Министерство образования
и науки Российской Федерации



Уральский
федеральный
университет
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

К.М. Зейде

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕНН В ALTAIR FEKO

Электронный образовательный текстовый ресурс

Методические материалы для лабораторных работ

Подготовлено департаментом радиоэлектроники и связи

Екатеринбург
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
1. ДВУХВИБРАТОРНАЯ АНТЕННА 5
2. РУПОРНАЯ АНТЕННА 18
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 34

ВВЕДЕНИЕ

Среда автоматизированного проектирования Altair FEKO предоставляет широкие возможности для электродинамического моделирования различных систем и устройств. Отличительной чертой данного программного обеспечения является мощное ядро трехмерного параметрического моделирования (solid modeling или modelling), позволяющее эффективно создавать топологии различной сложности, реализованное в простом и функциональном пользовательском интерфейсе.

Вычислительное ядро FEKO обеспечивает электродинамический анализ моделей всеми распространенными численными методами: метод моментов (method of moments – MoM), метод конечных элементов (finite elements method – FEM), метод конечных разностей по временной области (finite difference time domain method – FDTD), многоуровневый метод быстрых мультиполей (multi-level fast multipole method – MLFMM), метод геометрической оптики (geometry optics method – GO), метод физической оптики (physical optics method – PO), метод обобщенной теории дифракции (uniform theory of diffraction method – UTD). В рамках одной модели вычислительное ядро САПР позволяет применять гибридные методы расчета, такие как FEM/MoM + GO/PO, с настраиваемыми условиями сшивания решений. Отличительной особенностью реализованного в FEKO решателя методом моментов является возможность создания объемной сетки по принципу эквивалентности VEP (volume equivalence principle), что позволяет анализировать диэлектрические структуры более эффективно как с точки зрения скорости расчетов, так и с позиции затраченного времени и вычислительных ресурсов. Это объясняется тем, что метод моментов в САПР реализован в связке с методом быстрых мультиполей.

Архитектура программного обеспечения FEKO многомодульная. Это означает, что основные стадии моделирования – предпроцессинг и простпроцессинг – выполняются независимыми программными модулями CADFEKO и POSTFEKO соответственно. Более того, в комплекс FEKO входит

целый ряд других модулей, обеспечивающий специфический функционал. Подобная организация позволяет эффективно проводить распределенное моделирование в рамках программных продуктов Altair (обмен данными по стандартизированному протоколу STEP, реализованный в FEKO, позволяет также распределять задачи функционального цикла и между системами автоматизированного проектирования других разработчиков). FEKO является только одним из САПР, поддерживаемых Altair. В перечне доступных систем автоматизированного проектирования данного разработчика имеются и те, в которых реализован численный анализ процессов из других областей физики, например, гидродинамики, акустики, механики и др. Использование программных модулей в рамках одного проекта позволяет проводить полномасштабные мультифизические вычислительные эксперименты.

Данные материалы преследуют цель познакомить читателя с основными принципами автоматизированного проектирования в среде FEKO на примере двух самых распространенных в технике типов антенн: двухвибраторной антенны и рупорной антенны. Каждый раздел настоящих указаний является независимой и законченной методической единицей, поэтому вначале дается краткое описание пользовательского интерфейса и основных элементов управления (одинаковое для всех разделов). Причина такого подхода заключается в желании автора сделать работу с данными указаниями максимально удобной и эффективной. Особенно это важно при проведении лабораторных работ, при котором время студента и преподавателя естественным образом ограничено.

1. ДВУХВИБРАТОРНАЯ АНТЕННА

В данном разделе подробно описывается алгоритм работы пользователя с САПР для реализации расчетной модели двухвибаторной антенны. На рис. 1.1 показано главное окно программы CADFEKO.

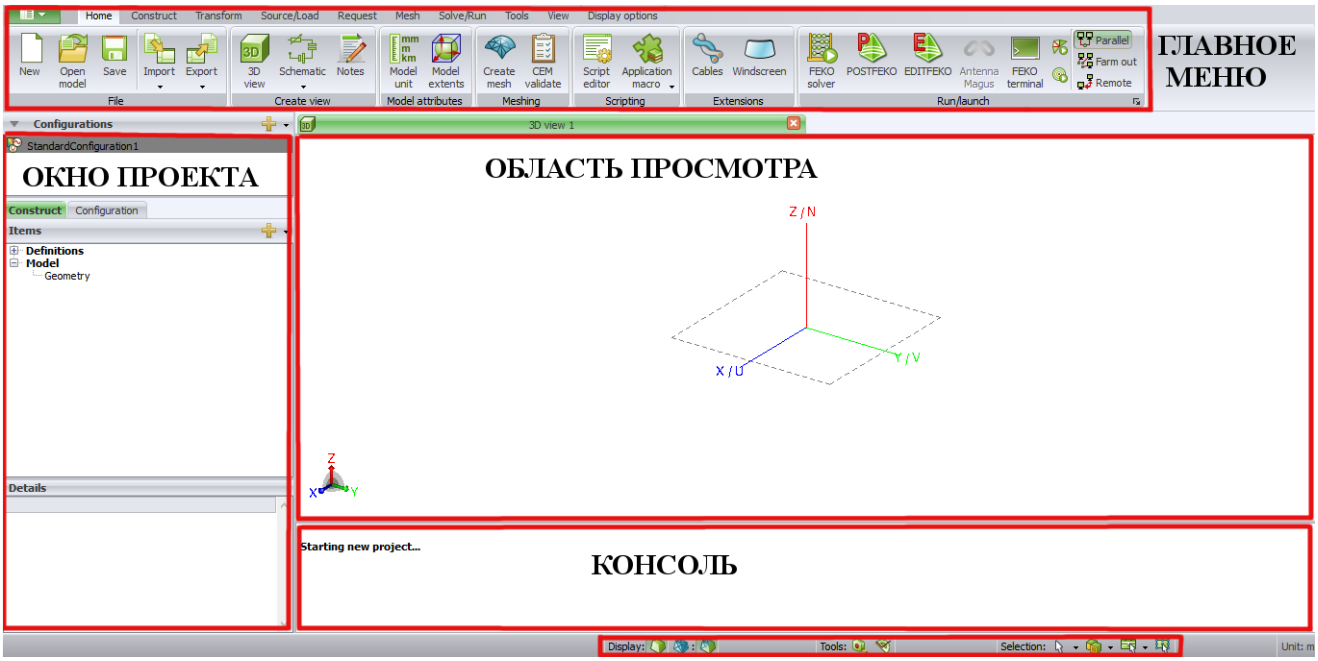


Рис. 1.1. Главное пользовательское окно CADFEKO

Прежде чем приступить к формированию геометрии, необходимо задать локальные переменные и единицы измерения, используемые в модели. Перейдите во вкладку ***Construct*** главного меню и выберите пункт ***Model Unit***, в открывшемся окне укажите единицу измерения, используемую в модели (***millimetres***) (рис. 1.2). В правом нижнем углу пользовательского окна значение ***Unit*** изменится на *mm*.

Далее в окне ***Add Variable*** в пункте ***Variable*** необходимо ввести переменные для удобной работы с моделью. Диалоговое окно ***Create variable*** имеет три строки ввода: *Name* – имя переменной, *Expression* – значение переменной, *Comment* – пояснение. В сложных проектах с большим количеством переменных или параметров для оптимизации рекомендуется указывать пояснения к каждой инициализированной в модели величине, чтобы в процессе исследования исключить путаницу в обозначениях. Клавиша ***Evaluate*** предназначена для проверки правильности задания переменной (в строке вывода

Value появляется значение величины в стандартном виде). Инициализируем переменную *wl* (wavelength – длина волны) со значением 250 мм. После нажатия на кнопку ***Create*** (клавиша ***Add*** служит для перехода к инициализации новой переменной без выхода из диалогового окна) в списке ***Definitions*** во вкладке ***Construct*** (в окне проекта) появится вновь созданная переменная. В этом списке уже присутствуют стандартные для электродинамических задач константы (скорость света в вакууме – *c0*, электрическая и магнитная постоянные – *eps0* и *mu0*, волновое сопротивление вакуума – *zf0*, число пи – *pi*).

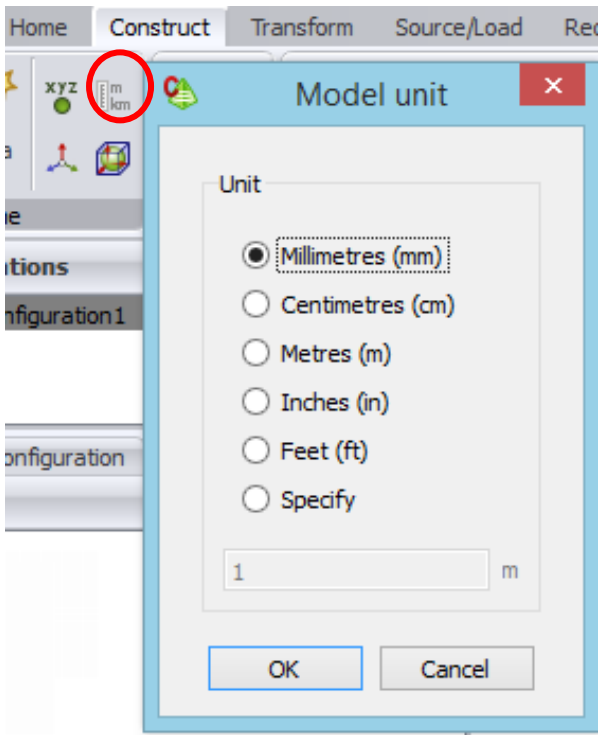


Рис. 1.2. Выбор единицы измерения

Построение исследуемой геометрии в САПР основывается на размещении в трехмерной системе координат (*XYZ*) базовых объектов (геометрических примитивов) и наборов определенных манипуляций над ними. Важно уметь правильно выбрать необходимые элементы построения и требуемый набор действий над ними в каждой отдельной системе. Так, например, в рассматриваемом случае двухвибраторную антенну можно моделировать геометрическими объемными примитивами (цилиндром или поверхностью). Однако такая геометрия окажется более сложной, требующей детальной оптимизации (как топологической, так и вычислительной). Поэтому для

создания двухвибраторной антенны в среде FEKO удобно использовать элемент ***Line*** из основного набора вкладки ***Construct*** главного меню.

Выберем элемент ***Line*** (раздел *Create curve*). Открывшееся диалоговое окно ***Create line*** (рис. 1.3) дает возможность пользователю разместить выбранный элемент в пространстве системы координатным методом.

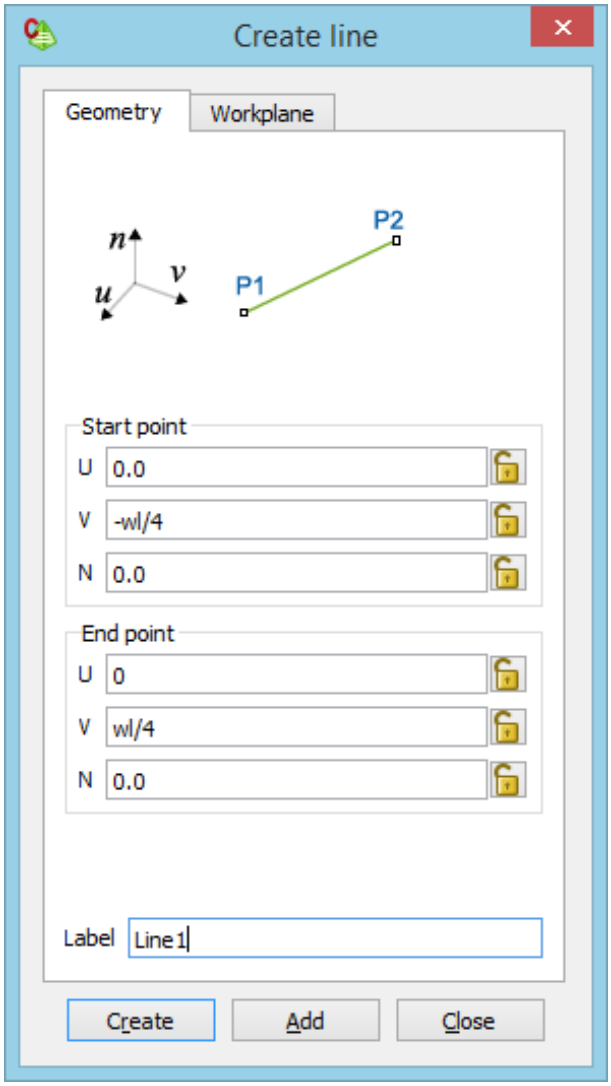


Рис. 1.3. Диалоговое окно создания элемента системы (линия)

Сверху окна на рис. 1.3 показаны направления орт единичных векторов, при желании их можно изменить во вкладке ***Workplane*** того же окна. Чтобы сформировать полуволновый вибратор вдоль оси *OY* с центром в начале координат, необходимо расположить элемент в направлении орты *V* со значениями указанными на рис. 1.3. Несложно видеть, что программа выполняет арифметические операции над переменными непосредственно в строке ввода, что значительно упрощает задание параметров системы. Синтаксис, понятный

программе, соответствует синтаксису для записи арифметических операций в языках объектно-ориентированного программирования (то же самое можно сказать и про экспоненциальный способ задания переменных в среде FEKO).

После расположения в системе полуволнового вибратора (клавиша ***Create*** на рис. 1.3) соответствующий элемент появляется в области просмотра. Удерживая левую кнопку мыши и перемещая курсор, можно изменить направление обзора. Перейдя в раздел ***View*** главного меню, выберем наиболее удобный изометрический вид на антенну, нажав на кнопку ***Isometric*** в группе ***Preset views***.

Теперь необходимо выбрать точку питания для вибратора. Вновь созданный элемент модели появляется в списке ***Model – Geometry – Line1*** вкладки ***Construc***t в окне проекта. После выбора его в окне ***Details*** ниже появляется список составных частей этой структуры. Элемент ***Line*** является двумерным проводом, поэтому содержит только одну область для решения электродинамической задачи: ***Wires – Wire1***. Нажимая правой кнопкой мыши на ***Wire 1***, получаем всплывающее меню, в котором необходимо выбрать пункт ***Create port – Wire port***. В строке ввода ***Edge*** должно быть указание на размещение порта (***Line1.Wire1***). Порт должен быть размещен на единичном сегменте провода по центру. Диалоговое окно создания порта представлено на рис. 1.4.

После того как порт создан, необходимо задать параметры его возбуждения. Как и в случае размещения линии в системе, заданный ранее порт появляется в списке окна ***Construct*** в разделе ***Model – Ports*** (окно проекта). Нажимая правой кнопкой мыши на ***Port 1***, переходим в меню ***Voltage source.*** Магнитуда напряжения (***Magnitude***), начальная фаза (***Phase***) и сопротивление порта (***Port impedance***) в рассматриваемом случае сохраняют значения по умолчанию. После нажатия клавиши ***Create*** в модели создается источник напряжения. Для того чтобы задать его частоту, необходимо перейти на вкладку ***Configuration*** в окне проекта. В списке ***Source*** значится ***VolageSource1***. Над ним располагается пункт ***Frequency***, двойной щелчок мыши по которому открывает

диалоговое меню ***Solution frequency***. В выпадающем списке необходимо оставить значение ***Single frequency*** (одна частота), в строке ввода ***Frequency*** необходимо ввести частоту в герцах. Здесь можно указать как арифметическую операцию (*c0/(wl/1000)*), так и численное значение (1.2e9). Следует особо обратить внимание, что переменная *wl* (как и любая другая инициализированная в проекте) может принимать любые единицы измерения в зависимости от того, в какой строке ввода она фигурирует. Поэтому при использовании ее в любой арифметической операции, результатом которой является физическая величина в СИ, переменную *wl* необходимо перевести в метры, так как изначально она была задана в миллиметрах. На этом проектирование активного вибратора окончено.

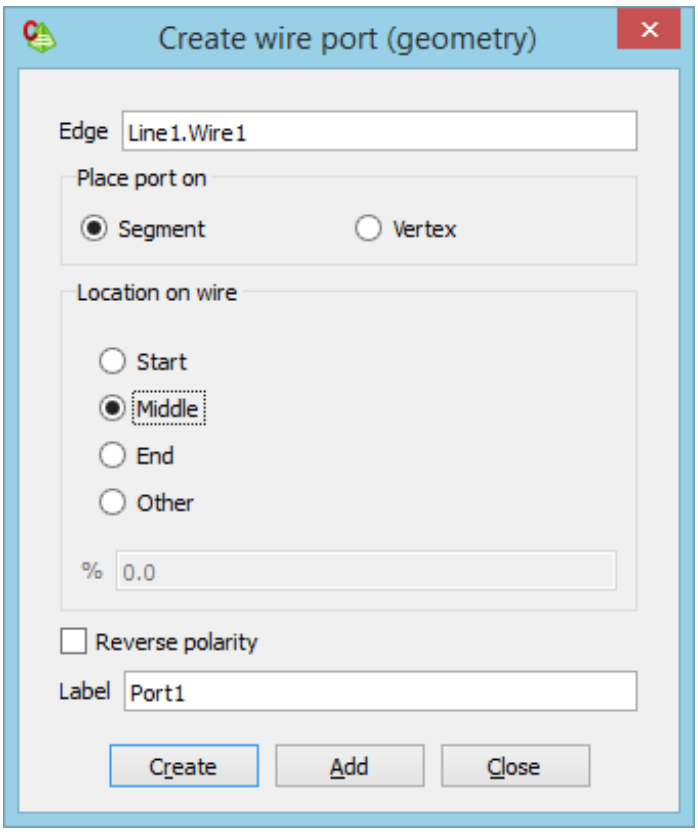


Рис. 1.4. Окно создание порта на проводе

Инициализируем вторую переменную $d = 0{,}25wl$ описанным выше образом. Эта переменная будет определять расстояние между вибраторами. Далее необходимо расположить в системе пассивный вибратор. Создавая новый элемент модели ***Line2***, следует учесть, что пассивный вибратор должен быть параллелен активному, располагаться с ним в одной плоскости на расстоянии *d*.

Выбор плоскости расположения вибраторов, строго говоря, является произвольным, однако для совпадения результирующих диаграмм рекомендуется выбирать плоскость *XOY*. В силу того, что пассивный вибратор также является полуволновым, длины обоих элементов будут одинаковыми. На рис. 1.5 показана одна из возможных геометрий модели двухвибраторной антенны.

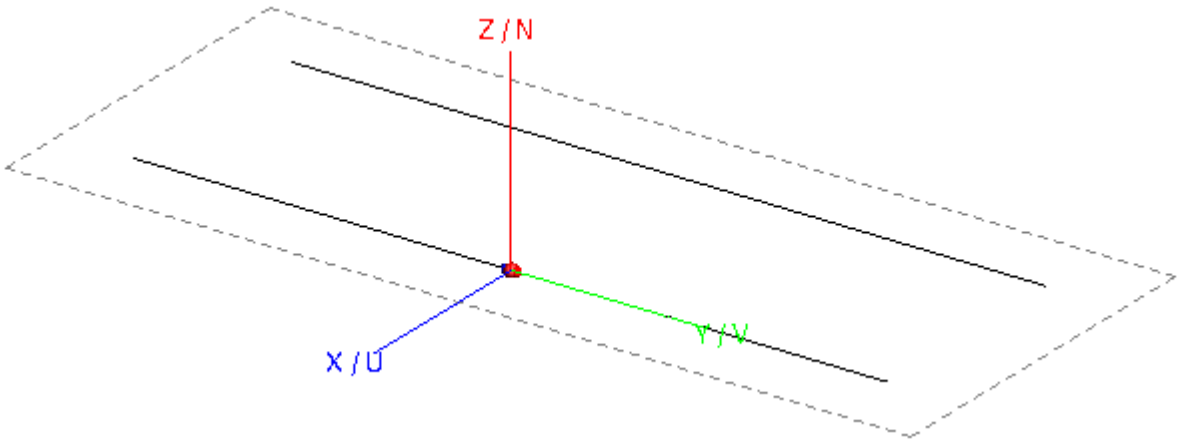


Рис. 1.5. Двухвибраторная антенна в окне программы FEKO

Последним этапом проектирования является моделирование короткозамкнутого шлейфа пассивного вибратора. Вычерчивание топологии такого элемента антенны является нежелательным по ряду причин, главной из которой является то, что существенное усложнение геометрии не дает никакого преимущества в точности результатов, а зачастую попросту снижает ее. Для того чтобы задать входное сопротивление пассивного вибратора, необходимо разместить на нем импедансный порт. Процедура полностью совпадает с описанной ранее процедурой размещения на проводе активного порта (источника напряжения) за одним исключением. В контекстном меню установленного порта вместо ***Voltage Source*** необходимо выбрать ***Add load***. Тип нагрузки (*Load type*) – комплексный импеданс (*Complex impedance*). В силу того что шлейф является реактивной нагрузкой, строку ввода ***Real part*** необходимо оставить без изменения (нуль по умолчанию), в поле ***Imagery part*** следует ввести значение сопротивления короткозамкнутого шлейфа (значения берутся из расчетной части задания сначала для режима директора, а затем для режима

рефлектора [1]). На этом создание геометрии двухвибраторной антенны закончено.

Элементы *Line* в FEKO рассчитываются методом моментов, поэтому создание сетки является обязательным. Перейдя во вкладку ***Mesh*** главного меню, необходимо нажать на клавишу ***Create mesh***. Появившееся диалоговое окно показано на рис. 1.6.

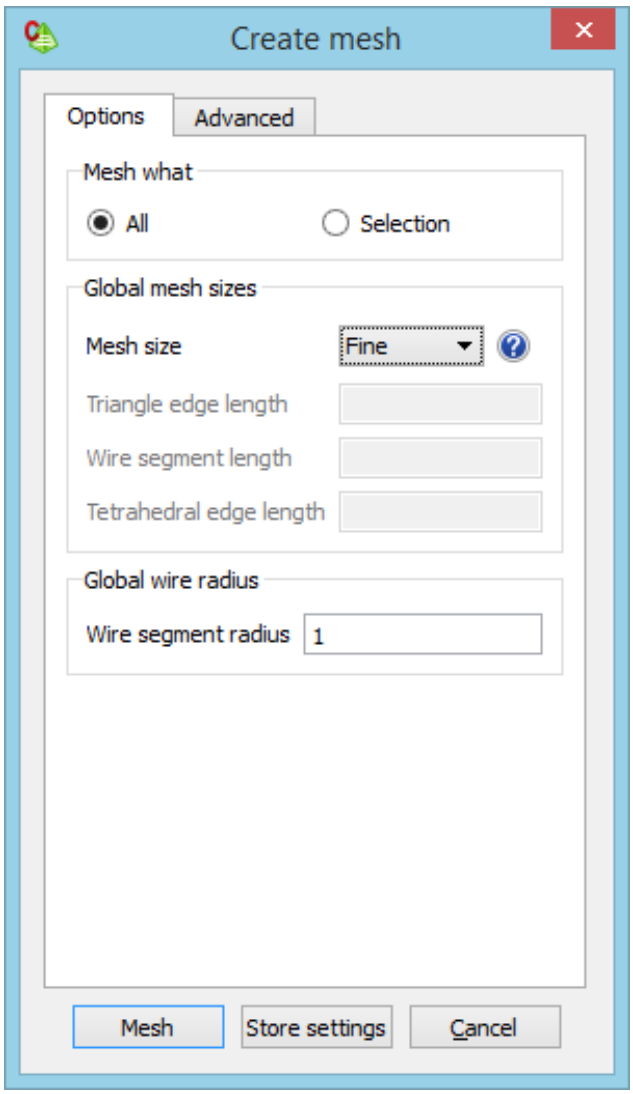


Рис. 1.6. Создание сетки разбиения

В силу относительной простоты исследуемой геометрии сетку логично задавать стандартными алгоритмами. В выпадающем списке ***Mesh size*** следует выбрать значении ***Fine***. В этом случае автоматическое разбиение геометрии на элементы осуществляется с минимальным пространственным шагом, равным 0,04λ. Значение радиуса сегмента провода (***Wire segment radius***) выбирается в соответствии с время-точностными ожиданиями по симулированию. Примем

радиус сегмента провода равным 1 мм. После нажатия на клавишу ***Mesh*** в области просмотра геометрия приобретает объемную форму с выделением сегментов разбиения; в текстовом терминале консоли можно наблюдать количество элементов сетки для каждого провода.

Требуемыми результатами расчета модели являются диаграмма направленности антенны в дальней зоне и распределение токов на вибраторах. Для того чтобы указать выходные параметры, в окне проекта необходимо перейти во вкладку ***Configuration*** и вызвать контекстное меню пункта ***Requests***, кликнув правой кнопкой мыши на нем. Далее следует выбрать ***Far field***. Все величины в открывшемся диалоговом окне сохраняют значения по умолчанию. Обратите внимание на ориентацию сферических координат в системе FEKO. При нажатии на клавишу ***3D pattern*** в области просмотра появляется сферическая поверхность, на которой располагаются точки, расчет полей в которых будет производиться программой. После нажатия клавиши ***Create*** в списке ***Requests*** появится дерево ***Far Fields*** с одной ветвью ***FarField1***. После этого в контекстном меню ***Requests*** следует выбрать пункт ***Currents***. В открывшемся диалогом меню следует нажать клавишу ***Create***, оставив значения всех пунктов без изменений (расчет всех токов, значение *All currents* в выпадающем списке). В списке ***Requests*** появляется новое дерево ***Currents*** с ветвью ***Currents1***.

Все готово, чтобы приступить к расчету модели. Во вкладке ***Solve/Run*** главного меню необходимо нажать на клавишу ***FEKO Solver***, после сохранения проекта запустится процедура решения. Дождавшись ее завершения, необходимо нажать на клавишу ***Ok***.

Программа постпроцессинговой обработки результатов – POSTFEKO – запускается нажатием соответствующей клавиши в главном меню. Основное окно пользовательского интерфейса приведено на рис. 1.7, в нем также располагаются главное меню, окно проекта и область просмотра (см рис. 1.1). Следует обратить внимание, что в правой части экрана теперь находится меню обработки результатов.

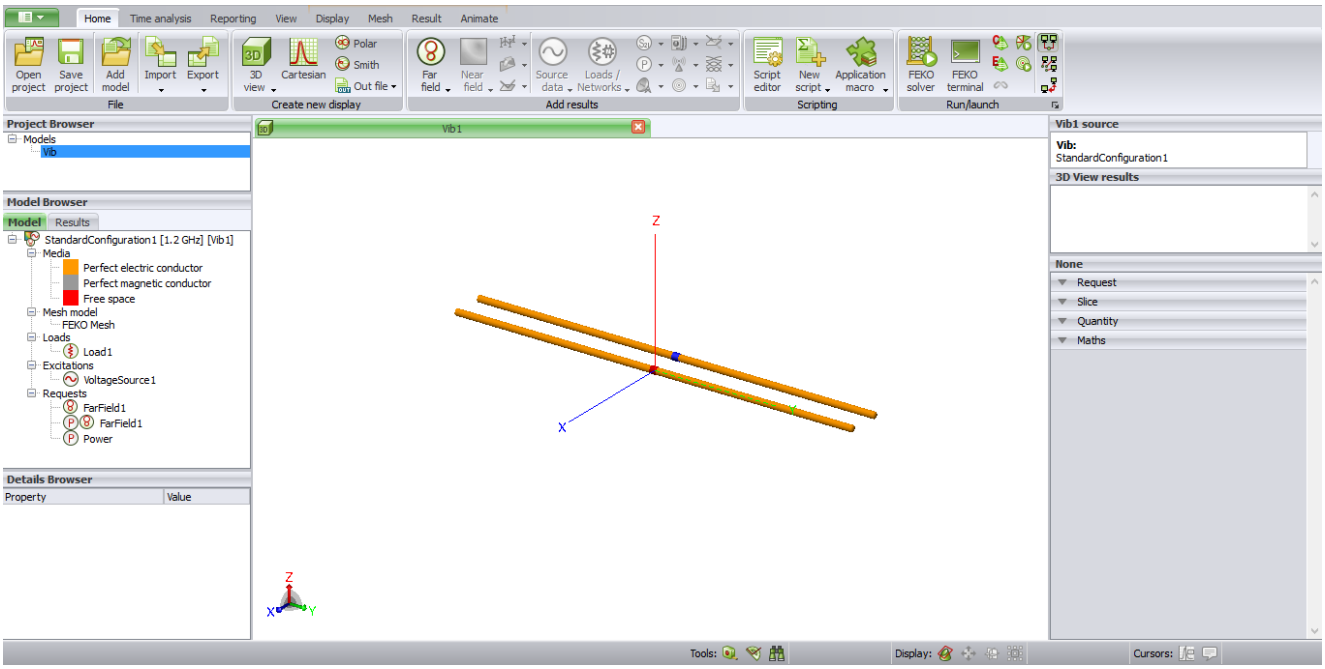


Рис. 1.7. Главное окно программы POSTFEKO с геометрией модели

Для того чтобы получить диаграмму направленности по заданному контуру, в окне проекта необходимо перейти на вкладку ***Model***, далее в списке ***Requests*** дважды кликнуть на пункте ***FarField1***. В меню обработки результатов появятся параметры отображения. В выпадающем списке ***Plot type*** выберем ***3D surface***, в списке выбора отображаемой характеристики выберем ***Electric field***, отмеченная радиокнопка ***Total*** указывает на отображение суммарного электрического поля, также следует выделить значение ***Normalise***, чтобы получить нормированное распределение напряженности. Далее двойной щелчок мыши на пункте ***Currents1*** в окне проекта запустит процедуру визуализации распределения токов на проводниках. Меняя значения в выпадающем списке в меню обработки результатов, нужно получить как распределение электрических токов, так и зарядов на вибраторах. В этом случае следует также указать построение нормированных значений величины. Окно отображения с меню обработки представления результатов приведено на рис. 1.8. В списке ***3D view results*** можно контролировать отображаемые в окне просмотра результаты.

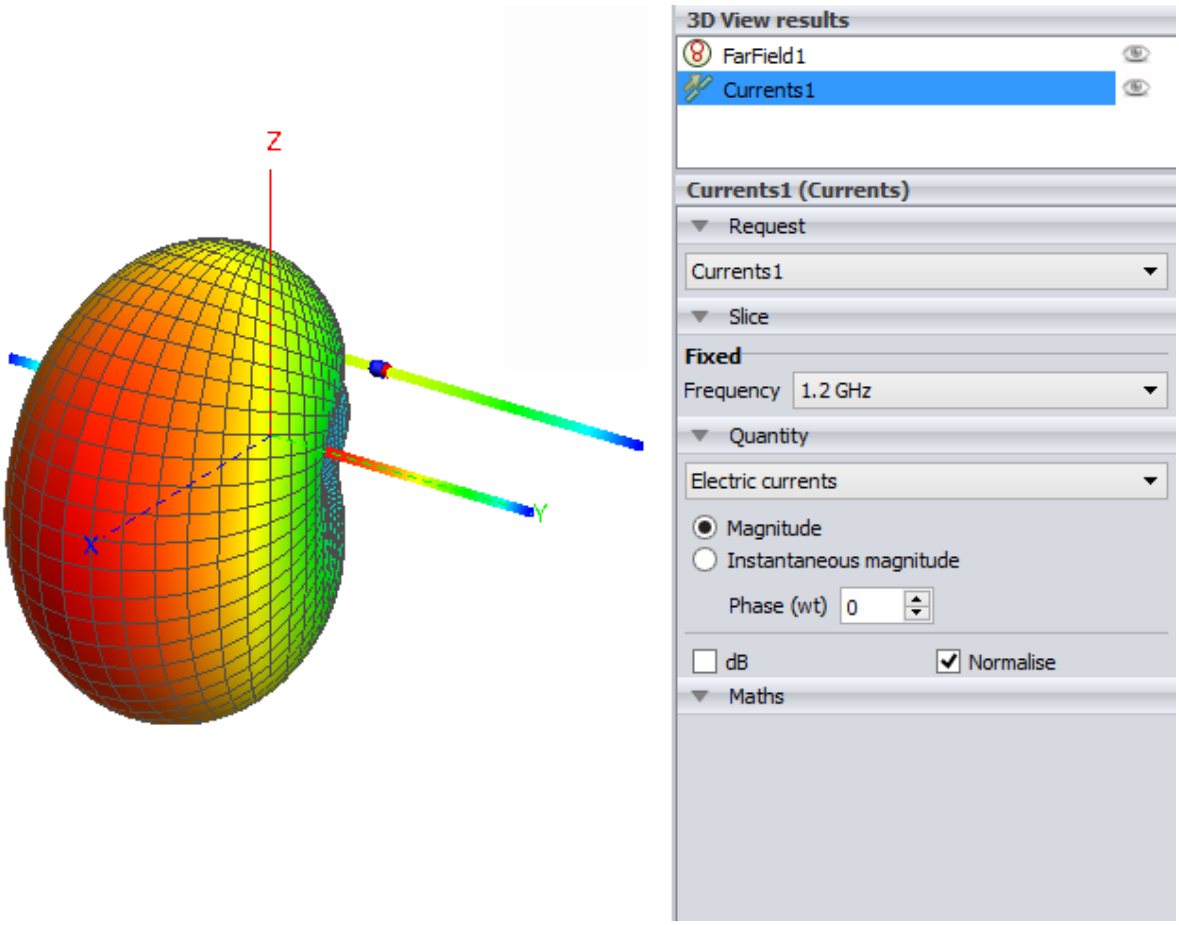


Рис. 1.8. Полученная диаграмма направленности антенны и распределение токов на вибраторах

Для удобного анализа, а также для представления результатов в отчете необходимо построить диаграмму направленности антенны в полярной координатной системе. Для этого во вкладке ***Home*** главного меню необходимо нажать на кнопку ***Polar*** в группе выбора ***Create new display***. Как и прежде, двойной клик мыши на пункте ***FarFiled1*** отображает результат расчета. В меню обработки результатов, нажимая на выпадающий список ***Independent axis***, выберем координату ***Phi***. Для построения диаграммы направленности в горизонтальной плоскости угол ***Theta*** выберем равным *90deg*. Подобно тому, как описывалось выше в группе ***Quantity***, выберем построение нормированного суммарного электрического поля.

Для быстрого анализа полученной характеристики в среде POSTFEKO предусмотрен ряд автоматических операций. Перейдя во вкладку ***Measure*** главного меню, в группе выбора ***Far filed annotations*** необходимо нажать на клавишу ***Beamwidth***. Данная процедура позволяет получить ширину главного

лепестка диаграммы по разным уровням. Если в появившемся меню невозможно выбрать процедуру расчета, необходимо указать, к какой характеристике она должна быть применена. Для этого достаточно кликнуть на график функции в окне просмотра, либо в правом верхнем углу меню обработки результатов выбрать ее указатель в группе ***Trace – FarFiled1***. После этого кнопки выбора становятся активными. Необходимо получить значение ширины главного лепестка по уровню –3дБ (клавиша ***Half power***). Для оценки КЗД двухвибраторной антенны проще всего установить маркеры в прямом и обратном излучениях вручную. Для этого в группе выбора ***Measurements*** следует нажать на клавишу ***Cursors***. На графике характеристики появятся два маркера, для перемещения которых необходимо зажать левую кнопку мыши на соответствующей подписи и перемещать в требуемом направлении. Далее несложно рассчитать коэффициент по требуемой характеристике антенны. На рис. 1.9 приведена полученная диаграмма направленности с расставленными маркерами.

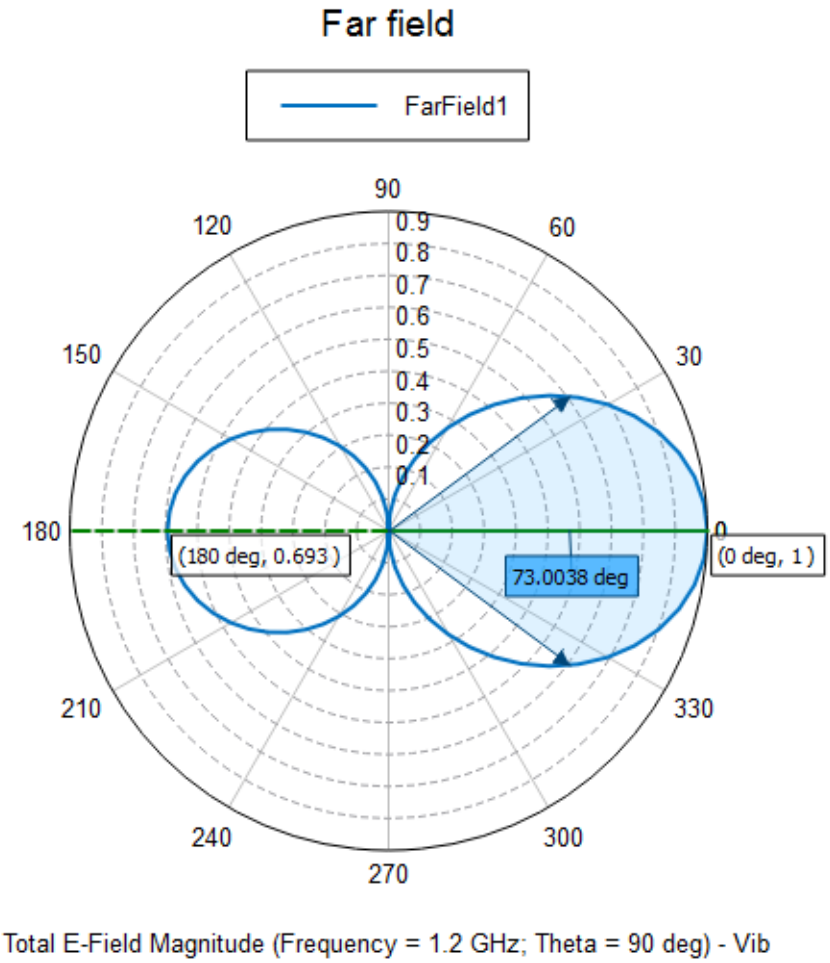


Рис. 1.9. Диаграмма направленности двухвибраторной антенны в горизонтальной плоскости

Для того чтобы сохранить полученную диаграмму как рисунок, необходимо кликнуть на графике правой кнопкой мыши и в контекстном меню выбрать пункт ***Export image*** (можно также воспользоваться комбинацией клавиш *Ctrl+E*).

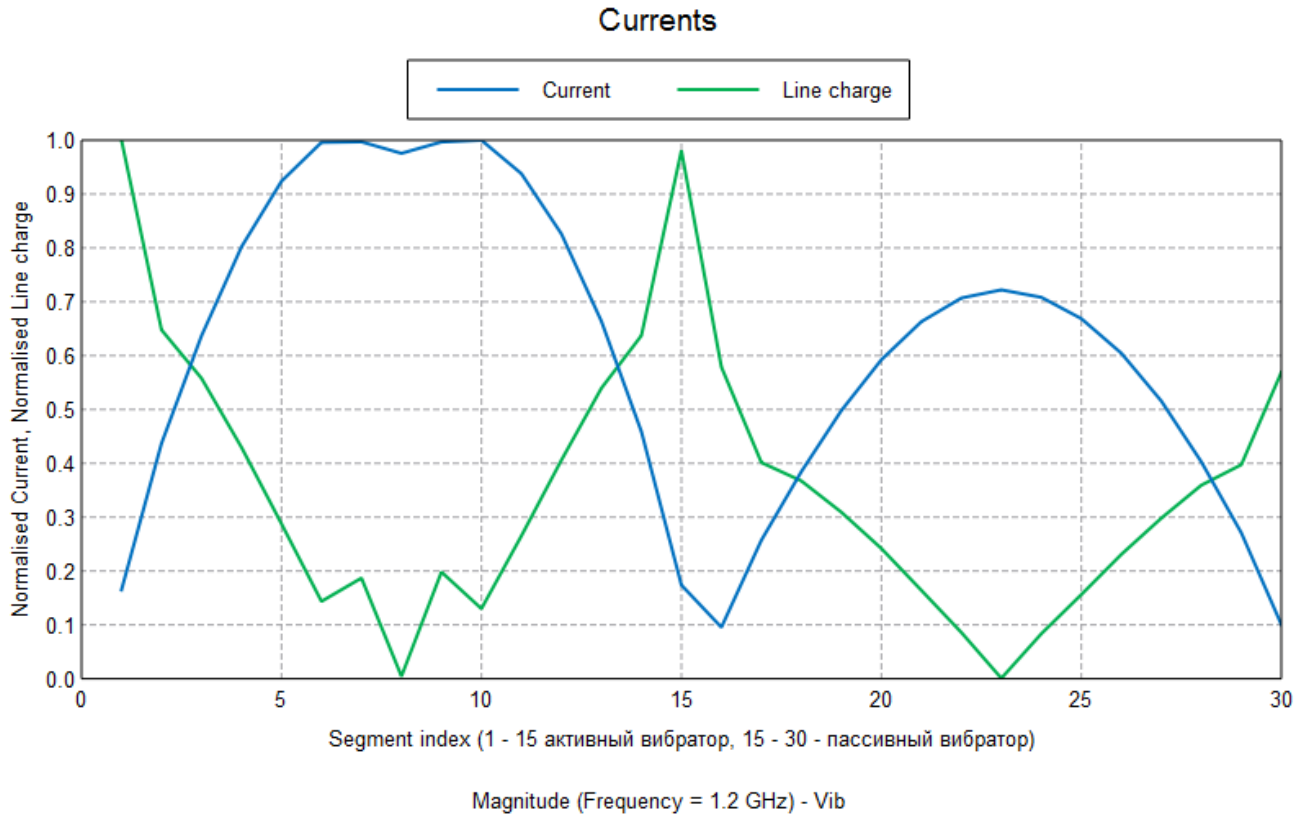


Рис. 1.10. Распределение токов и зарядов по сегментам вибраторов

Зависимость распределения тока на сегментах провода лучше получить в прямоугольных координатах. Для этого во вкладке ***Home*** главного меню необходимо нажать на клавишу ***Cartesian***. Двойной клик мыши на пункте ***Currents1*** в меню проекта, как и прежде, отобразит рассчитанные результаты. В интерфейсе обработки результатов в списке ***Independent axis*** должно фигурировать значение ***Segments***, в данном случае геометрия разбита на 30 участков (30 отчетов вдоль оси OX). В поле ***Fixed*** в списке ***Segments*** необходимо выбрать значение **<*All*>** – в этом случае будет построен объединенный график для распределения токов как на пассивном, так и на активном вибраторе. Для того чтобы получить зависимость для отдельного элемента геометрии, в списке ***Segments*** следует указать ***Line1.Wire1*** либо ***Line2.Wire2*** (это удобно в том

случае, когда принадлежность номера сегмента к определенному элементу неизвестна). Изменяя значения в поле ***Quantity***, необходимо получить нормированные зависимости тока и заряда на сегментах разбиения провода (в списке ***Sort by*** необходимо указать ***Index*** и выбрать ***Magnitude***). На рис. 1.10 приведен пример полученных зависимостей. Для того чтобы построить на одном графике две зависимости, необходимо повторить двойной клик мыши на пункте ***Currents1***.

На этом моделирование двухвибраторной антенны и обработка полученных результатов закончено. Проведите аналогичный расчет для антенны в режиме рефлектора и сравните полученные данные.

2. РУПОРНАЯ АНТЕННА

В данном разделе подробно описывается алгоритм работы пользователя с САПР для реализации расчетной модели исследуемой антенны. На рис. 2.1 показано главное окно программы CADFEKO.

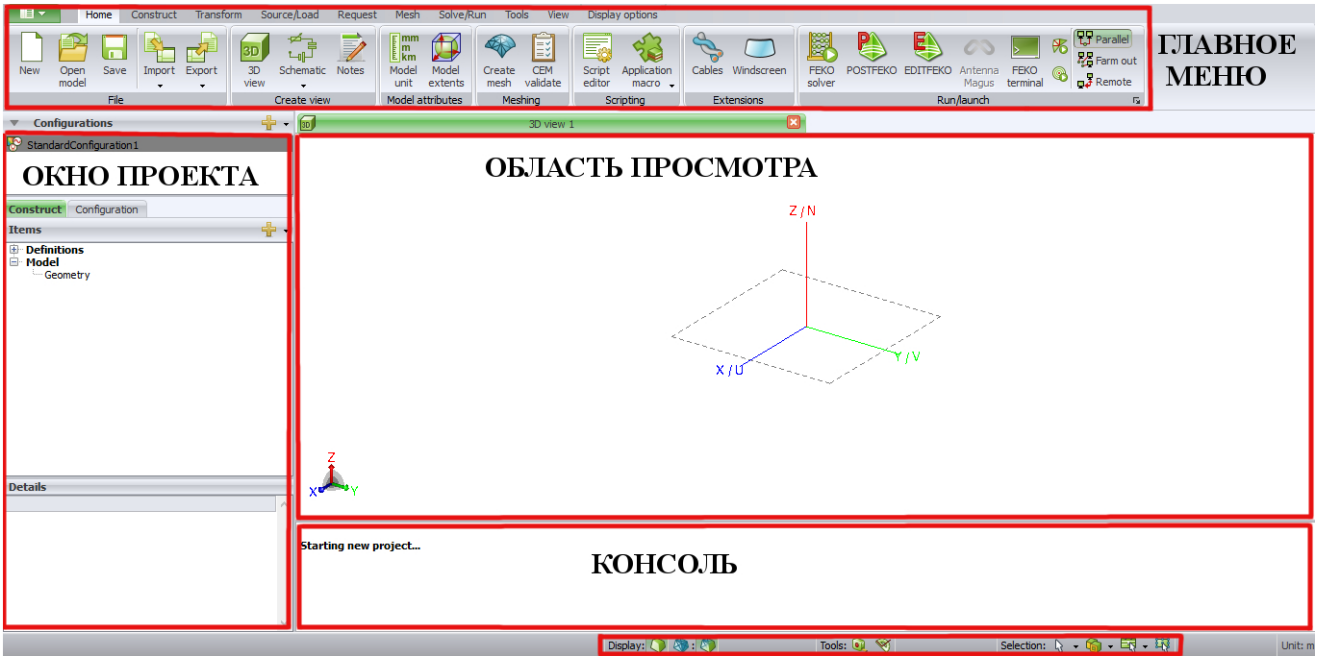


Рис. 2.1. Главное пользовательское окно CADFEKO

Прежде чем приступить к формированию геометрии, необходимо задать локальные переменные и единицы измерения, используемые в модели. Перейдите во вкладку ***Construct*** главного меню и выберите пункт ***Model Unit***, в открывшемся окне укажите единицу измерения, используемую в модели (***millimetres***) (рис. 2.2). В правом нижнем углу пользовательского окна значение ***Unit*** изменится на *mm*.

Далее в окне ***Add Variable*** пункта ***Variable*** необходимо ввести переменные для удобной работы с моделью. Диалоговое окно ***Create variable*** имеет три строки ввода: *Name* – имя переменной, *Expression* – значение переменной, *Comment* – пояснение. В сложных проектах с большим количеством переменных или параметров для оптимизации рекомендуется указывать пояснения к каждой инициализированной в модели величине, чтобы в процессе исследования исключить путаницу в обозначениях. Клавиша ***Evaluate*** предназначена для

проверки правильности задания переменной (в строке вывода ***Value*** появляется значение величины в стандартном виде). Инициализируем переменную *wl* (wavelength – длина волны) со значением 32 мм. После нажатия на кнопку ***Create*** (клавиша ***Add*** служит для перехода к инициализации новой переменной без выхода из диалогового окна) в списке ***Definitions*** во вкладке ***Construct*** (в окне проекта) появится вновь созданная переменная. В этом списке уже присутствуют стандартные для электродинамических задач константы (скорость света в вакууме – *c0*, электрическая и магнитная постоянные – *eps0* и *mu0*, волновое сопротивление вакуума – *zf0*, число пи – *pi*). Самостоятельно задайте еще три переменные, описывающие габаритные размеры рупорной антенны. Рекомендуется использовать следующие обозначения: длина раскрыва – *la = 200 мм*, ширина раскрыва – *ha = 70 мм*, длина рупора – *lh = 510 мм*.

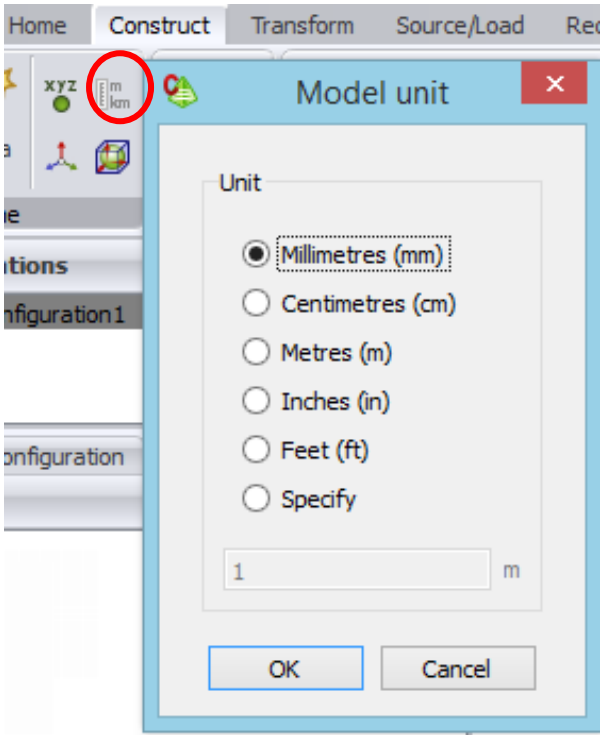


Рис. 2.2. Выбор единицы измерения

Для того чтобы вычерчивать антенны с относительно большими размерами, необходимо увеличить масштаб величин, входящих в модель. Для этого во вкладке ***Home*** главного меню в поле ***Model attribute*** необходимо проследовать в раздел ***Model extents***. В выпадающем списке вместо стандартного

значения *5E+2* необходимо установить *5E+3* (числа представлены в экспоненциальной записи).

Построение исследуемой геометрии в САПР основывается на размещении в трехмерной системе координат (*XYZ*) базовых объектов (геометрических примитивов) и наборов определенных манипуляций над ними. Важно уметь правильно выбрать необходимые элементы построения и требуемый набор действий над ними в каждой отдельной системе. Реализация топологии рупорной антенны предполагает размещение в пространстве металлических поверхностей, форма и размер которых повторяют элементы антенны. Совокупность всех сегментов модели представляет собой необходимую топологию.

Прежде всего необходимо определиться с ориентацией антенны в пространстве системы. Это необходимо для того, чтобы на этапе анализа результатов можно было без труда соотнести плоскость построения с плоскостью апертуры антенны. Ось рупорной антенны будет направлена вдоль оси *OZ*, следовательно, раскрыв антенны будет лежать в плоскости *XOY*.

Приступим к черчению геометрии антенны. Для начала необходимо расположить волновод, подходящий к рупору. Для этого во вкладке ***Construct*** главного меню выберем пункт ***Cuboid***. В открывшемся диалоговом окне необходимо ввести габаритные параметры элемента, а также координаты основания параллелепипеда. На рис. 2.3 показано диалоговое окно с параметрами, которые необходимо указать. После нажатия клавиши ***Create*** в области просмотра появится заданная структура, а в меню проекта в разделе ***Construct – Model – Geometry*** появится указатель объекта – ***Cuboid1***.

В силу того, что данная структура должна моделировать фидер, подходящий к антенне, верхнюю грань параллелеапипеда необходимо удалить из геометрии. Для этого следует нажать на указатель геометрии в окне проекта (***Cuboid1***), далее в окне ***Details*** снизу появятся три списка, соответствующие элементам построения фигуры: *Edges* (грани), *Faces* (поверхности) и *Regions* (регионы). При переходе в список ***Faces*** появятся шесть поверхностей,

формирующих фигуру. При клике на каждую из поверхностей (*Face1 – Face6*) в области просмотра выбранная выделяется желтым цветом. В данном случае необходимо удалить верхнюю грань (*Face1*). Для удаления выбранной поверхности следует нажать на ее указатель правой кнопкой мыши и в контекстном меню выбрать функцию ***Delete*** либо просто нажать на одноименную клавишу на клавиатуре.

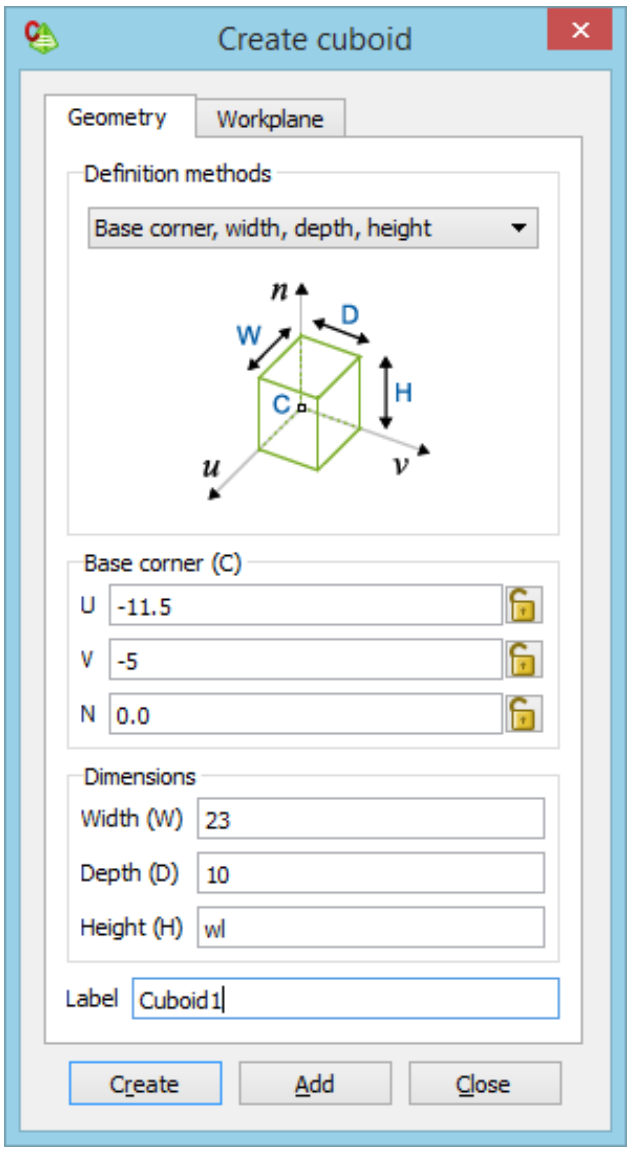


Рис. 2.3 Размещение прямоугольного волновода

Далее в главном меню во вкладке ***Construct*** необходимо выбрать геометрический примитив ***Flare***. Следует обратить внимание, что еще до размещения элемента в области просмотра появляются контуры будущей фигуры, тем самым появляется возможность оперативно отслеживать вносимые в топологию изменения. Для того, чтобы изменить рабочую область построения

раскрыва рупора, перейдите во вкладку ***Workplane*** диалогового окна ***Create flare***. Очевидно, для того, чтобы реализуемая фигура была ориентирована вдоль оси рупора, ее необходимо повернуть на 180 градусов по оси *OX*. Для этого в области ***Rotate workplan***в под соответствующей клавишей необходимо ввести требуемое значение угла поворота в градусах и кликнуть на ней. Описанное действие показано на рис. 2.4.

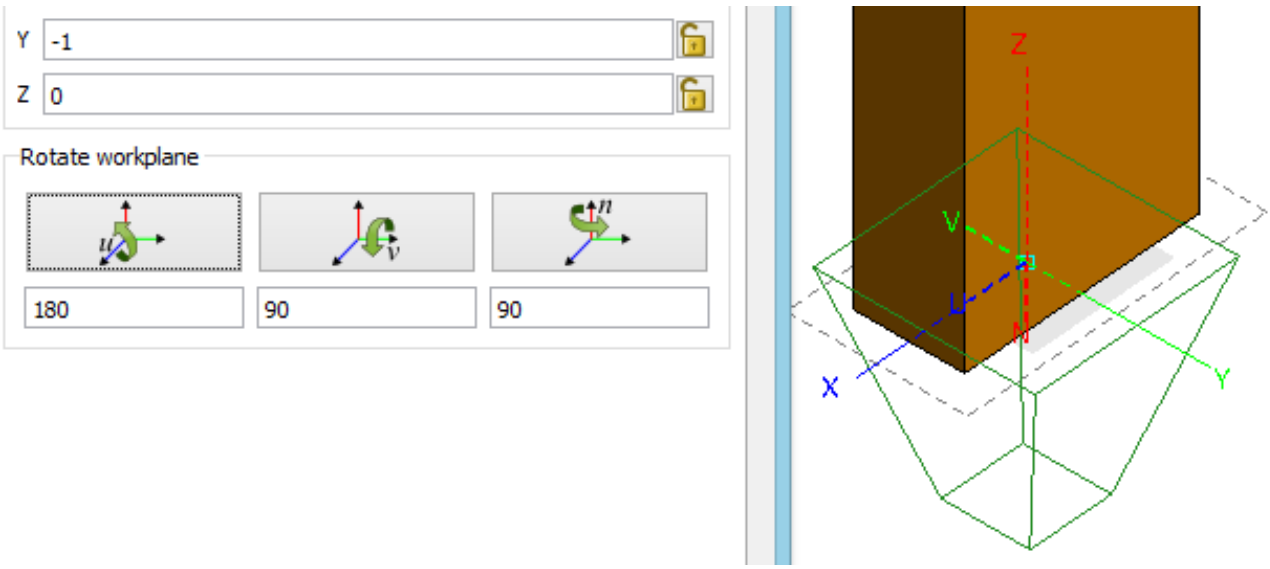


Рис. 2.4. Поворот рабочей поверхности

После этой процедуры достаточно задать габаритные размеры и расположение основания усеченной пирамиды, вернувшись во вкладку ***Geometry***. Диалоговое окно с введенными параметрами для секториального рупора H показано на рис. 2.5. Для того, чтобы сформировать секториальный рупор E, достаточно значения полей *Bottom width* и *Bottom depth* поменять местами (сначала смоделируйте E – секториальный рупор, а затем H – секториальный). После нажатия на клавишу ***Create*** появится реализованная геометрия. Вполне вероятна ситуация, что топология антенны будет выходить из области просмотра. Для установки изометрического вида на антенну следует нажать на клавишу ***Isometric*** во вкладке ***View*** главного меню.

Как и в случае с волноводом, для реализации раскрыва рупора, а также для обеспечения подключения фидера к нему необходимо удалить из геометрии ***Flare*** верхнее и нижнее основания. Проделайте эту процедуру самостоятельно.

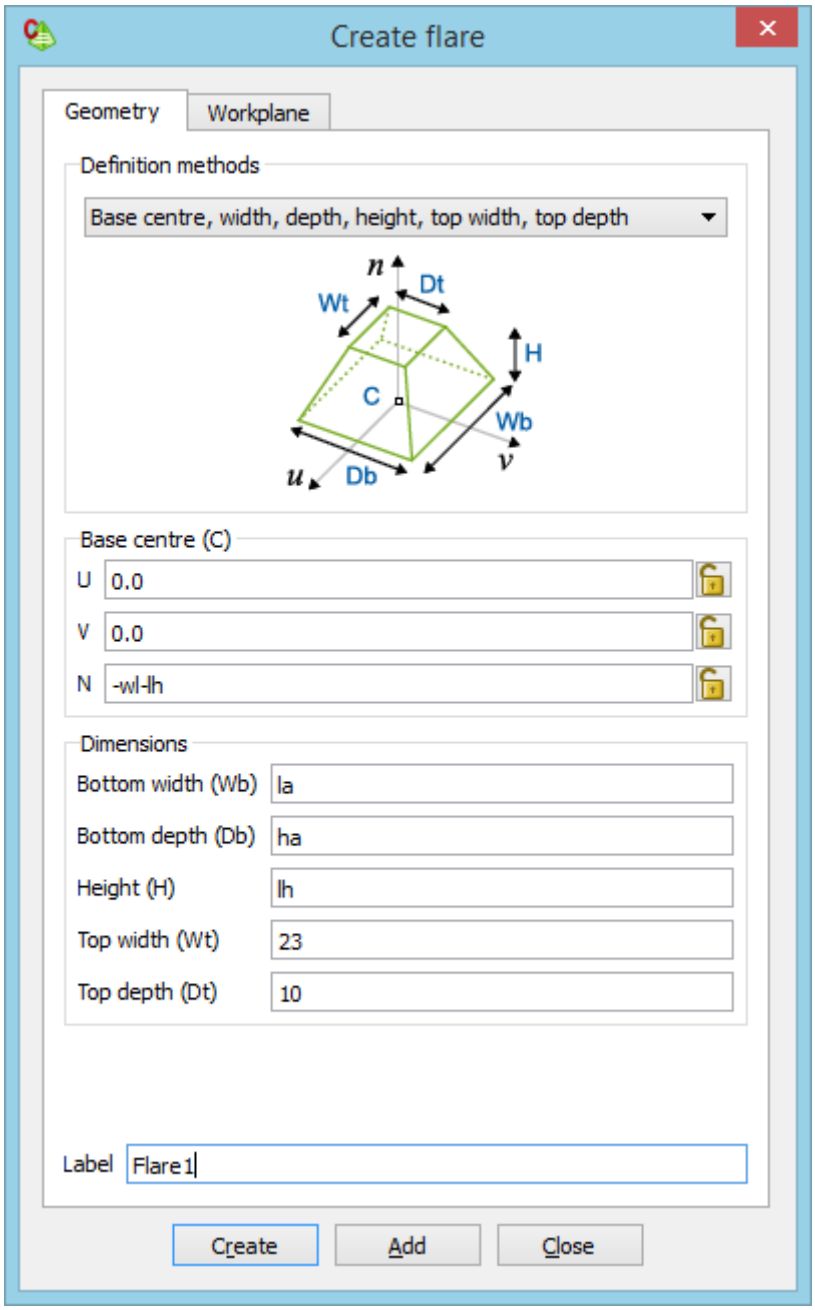


Рис. 2.5. Габаритные размеры и расположение рупора

На данном этапе реализованная топология представляет собой две независимые геометрические фигуры. Строго говоря, решение может быть получено и в том случае, если они (рупор и волновод) не объеденены в общую геометрию, однако для исключения погрешностей, вызванных сшиванием функций на границах раздела двух элементов, правильным решением будет объединить рупор и волновод в одну фигуру. Для этого в окне проекта во вкладке ***Construct – Model – Geometry*** необходимо выбрать требуемые структуры. При клике мышью последовательно сначала на указатель ***Cuboid1***,

затем на ***Flare1*** с зажатой клавишей *Shift* на клавиатуре в области просмотра обе структуры будут выделены одним цветом. Далее во вкладке ***Construct*** главного меню необходимо выбрать процедуру ***Union*** в группе ***Modify***. После этого в окне проекта указатели ***Cuboid1*** и ***Flare1*** станут элементами одного списка ***Union1***.

Последним этапом в проектировании рупорной антенны является задание способа ее возбуждение. Самым простым способом сделать это является выбор соответствующей процедуры в контекстном меню поверхности фидера, на которой должен располагаться порт. В меню проекта при нажатии на указатель объединенной структуры ***Union1*** в окне ***Details***, как и ранее, имеются списки формирующих геометрию элементов. В списке ***Faces*** необходимо выбрать поверхность, которая является нижней гранью волновода (единственная поверхность, лежащая в плоскости *XOY*). Нужно запомнить название этой поверхности, это пригодится в дальнейшем. Вызвав контекстное меню правой кнопкой мыши, необходимо выбрать ***Create port – Waveguide port***. Значения в открывшемся диалоговом окне остаются без изменения. Создание порта подтверждаем клавишей ***Create***. В меню проекта появляется список ***Ports*** с единственной ветвью ***Port1***. Вызывая контекстное меню этого элемента, выбираем ***Waveguide excitation***. Как и в предыдущем случае, значения возбуждения остаются по умолчанию. Завершаем процедуру клавишей ***Create***. Следуя во вкладку ***Configuration*** меню проекта, необходимо двойным щелчком мыши по полю ***Frequency*** вызвать строку ввода анализируемой частоты и задать значение 9375e6 (9375 МГц).

На этом проектирование рупорной антенны завершено. Возможная геометрия антенны в изометрическом виде представлена на рис. 2.6.

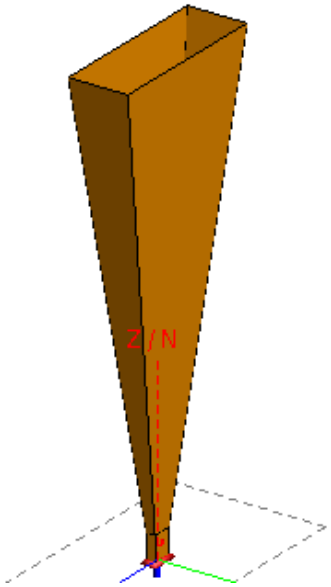


Рис. 2.6. Рупорная антенна в программе FEKO

В силу того что в данной работе изучается достаточно большая структура, по отношению к длине волны целесообразно для экономии вычислительных ресурсов несколько оптимизировать модель. Первым шагом оптимизации будет упрощение рассчитываемой геометрии. Выделите антенну, либо кликнув по ней левой кнопкой мыши в области просмотра, либо выбрав ее указатель ***Union1*** в меню проекта (выбранный элемент становится желтым в области просмотра). Далее во вкладке ***Transform*** главного меню необходимо нажать на клавишу ***Simplify***. Нет необходимости менять параметры упрощения геометрии в открывшемся диалоговом окне, основной принцип этой процедуры заключается в удалении избыточных точек в топологии, а также в устранении граней металлических соприкосновений. Вторым шагом оптимизации является задание плоскостей симметрии. Во вкладке ***Solve/Run*** главного меню следует нажать на клавишу ***Symmetry***. FEKO предлагает пользователю указать системе три плоскости симметрии: геометрическая симметрия (определяемая классической геометрией), электрическая симметрия (электрическое поле находится только в одном полупространстве, ограниченном выбранной плоскостью, для второго полупространства оно зеркально отображается) и магнитная симметрия (то же, но только для магнитного поля). В данной работе следует задать только плоскости геометрической симметрии антенны. На рис. 2.7 показан пример такой формулировки.

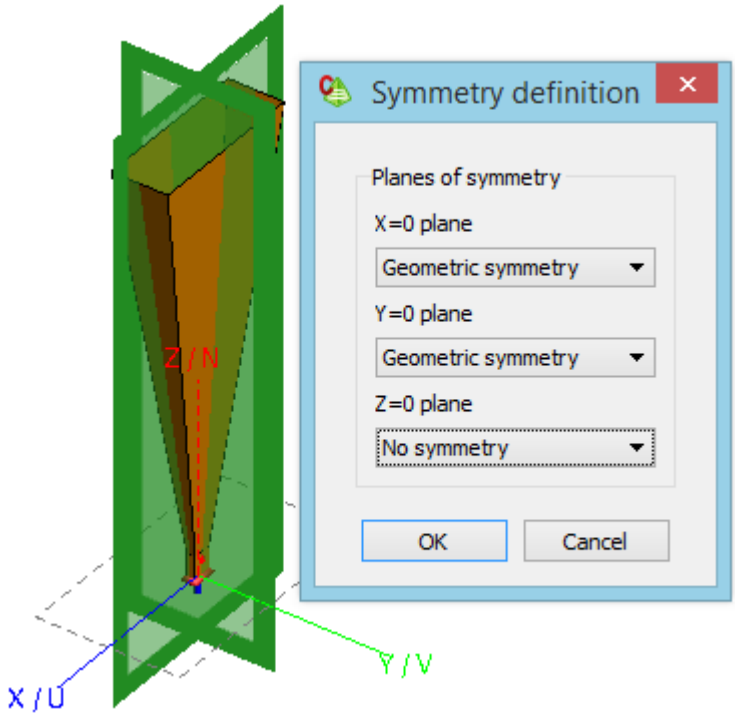


Рис. 2.7. Плоскости симметрии в программе FEKO

Следующим этапом моделирования является определение вычислительного метода для каждой поверхности антенны. Общим для каждого случая является метод расчета грани фидера, на которой установлен волноводный порт. Выбирая список ***Faces*** структуры ***Union1***, необходимо двойным нажатием мыши на указателе этой поверхности вызвать диалоговое меню, показанное на рис. 2.8.

Далее во вкладке ***Meshing*** установить флажок в поле *Local mesh size* и в поле ввода снизу указать значение для сетки разбиения *0.07*wl* (семь сотых от длины волны). Нажатие клавиши ***Ok*** закрывает окно с сохранением введенных параметров. Следует обратить внимание, что слева от указателя этой поверхности появился знак локального разбиения.

Теперь необходимо поочередно вызывать меню свойств поверхностей для каждого элемента системы (кроме грани с волноводным портом) и во вкладке ***Solution*** (рис. 2.8), в выпадающем списке ***Solve with special solution method*** выбрать вычислительный метод – PO full ray-tracing.

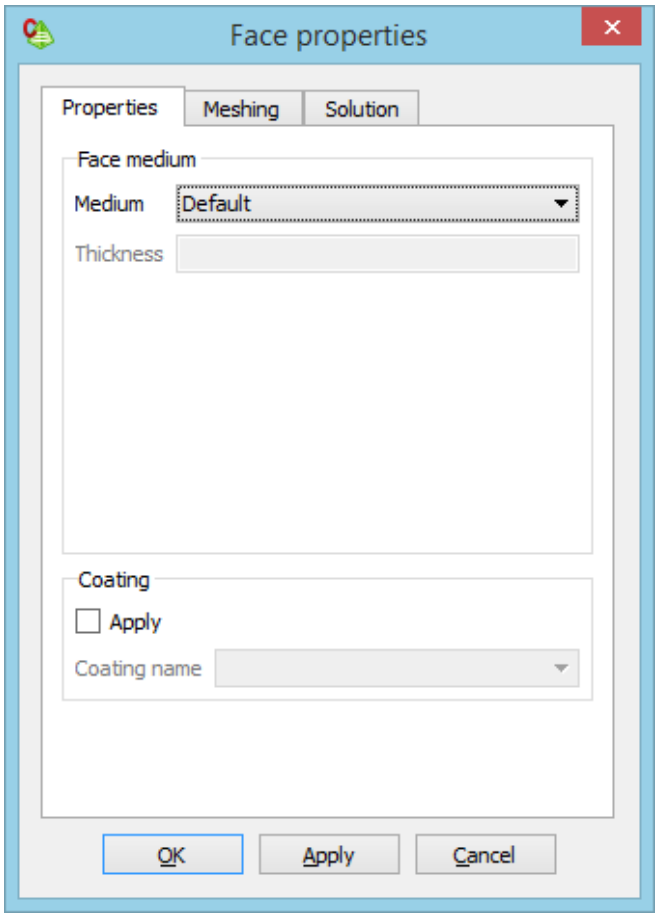


Рис. 2.8. Меню свойств поверхности

После того как для каждой поверхности антенны был выбран требуемый метод расчета, можно переходить к разбиению топологии на элементы сетки. Во вкладке ***Mesh*** главного меню необходимо выбрать процедуру ***Create Mesh***. Для экономии времени расчета используем самый грубый декомпозиционный алгоритм, для этого в списке ***Mesh size*** следует выбрать значение ***Coarse*** и нажать на клавишу ***Mesh*** снизу.

После окончания процедуры создания сетки следует задать выходные параметры работы модели. Во вкладке ***Configuration*** в окне проекта необходимо правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню поля ***Requests***. Первым результатом расчета будет распределение поля в раскрыве рупора, для этого необходимо выбрать пункт ***Near fields***. В открывшемся диалоговом окне необходимо задать область расчета, совпадающую с раскрывом рупора, и определить требуемое количество точек расчета. Диалоговое окно с введенными параметрами для H – секториального рупора – представлено на рис. 2.9. Для секториального рупора E значения полей *U* и *V* нужно поменять местами. Для

того чтобы инициализировать расчет поля антенны в дальней зоне, в том же контекстном меню необходимо выбрать пункт ***Far fields***. В открывшемся диалоговом окне требуется нажать клавишу ***3D pattern*** – расчет трехмерной ДН. Клавиша ***Create*** подтверждает выбор. В итоге в списке ***Request*** в меню проекта должны фигурировать два подраздела: ***Near fields*** и ***Far fields***.

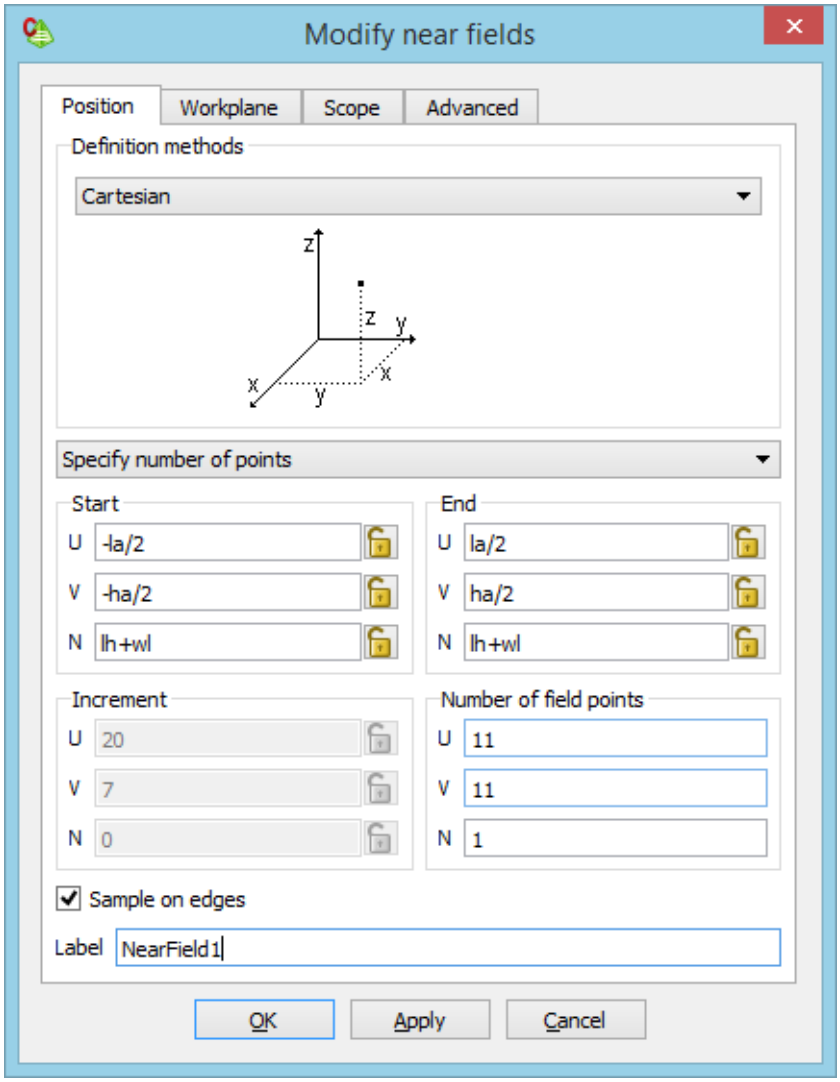


Рис. 2.9. Задание параметров расчета ближнего поля

Теперь необходимо рассчитать сформированную геометрию системы. Прежде всего следует «объяснить» программе, как объединять (или не объединять) решения для областей, полученные различными вычислительными методами (так называемый гибридный метод расчета). Для этого на вкладке ***Solve/Run*** главного меню необходимо выбрать пункт ***Solver settings***. Открывшееся окно показано на рис. 2.10. В соответствии с заданием используется метод физической оптики, волноводный порт же считается методом

моментов, следовательно, в модели применен гибридный MoM/PO. Далее следует перейти во вкладку ***High frequency*** и в группе выбора ***PO parameters*** сверху окна отметить ***Decouple PO and MoM solutions*** (не объединять решения). Для закрытия окна и подтверждения выбора следует нажать на клавишу ***Ok***.

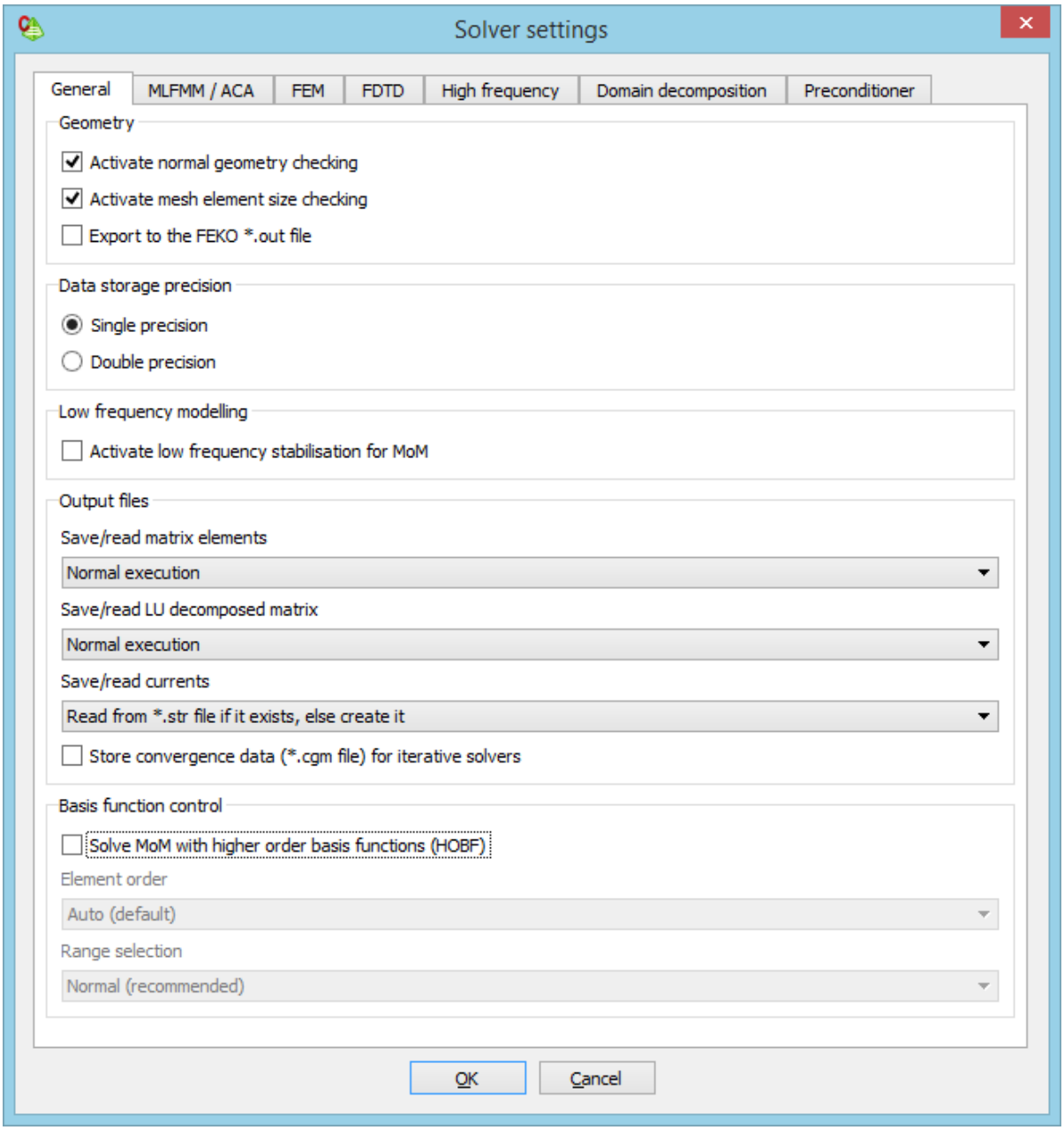


Рис. 2.10. Настройки параметров расчета системы

Во вкладке ***Solve/Run*** стандартная процедура ***FEKO solver*** запускает процесс вычислений (прежде необходимо сохранить проект, причем в имени файла следует использовать только латинские буквы). После завершениея процедуры (это займет некоторое время) необходимо нажать клавишу ***Ok***.

Программа постпроцессорной обработки результатов POSTFEKO запускается нажатием соответствующей клавиши в главном меню. Основное окно пользовательского интерфейса приведено на рис. 2.11, в нем также располагаются главное меню, окно проекта и область просмотра (см. рис. 2.1). Следует обратить внимание, что в правой части экрана теперь находится меню обработки результатов.

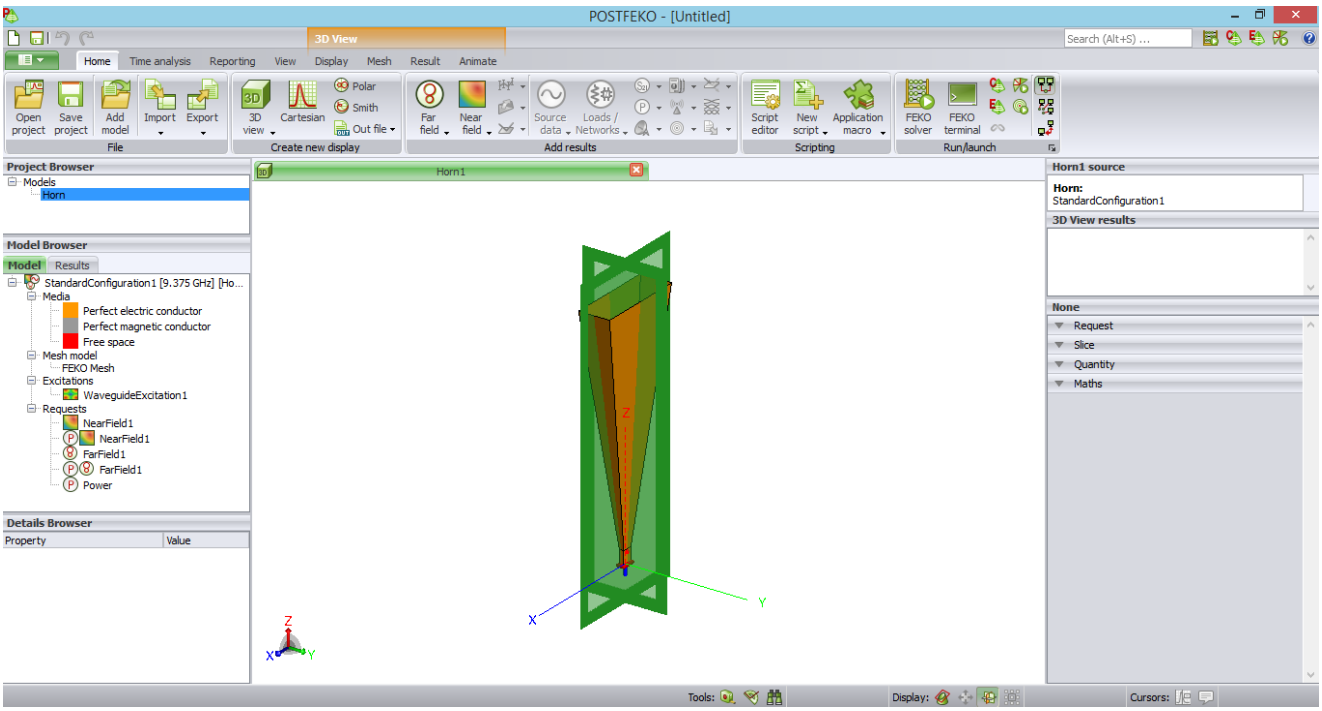


Рис. 2.11. Пользовательский интерфейс POSTFEKO

Для того чтобы получить диаграмму направленности по заданному контуру, в окне проекта необходимо перейти на вкладку ***Model***, далее в списке ***Requests*** дважды кликнуть на пункте ***FarField1***. В меню обработки результатов появится параметры отображения. В выпадающем списке ***Plot type*** выберем ***3D surface***, в списке выбора отображаемой характеристики выберем ***Electric field***, отмеченная радиокнопка ***Total*** указывает на отображение суммарного электрического поля, также следует выделить значение ***Normalise***, чтобы получить нормированное распределение напряженности. Далее двойной щелчок мыши на пункте ***NearFiled1*** в окне проекта запустит процедуру визуализации полей в апертуре антенны. Меняя значения в выпадающем списке в меню обработки результатов, нужно получить нормированное мгновенное распределение электрического поля в раскрыве рупора (***Electric field*** в группе

Quantity с активированным значением ***Instantaneous magnitude***). Окно отображения из меню обработки представления результатов приведено на рис. 2.12. В списке ***3D view results*** можно контролировать отображаемые в окне просмотра результаты.

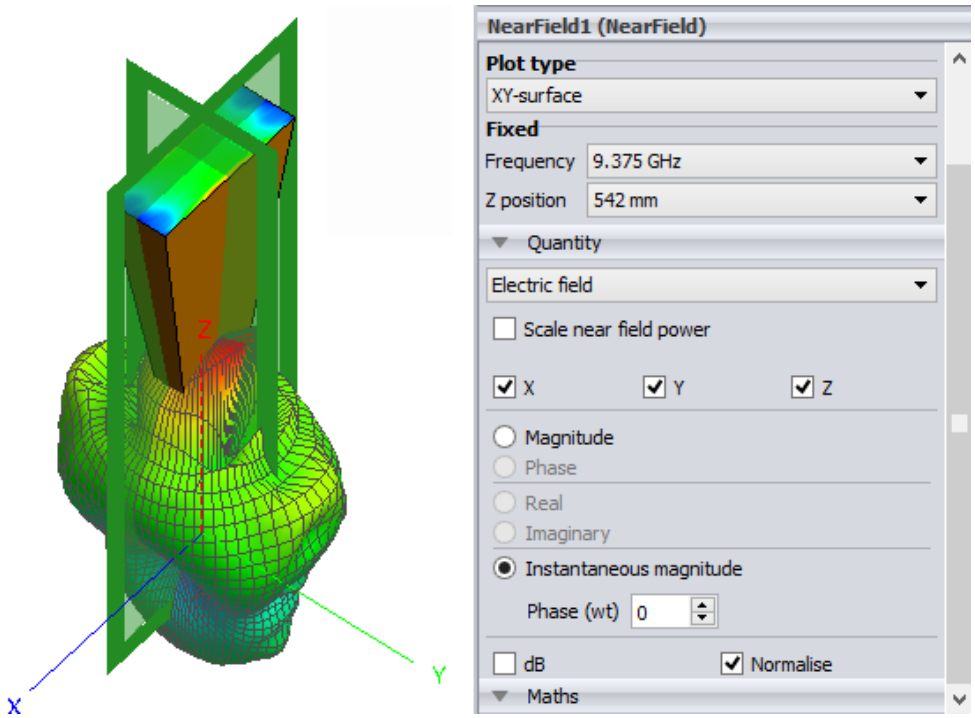


Рис. 2.12. Результаты расчета рупорной антенны

Для удобного анализа, а также для представления результатов в отчете необходимо построить диаграмму направленности антенны в полярной координатной системе. Для этого во вкладке ***Home*** главного меню необходимо нажать на кнопку ***Polar*** в группе выбора ***Create new display***. Как и прежде, двойной клик мыши на пункте ***FarFiled1*** отображает результат расчета. В меню обработки результатов, нажимая на выпадающий список ***Independent axis***, выберем координату ***Theta (wrapped)***. Необходимо получить две зависимости для разных плоскостей (*Phi = 0 deg* и *Phi = 90 deg*). Лучше их представить на одном графике, для этого достаточно снова дважды кликнуть на указатель ***FarField1*** и изменить значение угла. Подобно тому, как описывалось выше в группе ***Quantity***, выберем построение нормированного суммарного электрического поля.

Для быстрого анализа полученной характеристики в среде POSTFEKO предусмотрен ряд автоматических операций. Перейдя во вкладку ***Measure*** главного меню, в группе выбора ***Far filed annotations***, необходимо нажать на

клавишу ***Beamwidth***. Данная процедура позволяет получить ширину главного лепестка диаграммы по разным уровням. Если в появившемся меню невозможно выбрать процедуру расчета, необходимо указать, к какой характеристике она должна быть применена. Для этого достаточно кликнуть на график функции в окне просмотра, либо в правом верхнем углу меню обработки результатов выбрать ее указатель в группе ***Trace – FarFiled1*** или ***FarFiled1_1***. После этого кнопки выбора становятся активными. Необходимо получить значение ширины главного лепестка по уровню –3дБ (клавиша ***Half power***) для диаграмм в обеих плоскостях.

Для сохранения полученной диаграммы как рисунка необходимо кликнуть на графике правой кнопкой мыши и в контекстном меню выбрать пункт ***Export image*** (можно также воспользоваться комбинацией клавиш *Ctrl+E*).

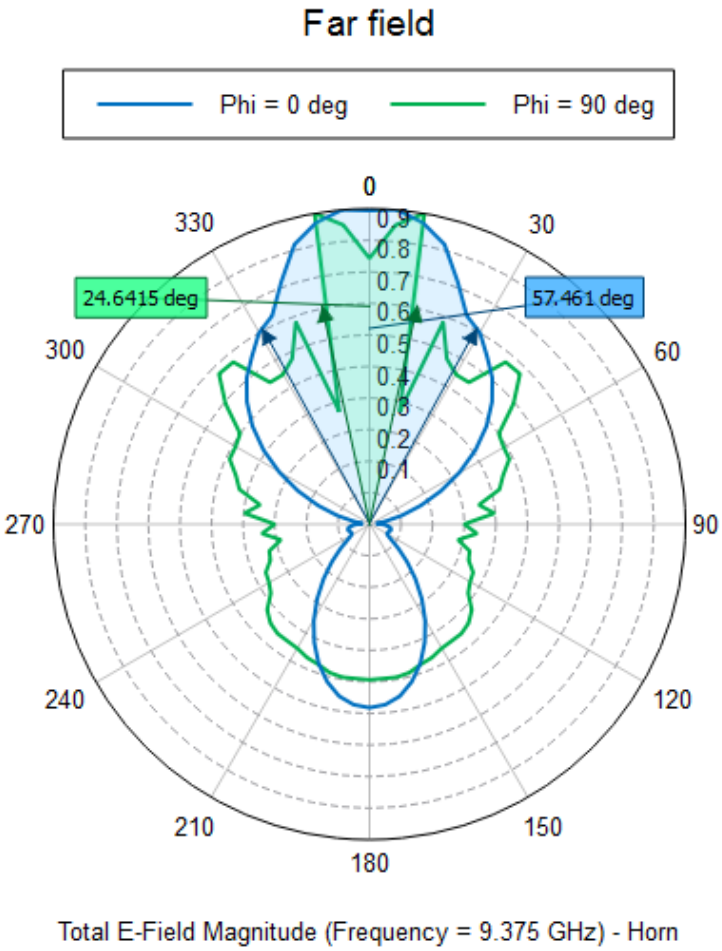


Рис. 2.13. Диаграмма направленности рупорной антенны в двух плоскостях

Зависимость распределения электрического поля в раскрыве антенны от пространственной координаты лучше получить в прямоугольных координатах.

Для этого во вкладке ***Home*** главного меню необходимо нажать на клавишу ***Cartesian***. Двойной клик мыши на пункте ***NearField1*** в меню проекта, как и прежде, отобразит рассчитанные результаты. Необходимо получить две нормированные зависимости, построенные на одном графике при различных значениях направления построения. В интерфейсе обработки результатов в списке ***Independent axis*** следует сначала указать ***X position***, а для второй зависимости ***Y position***.

На рис. 2.13 и рис. 2.14 показаны примеры полученных зависимостей.

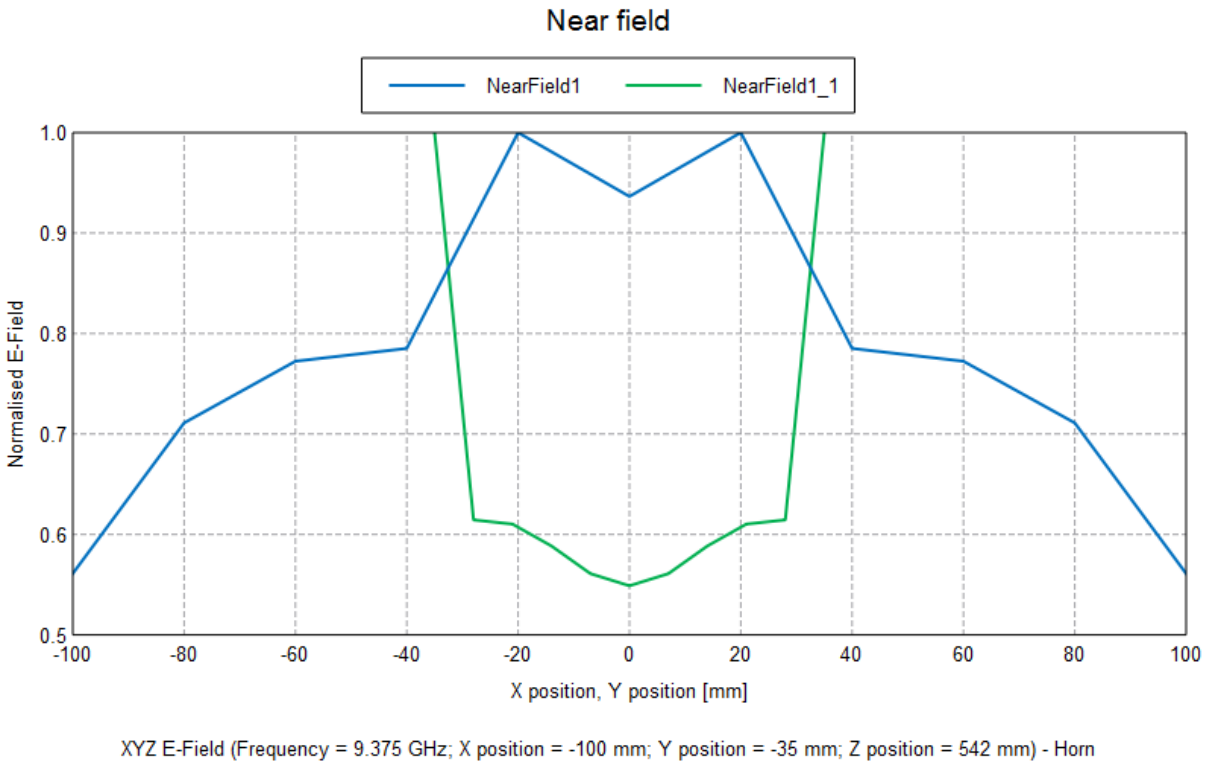


Рис. 2.14. Распределение электрического поля в раскрыве рупора

На этом моделирование рупорной антенны и обработка полученных результатов закончены. Проведите аналогичный расчет для H-секториального рупора и сравните полученные данные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет и измерение характеристик устройств СВЧ и антенн: учеб. пособие / Ю.Е. Мительман [и др.] ; под общ. ред. Ю.Е. Мительмана. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 140 с.

2. Мительман, Ю.Е. Проектирование антенных систем в ANSOFT HFSS / Ю.Е. Мительман. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – 49 с.

3. Сильвестер, П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / П. Сильвестер, Р. Феррари ; пер. с англ. С.Н. Хотяинцева ; под ред. Ф.Ф. Дубровки. – М. : Мир, 1986. – 229 с.

Электронный образовательный текстовый ресурс

Зейде Кирилл Михайлович

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕНН В ALTAIR FEKO

Подготовка к публикации *А.В. Овчинниковой*
Н.В. Лутовой
Компьютерный набор *К.М. Зейде*

Рекомендовано Методическим советом УрФУ
Разрешено к публикации 02.10.2018
Электронный формат – pdf
Объем 1,23 уч.-изд. л.



620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
Информационный портал УрФУ
http://www.urfu.ru