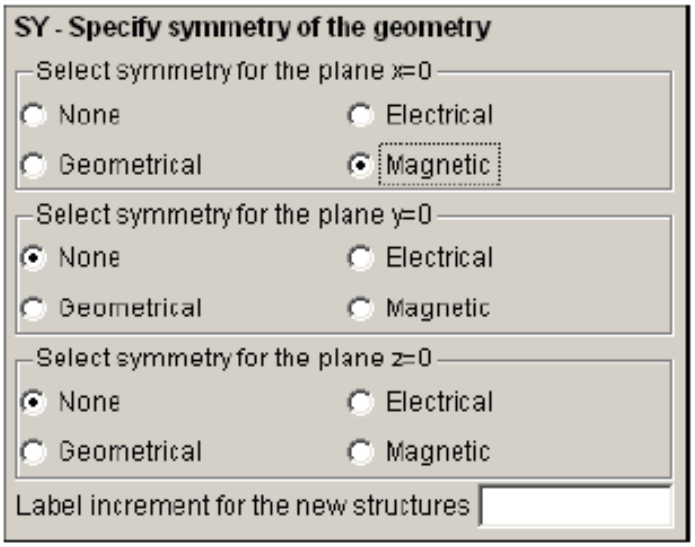


Рис. 2.53. Задание свойств плоскости симметрии

Созданная последовательность карт показана на рис. 2.55.
Карта SY, в зависимости от установок в EDITFEKO получает разные данные, и для нашего случае SY 1 3 0 0.

После команды SY нужно задать еще одну команду **IN,** чтобы импортировать созданные в CADFEKO сегменты проводов.

Поместите курсор в строку ниже команды **SY**, и нажмите кнопку IN слева. Установите тип файла, чтобы импортировать модель CADFEKO в виде файла в раскрывающемся списке сверху диалога (рис. 2.54).

Установите флажки в диалоге, как показано на рис. 2.54), и имя файла проекта. Нажмите **OK**.

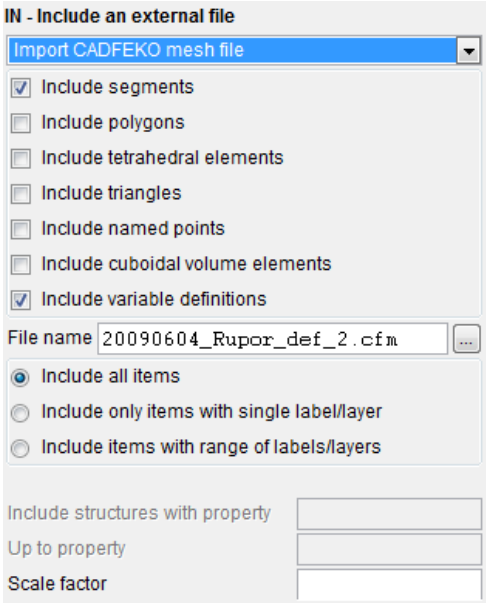


Рис. 2.54. Параметры карты IN для импортирования геометрии сегментов

```
** Work in cm
SF: 1 :  :  :  :  : 0.01

** Import model
IN   8  30  "horn_sym.cfm"
SY   1    3    0    0
IN   8  1  "horn_sym.cfm"


** End of geometry
EG: 1 : 0 : 0 : : 0 : : : : : : : :1

** Set frequency
FR:  :  :  :  :  : 1.645e+09
```

Рис. 2.55. Фрагмент программы в EDITFEKO

Итак, модель рупорной антенны со стенкой симметрии создана. Выберите *Run → PREFEKO*, чтобы увидеть модель в POSTFEKO. Переключите на POSTFEKO и выполните проверку, что никакие ошибки не были сделаны во время создания сценария. Затем нужно ввести частоту анализа рупорной антенны и требуемые рассчитываемые характеристики. Далее запускаем задачу на счет командой **Run -> FEKO**. Характеристики получаем в POSTFEKO также, как получали их, рассчитывая рупорную антенну без учета симметрии, из CADFEKO.

Этот пример показывает несколько вариантов взаимодействия между пользователем и системой FEKO. Применение в задаче магнитной стенки уменьшает память, требуемое для моделирования от 107 МБ до 52 МБ.

3. Анализ планарной антенны

Этот пример вводит в расчет диэлектрический материал и устанавливает свойства локального разбиения на отдельные компоненты антенны. Расчет планарной антенны на диэлектрической подложке, показывает использование диэлектрических материалов, заполняющих области решения. FEKO может разрешать плоские, а также искривленные диэлектрические области.

В данном примере рассматривается планарная антенна (рис. 3.1), работающая близко к резонансу.

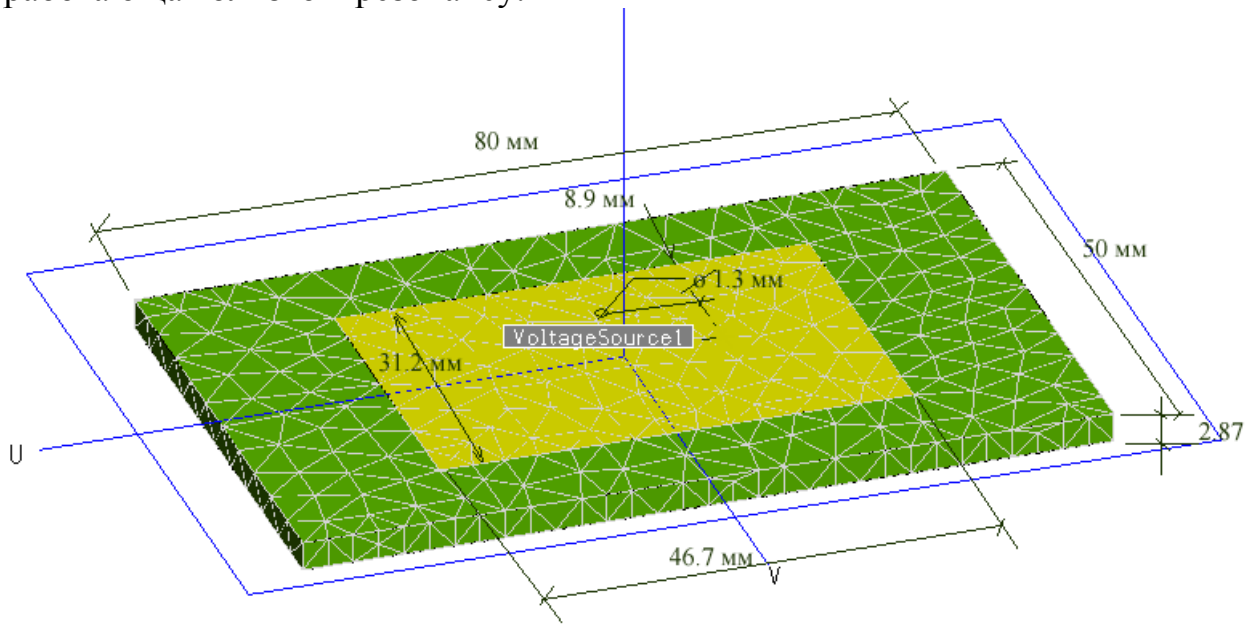


Рис. 3.1. Внешний вид пач-антенны

Прямоугольная металлическая пластина размером 31.2 мм x 46.7 мм нанесена на диэлектрическую подложку (50 мм x 80 мм) толщиной 2.87 мм, с относительной диэлектрической постоянной 2.2. Планарная антенна запитывается с помощью соединителя SMA (диаметром 1.3 мм), расположенного на 8.9 мм от центра длинного края.

Интересующие нас характеристики - входное сопротивление в диапазоне частот от 2.6 ГГц до 3.1 ГГц. Для уменьшения числа частотных точек при расчете в широкой полосе частот, будем использовать адаптивную выборку частот.

3.1. Создание модели планарной антенны в CADFEKO

Начертим модель антенны с среде CADFEKO и сохраним в файле с расширением ***. cfx**. Чтобы запустить CADFEKO, выберите *Programs → FEKO → CADFEKO*.

Модель создается, используя примитивы. Подложка чертится, используя черчение параллелепипеда. Полигон чертится, чтобы представить металлическую поверхность планарной антенны, а для моделирования штыря питания используем компоненту Wire (провод).

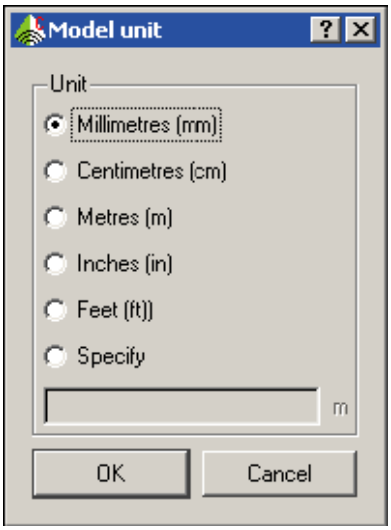


Рис. 3.2. Установка единиц

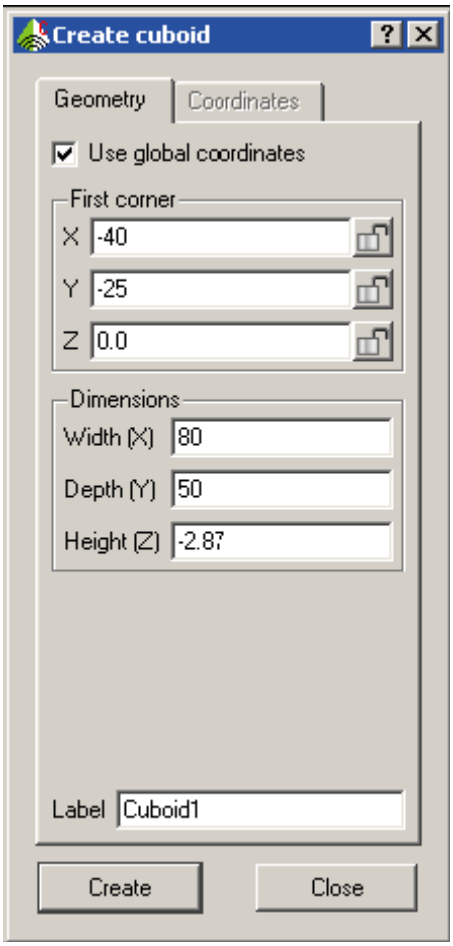


Рис. 3.3. Диалог с размерами диэлектрической подложки

Все размеры будут вводится в мм. Чтобы установить единицы, выберите *Model → Model units*. В диалоге рис. 3.2 выберите Millimetres (mm), и нажмите **OK**.

Черчение диэлектрической подложки

Чтобы начертить подложку, нажмите кнопку **Cuboid** на инструментальной панели . Для этого примера все объекты будут создаваться в глобальных координатах. Если диалог работает в терминах координат *U-V-N*, выберите команду *Options → Preferences* из главного меню и измените *Default local coordinates* координат на *Global*. Создадим подложку шириной 50mm, длиной 80mm и толщиной 2.87mm. Расположим куб так, чтобы начало координат было в центре вершины подложки. Для этого заполните диалог, показанный на рис. 3.3. Щелкните *Create* и затем *Close*.

Нажмите кнопку *Zoom to extents* на инструментальной панели, чтобы согласовать размеры рабочей плоскости и вида модели.

По умолчанию любое твердое тело в CADFEKO – идеальный электрический проводник. Чтобы установить свойства твердого тела как

диэлектрического материала – нужно, во-первых, создать новую среду, и, во-вторых, придать внутренней области кубоида эту новую среду.

Перед тем, как использовать материал подложки для этой области, он должен быть определен в разделе *Media* в дереве проекта. Нажмите дважды на *Media* для создания нового материала. Появляется диалог рис. 3.4.

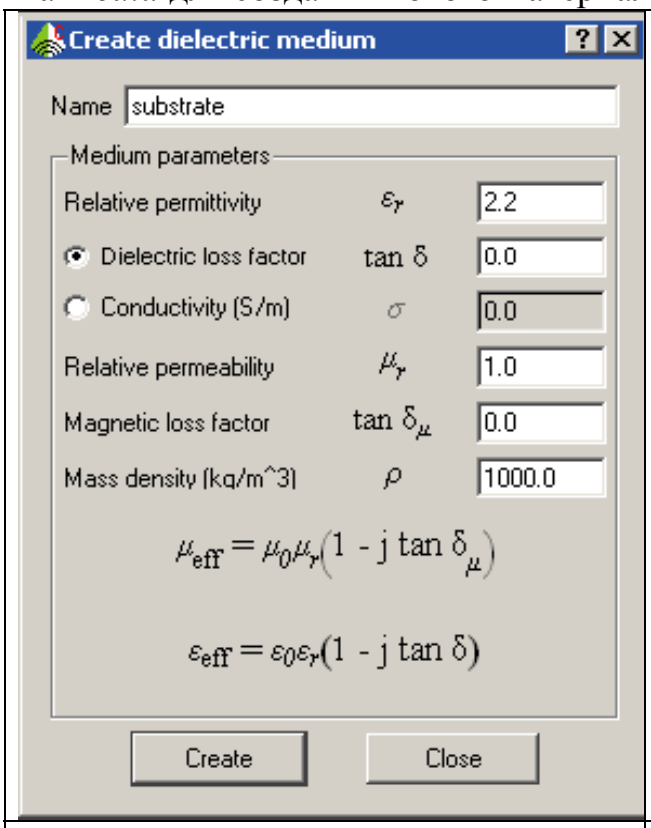


Рис. 3.4. Создание новой диэлектрической среды

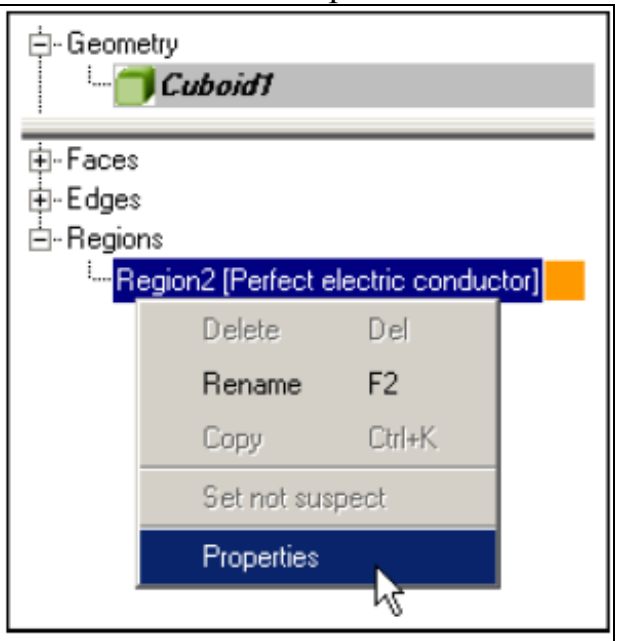


Рис. 3.5. Придание кубу диэлектрических свойств

Имя этой новой среды *substrate* и его диэлектрическая проницаемость ε=2.2. Чтобы установить свойство внутренней области модели, выберите **Cuboid** в дереве геометрии. Дерево подробностей теперь показывает ветвь *Regions*.

Разверните эту ветвь, чтобы видеть список областей в проекте. В этом примере имеется только одна область (внутренняя часть куба). Щелкните правой кнопкой мыши на этой области, и выберите свойства *Properties* (рис. 3.5).

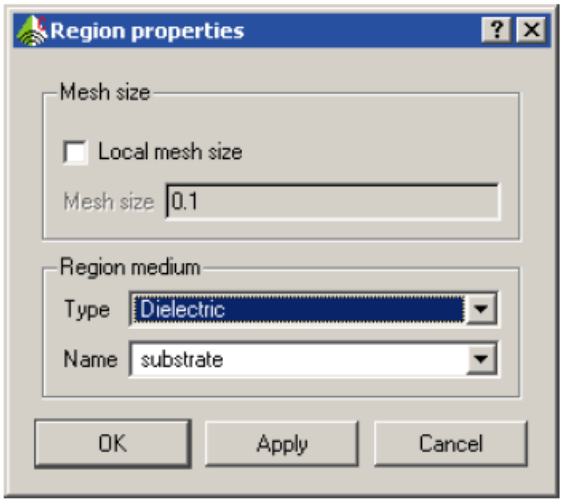


Рис. 3.6. Параметры разбиение на сетку

В появившемся диалоге свойств области (рис. 3.6), установите **Type** в разделе **Region medium** как **Dielectric**. Единственный используемый диэлектрик имеет имя substrate, так что он будет выбран по умолчанию. Нажмите **OK**.

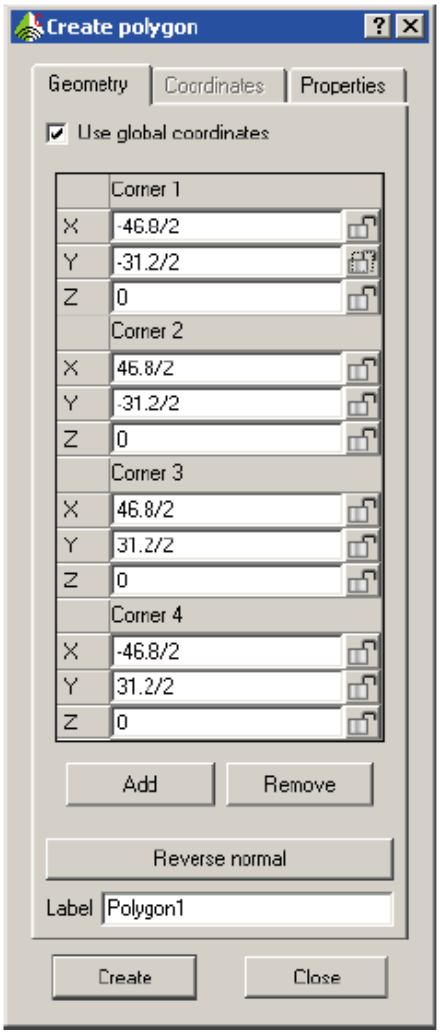


Рис. 3.7. Черчение прямоугольника, состоящего из четырех углов

Затем начертим металлическую пластину в виде полигона. Чтобы начертить полигон, выберите кнопку создания полигона на левой инструментальной панели CADFEKO.

Это открывает диалог **Create polygon**. Прямоугольник 46.8 мм на 31.2 мм должен быть создан в плоскости z = 0, с центром в начале координат. Введите значения как показано на рис. 3.7. Чтобы добавить новую вершину многоугольника, нужно нажать кнопку **Add**. Координаты можно ввести в виде алгебраического выражения.

Теперь модель планарной антенны представляется собой конструкцию, показанную на рис. 3.8.

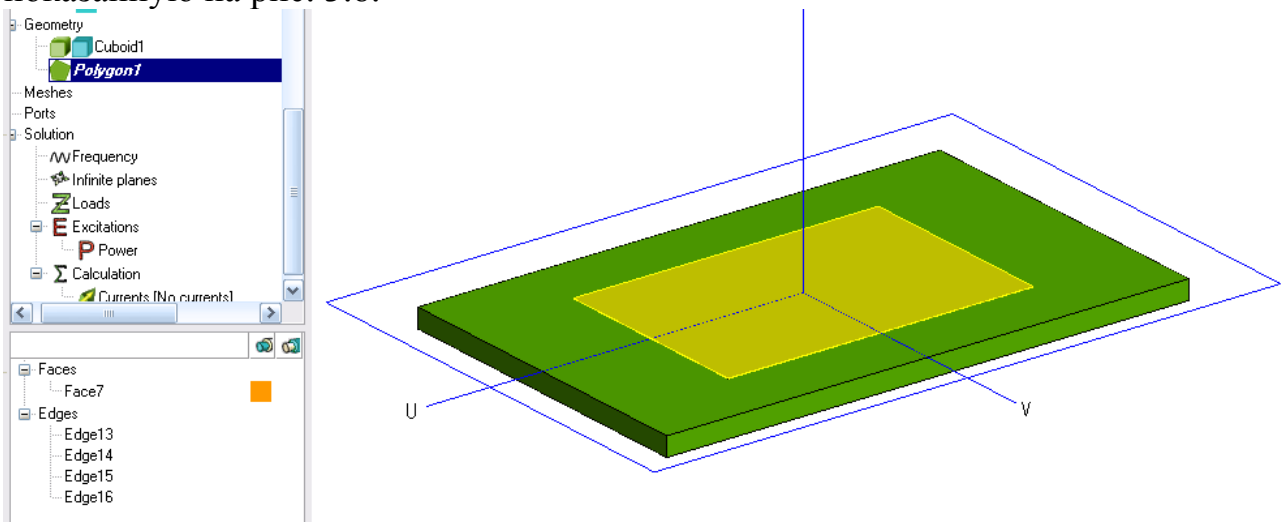


Рис. 3.8. Черчение металлической формы толщиной 0.1 мм, лежащей сверху диэлектрической подложки

Очень важным моментом при создании конструкций, объединяющих диэлектрические и металлические компоненты, является их корректное разбиение на треугольные сегменты. Для этого компоненты должны быть выделены и объединены командой **Unit**. Это обязательный элемент в проектирования.

3.2.Создание порта

В качестве модели разъема SMS, присоединяющего кабель питания к точке питания пач-антенны, можно выбрать дискретный порт, находящийся на сегменте провода. Начертим провод питания. Выберите кнопку черчения линии слева инструментальной панели. Провод устанавливается вертикально со сдвигом 8.9 мм от края длинной стороны платы.

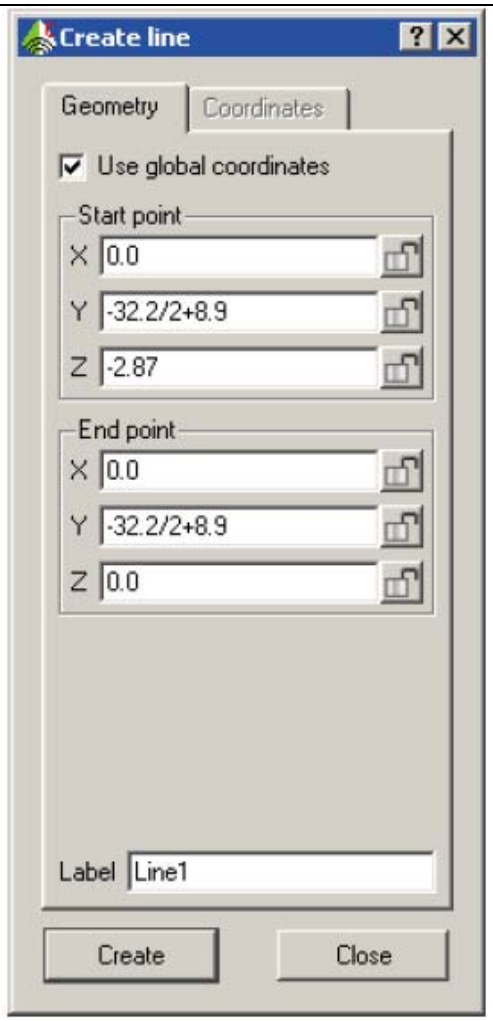


Рис. 3.9. Параметры линии, на которой будет установлен порт

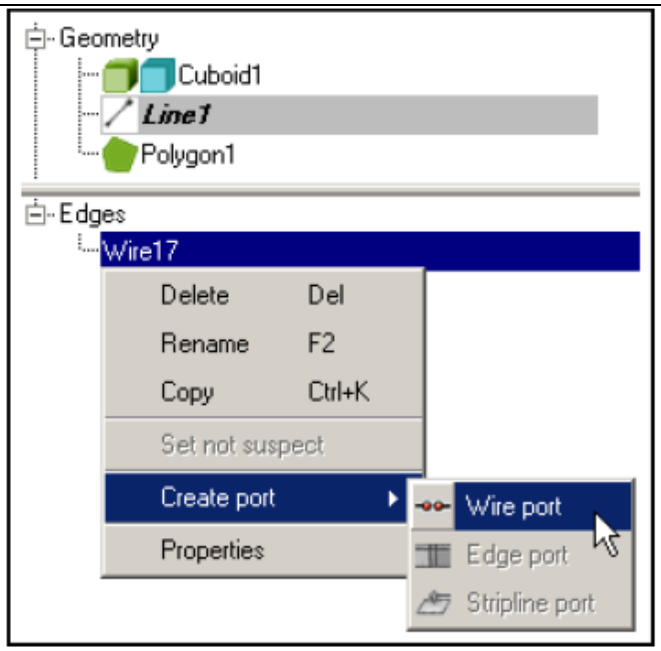


Рис. 3.10. Создание проволочного порта по начерченной линии

Этот провод будет использоваться для создания проводного порта возбуждения. Чтобы поставить порт на провод, выберите край провода в дереве подробностей. Щелкните правой кнопкой и выберите опцию *Create port → Wire port* (рис. 3.10).

После введения в поле **Edge** имени провода (рис. 3.11), что можно сделать выделением этого провода в дереве подробностей, нажмите *Create* и затем *Close*.

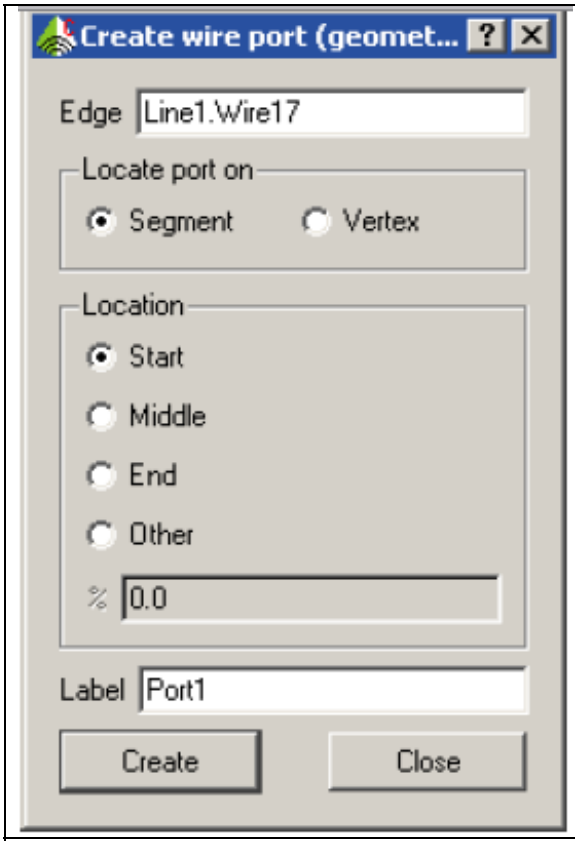


Рис. 3.11. Диалог создания проволочного порта

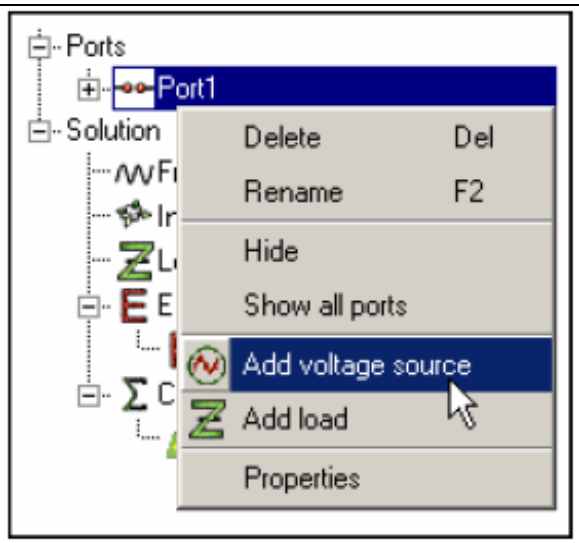


Рис. 3.12. Добавление команды создания источника напряжения

Теперь нужно задать вид этого порта, в виде источника напряжения с нулевым внутренним сопротивлением (рис. 3.11).

Прибавьте источник напряжения к порту, для чего выберите этот порт в дереве проекта правой кнопкой мыши и выберите команду *Add voltage source* из выплывающего меню.

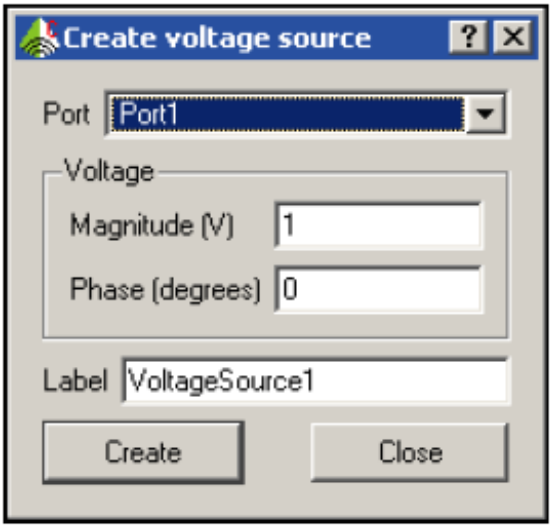
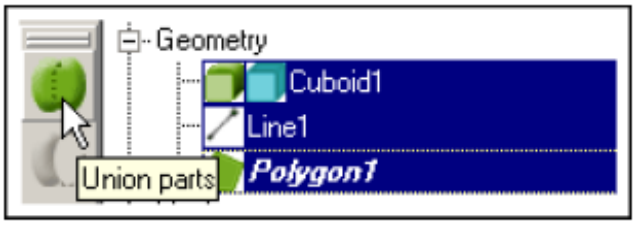


Рис. 3.13. Параметры источника напряжения

В этой модели использовался только один источник. Нажмите *Create* и затем *Close*.

Чтобы быть уверенным, что между сетки на различных частях были связаны, их нужно объединить вместе. Эта процедура выполняется по команде **Union**.

Выберите все три части в разделе **Geometry** (рис. 3.14) и нажмите на кнопку *Union parts* в дереве проекта. Создается новый уровень в дереве Geometry, с тремя включенными частями.



Чтобы выбрать поверхность пач-антенны, включите режим выбора фаски, нажимая кнопку *Select faces* из инструментария. Выберите поверхность антенны. Кликните правой кнопкой мыши на нее и выберите *Properties*.

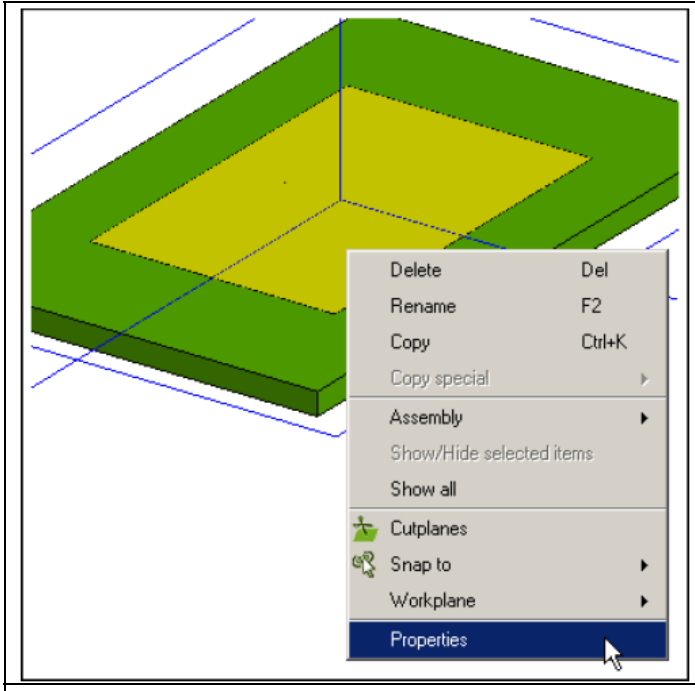


Рис. 3.15. Задание свойств прямоугольника как идеально проводящей поверхности

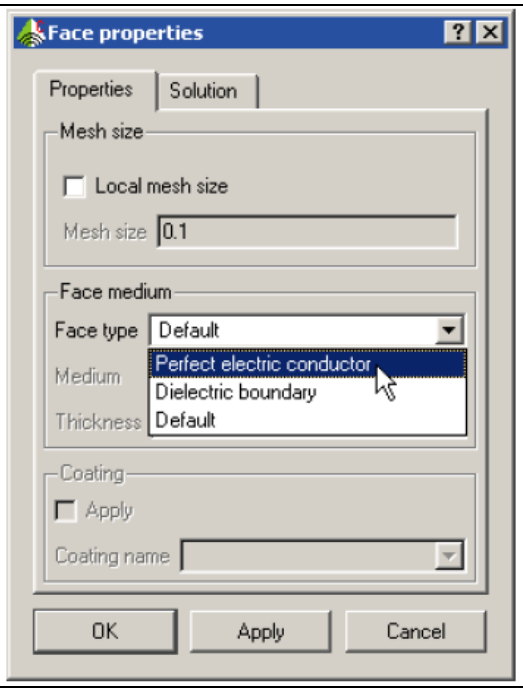


Рис. 3.16. Установка свойств области заполнения

В появившемся диалоге (рис. 3.16) выберите *Perfect electric conductor* как тип фаски *Face type* и нажмите *OK*. Заметим, что в этот время добавляется информация в дереве подробностпей, находящейся внизу дерева проекта. Повторите эту процедуру для земляной плоскости. (Эти фаски можно выбрать одновременно, и их свойства изменятся одновременно).

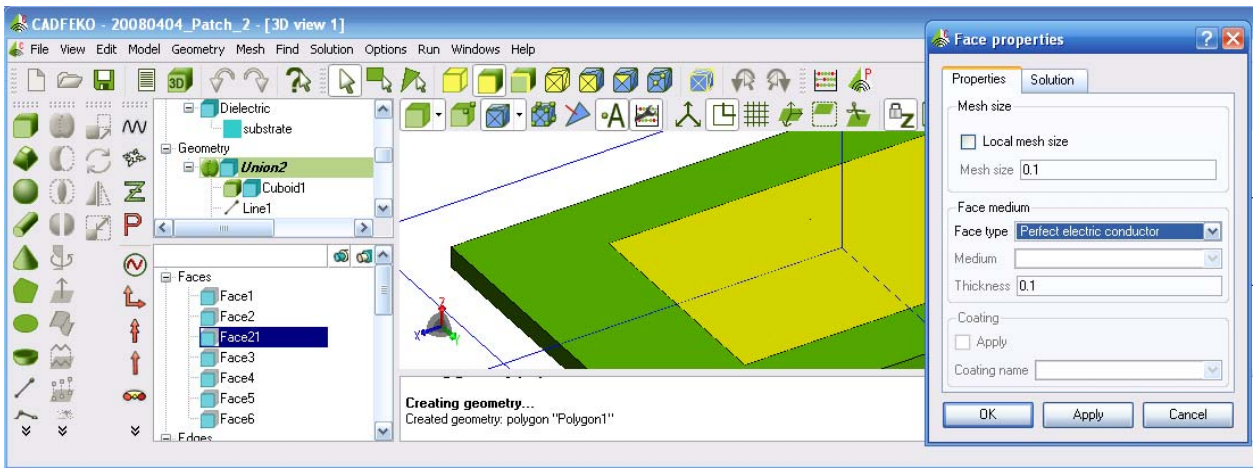


Рис. 3.17. Задание свойств идеально проводящего проводника

Теперь установим частотный диапазон, нажимая кнопку *Set frequency*. Выберите *Continuous (interpolated) range*. В этом случае FEKO автоматически выполнит выбор точек, на которых он будет рассчитывать характеристики в диапазоне частот. В диалоге, показанном на рис. 3.18 введите начальную частоту 2.6 GHz и конечную частоту 3.1 GHz. Нажмите *OK*.

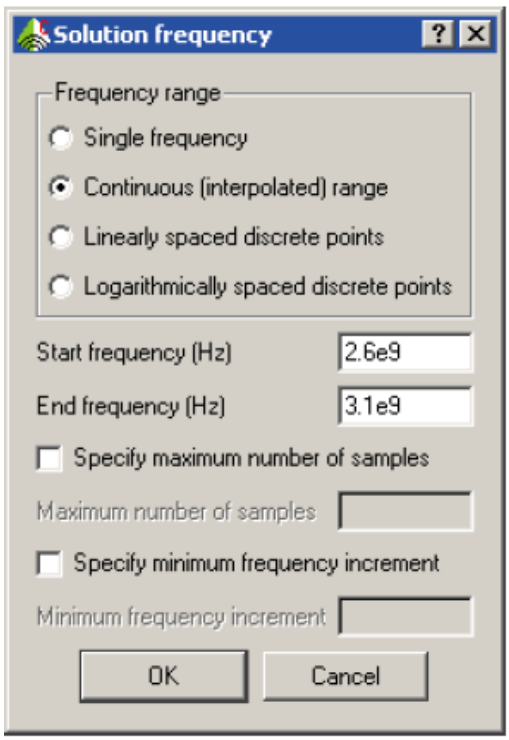


Рис. 3.18. Задание интерполированного диапазона частот

2.3. Создание сетки разбиения на ячейки

FEKO разбивает все поверхности, как проводящие, так и диэлектрические, на сетку. Разбиение на сетку выполняется по команде **Mesh-> Create mesh**.

Для большинства моделей, рекомендуется размер ребра сетки $\lambda/10$ (где λ является длиной волны свободного пространства). Когда модель содержит

диэлектрические материалы, этот размер $\lambda/10$ (где λ - длина волны внутри диэлектрика) должен использоваться для треугольников на поверхности диэлектрика. Эти правила вообще подходят, но они не должны применяться вслепую. Более плотное разбиение на ячейки должно использоваться там, где ток, как предполагается, изменяется более быстро, и менее плотная сетка разбиения может использоваться, когда можно допустить некоторые приближения моделирования.

В подобных конструкция, ток, как известно, изменяется более быстро вблизи длинных граней планарной антенны, поэтому рекомендуется там выполнить более сильное разбиение по граням.

Плотность разбиения на ячейки λ /12 будет использоваться как размер ячейки разбиения, с более плотным разбиениям λ /18 по двум длинным граням. Оба из этих малых размеров более плотные, чем рекомендуется, потому что подложка тонкая.

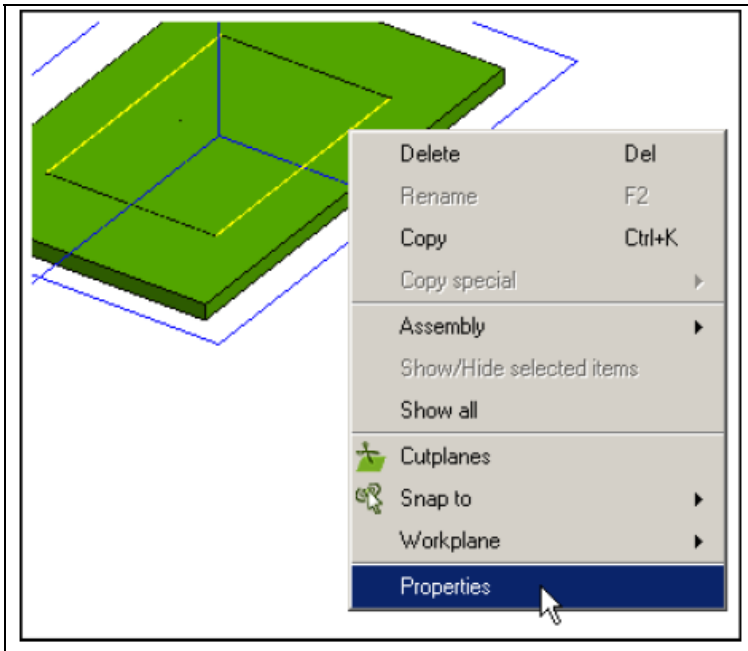


Рис. 3.19. Выделение ребер для задания на них отдельного разбиения

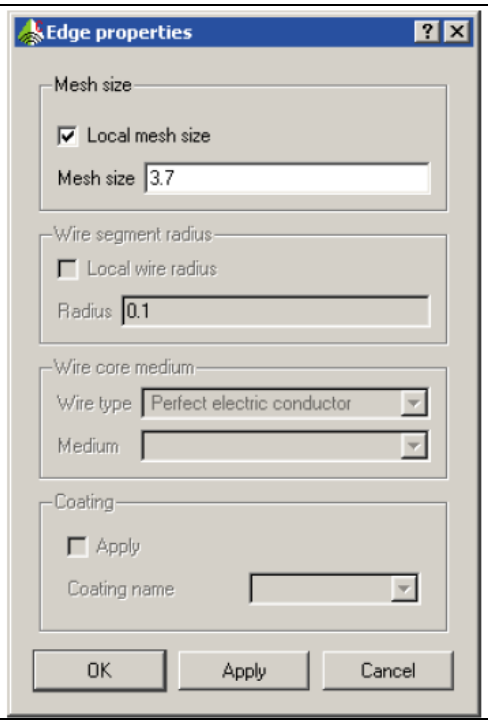


Рис. 3.20. Задание параметров на разбиение ребер

Чтобы установить размер ячейки разбиения вдоль интересующих рёбер, переключитесь в режим выбора рёбер, нажимая кнопку *Select edges*. Наведите на ребро курсор и кликните левой кнопкой мыши, чтобы выбрать ребро. Выберите два длинных ребра антенны (удерживая клавишу *Ctrl*). Нажмите правой кнопкой мыши и выберите *Properties*. Появляется диалог рис. 3.20.

Отметьте опцию *Local mesh size* и введите размер ячейки разбиения 3.7mm. Заметим, что размер ячейки разбиения заносится отдельно для каждой грани.

Если эту установку нужно изменить, то это нужно сделать для обоих граней.

Теперь, когда свойства локального разбиения было установлено, геометрия может быть объединена. Выберите *Mesh* → *Create mesh* из меню CADFEKO. В диалоге рис. 3.21 нужно установить параметры разбиения на ячейки.

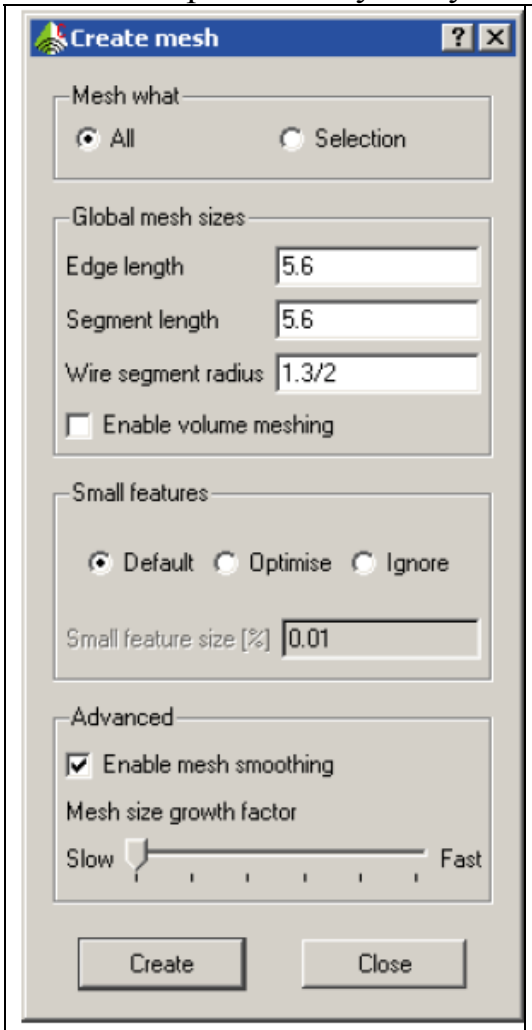


Рис. 3.21. Задание разбиения на ячейки ребер антенны

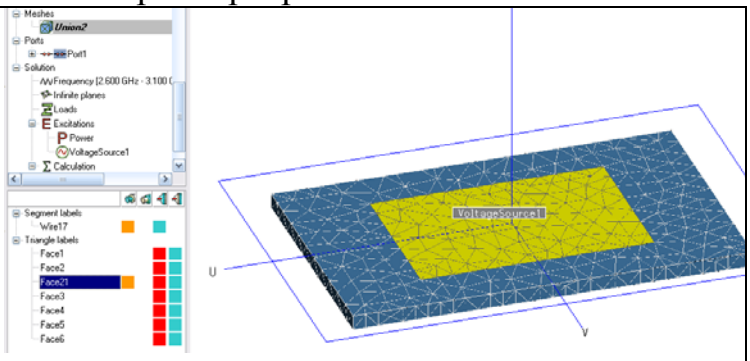


Рис. 3.22.Данные о сетке разбиения

Размер сетки для треугольников **Global mesh Size** и сегментов проводов должен быть установлен равным 5.6 мм. Радиус штыря питания 0.65 мм.

Все другие параметры должны быть оставлены по умолчанию.

Выберите **Create**, чтобы выполнить разбиение на ячейки. Заметим, что по длинным краям выполнилось более плотное разбиение на ячейки.

3.4. Запуск на решение

После завершения создания модели, нужно задать необходимые установки для вывода результаты расчета и запустить решающее устройство. Чтобы запустить на решение из CADFEKO выберите *Run* → *FEKO* из инструментального меню или нажмите на иконку *FEKO*. Откроется окно, показывая прогресс моделирования. Решающее устройство будет использовать 6 частотных точек в полосе. Время расчета около 70 - 100 сек. на частоту, в зависимости от скорости процессора компьютера.

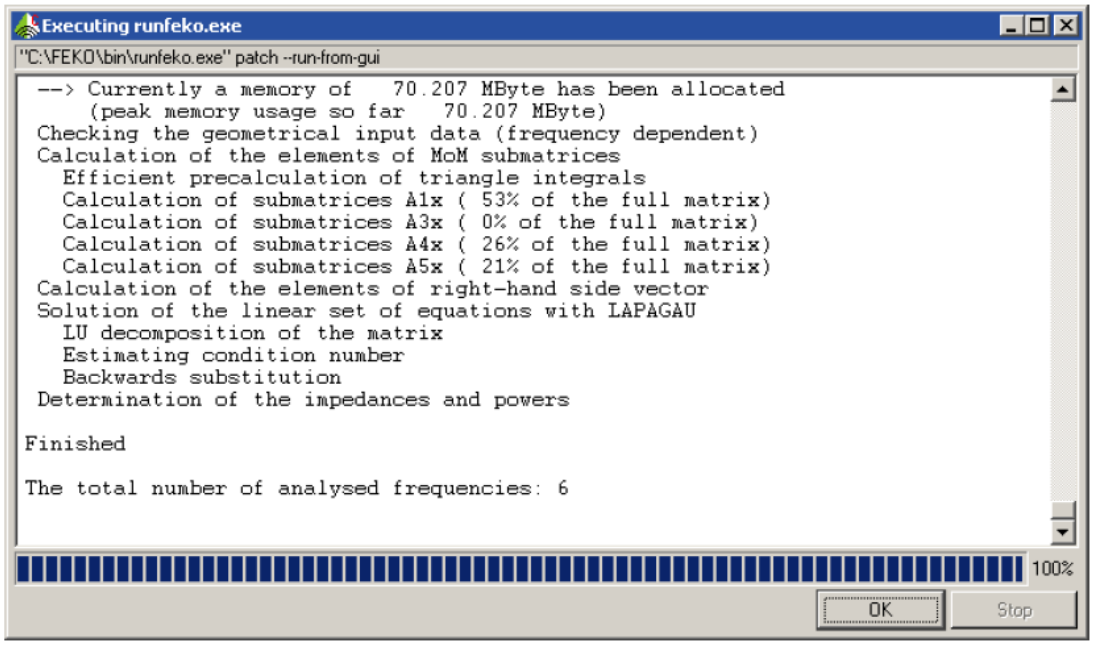


Рис. 3.23. Окно контроля процесса расчета

Максимальное требуемое RAM должно иметь порядок 70 Мб (рис. 3.23). Время моделирования и RAM могут быть существенно уменьшены, используя магнитную симметрию в этом примере.

3.5. Вывод результатов расчета

POSTFEKO используется для постпоцессорной обработки всех результатов FEKO. Этот интерфейс используется для просмотра 3D результатов (дальнее поле, ближние поля, токи и пр.) с геометрией, а также вывод и экспорт двухмерных графиков. Чтобы запустить POSTFEKO, нажмите кнопку *Run POSTFEKO*.

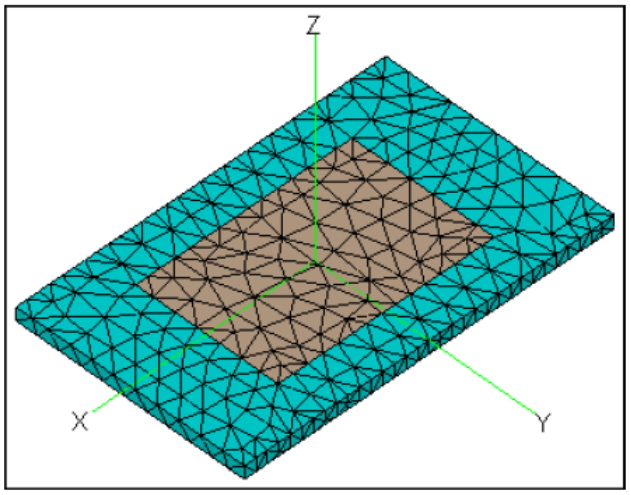


Рис. 3.24. Разбиение на сетку дает согласование разбиения всех объектов

По умолчанию POSTFEKO показывает металлические поверхности в коричневом цвете на голубой подложке.

Новый график, на который выводится информация о согласовании антенны с источником, создается, нажимая кнопку *Add a source data graph* на инструментальной панели 2D графиков. (Этот инструментарий находится вверху 3D). По умолчанию график входного импеданса в диапазоне частот открывается с входным импедансом на первой частотной точке.

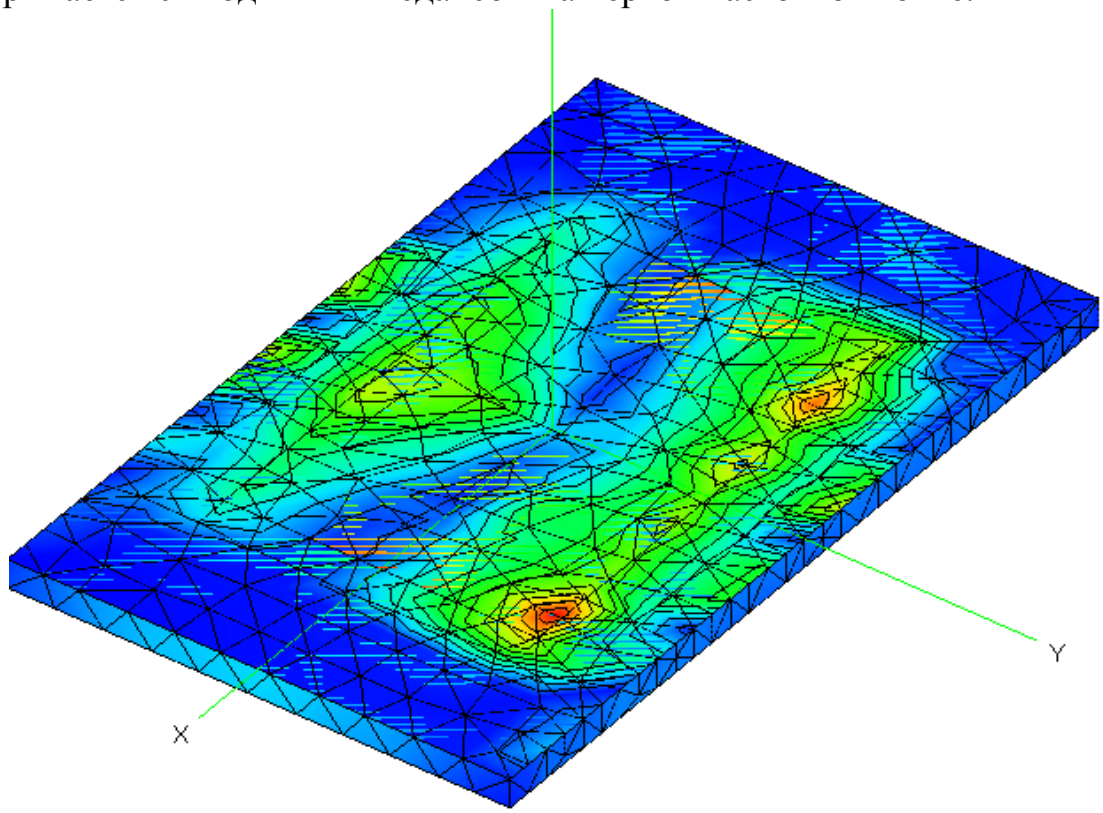


Рис. 3.25. Распределение тока на металлической поверхности пач-антенны

В этом примере используются непрерывные частотные выборки, поэтому снизу этого списка отметьте режим *Use continuous frequency*. Это выбирается для того, чтобы нанести на график результаты, полученные в процессе адаптации.

Выведем величины входного импеданса в диапазоне частот.

Точки частот, на которых было получено решение, показываются маркерами. Выберите *Real* в группе *Part* чтобы нанести реальную часть входного импеданса, а не модуль (рис. 3.26).

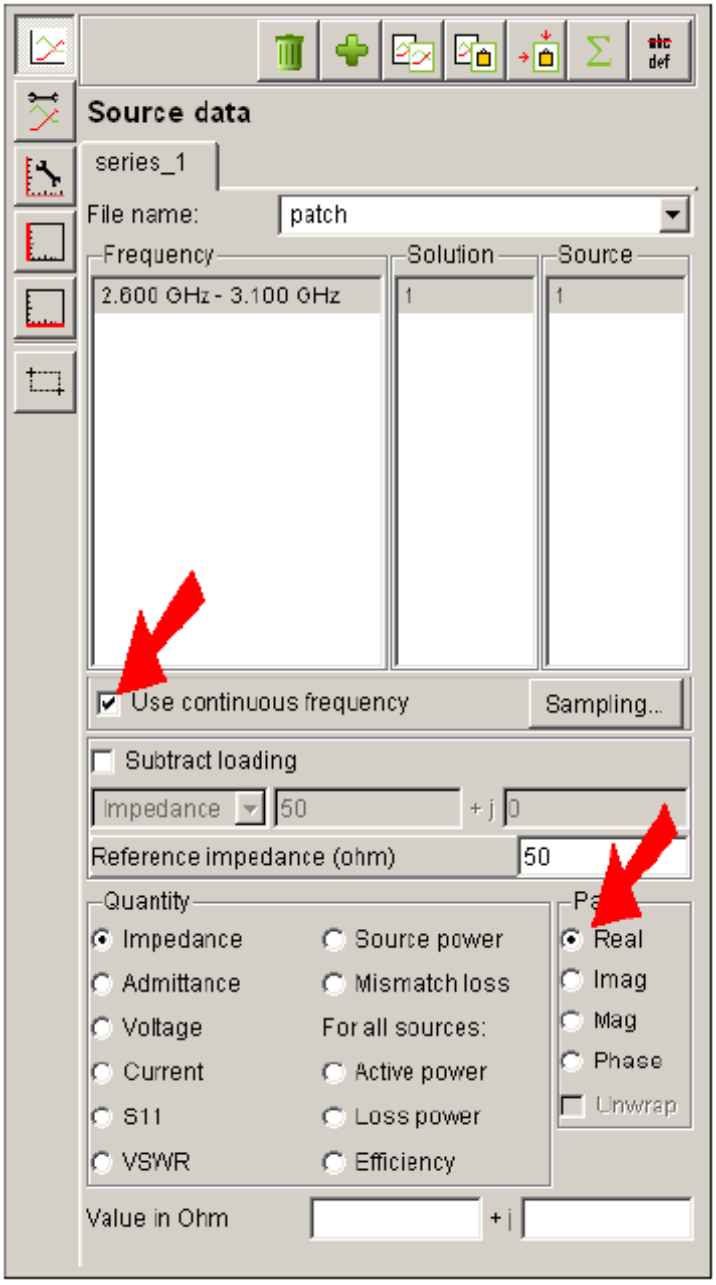


Рис. 3.27. Выбор характеристики, выводимой на график

Чтобы добавить характеристики на график, (для мнимой части импеданса) выберите кнопку *Copy series* расположенную вверху панели конфигурации. Будет создана вторая закладка с именем *series_2* и тогда выберите эту закладку.

Рис. 3.28. Добавление закладки для вывода еще одной характеристики на график

Теперь будет видна вторая характеристика, показывая реальную часть входного импеданса. Выберите *Imag* из группы *Part* чтобы изменить эту характеристику чтобы показать мнимую часть входного импеданса (рис. 3.29).

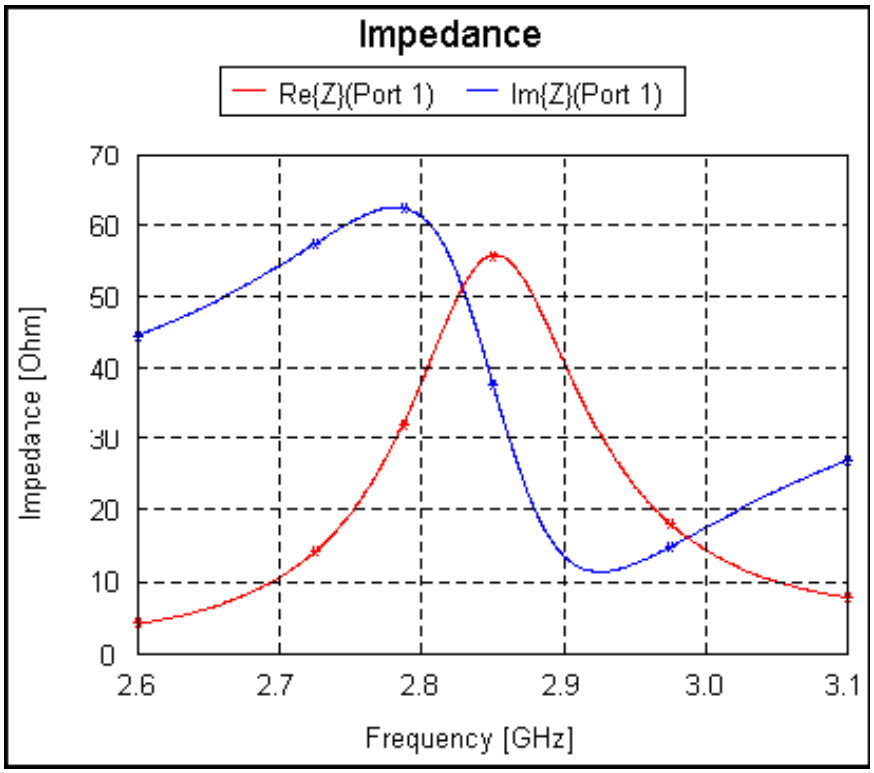


Рис. 3.29. Частотные характеристики входного импеданса пач-антенны

Характеристики входного импеданса пач-антенны видны из графика. Этот график может быть изменен, используя панель установок слева от окна.

Итак, в этом разделе было выполнено моделирование планарной антенны, с дискретным источником в виде штыря, на диэлектрической подложке конечного размера.

Геометрия чертится полностью в CADFEKO. Диэлектрическая плата представляется в виде трехмерного объекта. Внутренняя область платы должна быть установлена как диэлектрический материал. Далее, чертятся две металлические поверхности. Наконец, чертится провод штыря питания, порт добавляется к антенне, а к порту добавляется генератор напряжения.

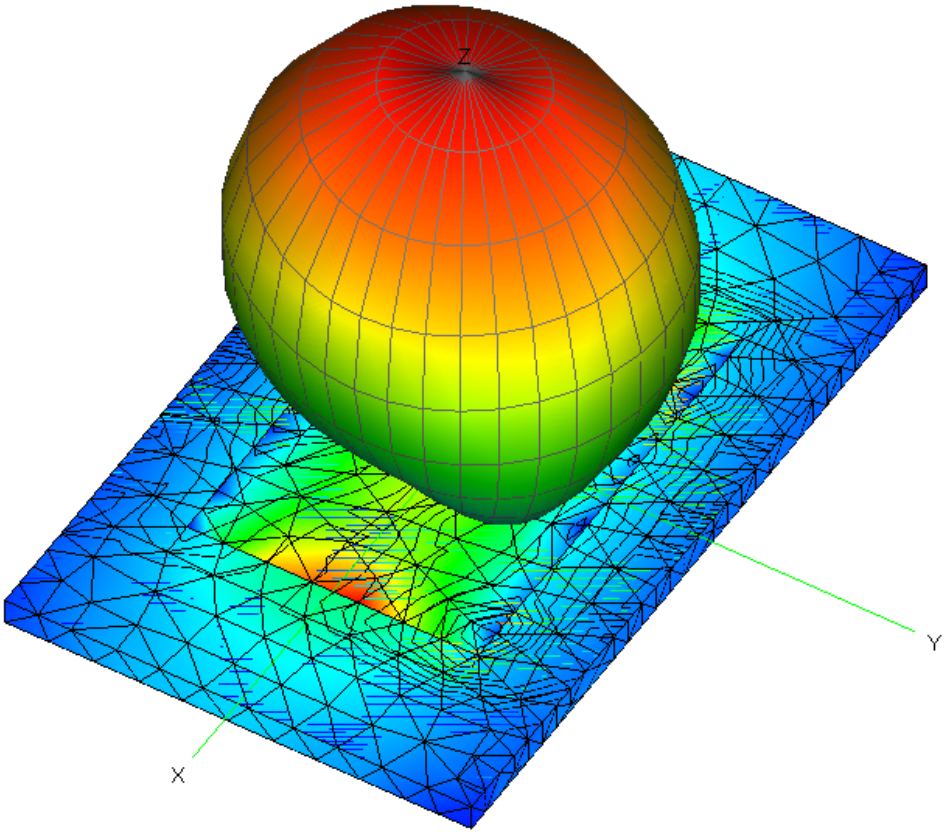


Рис. 3.30. Трехмерная диаграмма направленности пач-антенны

Заметим, что для моделировании подложки можно использовать и описание подложки с помощью функций Грина. Это потребовало бы меньшее количество памяти, чем в представленном примере, но диэлектрик должен бы быть представлен как бесконечный (infinite extents) в плоскости XY.

Вычисление поля в дальней зоне обычно требуется при анализе антенны, но лучше вывести эти характеристики только в нескольких частотных точках, и не выполнять расчет дальнего поля на всех частотах.

4. Анализ квадрифилярной антенны

Выполним черчение и моделирование четырехзаходной спиральной антенны. Антенна имеет 4 порта, которые запитываются с разностью фаз 90 град.

Антенна работает на частоте системы GLONAS и может применяться в аппаратуре определение глобальных координат. Квадрифилярная антенна обладает уникальными свойствами. При своих небольших габаритах (длина её определяется четвертью длины волны вибратора, скрученного на цилиндрической поверхности, она имеет круговую поляризацию близкую к единице в широком меридоональном углу, диаграмму направленности излучению, направленную только в одну сторону даже при отсутствии земляной отражающей платы (рис. 3.1).

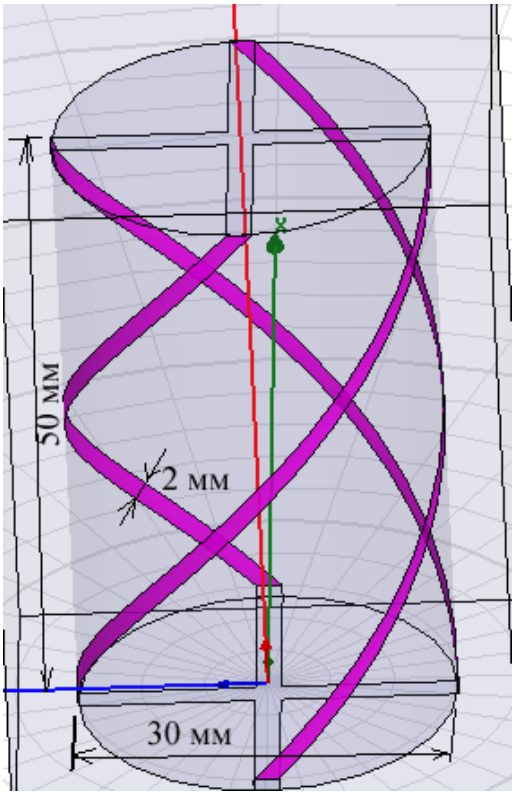


Рис.4.1. Структура квадрифилярной антенны без заполнения. Каждая линия имеет 0.5 витка

Моделируемая антенна состоит из двух скрученных вибраторов, по которым течет ток. Поэтому снизу и сверху диэлектрического патрона находятся два крестообразных перехода.

Ставим единицы мм. Затем, используя команду **Geometry -> Surface -> Poligon**, начертим крестообразный полигон в плоскости XoY, вводя 12 точек (Corner 1 … Corner12, рис. 3.2).

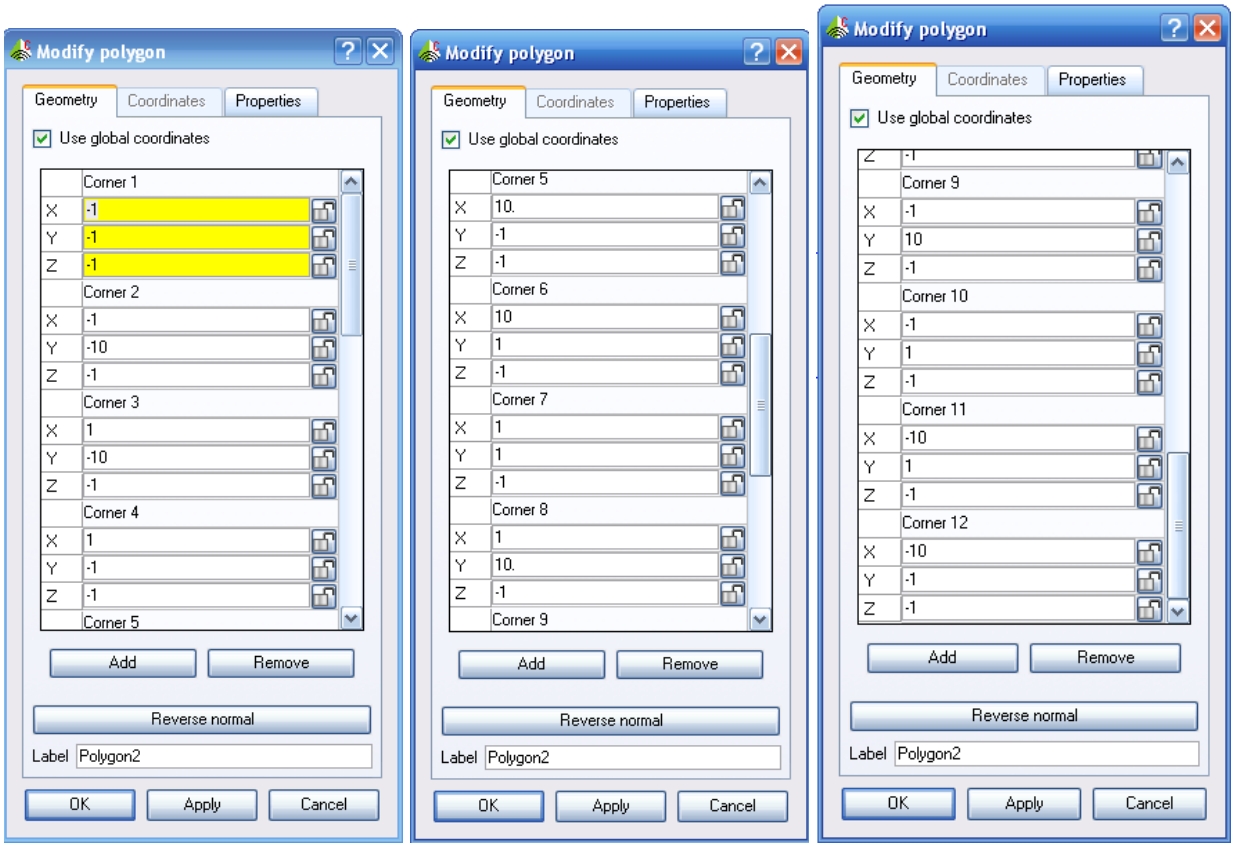


Рис. 4.2. Параметры точек крестообразного полигона

Построение вибраторов с бесконечно малой толщиной выполним черчением спирали по команде **Create helix**, а затем свипированием и вращением спирали вокруг оси Z.

Внесем переменные в проект, которые будем использовать для того, чтобы параметризировать модель, т.е. мгновенно перестраивать, например, высоту антенны, диаметр, количество витков,… Эти переменные вносятся в разделе **Variables**:

Radius15 =15 мм (радиус антенны);

Vysota = 50 мм (высота антенны);

Width = 2 мм (ширина линии вибратора антенны);

Gradius = 180*Width/pi/Radius15 (угол вращения, связанный с шириной линии).

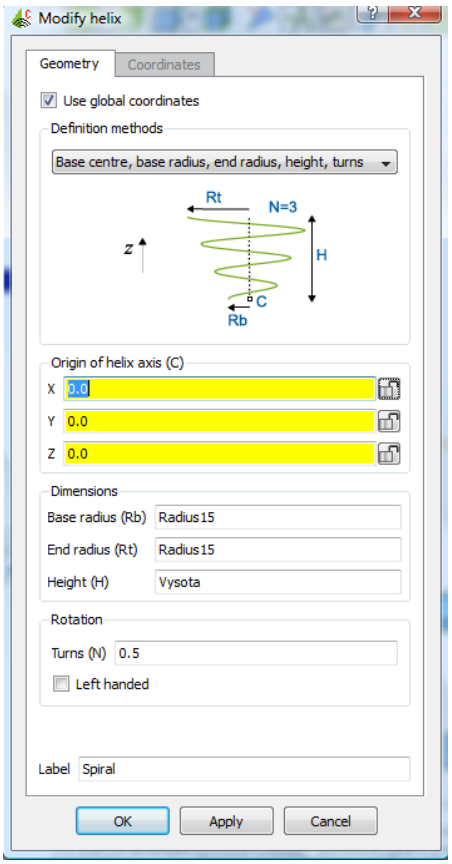


Рис. 4.3. Затем добавляем переменные Radius15 =15

Таким образом, мы строим спираль в виде провода, которая идет из одной точки, смещенной на расстояние 15 мм. Высота спирали будет равна значению переменной Vysota =50 (рис. 4.4).

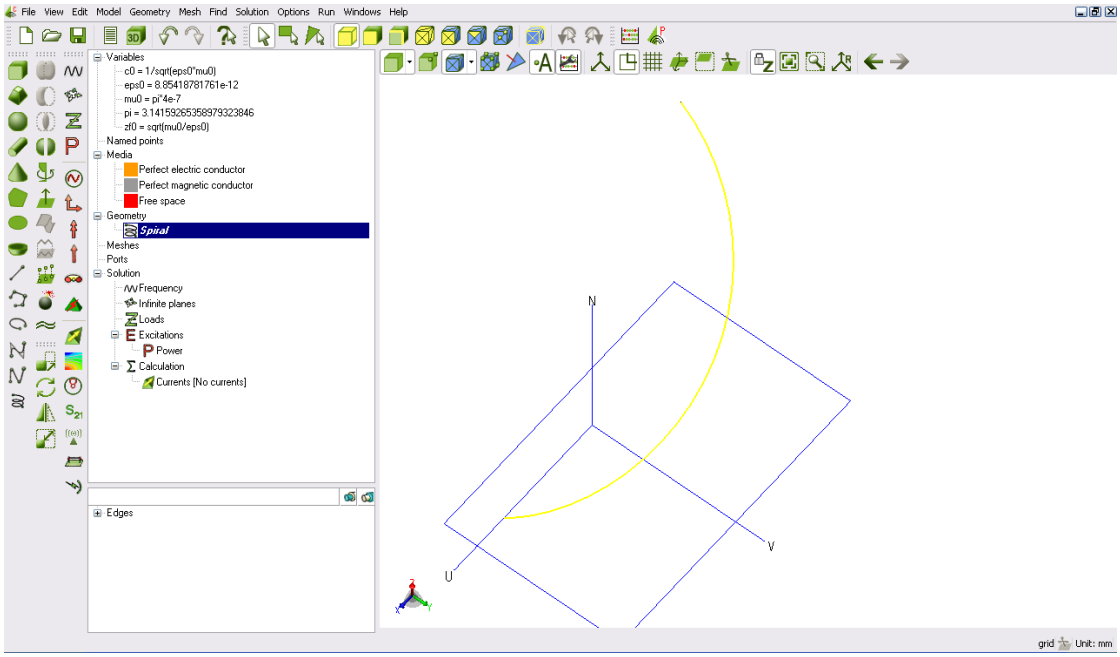


Рис. 4.4. Черчение спирали в виде тонкого провода

Теперь начерченную линию спирали нужно превратить в полоску командой **Rotate**. Появляется диалог Rotation (рис. 3.5).

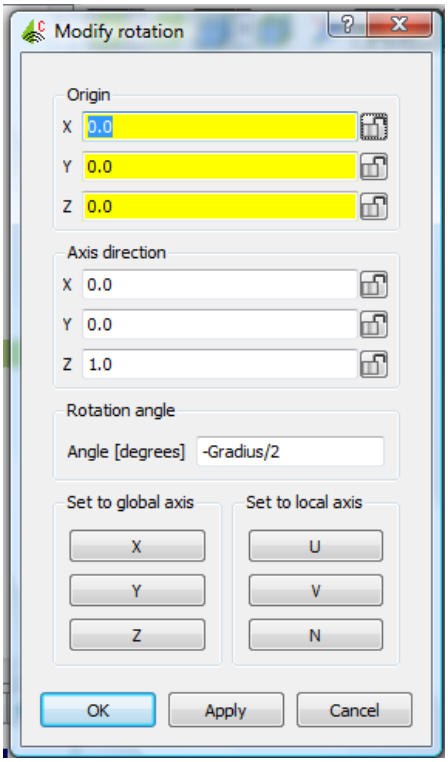


Рис. 4.5. Вращение спирали вокруг оси Z

Нажимая на OK, выполняется вращения **Rotate** на угол , который соответствует половине ширине будущей линии .

Командой **Edit -> Transform -> Rotate** мы сдвинули линию спирали назад на полширины будущей полоски.

Теперь командой **Geometry->Spin** выполним свипирование тонкой спиральной линии по окружности на 11.4 град, что будет соответствовать 2 мм ширине вибратора**.** Заполним диалог рис. 4.6 и нажмем OK**.** Этой операцией создается плоская лента, навитая на цилиндр (рис. 4.7).

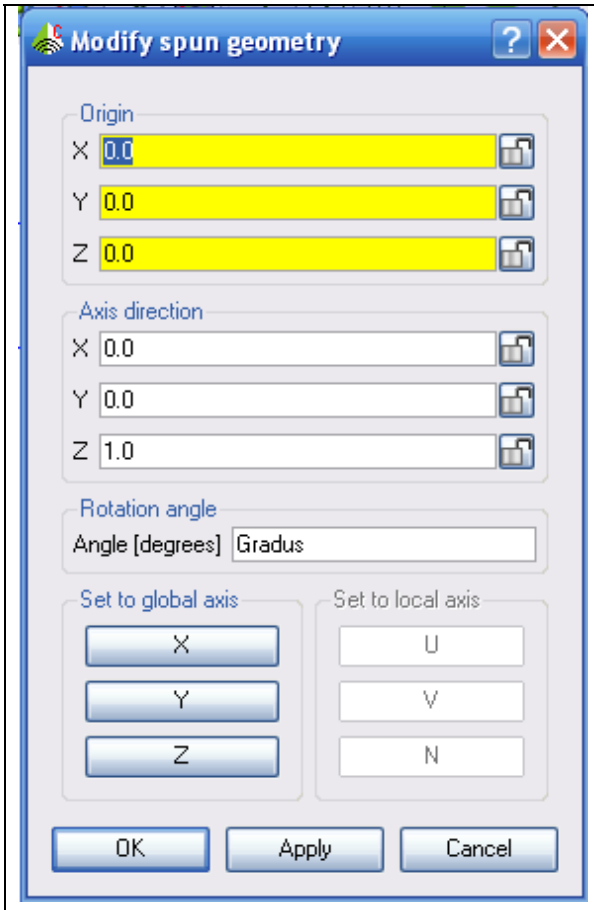


Рис. 4.6. Свипирование спирали и превращение ее в ленту

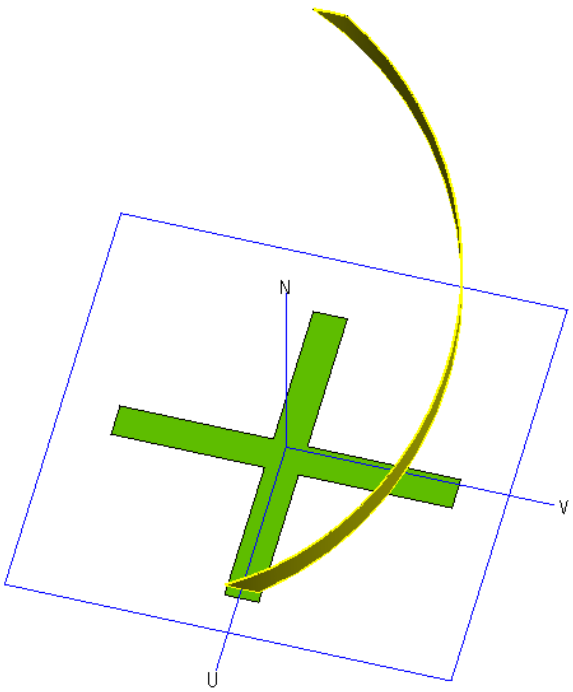


Рис. 4.7. Вращение спирали на -5.7 град соответствует сдвигу спирали «назад» на полширины линии

Далее необходимо продублировать эти вибраторы и прокрутить их положения на 90 градусов. Дублирование выполним командой **Copy**.

Создадим также нижний квадрат, копированием и сдвигом копии вниз на высоту антенны. И, наконец, объединим все объекты командой **Unite**. Объединение нужно для того, чтобы правильно сделать разбиение на треугольники, включая провода, на которые будут устанавливаться проводные порты.

Создание проводных портов

Проводные порты нужно подключить в середину навитых вибраторов. Создадим линию порта командой **Line** (рис. 4.8).

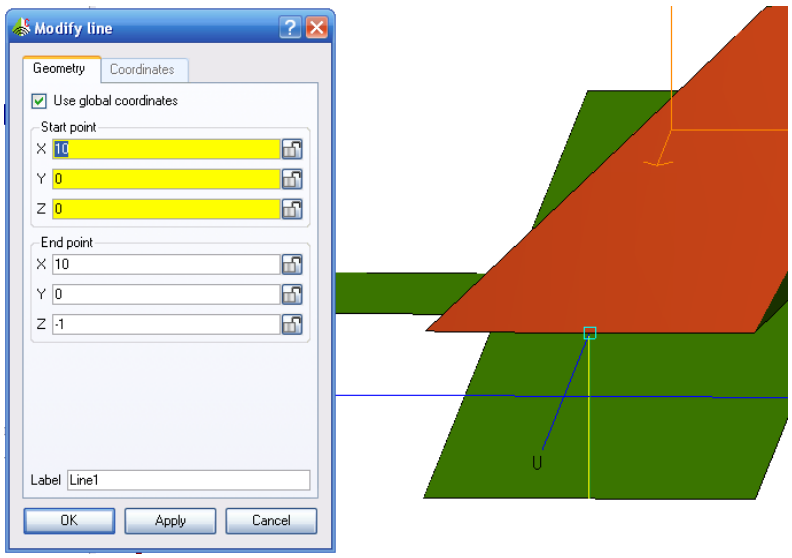


Рис. 4.8. Черчение линии, на которую будет ставиться проводной порт

Теперь на эту линию поставим порт и источник напряжения. С помощью операции вращения, и копирования создадим еще три таких вибратора.

Это копирование и размножение выполним относительно оси Z на 90 градусов. Далее командой **Mesh** вызовем диалог рис. 4.9, в котором установим параметры разбиения. Нажмем кнопку **Create**.

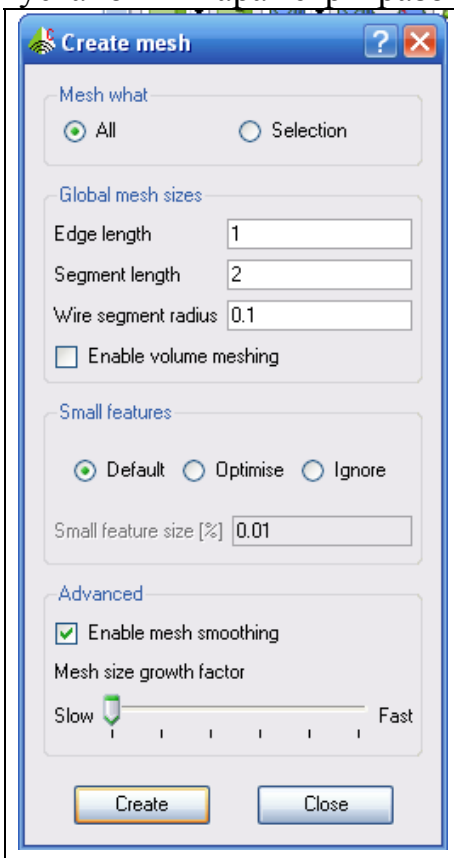


Рис. 4.9. Установки на разбиение на ячейки в программе FEKO

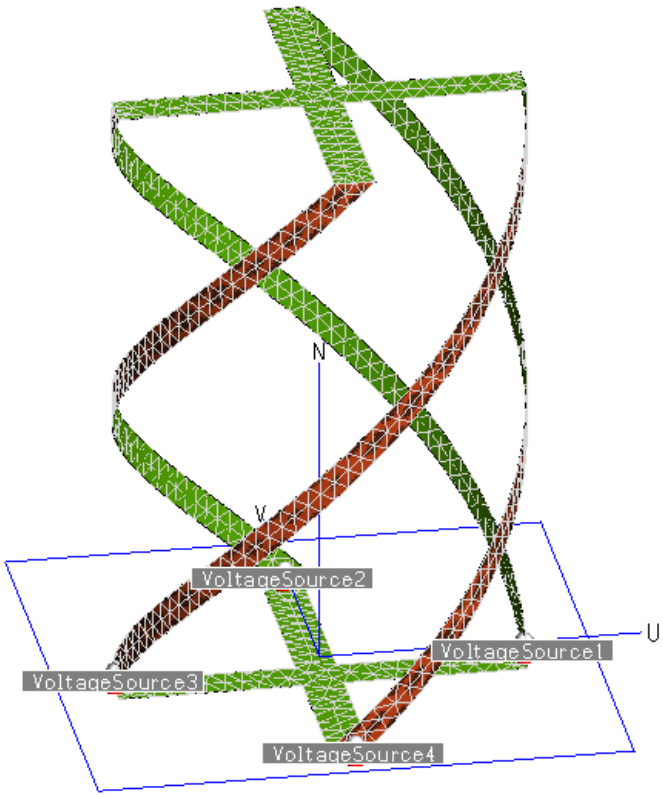


Рис. 4.10. Квадрифилярная антенна без патрона с разбиением высотой 50 мм (от верхнего уровня портов), и диаметром 30

В результате разбиения в дереве проекта появляется раздел **Mesh**, а сама конструкция квадрифилярной антенны приобретает вид, показанный на рис. 4.10. Теперь выполним расчет квадрифилярной антенны. Разбитая на 1914 металлических треугольников в свободном пространстве, конструкция занимает в памяти компьютера 89 МБ. После этого, запуская POSTFEKO можно вывести все необходимы характеристики, например трехмерную диаграмму направленности антенны (рис. 4.11).

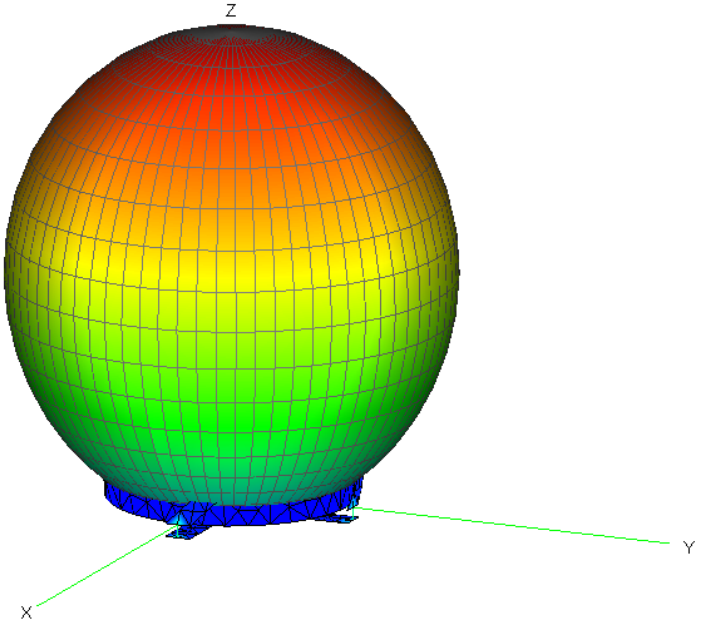


Рис. 4.11. Диаграмма направленности квадрифилярной антенны

Важной характеристикой антенны является частотная характеристика. Одной из часто используемых критериев согласования является частотная зависимость модуля S11 от частоты (рис. 4.12), а также частотные зависимости реальной и мнимой части входного импеданса (рис. 4.13).

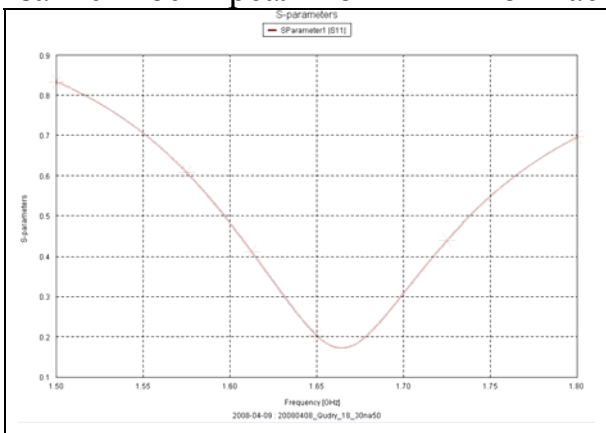


Рис 4.12. Частотная характеристика квадрифилярной антенны 30 мм на 50 мм без заполнения

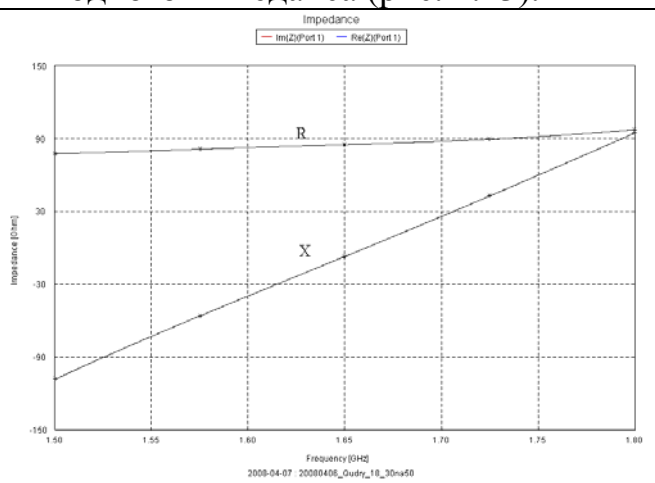


Рис. 4.13. Входной импеданс квадрифилярной антенны

Чтобы выполнить квадрифилярную антенну с еще меньшими размерами, можно навить вибраторы на диэлектрический патрон (рис. 4.14).

Поставим патрон с проницаемостью 4.5, высотой равной высоте квадрифилярной антенны. При создании такой конструкции очень важно объединить металлические линии с диэлектриком командой Unite, чтобы вершины треугольников разбиения лежали точно на ребрах провода. В этом случае размеры антенны уменьшены до 20 мм в диаметре, и 31 мм в высоте.

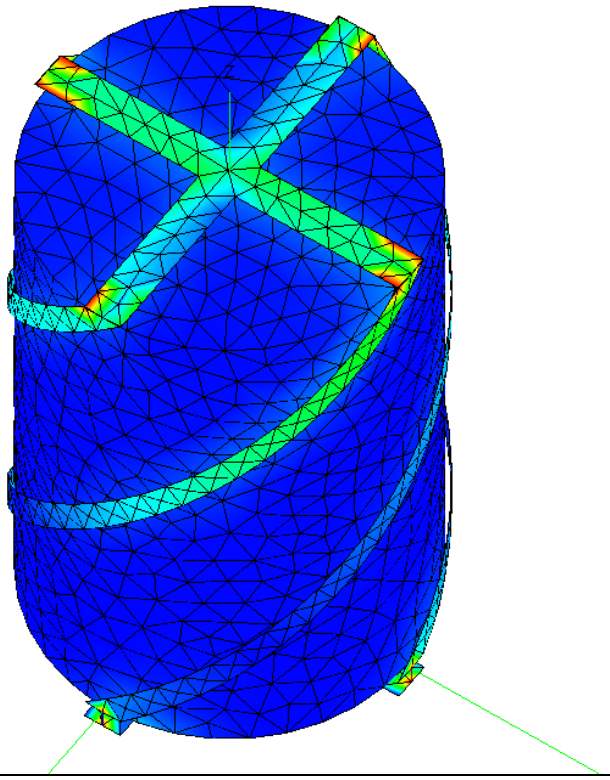


Рис. 4.14. Токи на металлических поверхностях квадрифилярной антенны

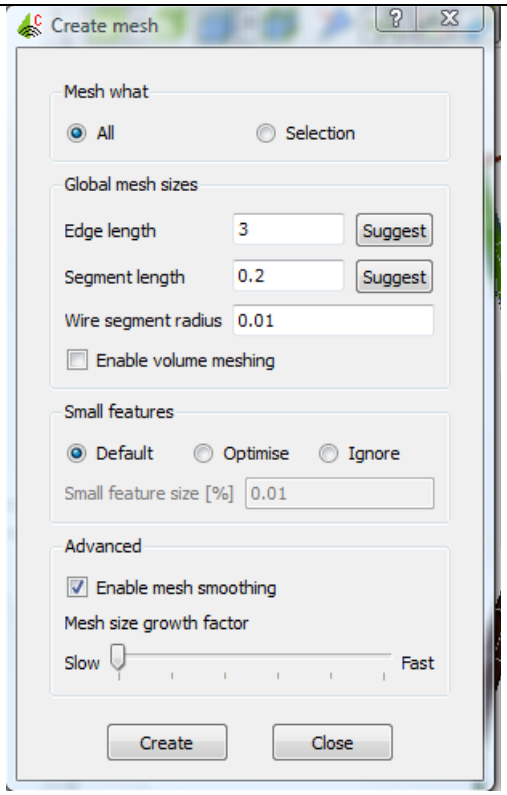


Рис. 4.15. Установка уплотненной сетки разбиения на всех поверхностях

Для расчета квадрифилярной антенны на диэлектрическом патроне потребовалось 880 МБ памяти для размещения 7760 треугольных ячеек, или базовых функций. Для того, чтобы подтвердить данные расчета, существует несколько путей. Наиболее часто используется сравнение с экспериментом, а также сравнение с расчетами на различных программах, в которых реализованы разные методы электродинамического анализа: метод конечных элементов в HFSS, метод конечных разностей во временной области в SCT Microwave Studio и др. Так например, аналогичная квадрифилярная антенна была рассчитана на программе EDEM [3], в которой также реализован метод моментов. Частотные характеристики точно совпадают с полученными на FEKO и показаны на рис. 4.20. Однако расчет на HFSS, в которой реализован метод конечных элементов, показал отличие в резонансной частоте около 20 МГц.

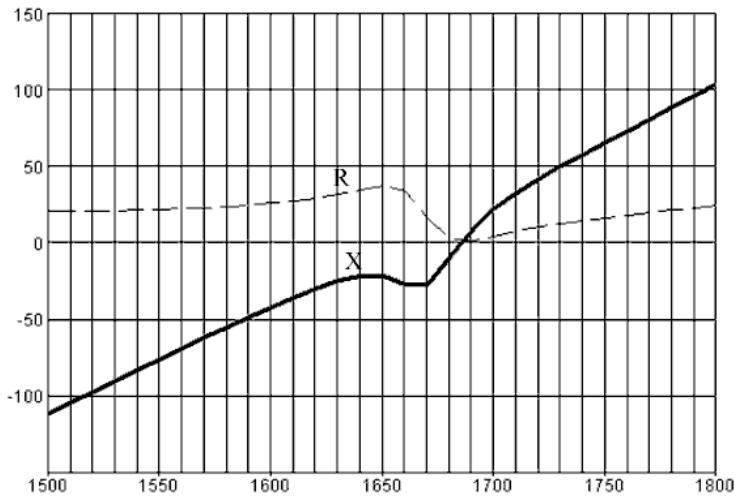


Рис. 4.16. Входной импеданс квадрифилярной антенны, рассчитанный на EDEMe

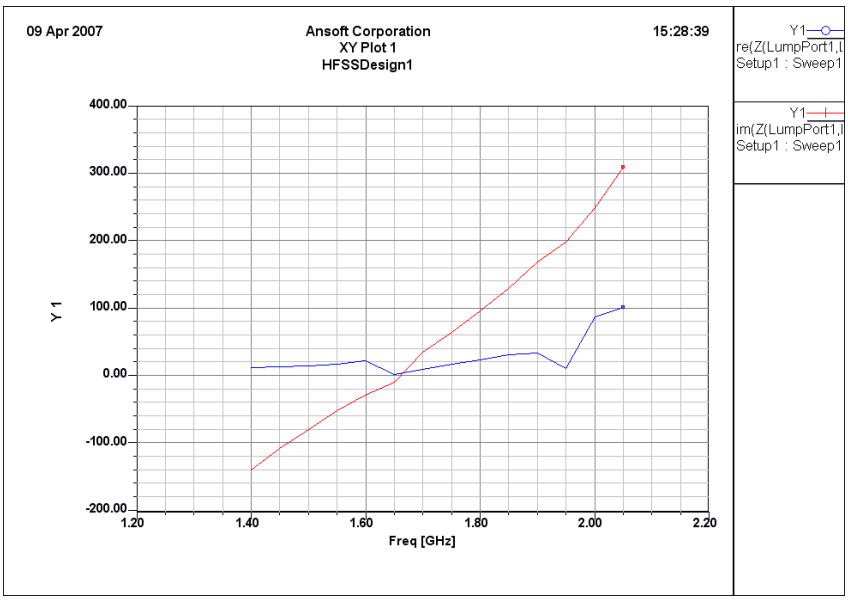


Рис. 4.17. Входной импеданс квадрифилярной антенны, посчитанный на HFSS

Основное отличие в расчетах в этих двух случаях заключается в том, что в HFSS учет одновременной работы всех генераторов, и фазовых соотношений между ними, выполняется на этапе постпроцессорной обработки, а в FEKO – с самого начала расчета все возбуждающие источники вносят свой вклад в рассчитываемые токи с учетом фаз.

Квадрифилярная антенна работает с 4 генераторами одновременно. Поэтому ее входной импеданс нельзя считать как параметр Z_{11} матрицы [Z], пересчитанной из обобщенной S-матрицы. Поэтому для вывода Zin по каждому из входов квадрифилярной антенны необходимо использовать рассчитанную обобщенную S-матрицу, и при этом

$$Z_{in} = Z_o*(1+S_{11})/(1-S_{11}),$$ где Z_o – сопротивление порта

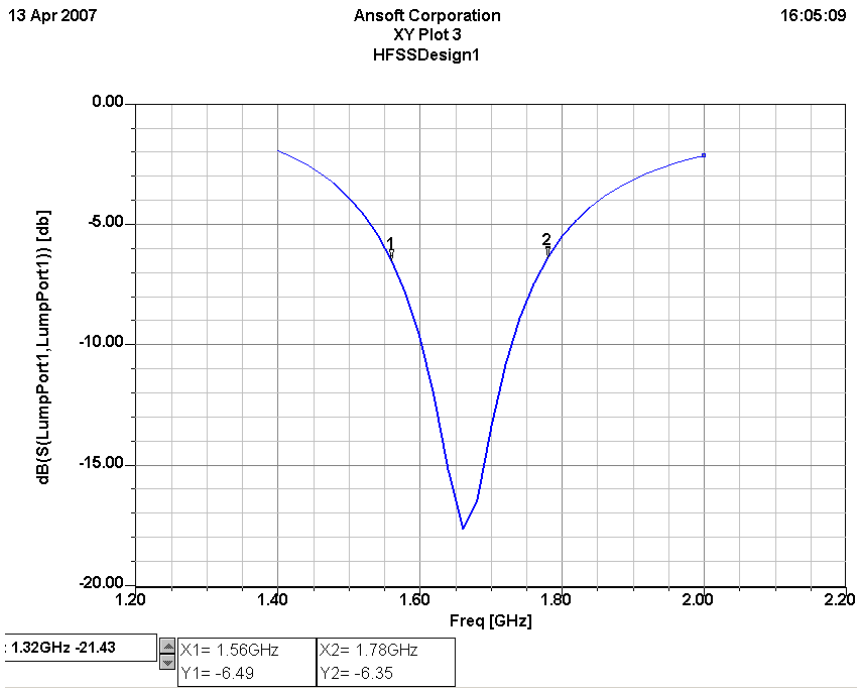


Рис. 4.18. Частотная характеристика квадрифилярной антенны без заполнения (возвратные потери, S_{11}, dB). Полоса 220 МГц

При работе многопортовой антенны, с учетом того, что падающие волны на каждый из 4-х портов подаются со смещением π/2, со стороны 1-го порта имеем:

$$U1o = U\,(S_{11}+S_{12}\,e^{j\pi/2} + S_{13}\,e^{j\pi} + S_{14}\,e^{j3\pi/2}),\ \text{откуда}$$

$$S_{11\ com} = S_{11}+S_{12}\,e^{j\pi/2} + S_{13}\,e^{j\pi} + S_{14}\,e^{j3\pi/2}$$

Поскольку второе и четвертое слагаемое компенсируются, то

$$S_{11\ com} = S_{11} - S_{13}$$

В результате учета отражения от генератора, лежащего напротив первого порта, получаем, что параметр S11, dB, или возвратные потери приобретают частотную характеристику, несколько смещенные по сравнению с исходным случаем (не учета отраженной волны).

Далее, по этой величине S11 com рассчитываем входное сопротивление, равное

$$Z_{in_com} = Z_o*(1+S_{11\ com})/(1-S_{11\ com}),$$

где Z_o – сопротивление порта.

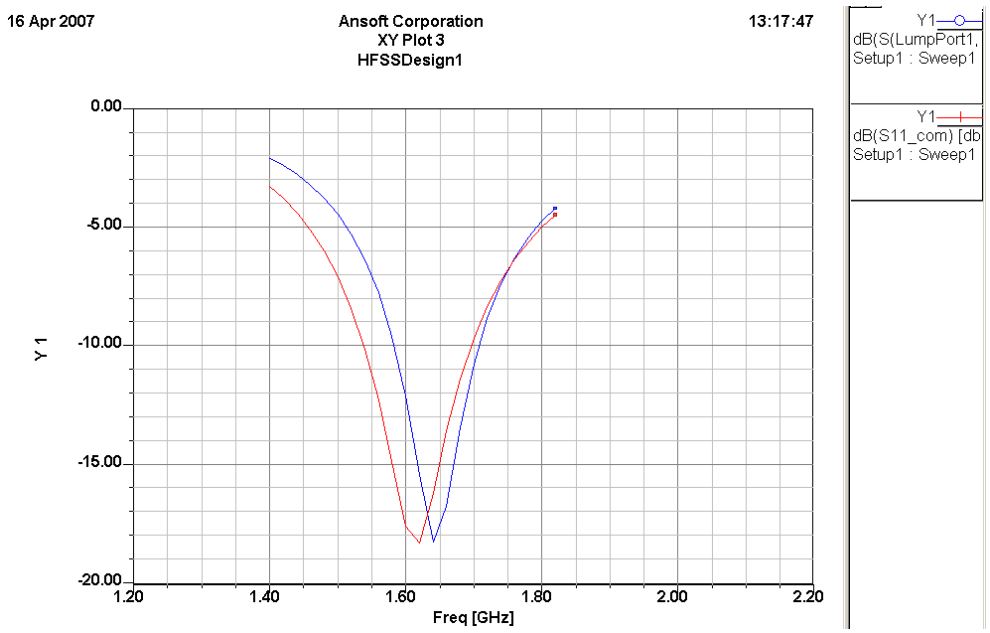


Рис. 4.19. S11 исходное, справа, и S11_com, учитываемое отражение волны от порта 3

В качестве характеристики, общепринятой для оценки полосы пропускания антенны, часто используют критерий КСВ по уровню 3. Так, для квадрифилярной антенны на диэлектрическом патроне, имеем частотную зависимость КСВ показанную на рис. 3.20.

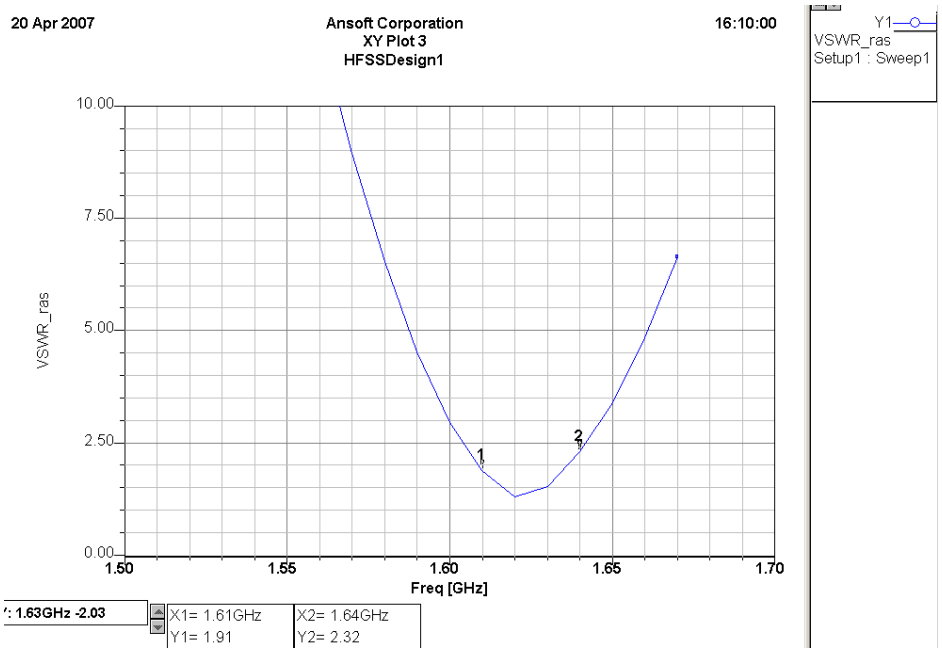


Рис. 4.20. Частотная характеристика квадрифилярной антенны на диэлектрическом патроне

Из сравнения с частотной характеристикой антенны без диэлектрического заполнения видим, что полоса антенны уменьшилась до 30 МГц.

В заключении отметим, что при расчете на различных программах нужно твердо осознавать, что мы считаем. При использовании HFSS, необходима компенсации взаимной связи, и к тому же:

1. Согласование антенны с заполнением диэлектрическим материалом значительно усложнилось.
2. Появление второго слагаемого в выражении $S_{11\ ком} = S_{11} - S_{13'}$ по видимому, усложняет согласование антенны.
3. Полоса уменьшилась до 30 МГц.

Особенности расчета на FEKO заключаются в том, что такого учета в FEKO делать не надо. В FEKO процесс расчета уже учитывает фазовые соотношения между источниками возбуждения.

5. Расчет связи между антенной и линией

В этом примере рассчитывается связь между вертикальной расположенной антенной и горизонтальной линии передачи, как показано на рис. 5.1. Можно сказать, что в этом примере решается задача электромагнитной совместимости, поскольку главная задача электромагнитной совместимости заключается в том, чтобы развязать много источников излучения, работающих вблизи.

И антенна, и линия передачи состоит из проводников (структура провода такова, что длина его существенно больше, чем диаметр), лежащих над земляной платой.

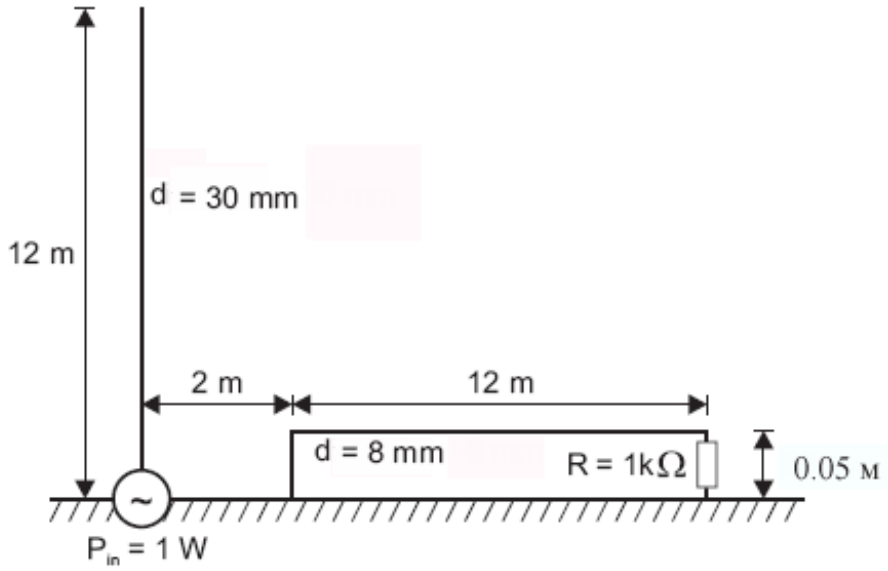


Рис. 5.1. Две антенны, имеющие взаимную связь

В примере используется аппроксимация земляной плоскости как бесконечной, чтобы моделировать идеально проводящую земляную плату (противовес). Горизонтальная линия нагружена с одного конца на комплексный импеданс.

4.1. Создание геометрии в CADFEKO

Создадим геометрию в CADFEKO. Зададим единицы в метрах. Вертикальный вибратор создан как элемент однопроводной линии и линия передачи как элемент ломаной линии. Ломаная линия составлена из трех секций. Противовес определен, используя аппроксимацию в виде бесконечной отражательной заземляющей поверхности. Этот метод моделирования больших противовесов более эффективен по сравнению с разбиением на треугольники противовеса конечного размера.

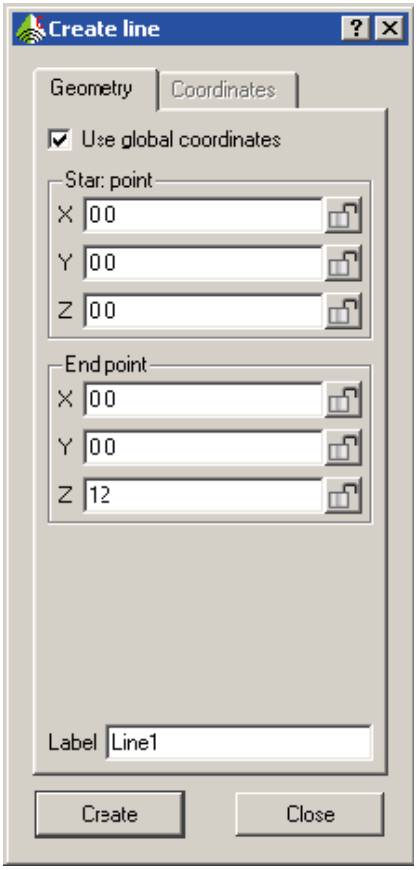


Рис. 5.2. Черчение монопольной антенны длиной 12 метров

Начертим монопольную антенну по оси Z. Нажмите кнопку **Line** на инструментальной панели создания геометрии и введите данные в диалог рис. 5.2. Будет создана однопроводная линия 12 м по z оси.

После создания этой антенны, нажмите *Zoom to extents* на инструментальной панели выше трехмерного представления. Заметим, что из-за наложения антенны с осью Z, может быть трудно видеть антенну.

Поскольку антенна и горизонтальная линия имеют различные радиусы, радиус провода не может быть установлен как глобальный размер. Для вертикальной антенны должен быть установлен локальный радиус. Он устанавливается в диалоге свойств ребер (рис. 5.4). Чтобы открыть этот диалог, выберите линию в дереве проекта, разверните *Edges* в дереве проекта, и выберите край.

Выберите опцию **Properties** из всплывающего меню.

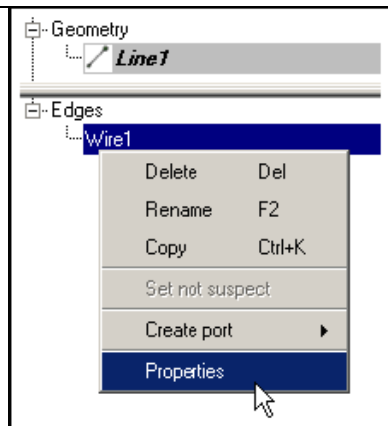


Рис. 5.3. Установление свойств монопольной антенны

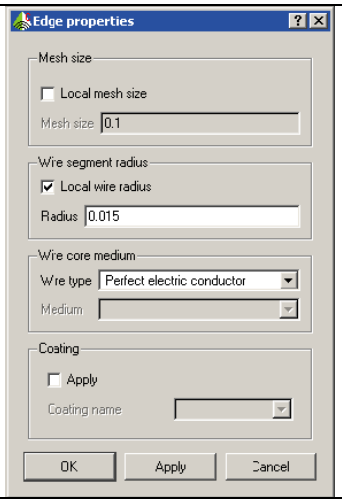


Рис. 5.4. Установление радиуса вибраторной антенны

Радиус провода устанавливается опцией *Local wire radius*, вводя радиус 0.015 [m] в поле **Radius**. Тогда в дереве подробностей, рядом с краем изменится значок, указывая, что край имеет заданный радиус.

4.2.Черчение горизонтальной линии

Линия передачи чертится как ломаная линия. Нажмите **Polyline** на инструментальной панели. Линия передачи создается идущей вдоль оси Y.

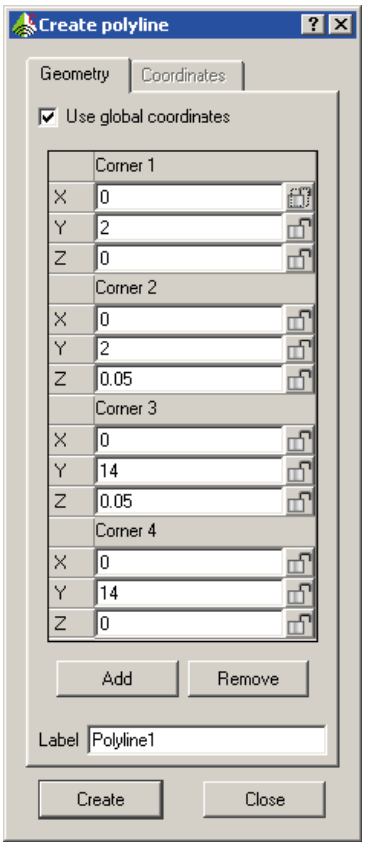


Рис. 5.5. Создание ломанной линии

Нажмите кнопку *Zoom to extents* на инструментальной панели выше трех-мерного представления, чтобы расположить структуру в 3D окне.

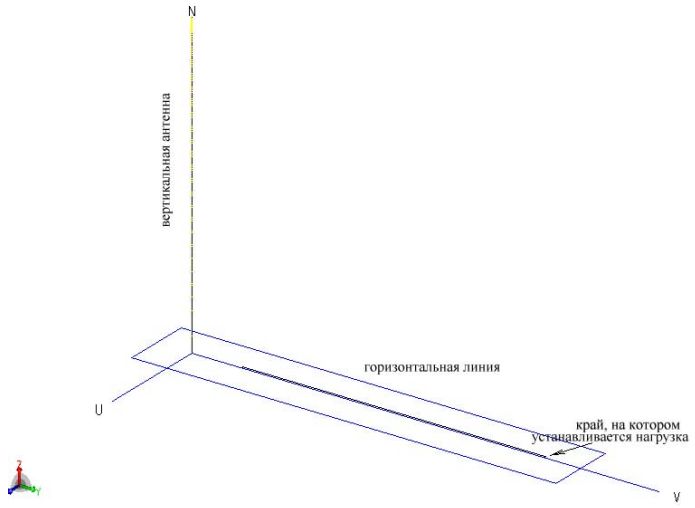


Рис. 5.6. Горизонтальная линия

Чтобы создать земляную плату бесконечного размера, дважды щелкните *Infinite planes* в дереве проекта. Появляется диалог рис. 4.7.

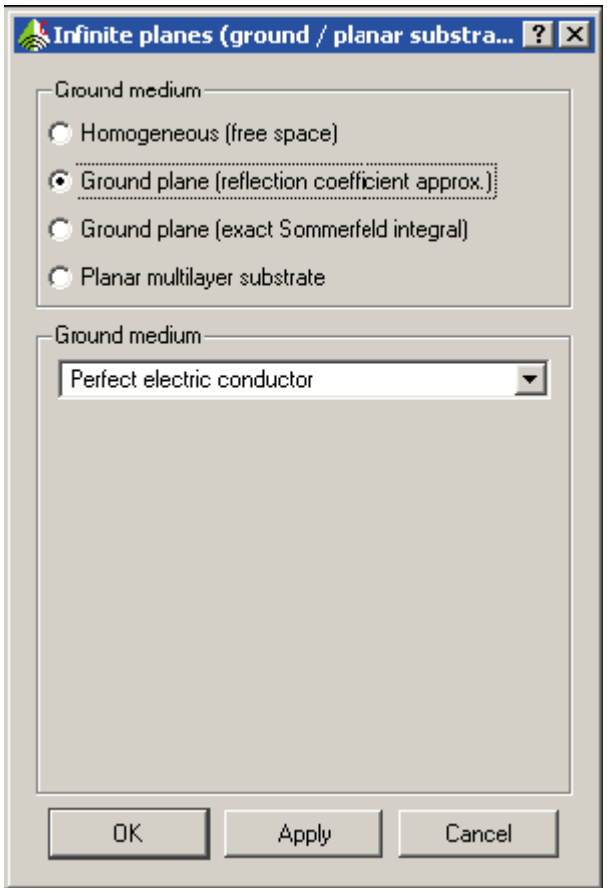


Рис. 5.7. Задание бесконечной земляной плоскости

В диалоге **Infinite planes** выберите опцию *Ground plane (reflection coefficient approx.)* , а в разделе *Ground medium* по умолчанию установите *Perfect electric conductor*.

Далее необходимо задать порты, возбуждения и отдельные нагрузки для модели. Первый порт будет создан для возбуждения вибратора. Чтобы создать этот порт, выберите **Line1** в дереве проекта, сделайте щелчок правой кнопкой мыши на крае, связанном с этим в дереве подробностей. Затем выберите опцию *Create port → Wire port* (рис. 5.8).

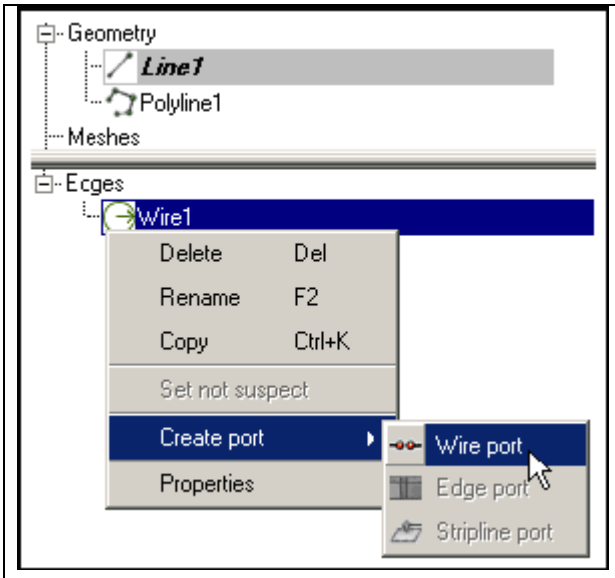


Рис. 5.8. Создание порта на вертикальной вибраторной антенне

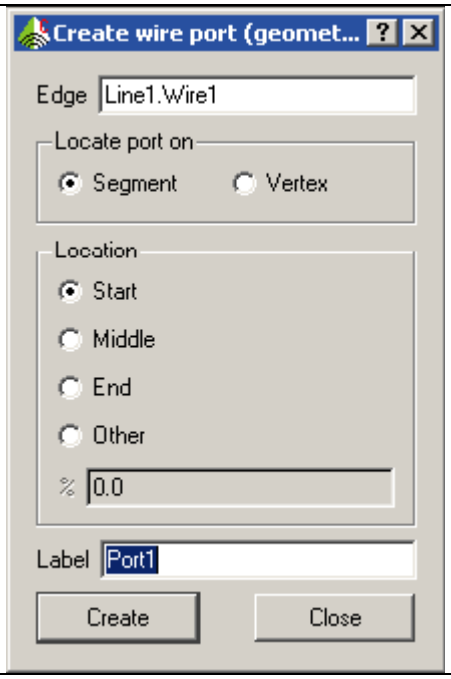


Рис. 5.9. Создание проводного порта

По этой команде появляется диалог рис. 4.9. Теперь нужно в дереве подробностей выделить провод, на который будет установлен проводной порт. Его имя появится в окне Edge.

В данной модели используются установки порта по умолчанию в начальной точке созданной линии (Start). Нажмите *Create* и *Close*.

Порт для нагрузки на линии передачи сделан аналогично. Сначала выберите верный сегмент линии в дереве деталей, нажимая на правую кнопку, и создайте проводной порт.

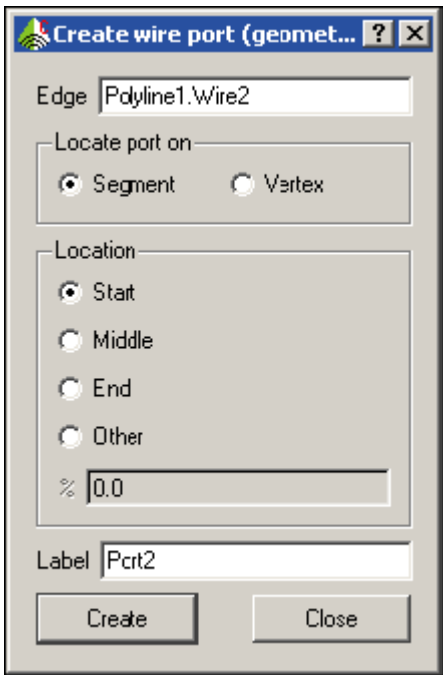


Рис. 5.10.Диалог создания проводного порта

Осторожно нужно выбрать правильный край. (В трехмерном представлении показываются предварительный вид порта с зеленой сферой прежде, чем Вы создаете ее). Для установки порта оставляем параметры по умолчанию.

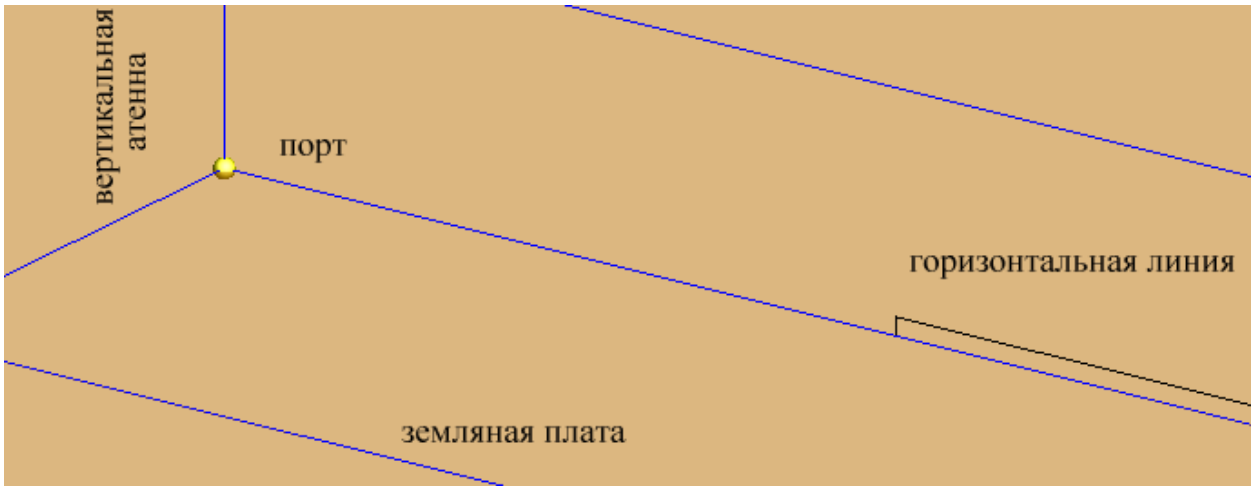


Рис. 5.11. Порт в вертикальном вибраторе

Теперь установим генератор напряжения на первом порту. Чтобы добавить источник, нажмите кнопку *Voltage source* на инструментальной панели. Мощность излучения должна быть 1 Ватт для этого примера, но так как входное сопротивление для монопольной антенны не известно, мощность не может быть установлена, изменяя напряжение. Установка мощности может быть выполнена позже, при задании масштаба мощности излучения. Поэтому оставьте установки напряжения по умолчанию (рис. 5.12), и нажмите *Create* и *Close.*

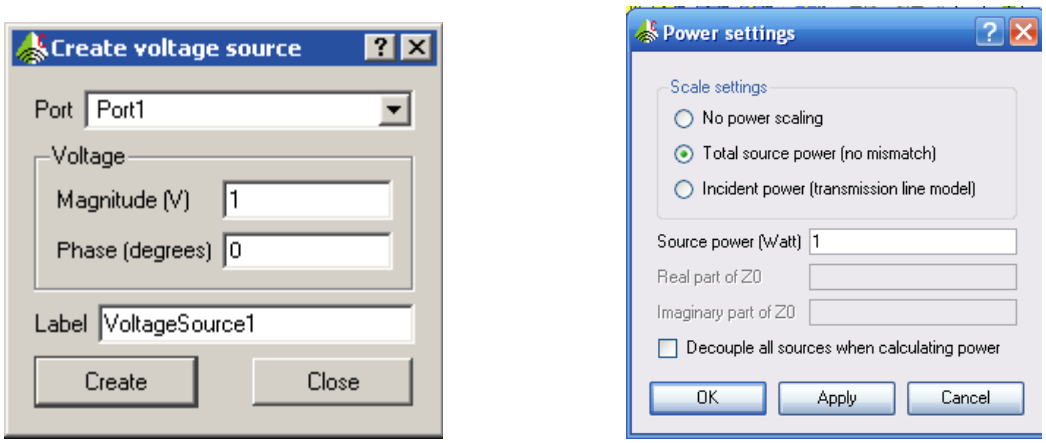


Рис. 5.12. Создание источника напряжения в порту и мощности его

Чтобы установить мощность излучения для модели, выделите порт и щелкните кнопку *Specify power settings* на инструментальной панели.

В этом случае мощность излучения должна быть 1 Ватт, так что сначала должны быть рассчитаны потери мощности в результате рассогласования с источником и вычитаться из мощности в 1 Ватт. Выберите опцию *Total source power (no mismatch)*. Введите мощность источника 1, и нажмите **OK**.

Создадим порт на втором проводе. К этому второму порту добавим нагрузку в виде активного сопротивления. Чтобы прибавить эту нагрузку, выберите кнопку *Add load* (букву **Z**) на инструментальной панели.

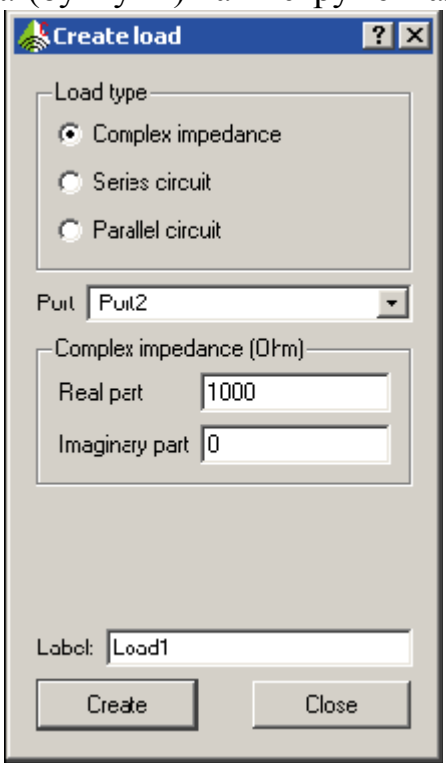


Рис. 5.13. Создание нагрузки 1000 Ом

Выберите Port2 в разделе Port (рис. 5.13) и установите реальную часть полного сопротивления, равной 1000 [Ом]. Нажмите *Create* и *Close*.

5.3. Установки на решение

Остается задать частотный диапазон анализа и рассчитываемые характеристики.

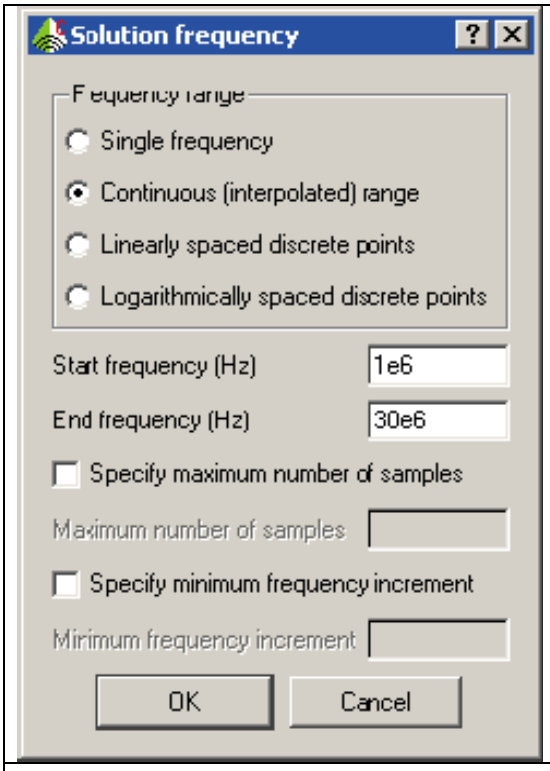


Рис. 5.14. Задание частотного диапазона анализа

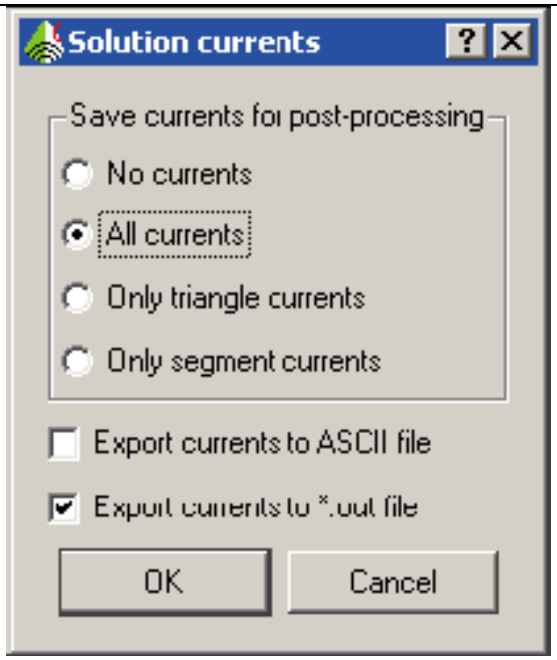


Рис. 5.15. Установка для расчета и вывода тока на всех токонесущих поверхностях

Чтобы установить частотный диапазон, кликните кнопку *Set frequency*. Используется частотные выборки, выбираемые для максимальной плавности (рис. 5.14). В этом случае FEKO автоматически устанавливает осуществление выборки частоты для оптимальной интерполяции. Выберите опцию *Continuous (interpolated) range*. Задайте частотный диапазон от 1MHz до 30MHz.

В качестве цели анализа выберем ток, протекающий через нагрузку. Нажмите на кнопку *Current output* для изменения установок выделения тока и выберите опцию *All currents* в этом диалоге.

5.4. Разбиения структуры на ячейки

Разбиение на ячейки устанавливается на основании параметров разбиения, которые вводятся в диалоге **Create mesh** (рис. 5.16).

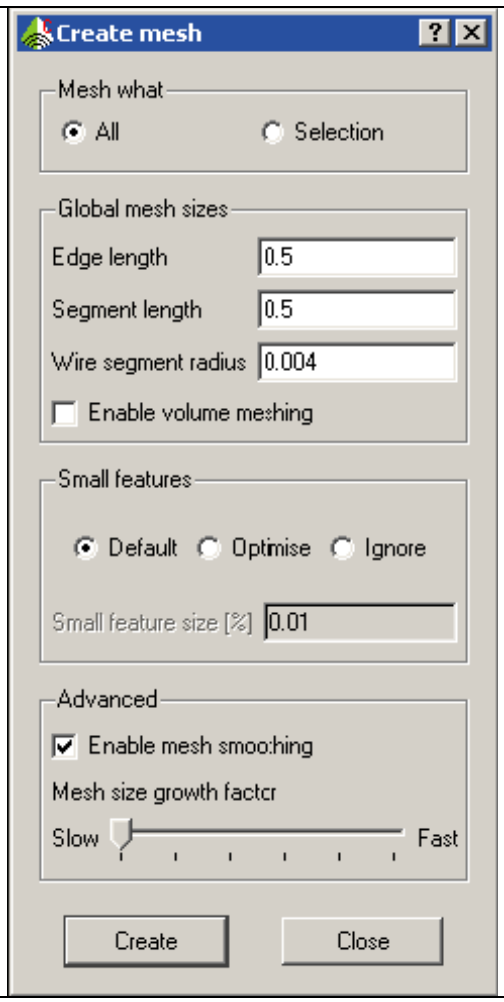


Рис. 5.16. Установка параметров разбиения на сетку

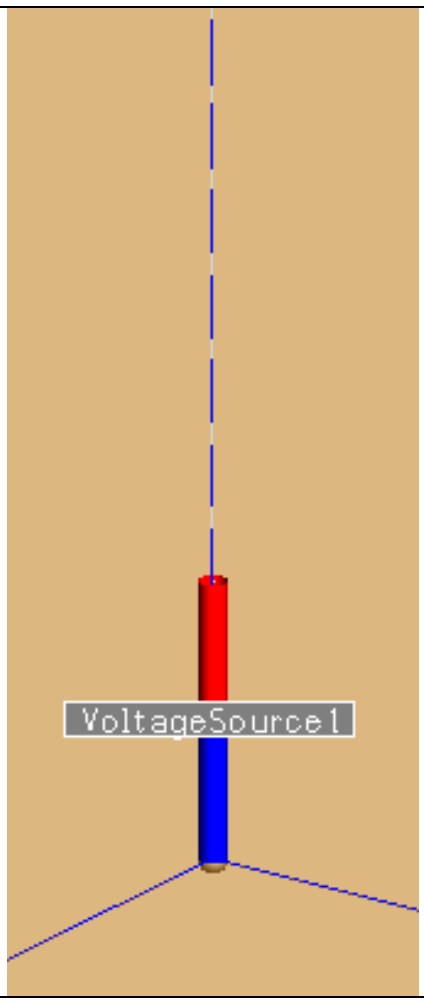


Рис. 5.17. Источник напряжения

Установим режим **All** и **Segment length= 0. 5** в разделе **Global mesh sizes.** Такая длина сегмента 0.5 м вполне подходит, с учетом, что самая высокая частота решения будет 30MHz - или длина волны 10 м. В данном случае модель весьма небольшая (12 метров, что соизмеримо с длиной волны), так что количество сегментов, или базовых функций, не будет создавать проблему для ресурсов компьютера.

Кроме того, радиус провода все еще намного меньший, чем длина сегмента. Радиус провода устанавливается как Wire segment radius = 0.004 м. (Радиус монопольной антенны был установлен локально, и локальные размеры записываются поверх глобальных)

После завершения подготовки модели, нужно запустить решающее устройство командой *Run → FEKO* из строки меню. Перед запуском на решение появится запрос о сохранении модели.

5.5. Запуск на решение

Откроется окно, показывая прогресс моделирования (рис. 5.18). Решающее устройство будет использовать 43 частотных точки в полосе частот.

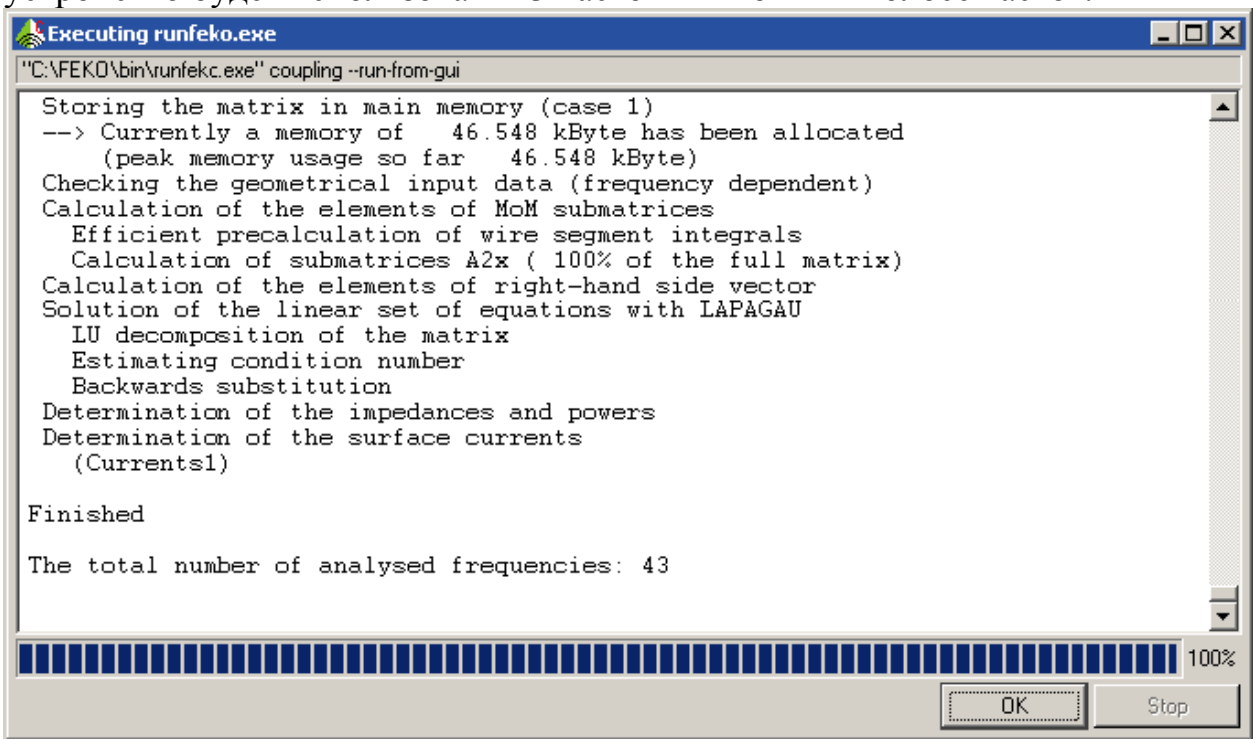


Рис. 5.18. Диалог сопровождения процесса расчета

5.6. Просмотр результатов расчета

Чтобы запустить программу постпроцессорной обработки POSTFEKO, выберите *Run → POSTFEKO* из меню CADFEKO или нажмите кнопку *Run POSTFEKO*. Откройте POSTFEKO с трехмерной моделью для всех операций постпроцессорной обработки, включая вывод частотной характеристики рассогласования (рис. 5.19), нанесение токов на частотах, которые используются в проекте.

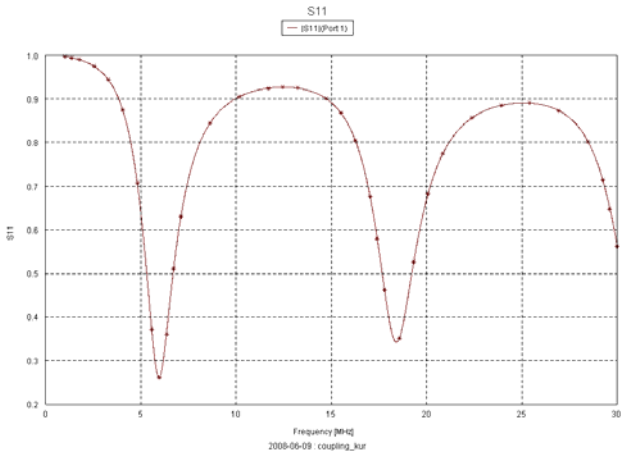


Рис. 5.19. Частотная характеристика антенны

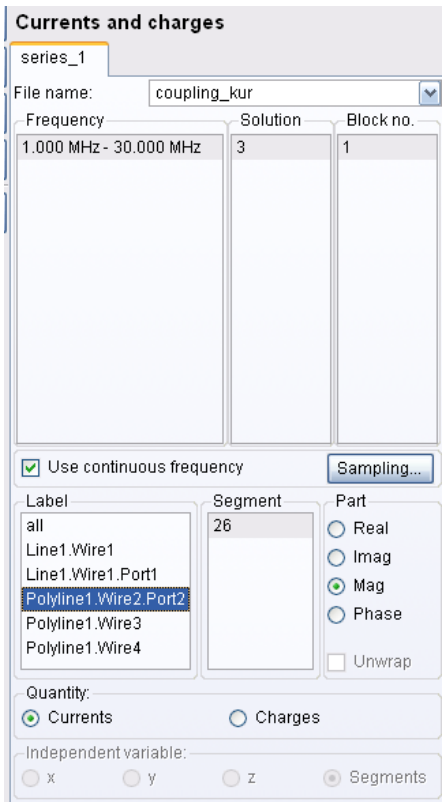


Рис. 5.20. Установка выводимых параметров тока на сегменте 26 проводного порта

Выберем команду **View -> Add a 2D Graph -> Currents and charges**. На панели конфигурации слева, нужно выбрать режим **Use continuous frequency**.

Выберите сегмент линии связи *Polyline.Wire2.Port2* в разделе Label (рис. 5.19). Это значит, что мы хотим вывести на график ток через второй порт в диапазоне частот.

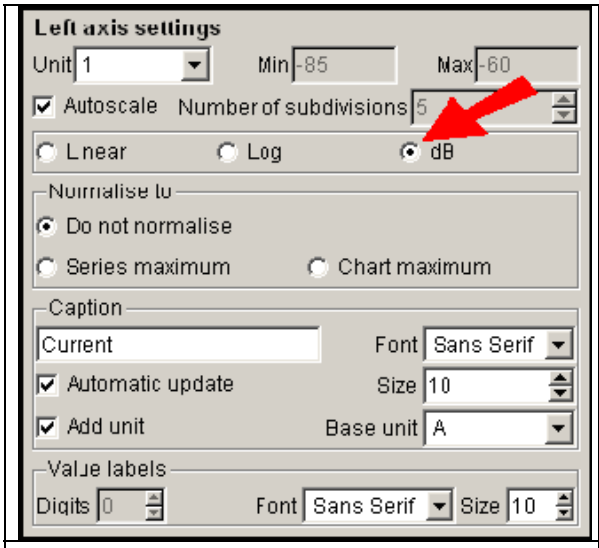


Рис. 5.21. Установка параметров тока, выводимого на график

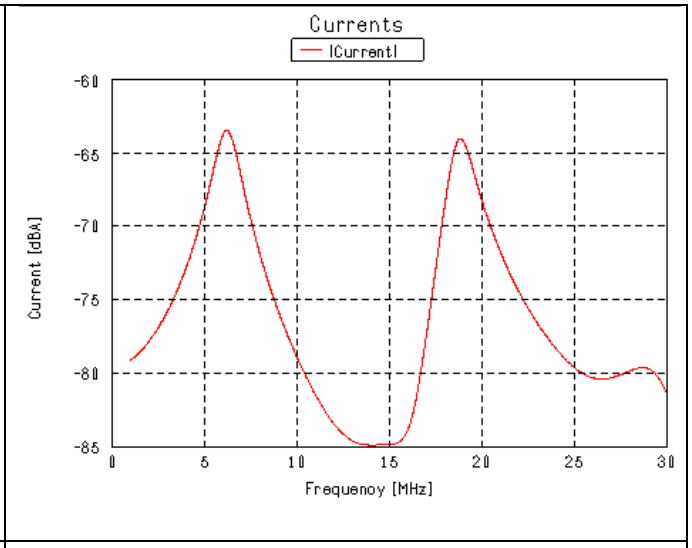


Рис. 5.22. Частотное распределение тока в нагрузке

Ток по горизонтальной линии течет маленький, поэтому переведем его в дБ. Выберите кнопку *Left axis,* чтобы открыть панель конфигурации для изменения установок оси (рис. 5.20). Измените размерность тока на dBA.

Далее выведем частотные характеристики входного импеданса вертикальной антенны (рис. 5.21).Для этого нажмем на кнопку **E**. И выберем кнопки **Impedance и Real**. Затем нужно добавить еще одну характеристику и выбрать кнопки **Impedance** и **Imag**.

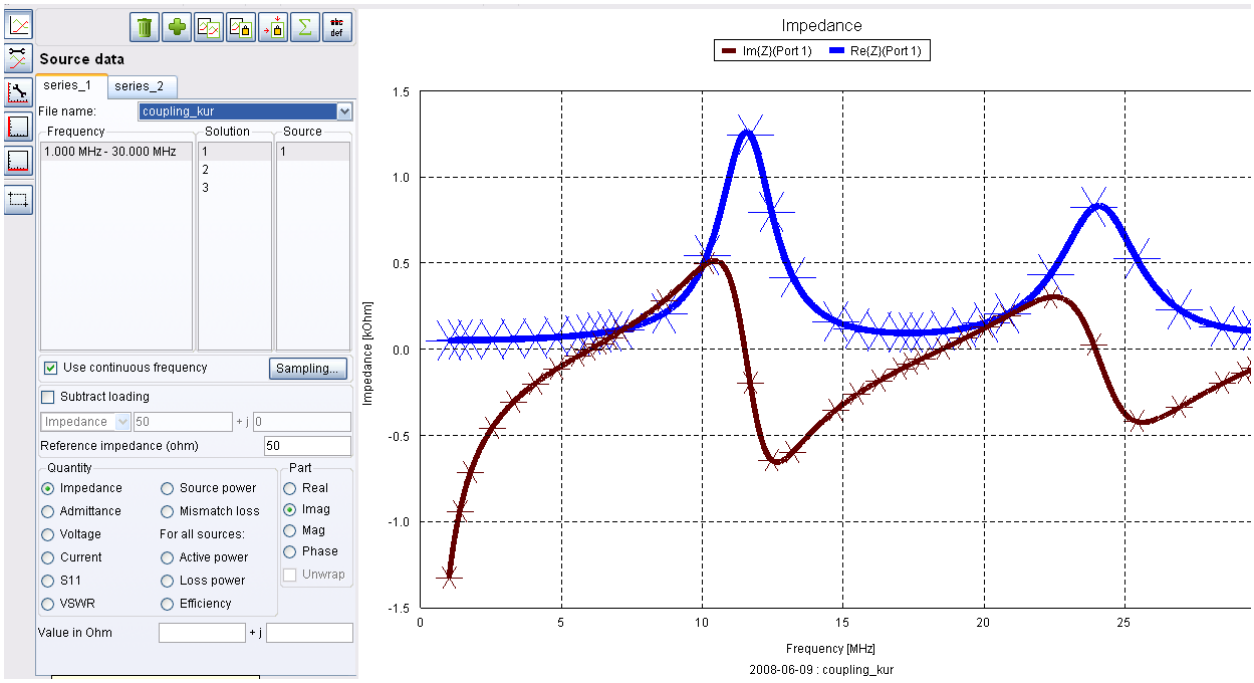


Рис. 5.23. Реальная и мнимая части входного импеданса порта 1

Этот пример показал установку и решение задачи электромагнитной совместимости, и расчет связи двух конструкций. Рассмотрена несимметричная антенна и линия передачи на бесконечной идеально проводящей земляной плате. Показана связь тока в линию передачи в диапазоне частот от 1MHz до 30MHz.

6. Анализ металлического резонатора с узкой щелью

В прямоугольном боксе из проводящего материала имеется щель, которая излучает. Внутри бокса находится порт, возбуждающий штырь, нагруженный с другого конца на 47 Ом. Необходимо добиться, чтобы бокс излучал через щель. Поскольку щель узкая, то для правильного решения, нужно вблизи щели выполнить плотное разбиение на сетку. В этом примере широко применяется понятия рабочей плоскости (РП).

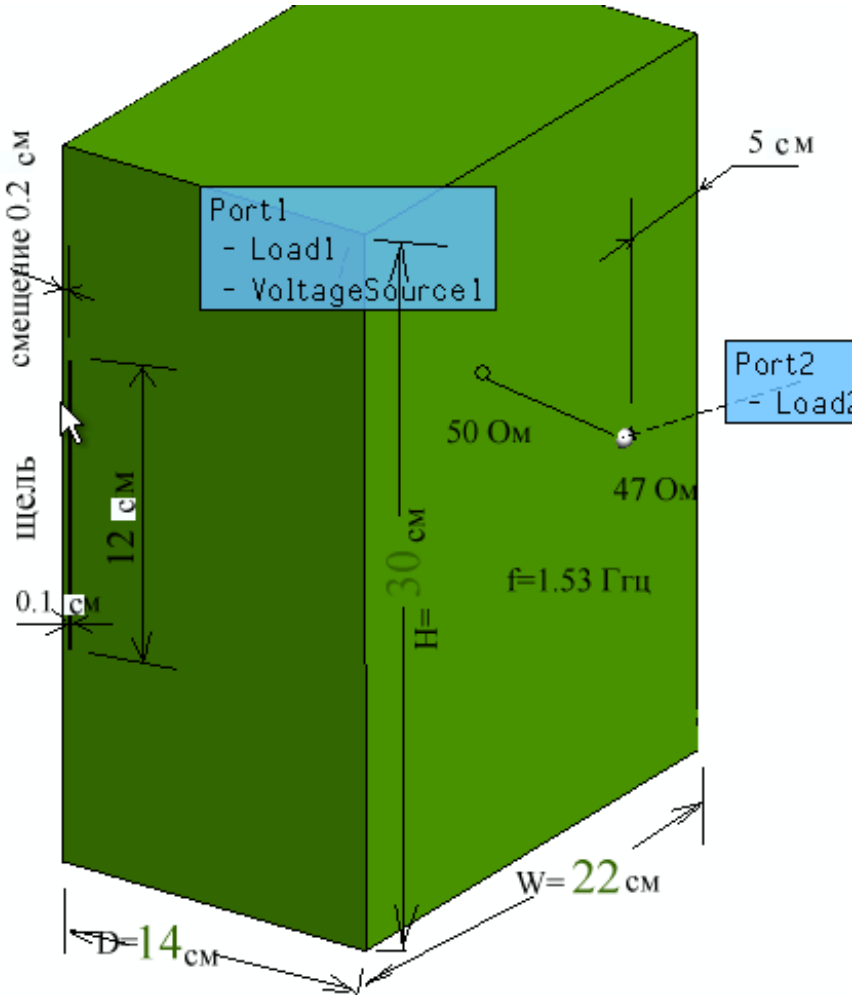


Рис. 6.1. Металлический бокс, размеры в см

В данном проекте необходимо найти поле внутри бокса, ближнее поле, излучаемое из щели, а также характеристики излучения: диаграмму направленности.

Устанавливаем единицы измерения – сантиметры (рис. 5.2).

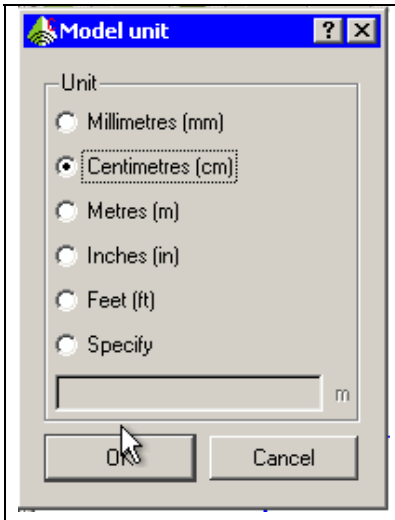


Рис. 6.2. Диалог выбора единиц измерения

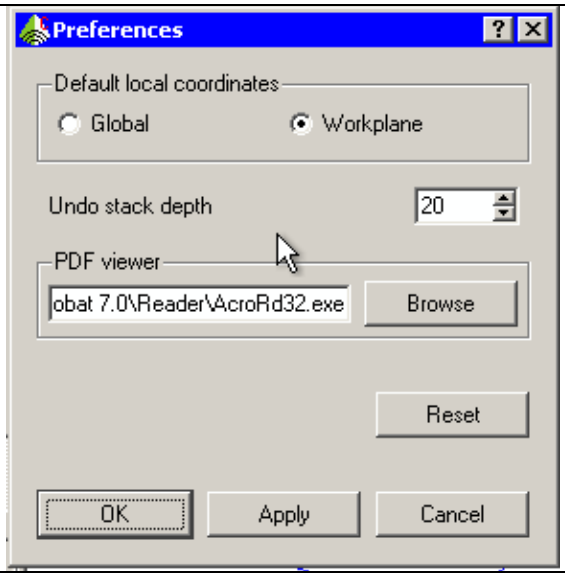


Рис. 6.3. Выбор системы координат

В диалоге Preference (рис. 6.3) выбираем локальные координаты по умолчанию – связанные с глобальными координатами (Global), или с рабочей плоскостью (Workplane).

Нажмите правой кнопкой мыши в окне CADFEKO и выберите команду Workplane

. Выберите команду **Edit**. Можно также нажать кнопку . При этом появится диалог рис. 6.4, в котором устанавливаются параметры рабочей плоскости.

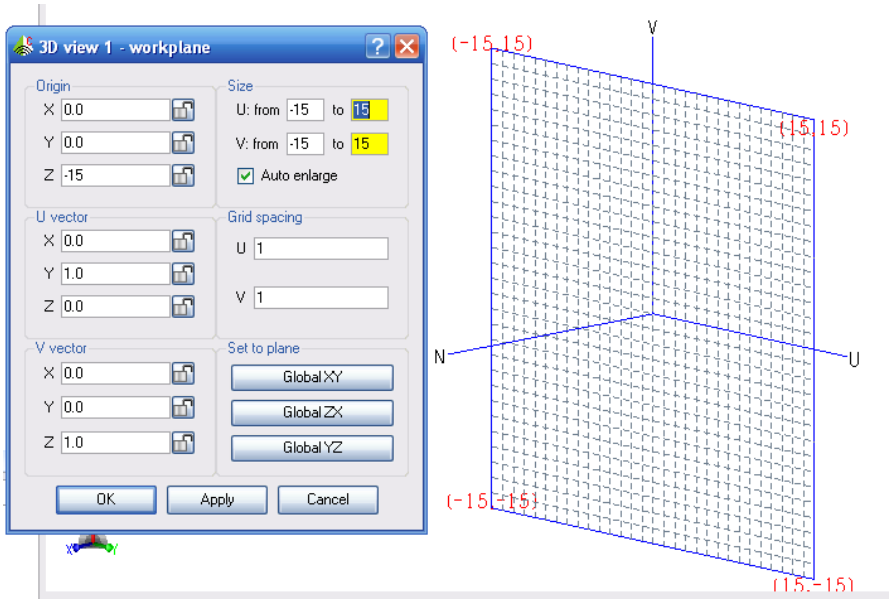


Рис. 6. 4.Свойства рабочей плоскости

В этом диалоге **3D view 1 -workplane** (рис. 6.4) задаются параметры рабочей плоскости в глобальных координатах. Эта рабочая плоскость (рис. 6.4) будет иметь размеры, простирающиеся от -15 см до 15 см по каждой из координат (потому что общий размер 30 см), а также начало координат, в системе x,y,z (0,0,-15).

Нажав на кнопку **Global XY** в диалоге рис. 6.4. мы согласуем рабочую плоскость (U,V,N) с плоскостью (X,Y,Z). Нажимая на другие кнопки, системы координат будут прокручены одна относительно другой.

Теперь начертим куб командой Cuboid с именем **box**. Это будет прямоугольный металлический резонатор. Куб будет создан в выбранной рабочей плоскости (U,V,N) (рис. 6.5).

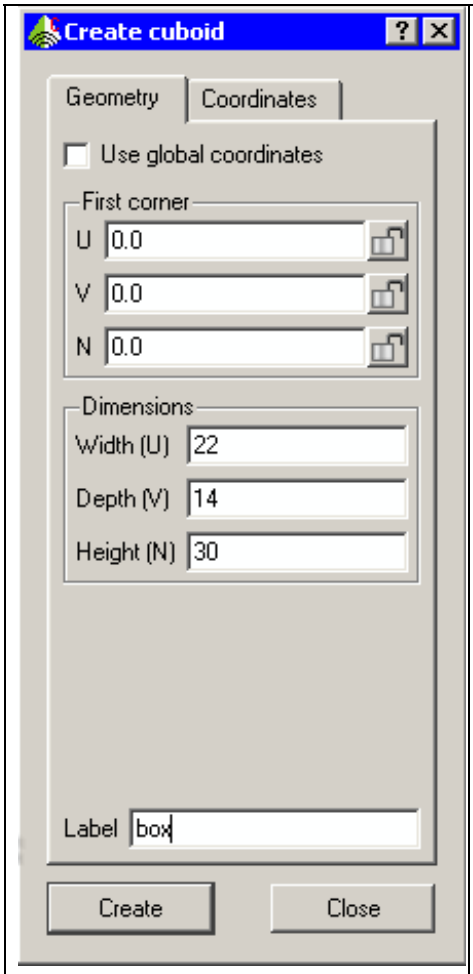


Рис. 6.5. Параметры параллелепипеда: координаты первой точки и размеры

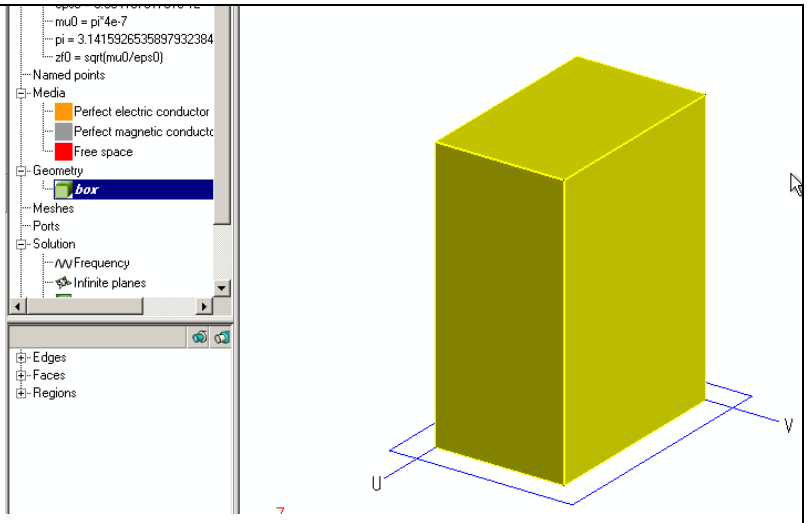


Рис. 6. 6. Вид созданного бокса с началом угла (0,0,0) в локальной системе координат.

После нажатия на кнопку Create в дереве проекта появится объект **box** (рис. 6.6), а в окне подробностей – вся информация относительно сторон, ребер, области заполнения.

Активизируем бокс в дереве проекта и выберем в окне подробностей **Region** (рис. 6.7) для задания материала заполнения металлического бокса.

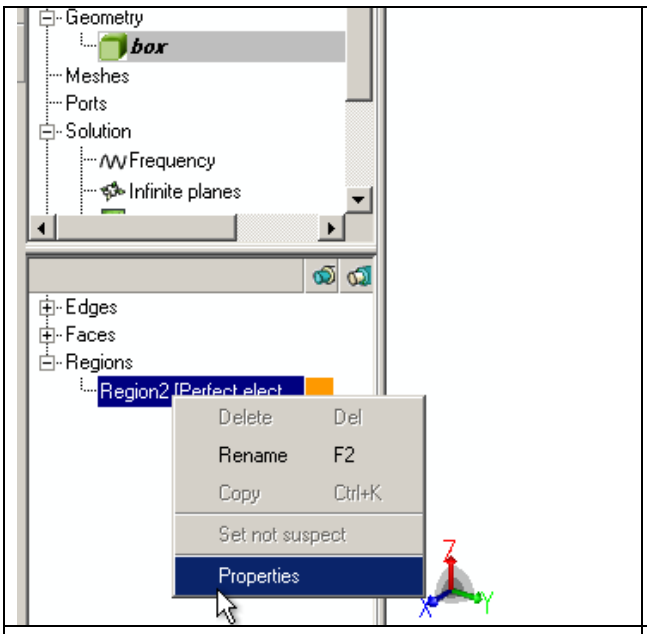


Рис. 6.7. Выделение свойств куба

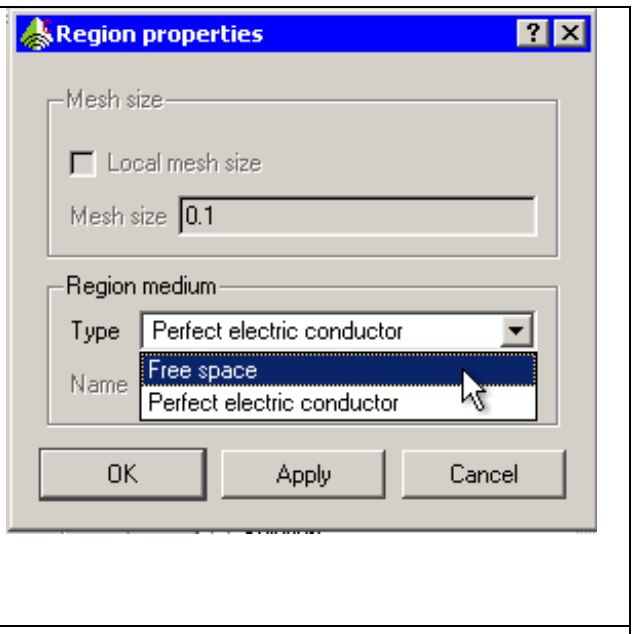


Рис. 6.8.Создаем заполнение параллелепипеда как свободное пространство

Заполним параллелепипед материалом, тип которого – свободное пространство (рис. 6.8).

Создадим переменные – длину и высоту щели (рис. 6.9), а также параметр смещения щели от ребра бокса (рис. 6.10).

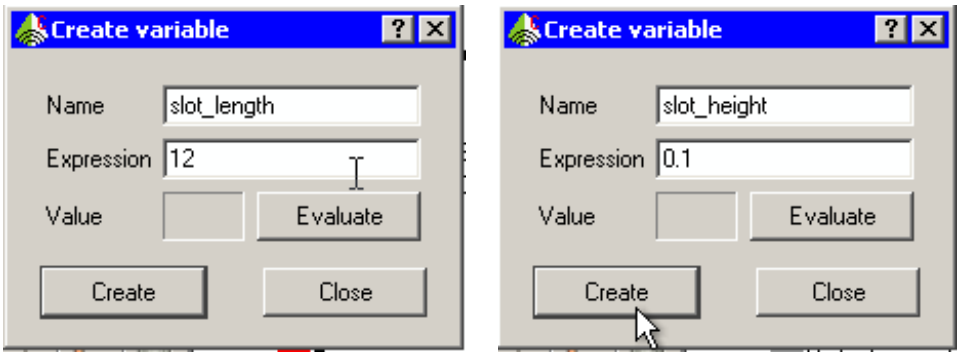


Рис. 6.9. Диалоги создания переменных проекта: длина и высота щели

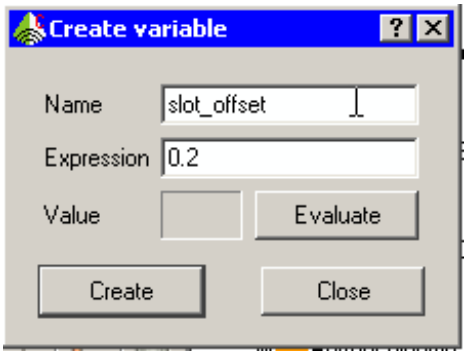


Рис. 6.10.Создание переменной смещение щели от ребра бокса

Теперь изменим параметры рабочей плоскости так, чтобы она совпала с будущей щелью. Затем нажмем на кнопку **Set to Workplane** и в диалоге рис.

6.11 внесем данные, которые задают опции рабочей системы координат относительно глобальной системы координат.

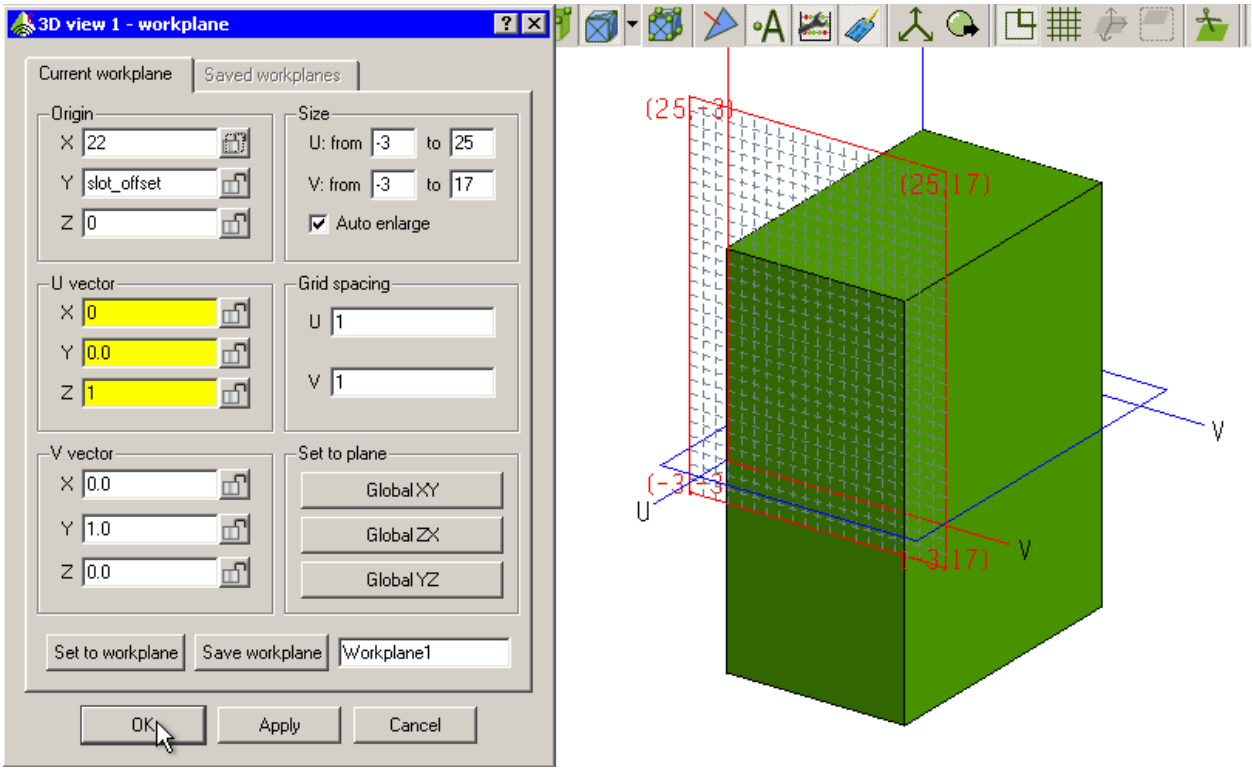


Рис. 6.11. Установка параметров рабочей системы координат

Можно изменять параметры в диалоге, и нажимать на **Apply**. Тогда рабочая плоскость согласуется с поверхностью бокса.

В FEKO имеется команда согласования рабочей системы координат и РП с геометрией (рис. 6.12).

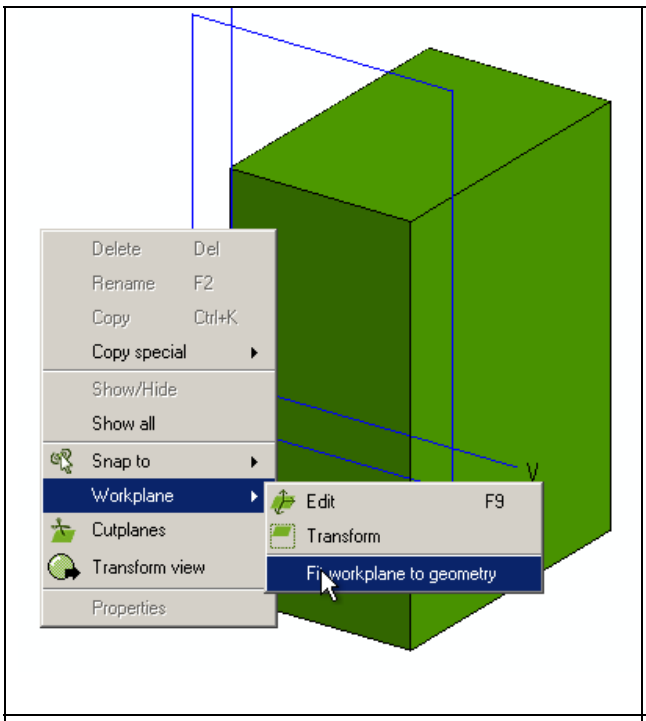


Рис. 6.12. Команда согласования рабочей плоскости с геометрией

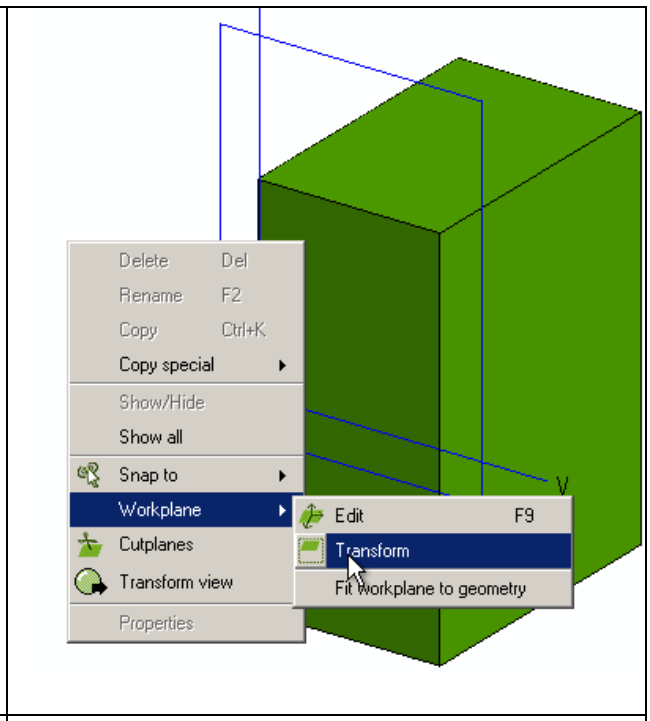


Рис. 6.13. Трансформация рабочей плоскости

В этой системе координат теперь начертим прямоугольник, задавая координаты в диалоге **Create polygon** (рис. 6.14), вызываемой по команде Create Polygon .

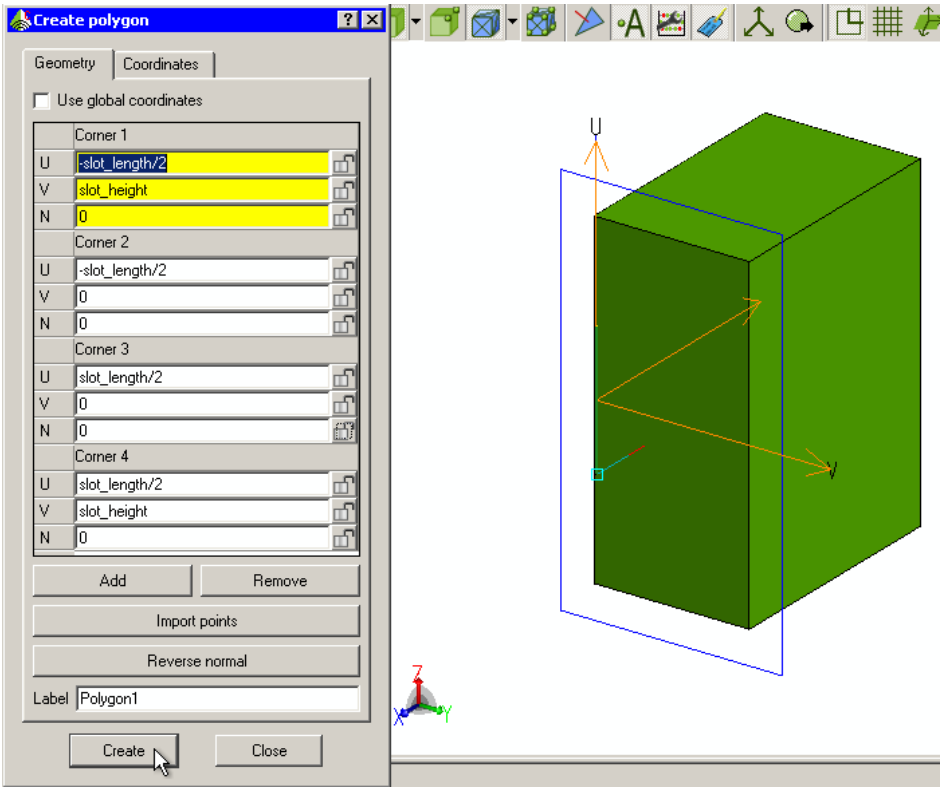


Рис. 6.14. Черчение щели на рабочей плоскости прямоугольник

Этот прямоугольник будет щелью на поверхности бокса. Зададим ему имя **slot** и параметры, показанные на рис. 6.14. Чтобы вырезать эту щель из бокса, выделим объект щели **slot** в дереве проекта и нажмем кнопку вычитания **Substrate**.

По запросу активизируем бокс. В результате выполняется вычитание щели из бокса (рис. 6.15).

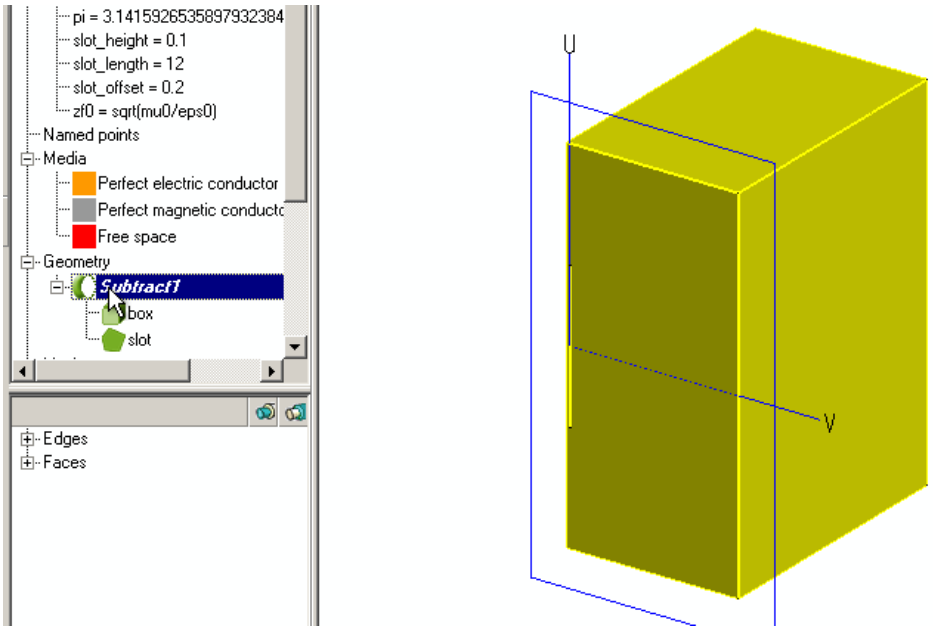


Рис. 6.15. Операция вычитания из бокса box щели slot

Переименуем этот объект как **Box_Slot** в дереве проекта и изменим значения переменных для смещения и ширины щели, чтобы более явно просмотреть щель (рис. 6.17).

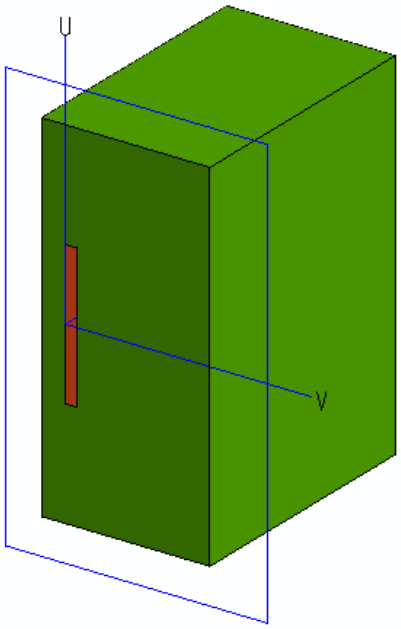


Рис. 6.17.Просмотр щели на поверхности металлического бокса

Команда **Undo** возвращает параметры щели в прежние значения. Чтобы увидеть пространство внутри куба, при черчении линии возбуждения, выполним разрезание бокса командой **Cutplane** (рис. 6.18).

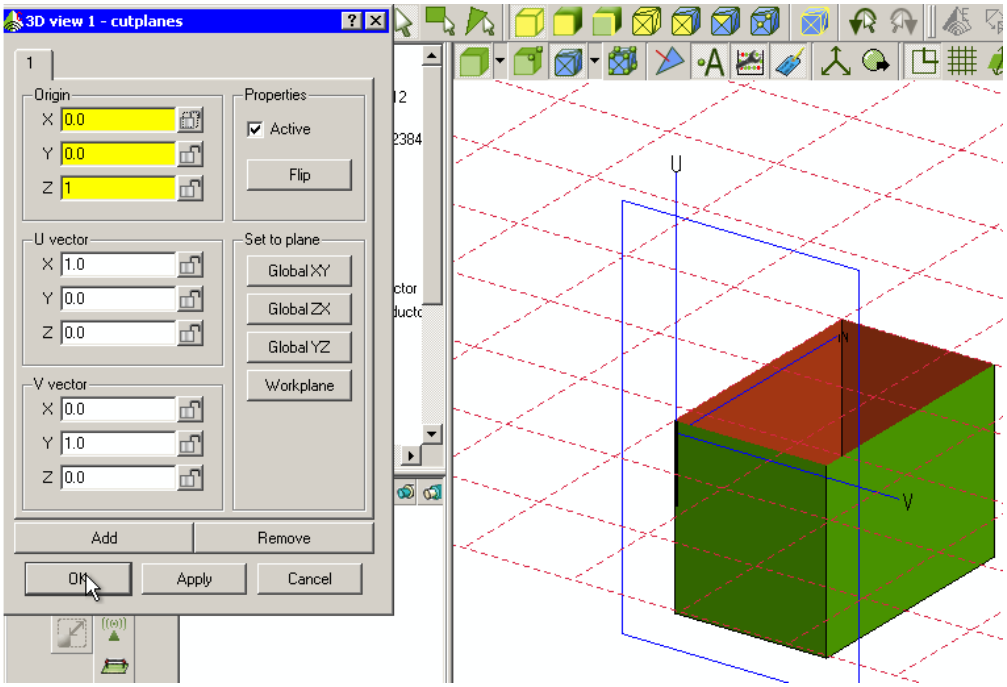
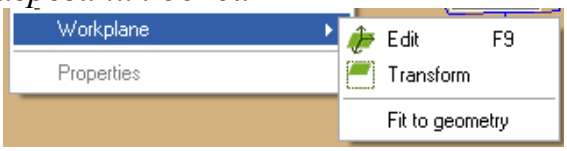


Рис. 6.18. Команда разрезания бокса



Нажмем правой кнопкой мыши кнопку **Edit** (Редактирование рабочей плоскости).

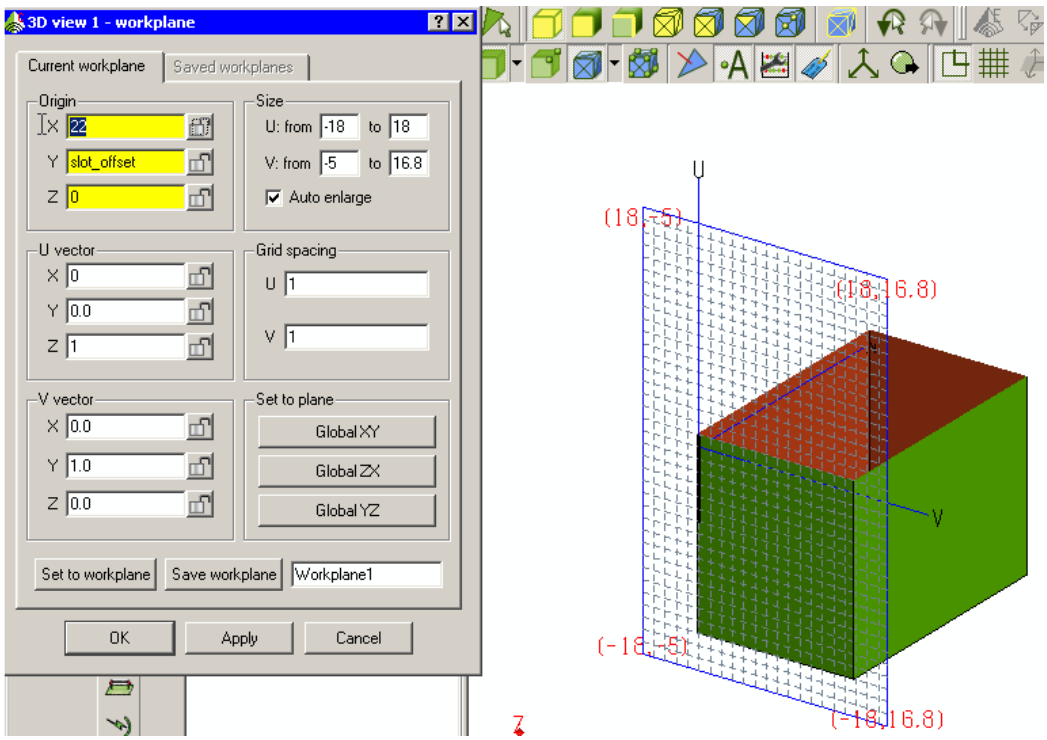


Рис. 6.19. Внесение в качестве начала рабочей плоскости смещение щели от стороны на 0.2 мм

Задача состоит в том, чтобы совместить РП с передней стороной бокса так, чтобы в этой системе координат удобнее было начертить узкую щель. После внесения по оси Y смещения, равного переменной slot_offset, начало координат РП приобретет нужное положение.

После черчения в этой системе координат прямоугольника-щели, сдвинем её так, чтобы в ней чертить линию, которая будет показывать места порта и нагрузки.

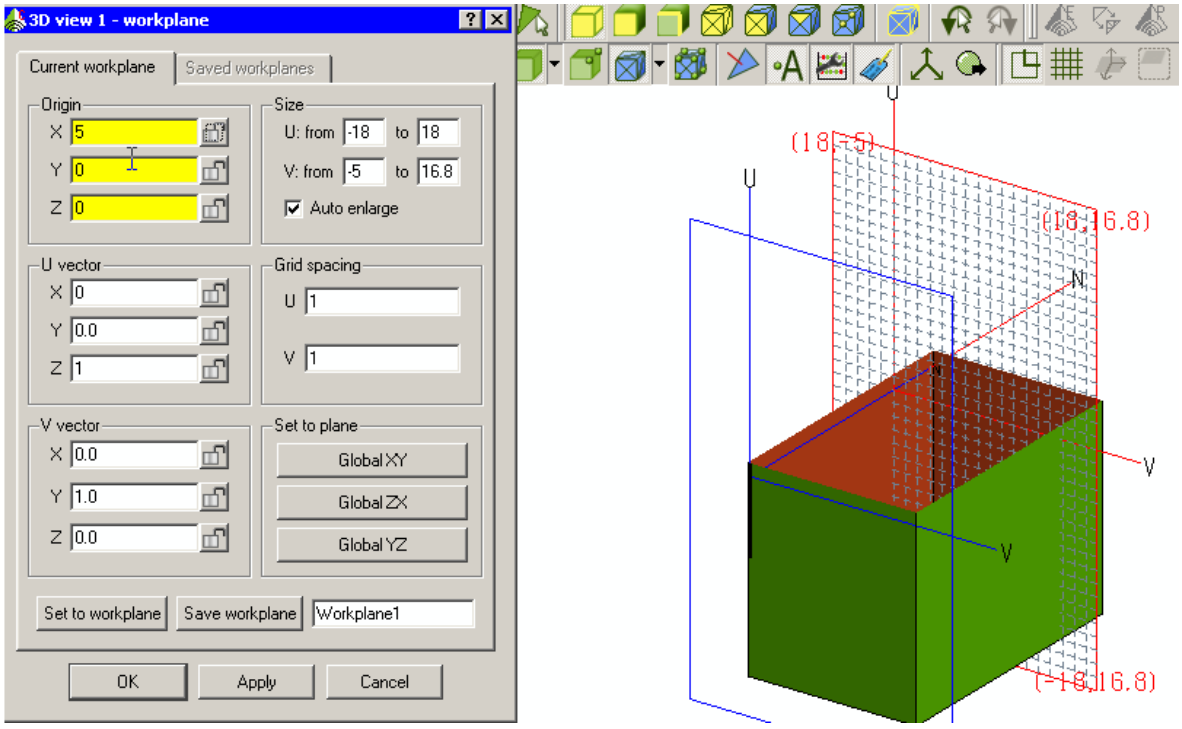


Рис. 6.20. Передвижение рабочей плоскости, в которой будет чертиться второй порт.

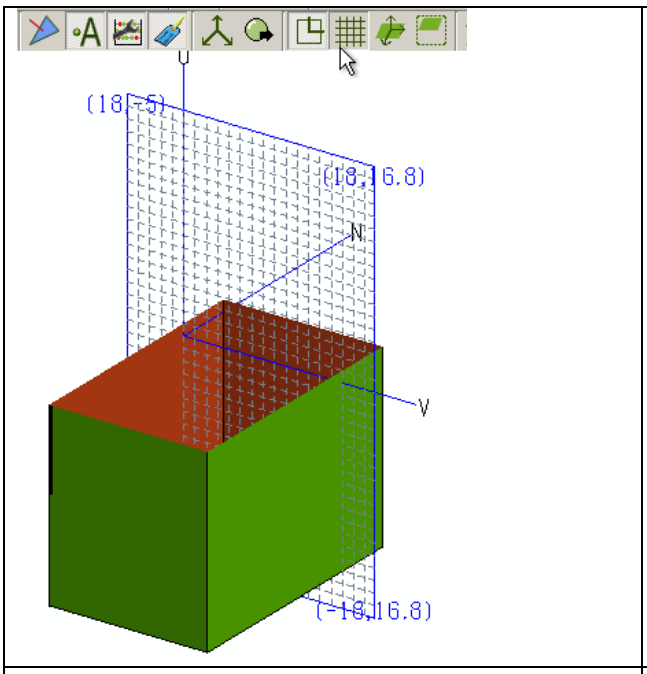


Рис. 6.21. Раскрытый бокс с рабочей плоскостью

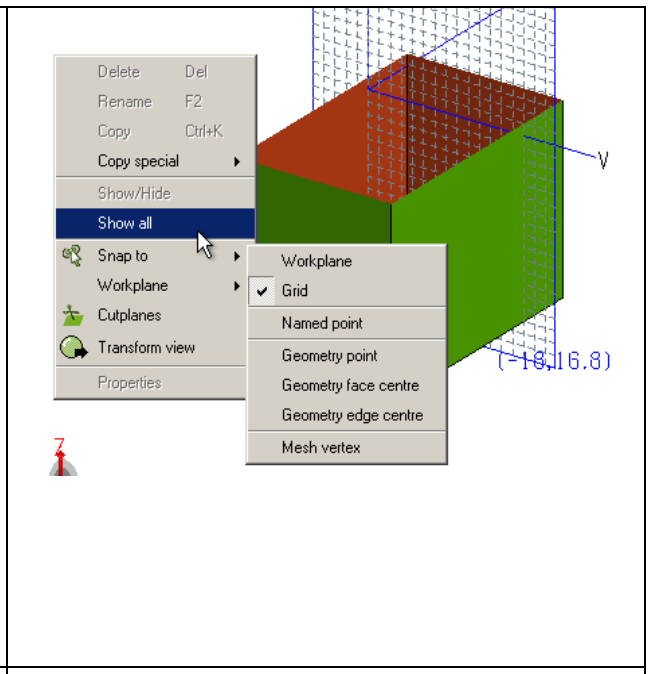


Рис. 6.22. Включение и выключение опции показа сетки

Линию, на которой будет назначен второй порт, создадим командой Line. Теперь в диалоге, согласованной с положением линии, можно внести только 0 и 14, показывающую начальную и конечную точку линии (рис. 6.23).

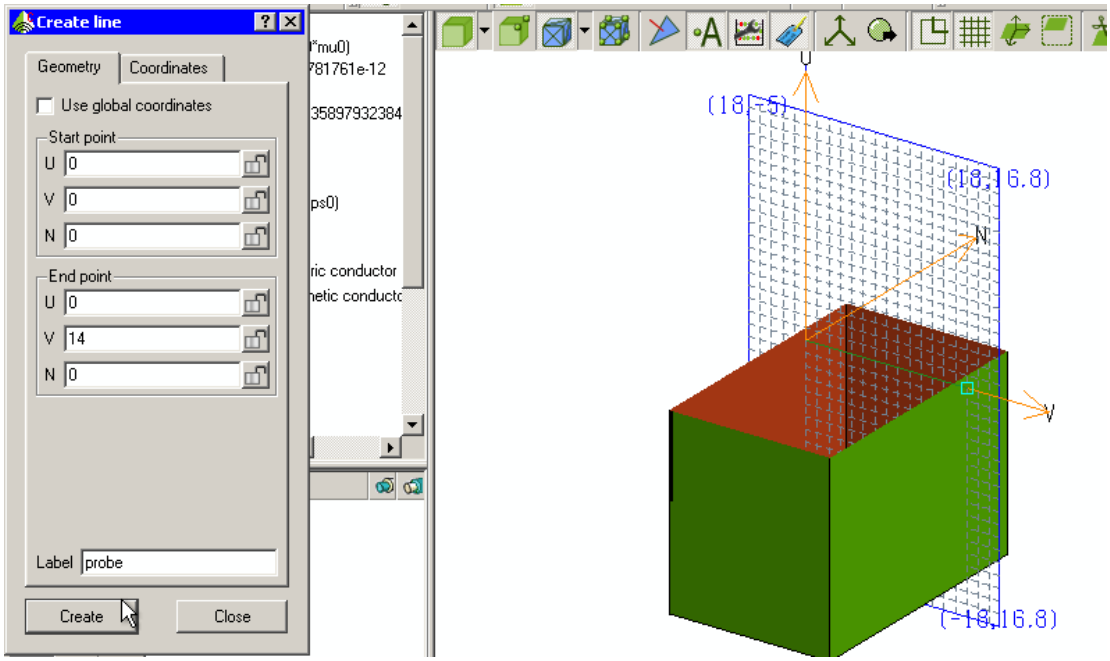


Рис. 6.23.Диалог черчения линии, по которой пойдет порт

Полученный линию-пробник объединим с боксом командой Unite (рис. 6.24)

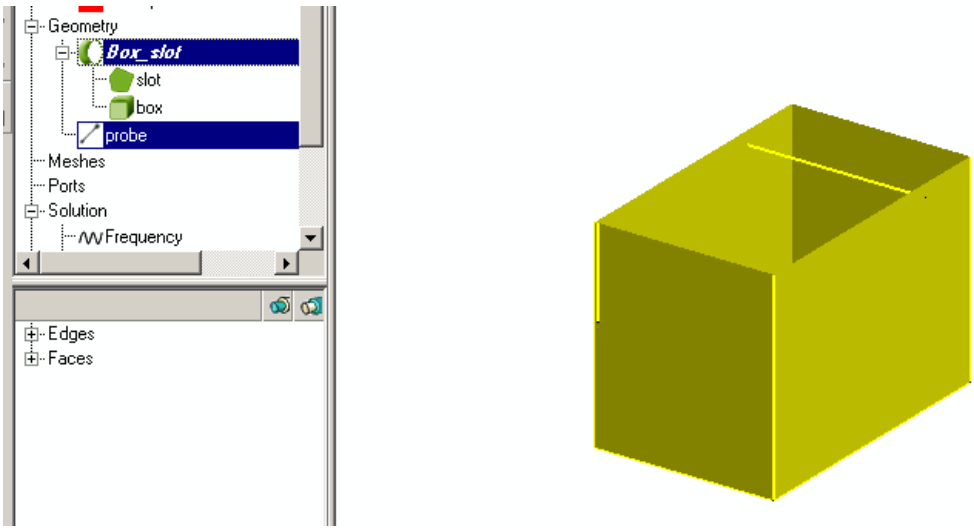


Рис. 6.24. Линия порта между сторонами резонатора

Назовем новый бокс со щелью **Probe_ Box_Slot.** Создадим переменную **freq** командой **Model -> Add variables.** Эта частота будет равна 1.53 ГГц.

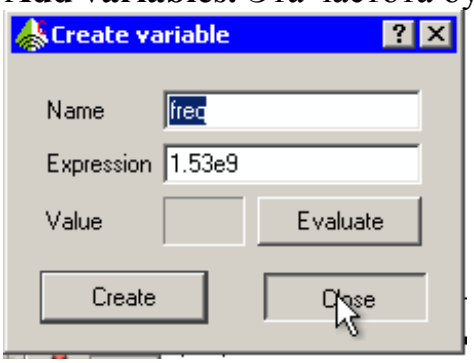


Рис. 6.25. Диалог задания переменной – частота расчета

Внесем эту переменную в диалог рис. 6.26.

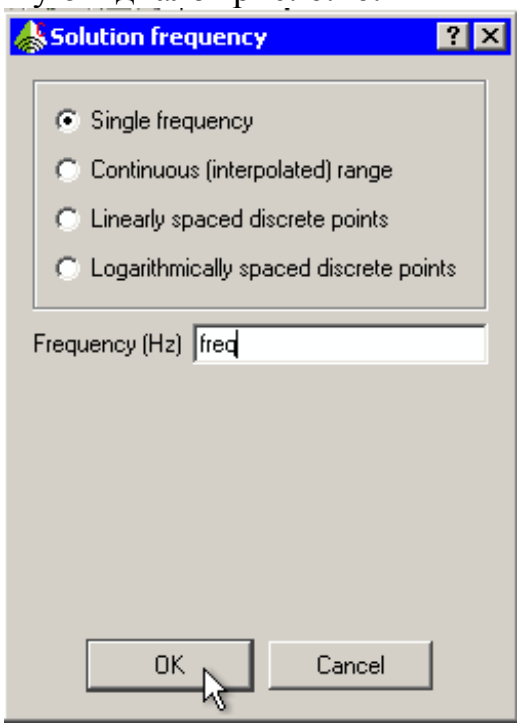


Рис. 6.26.Задание частоты расчета

На созданном проводнике зададим проволочный порт (рис. 6.27).

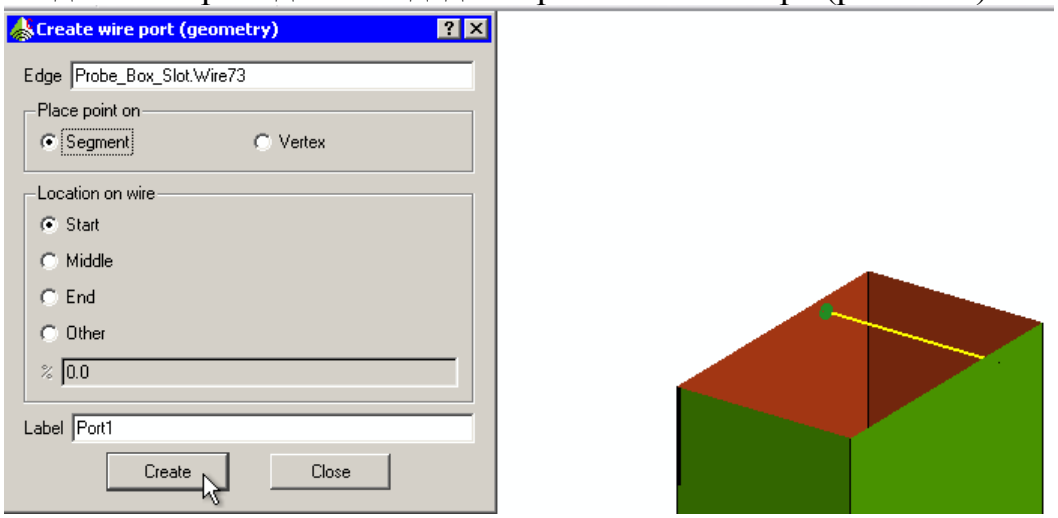


Рис. 6.27. Задание проволочного порта

На порт 1 поставим источник напряжения. При этом выберем опцию Start, чтобы установить порт на начальном сегменте проводника. Далее зададим источник напряжения и параметры этого источника в диалоге рис. 6.28.

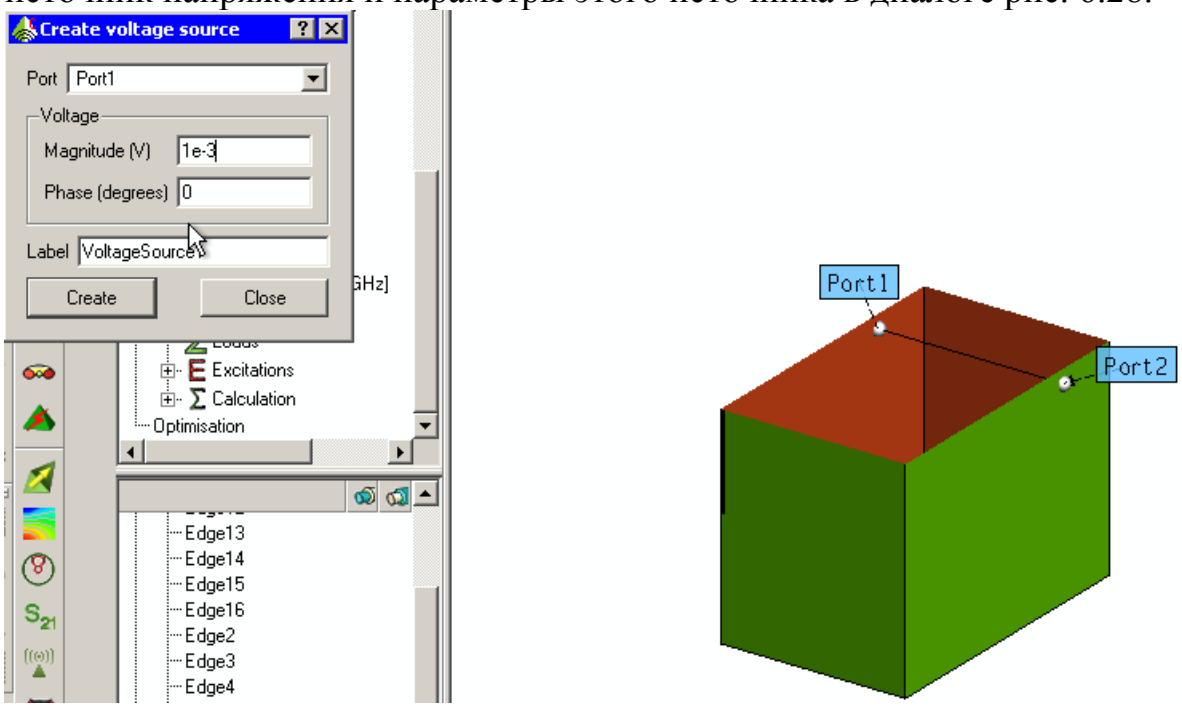


Рис. 6.28. Задание источника напряжения на проволочный порт

В конечный сегмент провода поставим порт Port2, на который установим нагрузку 47 Ом (рис. 6.29).

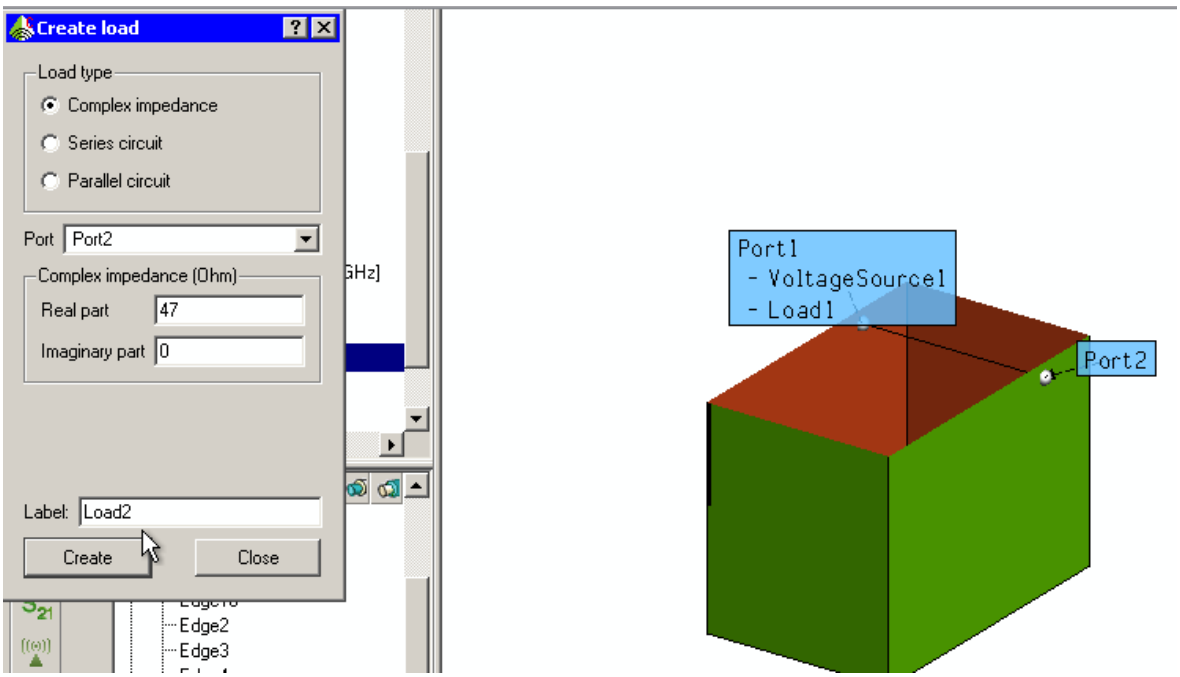


Рис. 6.29. Задание нагрузки 47 Ом с другой стороны провода между сторонами резонатора

Задание на расчет

Ближнее поле на сфере вокруг резонатора со щелью зададим командой **Solution -> Request Near Field.** Появляется диалог рис. 6.30. В закладке Position этого диалога устанавливаем координаты и параметры полусферы, в точках на которой будут рассчитываться значения ближнего поля.

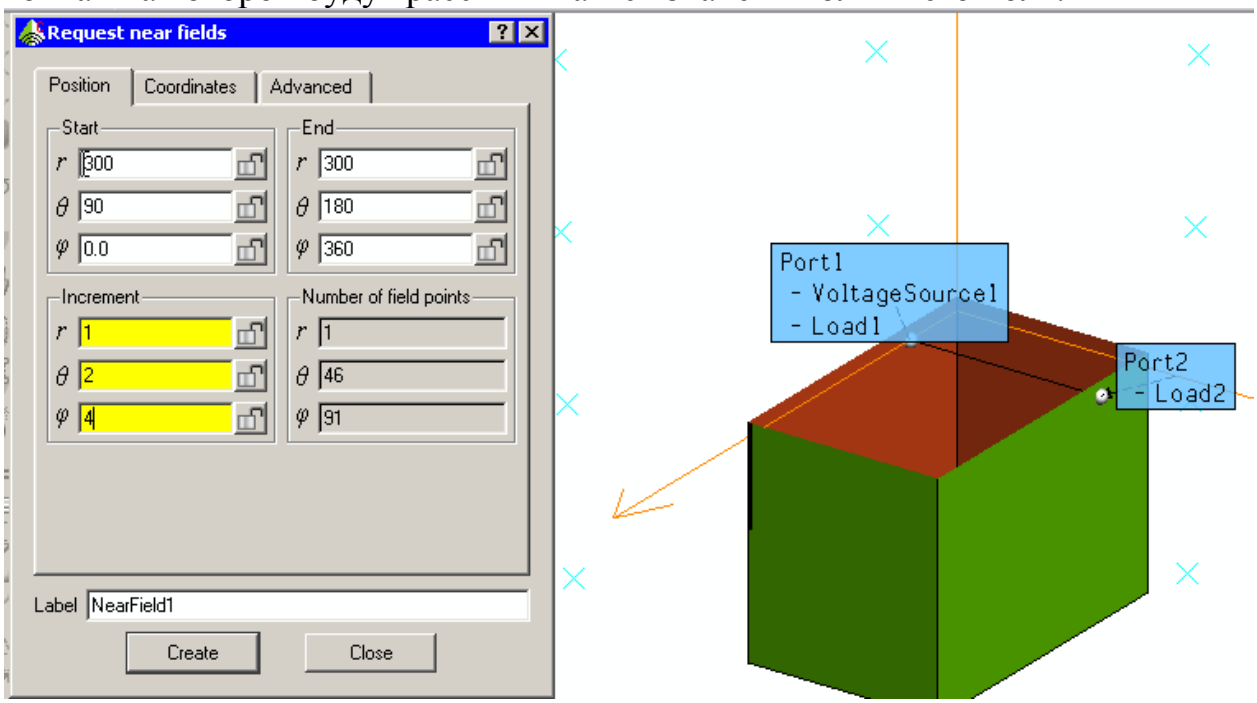


Рис. 6.30. Диалог задания ближнего поля

Чтобы удалить эту полусферу из просмотра, можно использовать команду Show/Hide (рис. 6.31).

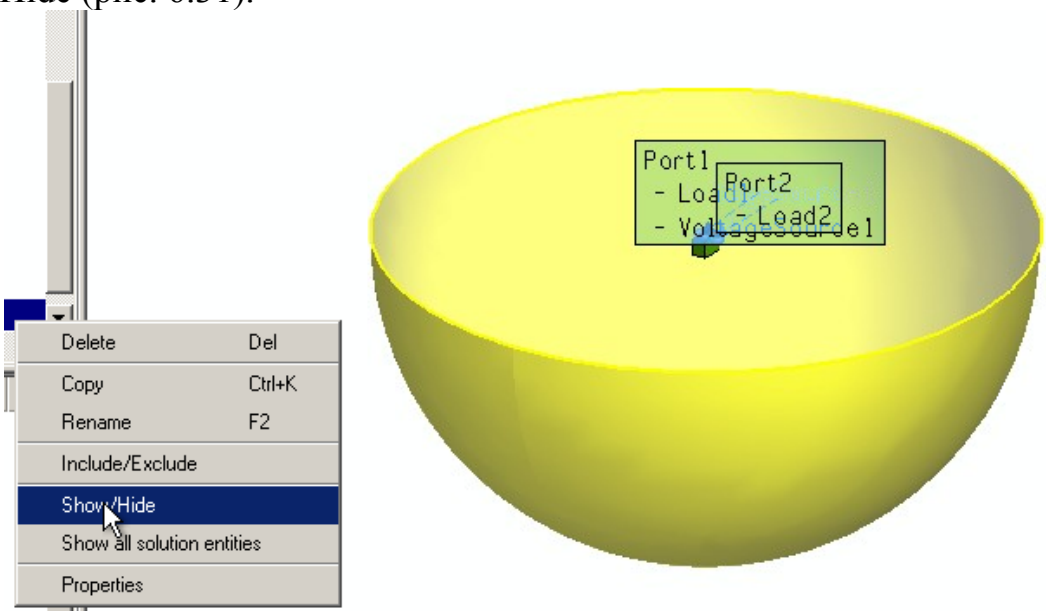


Рис. 6.31. Удаление полусферы из просмотра

После снятия видимости полусферы, на которой будет рассчитываться ближнее поле, нажмем кнопку согласования вида.

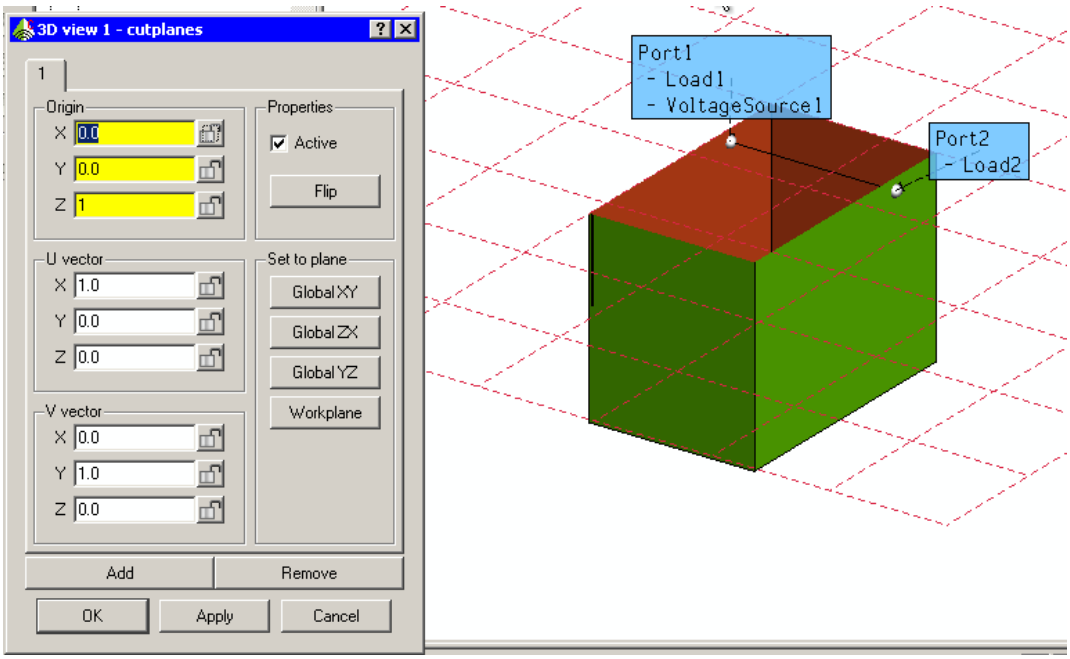


Рис. 6.32. Диалог плоскости сечения

Теперь, чтобы убрать плоскость сечения резонатора, снимем галочку Active в разделе Properties диалога 3W view (рис. 6.34).

Щель резонатора очень узкая, по сравнению с размером всего резонатора. В таких случаях нужно сделать более плотное разбиение на ячейки в области щели. Создадим переменные, которые будем использовать для разбиения

всей конструкции и конструкции вблизи щели. Параметр lam – длина волны (рис. 6.33), параметр tL1, минимальное значение из выражения tL0 и высота щели, служат для установки разбиения вдоль щели (рис. 6.34).

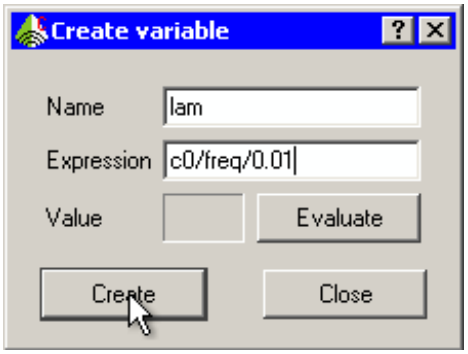


Рис. 6.33. Создание переменной параметра разбиения на сетку

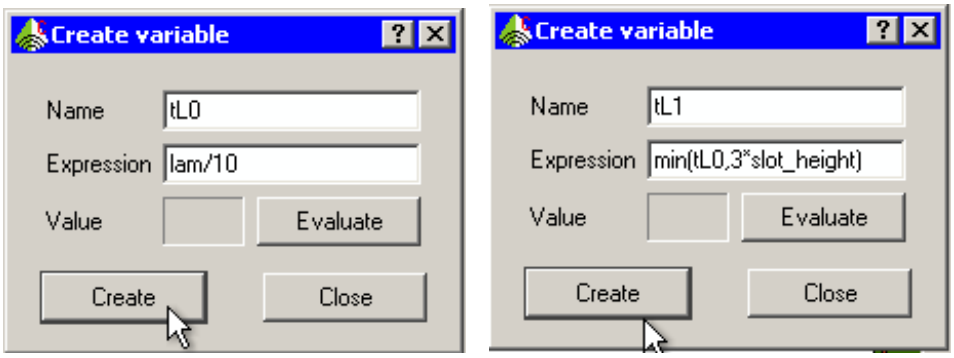


Рис. 6.34. Задание переменных для построения сетки разбиения

Чтобы установить размер ячейки на ребра, составляющие щели, выделим эти щели (рис. 6.35) в дереве проекта, нажмем правой кнопкой мыши и в появившемся диалоге зададим на них свойства, как показано на рис. 6.35.

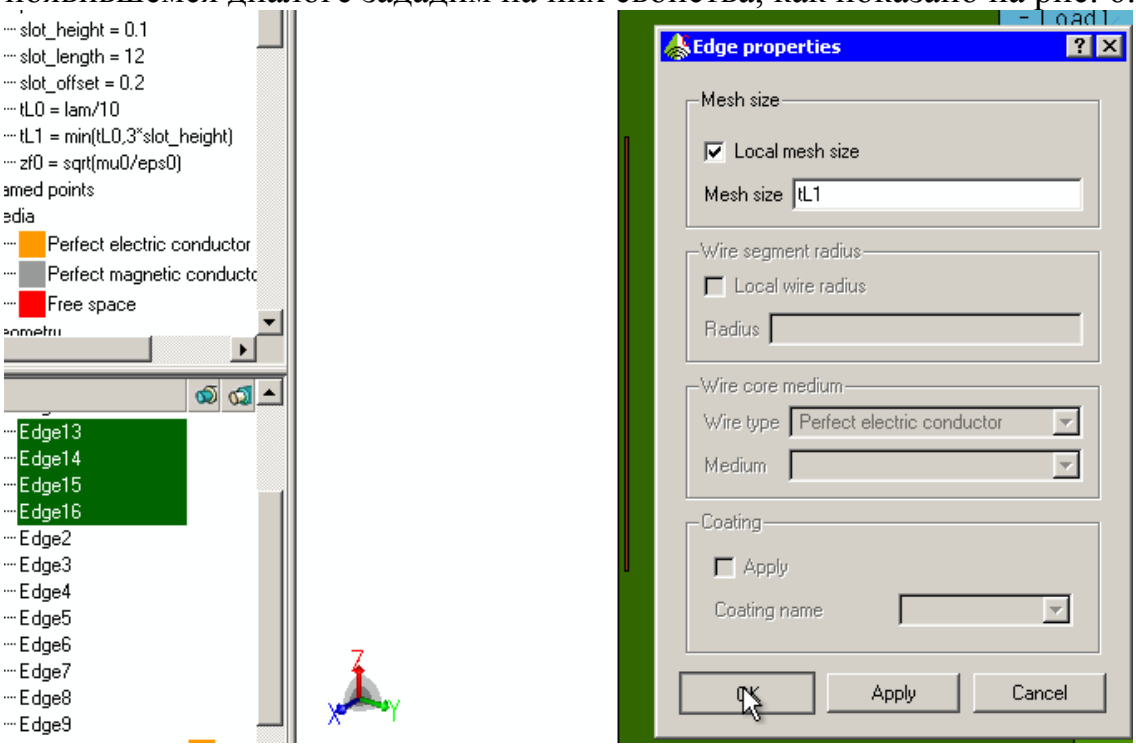


Рис. 6.35. Выделение ребер для задания на них более плотное разбиения на сетку

Создадим еще переменные, которые помогут управлять разбиением на ячейки. В окна можно вводить и выражения, как показано на рис. 6.36.

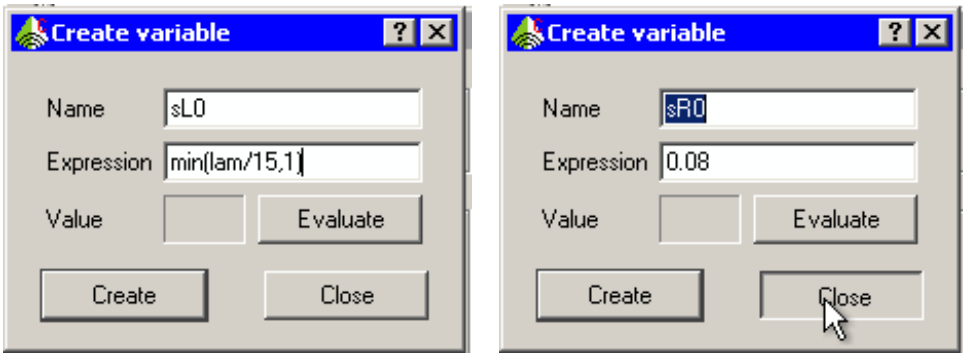


Рис. 6.36. Создание переменных для изменения плотности разбиения на ячейки вблизи щели

Эти переменные вносим в диалог Create mesh, который вызывается командой Solution -> Create Mesh (рис. 6.37).

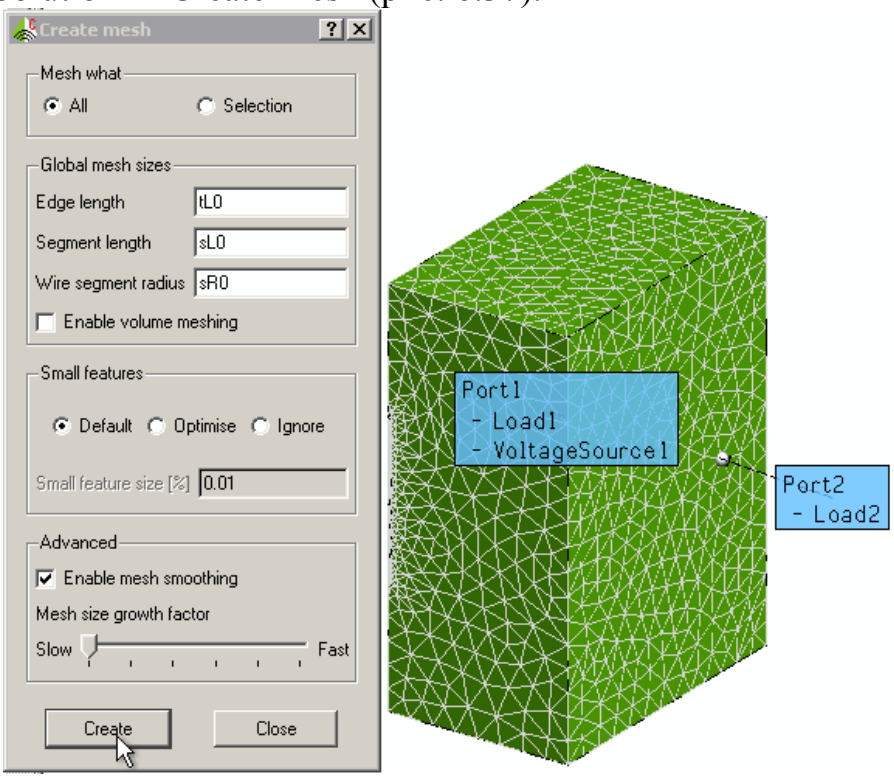


Рис. 6. 37.Результат разбиения на ячейки всего бокса

Теперь запустим на решение командой FEKO командой **Solve -> FEKO**. После выполнения расчета вызовем программу POSTFEKO командой **Solve -> PostFEKO**. В диалоге рис. 6.38 выведем ДН в трехмерном виде.

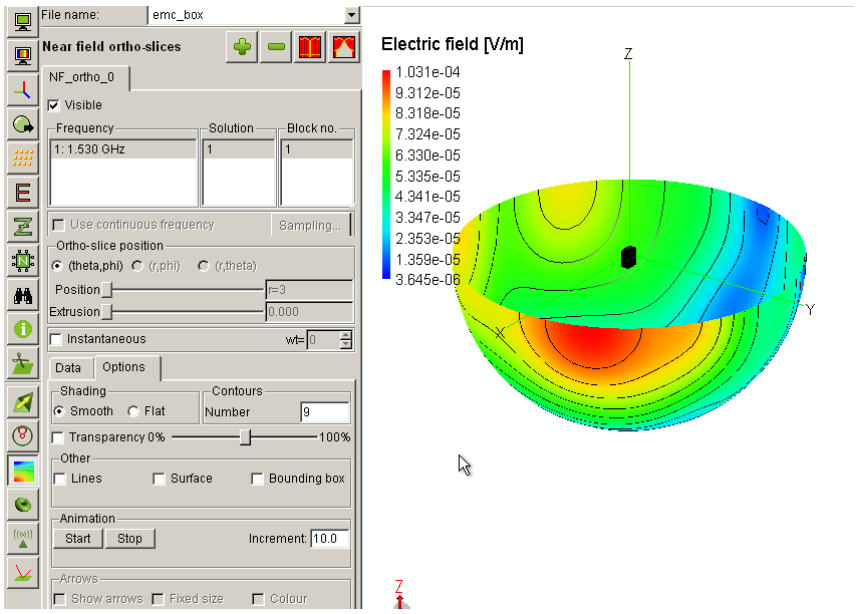


Рис. 6.38. Просмотр ближнего поля в виде линий равного поля

Не вызовет сложностей также задать и вывести характеристики дальнего поля и характеристики согласования порта. Итак, в этом примере сделан акцент на применение рабочей плоскости, неравномерного разбиения на сетку вблизи щели, а также широкое применение параметризации конструкции с помощью переменных.