

Министерство науки и высшего  
образования РФ



К.М. Зейде

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕНН В ALTAIR FEKO. ЧАСТЬ 2

Электронный образовательный текстовый ресурс

Учебно-методические материалы по дисциплине «Автоматизированное проектирование высокочастотных устройств» и «Численные методы электродинамики» для студентов-бакалавров и студентов-магистров. Направления 11.03.01 и 11.04.01 «Радиотехника»

Учебно-методические материалы рассчитаны для самостоятельного освоения базовых принципов работы в Altair FEKO. В материалах рассмотрены основные принципы автоматизированного проектирования для моделирования и анализа антенн, на примере щелевой волноводной антенны и конической диэлектрической антенны

Подготовлено департаментом радиоэлектроники и связи

Екатеринбург  
2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Щелевая волноводная антенна.....	5
2. Диэлектрическая антенна .....	11
Библиографический список.....	20

## 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 быстрый мультиполей (multilevel 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, гидродинамика, акустика, механика и др. Использование программных модулей в рамках одного проекта позволяет проводить полномасштабные мультифизические вычислительные эксперименты.

Цель данного пособия – познакомить студента с методами проектирования ряда антенн средствами CADFEKO. Следует указать, что, будучи второй частью, эта работа является логическим продолжением первой [1]. Автором не рекомендуется рассматривать эти указания по отдельности, так как предлагаемые материалы призваны решить, в известной степени, различные задачи. Если в первой части методических указаний подробным образом описывались все стадии моделирования самых типовых антенн (вибраторная антенны и рупорная антенна), включая обработку и анализ получаемых результатов в модуле POSTFEKO, то во второй части, постпроцессинговый раздел полностью исключен. Это сделано для того, чтобы студенты могли закрепить навыки работы с САПР в процессе самостоятельной работы.

В данной работе подробно описаны методы проектирования двух антенн с несколько более сложной топологией, по сравнению с предложенными в предыдущем ЭОР [1]: щелевая волноводная антенна и коническая диэлектрическая антенна. Главный акцент сделан на создание моделей антенн, и в целом, на работу в модуле CADFEKO.

# 1. ЩЕЛЕВАЯ ВОЛНОВОДНАЯ АНТЕННА

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

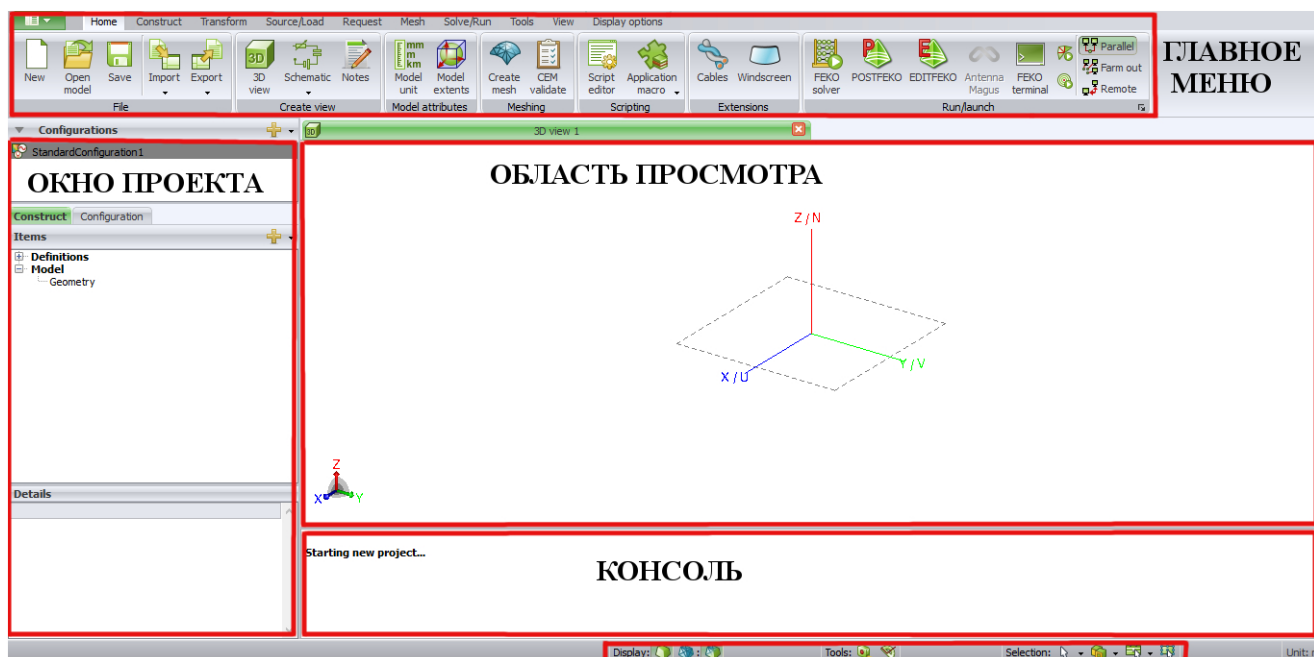


Рис. 1.1. Главное пользовательское окно CADFEKO

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**, 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, что бы в процессе исследования исключить путаницу в обозначениях. Клавиша **Evaluate**, предназначена для проверки правильности задания переменной (в строке вывода

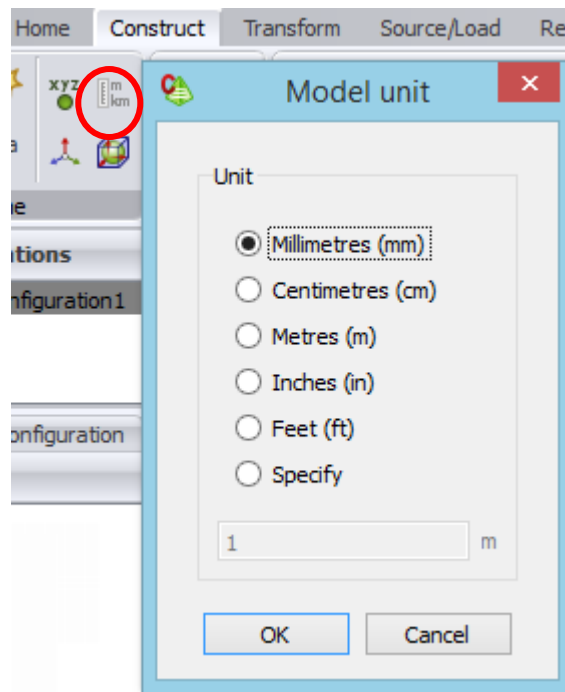


Рис. 1.2. Выбор единицы измерения

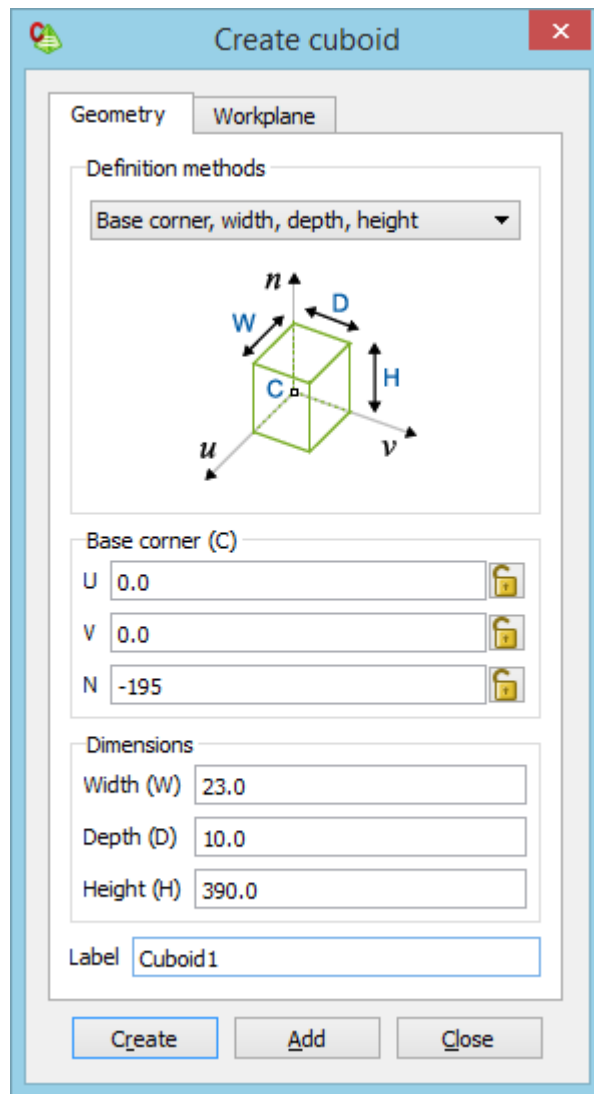
*Value*, появляется значение величины в не экспоненциальном виде). Инициализируем переменную  $wl$  (wavelength – длина волны) со значением 32 мм. Эта величина обозначает резонансную длину волны, для определения положения щелей. После нажатия на кнопку *Create* (клавиша *Add* служит для перехода к инициализации новой переменной без выхода из диалогового окна), в списке *Definitions* вкладке *Construct* (в окне проекта) появиться 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 –  $z0$  и число пи –  $pi$ ). Самостоятельно задайте переменную  $n$ , которая соответствует количеству щелей волноводной антенны.

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 ситуации. Реализация топологии щелевой волноводной антенны предполагает размещение в пространстве металлических поверхностей, форма и размер которых повторяет элементы

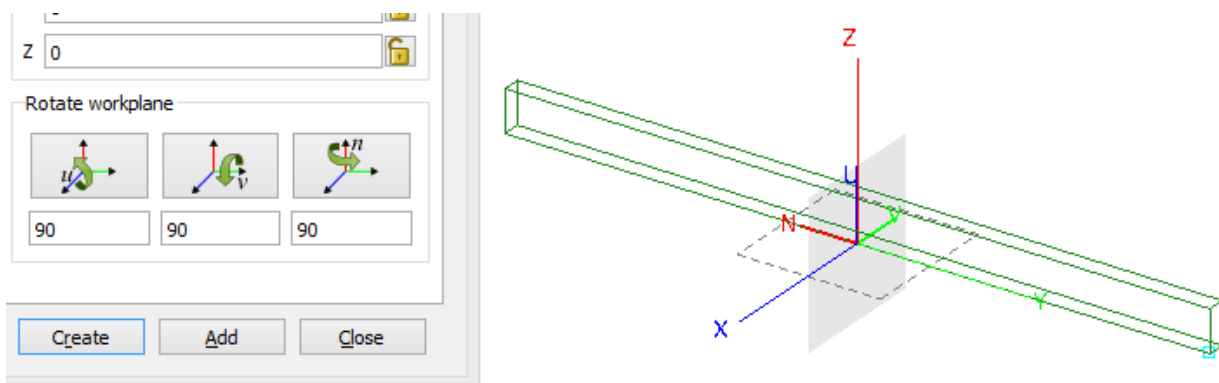
антенны. Фактически реализуемая геометрия представляет собой один параллелепипед с набором вырезанных из одной из его поверхностей прямоугольников.

Прежде всего, необходимо определиться с ориентацией антенны в пространстве системы. Это необходимо для того, что бы на этапе анализа результатов, можно было без труда соотнести плоскость построения диаграммы направленности с плоскостью антенны. Условимся, что излучающая поверхность антенны должна быть перпендикулярна поверхности XOY.

Приступим к черчению геометрии антенны. Для начала, необходимо расположить волновод. Для этого во вкладке **Construct** главного меню выберем пункт **Cuboid**. В открывшемся диалоговом окне необходимо ввести габаритные параметры элемента, а так же координаты его основания. На **Ошибка! Источник ссылки не найден.**<sup>3</sup> показано диалоговое окно с параметрами, которые необходимо указать. После этого, элементу необходимо придать должное положение в пространстве. Во вкладке **Workplane** того же окна имеются три клавиши поворота геометрии вокруг соответствующих осей. Поворачивая волновод относительно требуемых осей расположите его таким образом, что бы та стенка, на которой, в последствие, будут размещены щели была перпендикулярна оси XOY. Малое основание параллелепипеда так же должно быть перпендикулярно этой плоскости. Подобная формулировка проиллюстрирована на 04. После нажатия клавиши **Create** в области просмотра появиться заданная структура, а в меню проекта в разделе **Construct – Model – Geometry**, указатель объекта, – **Cuboid1**.



1.3. Размещение прямоугольного волновода

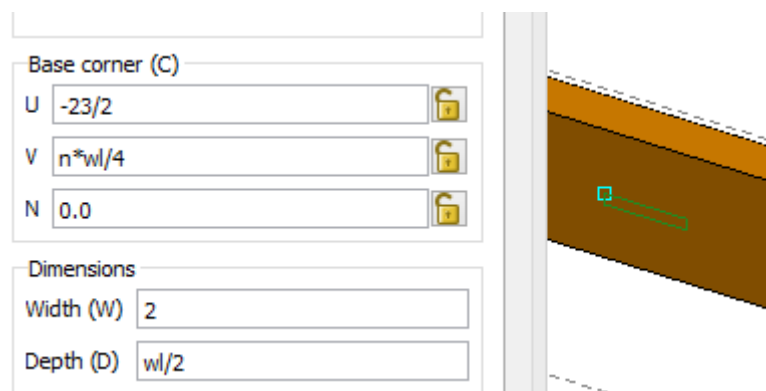


1.4. Ориентация антенны в пространстве

Строго говоря, антенна может быть ориентирована любым другим образом в пространстве. Особое внимание на это следует обращать при решении задач со сторонним источником.



Теперь, необходимо приступить к моделированию щелей на волноводе. Ход действий следующий: вначале на требуемой поверхности волновода размещаются прямоугольные пластины, а затем специальной функцией они вырезаются из этой структуры. Во вкладке **Construct**, главного меню следует выбрать **Rectangle**. Согласно конструкции моделируемой антенны необходимо размещать прямоугольные элементы на поверхности волновода. В этом случае так же удобно пользоваться вращением рабочей поверхности, как на 04. При размещении «щелей» следует точно следовать выкладкам сделанным ранее: длина щели –  $wl/2$ , ширина щели – 2 мм, отступ последней щели от стенки волновода –  $n*wl/2$  для поперечных и  $n*wl/4$  для продольных щелей (множитель перед  $wl$  может быть другим, в зависимости от геометрии антенны, однако в любом случае он должен быть целочисленным). 05 показывает возможное положение первой щели.

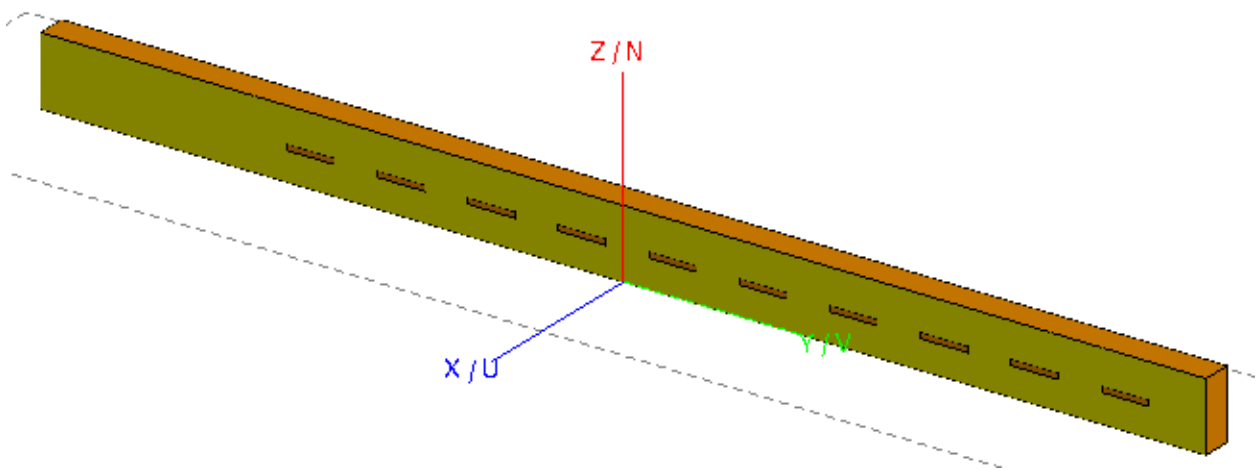


1.5. Размещение щелей на волноводе

После того, как положение первой щели окончательно определено, вместо клавиши **Create**, удобно воспользоваться клавишей **Add** – это действие размещает смоделированный элемент, и без сброса его настроек автоматически переходит к размещению нового. На рисунке обозначены расстояния между соседними щелями – это единственный параметр, который необходимо изменить. Последовательно размещая щели, меняя их положения, завершите процедуры для последней щели клавишей **Create**.

После того как, все щели размещены на поверхности волновода, их необходимо выбрать единой группой. Для этого, зажав клавишу **Shift** на

клавиатуре, следует кликать по ним левой кнопкой мыши, либо в области просмотра, либо в меню проекта (указатели *Rectangle1* – *Rectangle10*). Выбранные элементы геометрии подсвечиваются желтым цветом в области просмотра. Далее, во вкладке **Construct**, главного меню необходимо выбрать действие **Subtract from**. Программа предложит выбрать геометрию, из которой необходимо исключить выбранные элементы. Процедура будет ожидать действия пользователя – следует выбрать волновод, просто кликнув по нему в области просмотра. Таким образом, на стенке волновода образуются сквозные щели. Пример моделируемой антенны представлен на Об.



1.6. Щелевая волноводная антенна в программе FEKO

Для проведения электродинамического анализа антенны необходимо назначить возбуждение электромагнитных волн в системе. Для настоящей модели наиболее логичным выбором является волноводный порт, расположенный на торцевой стенке волновода (на рис. 1.6. справа). В [1] уже было показано, как следует назначать такого типа порты на прямоугольные волноводы, при рассмотрении рупорных антенн.

Задание для самостоятельной работы: назначьте волноводный порт, постройте диаграммы направленности антенны в дальней зоне на двух частотах 9375 МГц и 9675 МГц в диапазоне углов, соответствующих видимой зоне антенны (см. указания [2]). Сделайте выводы по полученным характеристикам.

## 2. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АНТЕННА

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

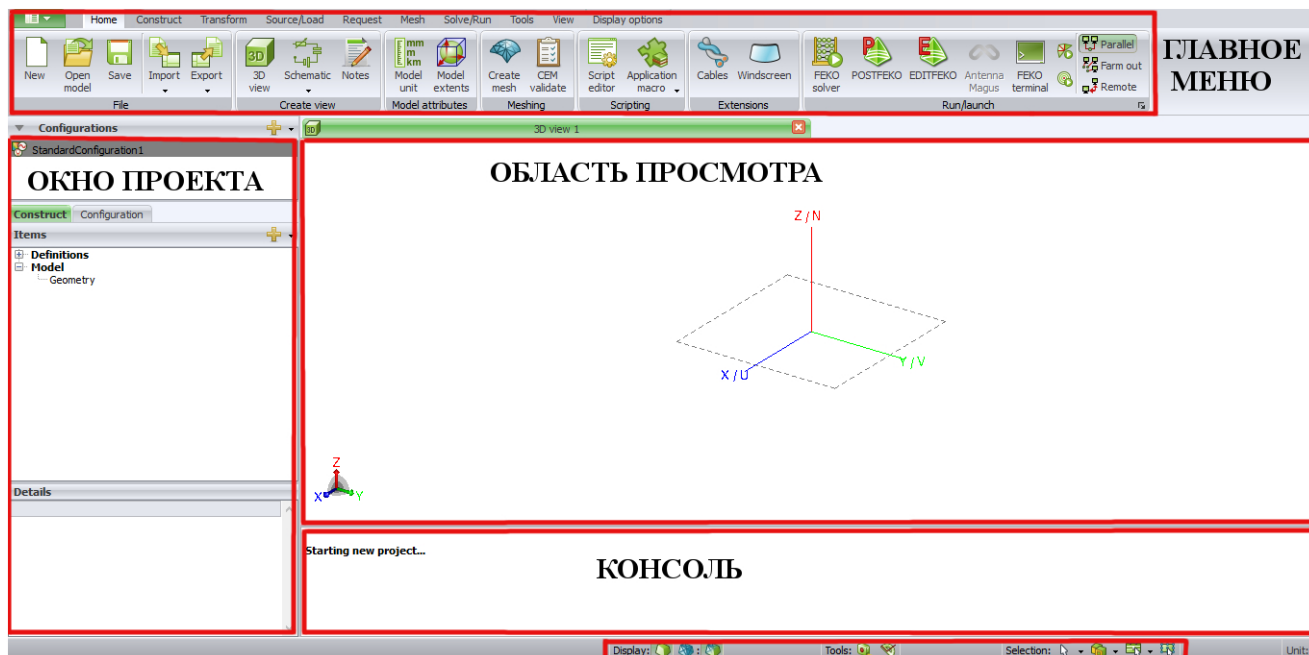


Рис. 2.1. Главное пользовательское окно CADFEKO

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*.

В данной работе мы моделируем конструкцию конкретной антенны, поэтому можем обойтись без задания переменных в системе. Тем не менее, это может оказаться удобным механизмом для факториальной или параметрической оптимизации модели. В данном случае такой необходимости нет, поэтому мы можем сразу приступить к вычерчиванию топологии антенны.

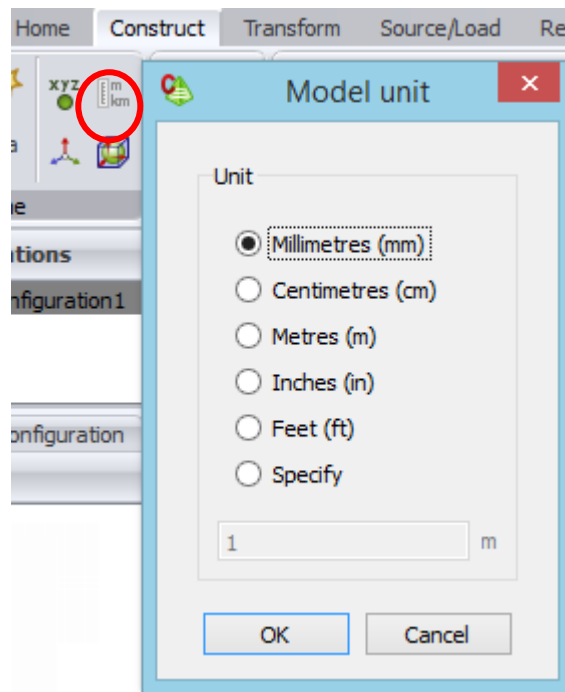


Рис. 2.2. Выбор единицы измерения

Во вкладке *Construct – Create solid* нужно выбрать элемент *Cone*. В появившемся окне (рис. 2.3) мы можем задать координаты точки создания фигуры (*Base centre*), а также её параметры: радиус основания (*Base radius*), высоту (*Height*), радиус верхнего основания (*Top radius*). Для удобства дальнейших вычислений точкой формирования фигуры будет начало координат. Радиус основания 22,5 мм, высота 200 мм, верхний радиус 14 мм.

Сформированный конус – стержень диэлектрической антенны. Теперь необходимо вычертить его верхнюю часть. Для начала на верхней части конуса следует создать характерное округление геометрии антенны. Во вкладке *Construct – Create surface* выбираем элемент *Paraboloid*. В появившемся окне (рис. 2.4) мы можем задать координаты точки создания фигуры (*Base centre*), а также её параметры: радиус (*Radius*), глубину фокуса (*Focal Depth*). Параметры указаны в окне создания элемента (рис. 2.4).

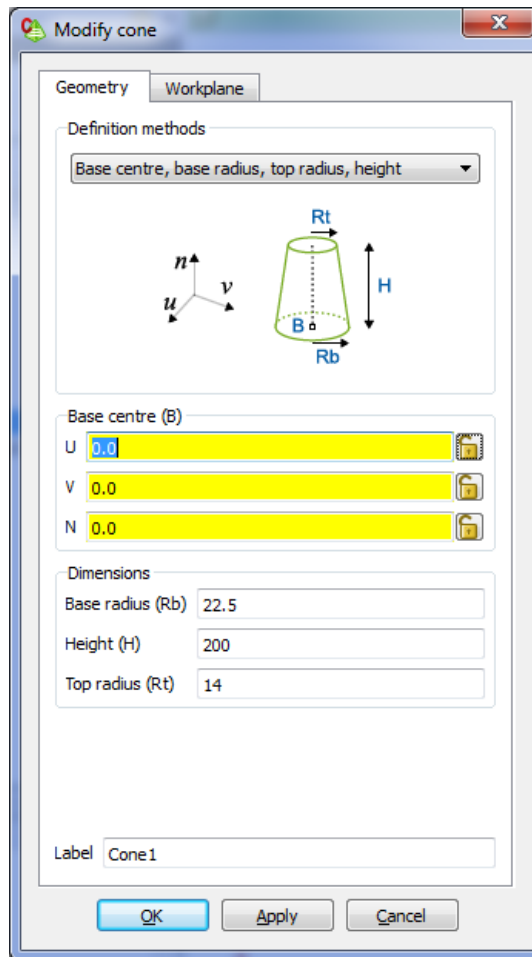


Рис. 2.3. Окно формирования конуса

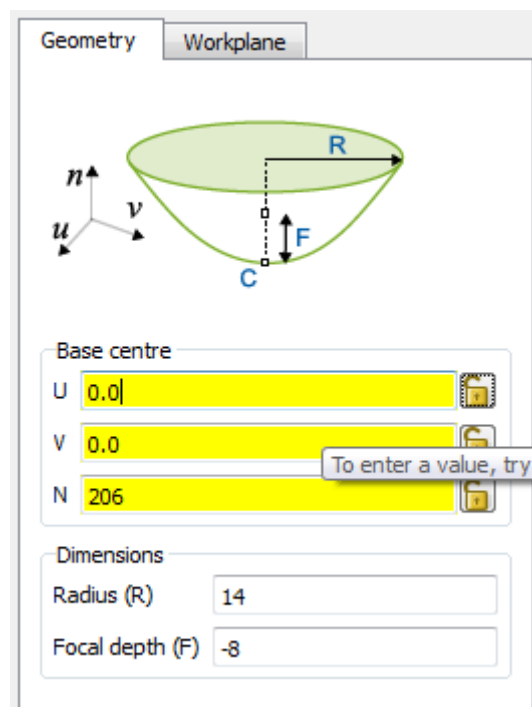


Рис. 2.4. Окно параметров для формирования параболоида

Далее следует отсечь верхнюю часть антенны. Для этого в меню **Construct – Modify** используем операцию **Split**. В появившемся меню (рис. 2.5) в поле *N* следует указать значение (205+67). Теперь нужно объединить параболоид и конус, для этого в окне проекта выбираем объекты. Во всплывающем меню, которое вызывается правой кнопкой мыши, выбираем **Apply – Union**. Переходим к черчению волноводной части антенны.

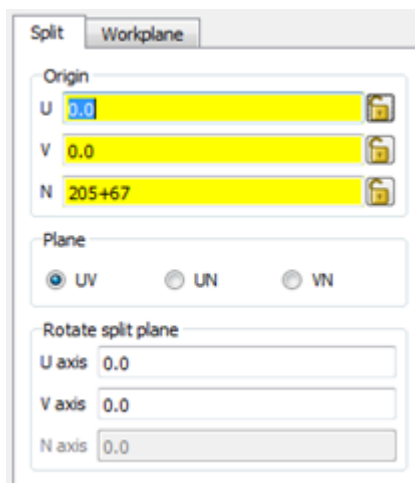


Рис. 2.5. Окно логической операции Split

Для моделирования круглого волновода во вкладке **Construct – Create solid** нужно выбрать примитив **Cylinder**. В появившемся окне мы задаем радиус основания 28,5 мм, высоту 67 мм (рис. 2.6). Далее с помощью функции **Split** с координатами 25,5 мм необходимо отсечь соответствующую часть цилиндра.

Последним шагом будет создание характерной выемки для диэлектрического стержня. Для этого создадим еще один цилиндр с указанными на рис. 2.7 параметрами. Следует обратить внимание, что центр фигуры находится в координатах (0;0;1), тем самым толщина стенки волновода получается равной 1 мм. Теперь нужно вырезать из одного цилиндра другой, для этого в окне проекта выбираем первый цилиндр и в меню, которое вызывается правой кнопкой мыши, **Apply – Subtract from** и нажимаем на второй цилиндр.

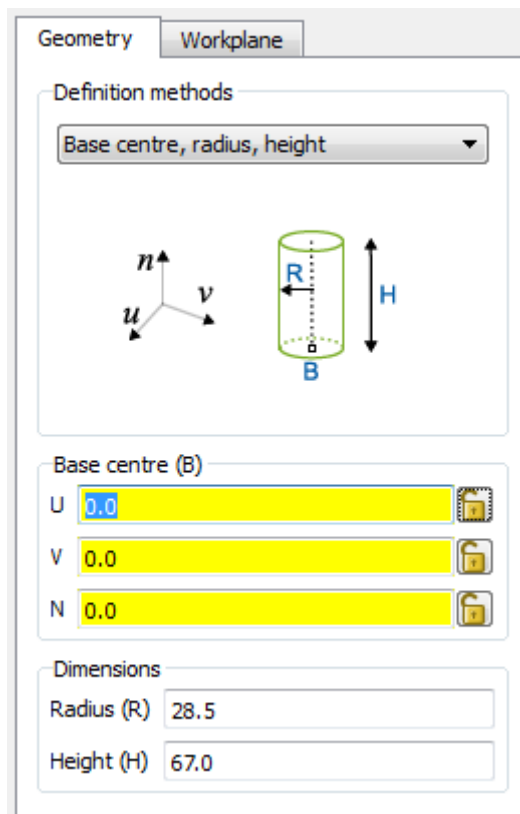


Рис. 2.6. Параметры конфигурации первого цилиндра

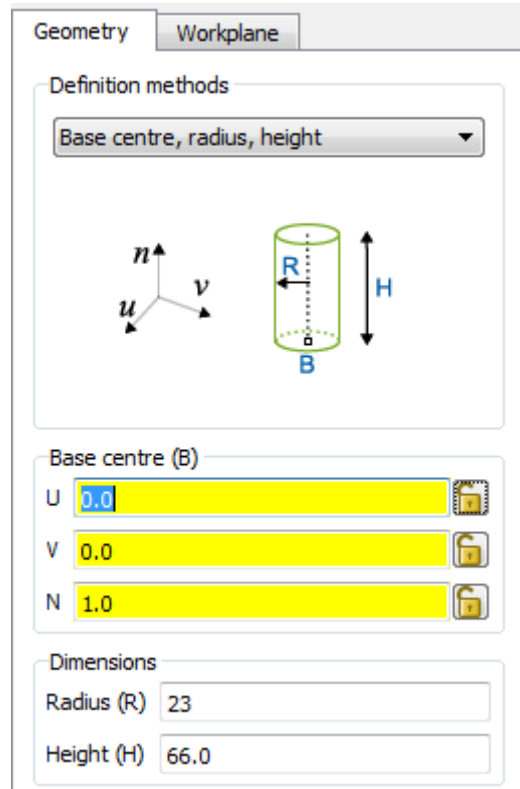


Рис. 2.7. Параметры конфигурации второго цилиндра

Переходим к электродинамической характеристике модели. Нам нужно задать диэлектрическую проницаемость стержня антенны, для этого слева в меню **Construct** щелкнуть правой кнопкой по вкладке **Media** и в появившемся окне выбрать пункт **dielectric medium**. В появившемся окне необходимо задать диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon = 2,2$ ) и тангенс угла диэлектрических потерь среды (в нашем случае он равен 0), после чего нажать кнопку ОК. Далее, во вкладке **model** следует выбрать стержень антенны, затем во вкладке **details** – **Region** вызвать контекстное меню правой кнопкой, нажать на пункт **Properties** и в появившемся окне установить характеризованную только что среду. Электрофизические параметры диэлектрического стержня назначены. Промежуточная модель антенны представлена на рис.2.8.

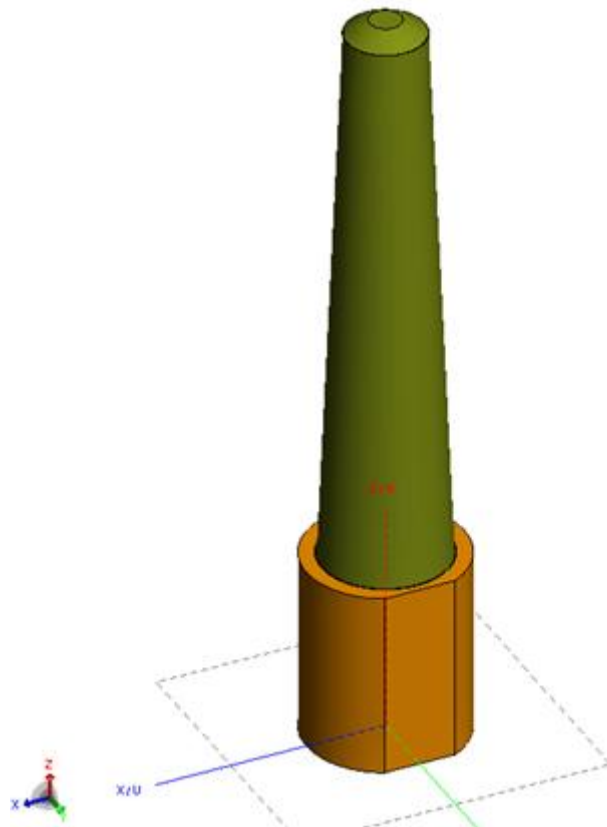


Рис. 2.8. Модель диэлектрической антенны

Для проведения электродинамического анализа необходимо определить возбуждение антенны. Для начала нам нужно создать поверхность, на которой будет расположен порт. Удобнее всего для этой цели использовать примитив эллипса. Параметры этой геометрии показаны на рис. 2.9.



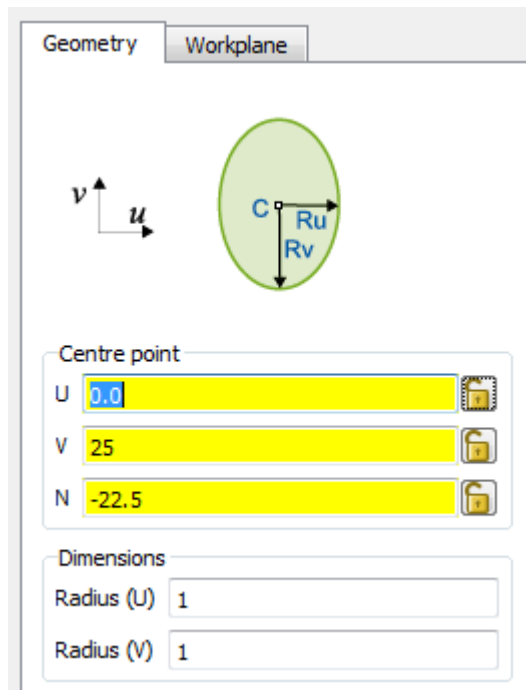


Рис. 2.9. Параметры эллипса для моделирования порта антенны

Далее в меню проекта во вкладке *Details* выбираем плоскость вновь созданного эллипса, вызываем контекстное меню и во вкладке *Create port* выбираем *Waveguide port*. Следующим шагом нужно задать возбуждение порта. Для этого в меню *Source/Load* выбираем пункт *Waveguide excitation*.

Переходим к определению областей анализа модели. В меню *Configurations* вызываем контекстное меню вкладки *Request*, далее выбираем пункт *Far field*. Параметры, которые следует указать даны на рис. 2.10.

Будем считать, что геометрия антенны готова. Теперь нужно указать решателю каким именно численным методом должна быть рассчитана модель. Это важный пункт, так как при неправильном выборе метода, результат может оказаться некорректным или программа вовсе не сможет получить результат. Волноводная часть вместе с портом считаются методом моментов. Диэлектрик – методом конечных элементов (рис. 2.11). Данный выбор обусловлен математической точностью расчетов границ геометрии и требованиями самого ядра решателя САПР.

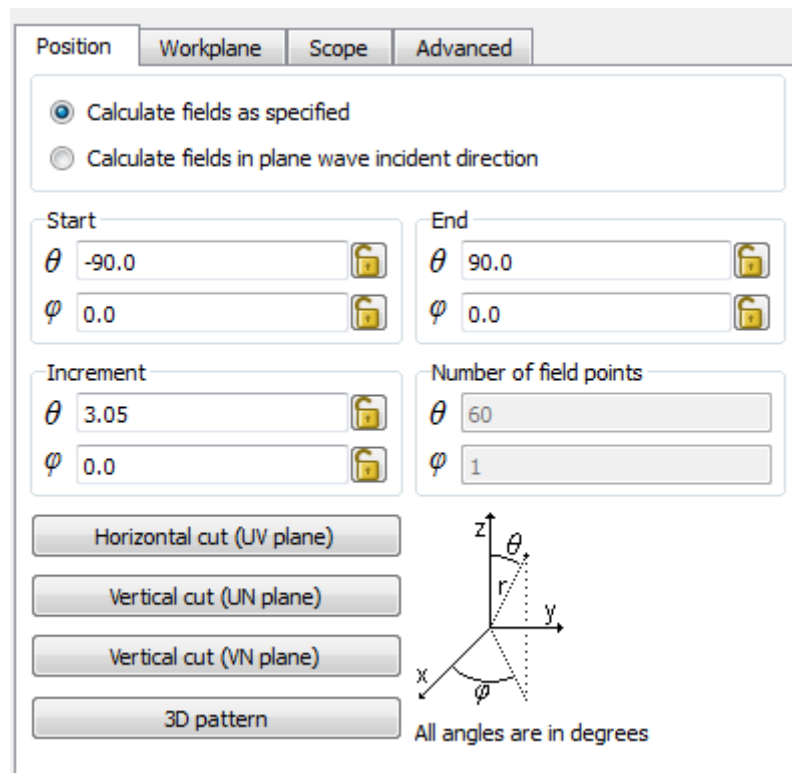


Рис. 2.10. Окно Far field для задания параметров расчета дальнего поля антенны

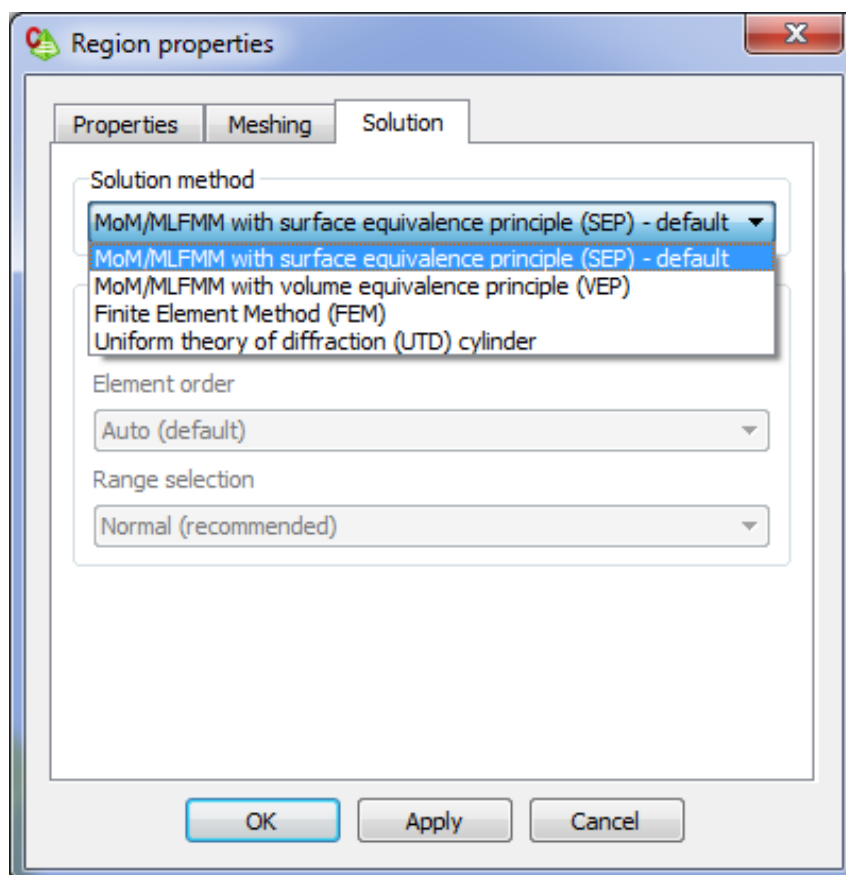


Рис. 2.11. Назначение численных методов для элемента топологии модели

Задание для самостоятельной работы: необходимо получить диаграмму направленности антенны в дальней зоне на частоте равной 3060 МГц. На диаграмме указать ширину главного лепестка антенны, а также максимальный уровень боковых лепестков.

Данная часть указаний подготовлена, в соответствии с материалами, изложенными в выпускной квалификационной работе бакалавра [3].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зейде К.М. Проектирование антенн в Altair FEKO: электронно-образовательный текстовый ресурс УрФУ, 2018. – 35 с. Режим доступа: <https://study.urfu.ru/Aid/ViewMeta/13745>
2. 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.
3. Яндовский Н.Г. Разработка алгоритма оптимизации объемной конечно-элементной сетки на примере диэлектрической антенны: выпускная квалификационная работа бакалавра, Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, 2018. – 39 с.
4. Мительман Ю.Е. Проектирование антенных систем в ANSOFT HFSS. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012.— 49 с. Режим доступа: <http://www.study.urfu.ru/Aid/ViewMeta/10966>
5. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / перевод с английского С.Н. Хотяинцева, под редакцией Ф. Ф. Дубровки. — М.: Мир, 1986. – 229 .

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕНН В ALTAIR FEKO. ЧАСТЬ 2

Электронный образовательный текстовый ресурс

Подготовка к публикации

*К.М. Зейде*

Рекомендовано Методическим советом УрФУ

Разрешено к публикации \_\_\_\_\_

Электронный формат – pdf

Объем 0,9 уч.-изд. л.



620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Информационный портал УрФУ

<http://www.study.urfu.ru>