



**Ю. Е. Мительман**

# **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН В ANSYS ELECTROMAGNETICS SUITE**

**Электронное текстовое издание**

Методические указания по лабораторным работам для студентов всех форм обучения направления 11.03.01 и 11.04.01 «Радиотехника»

Сформулированы цели лабораторных работ, требования к их выполнению, содержание заданий, рекомендации по выполнению домашних расчетов, экспериментальной части и оформлению отчетов

## ВВЕДЕНИЕ

ANSYS Electromagnetics Suite 18.1 (2017.1) – это пакет программ, предназначенный для моделирования радиоэлектронных устройств и расчета их характеристик. Конструктивный модуль HFSS design позволяет, используя набор графических примитивов, начертить виртуальную модель исследуемого устройства, расчетные модули, использующие методы конечных элементов, моментов, интегральных уравнений, физической оптики и т. д., проводить расчет электромагнитного поля для построенной модели, а постпроцессор дает возможность провести обработку и детальный анализ полученных результатов.

В процессе конструирования виртуальной модели необходимо задать тип расчета модели, начертить анализируемое устройство, либо собрать его схему из готовых элементов, указать материалы и свойства для каждого объекта в модели, включая граничные условия, определить порты. Кроме того, постановка задачи включает в себя установку частотного диапазона для анализа и определение условий сходимости решения.

После запуска ANSYS Electronics Desktop на экране монитора появится рабочий стол (рис. 1). Интерфейс рабочего стола состоит из линейки меню, панелей инструментов и нескольких окон. Пункты меню содержат полный набор команд, которые позволяют решать все задачи возникающие в процессе моделирования. Панели инструментов позволяют осуществлять быстрый доступ к наиболее часто используемым командам.

В окне менеджера проекта (Project Manager) отображается структура проекта, которая представлена в виде дерева проекта. Верхним узлом в дереве проекта является имя проекта. По умолчанию проекту присваивается имя Project $n$ , где  $n$  – порядковый номер проекта, открытого в текущей сессии работы с ANSYS.

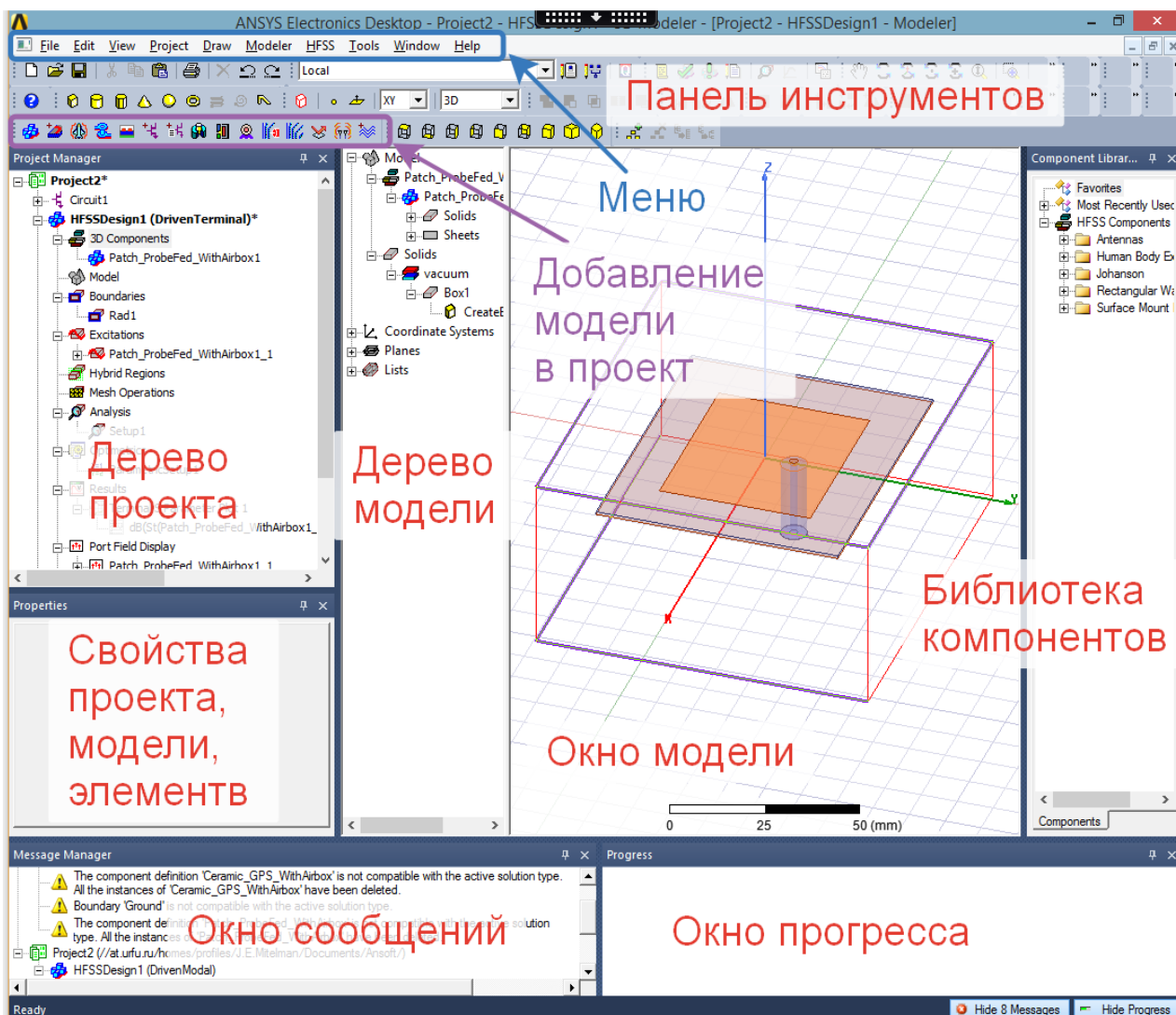


Рис. 1. Интерфейс рабочего стола ANSYS Electronics Desktop

Для того, чтобы начать работать с проектом, в него необходимо включить хотя бы одну модель (Design). Чтобы добавить в текущий проект новую модель необходимо, используя меню, дать команду Project → Insert **Name** Design, где **Name** – имя исполнительного модуля (рис. 2). Другой способ добавления модели в проект – нажатие кнопки на панели инструментов, соответствующей определённому модулю (рис. 1). В результате выполнения этой команды в дереве проекта будет добавлен второй узел, которому по умолчанию присваивается имя **NameDesignm**, где **m** – порядковый номер модели, добавленной в текущий проект. В этом узле содержится вся информация о модели, включая условия расчета, схемы, топологии, переменные модели, граничные условия,

рассчитанную структуру поля, результаты пост-процессорной обработки и т. д. Нижний узел дерева проекта будет содержать перечень материалов, использованных при построении модели.

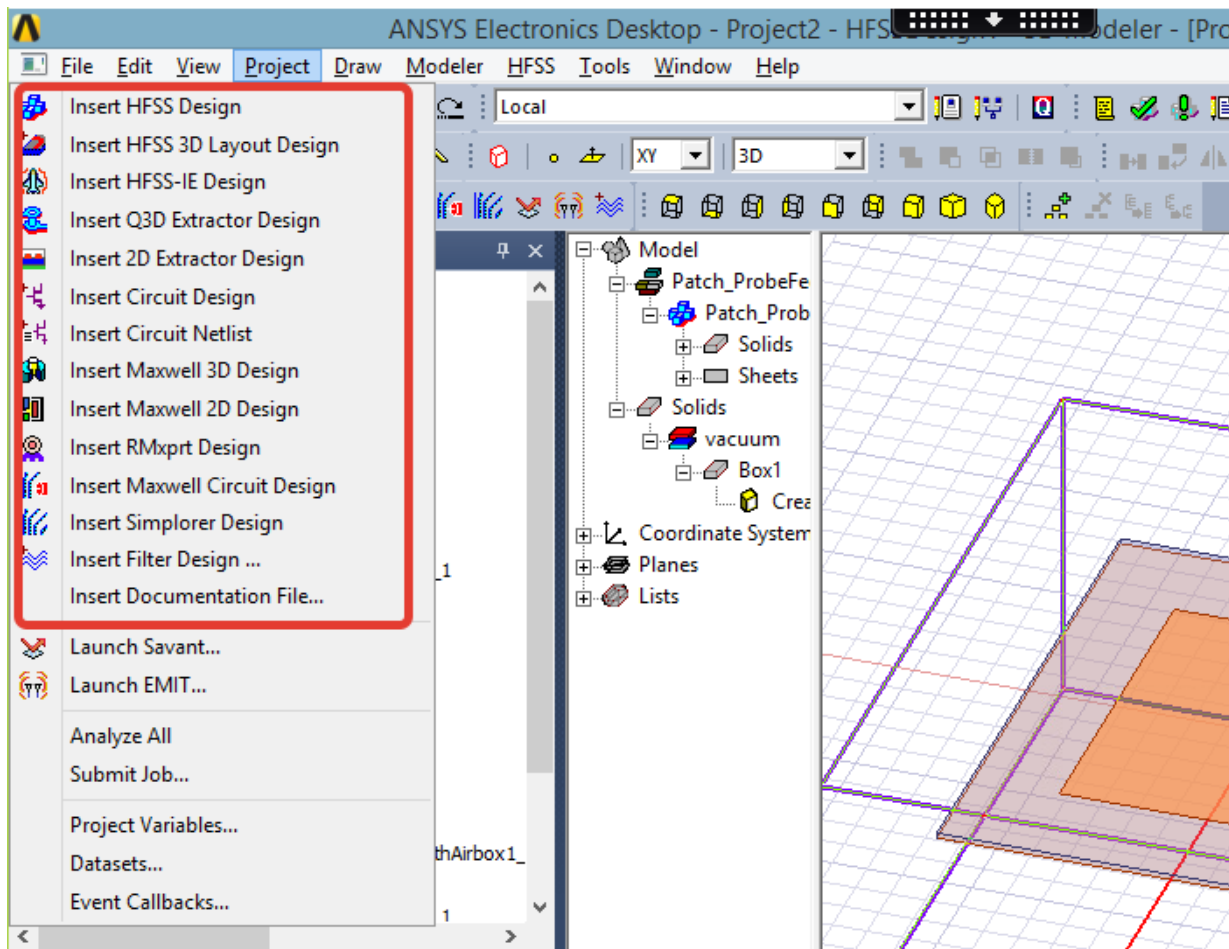


Рис. 2. Добавление модели в проект

Включение в проект новой модели HFSS или HFSS-IE приведет к открытию окна 3D-конструктора (3D Modeler), которое появится справа от окна менеджера проекта (Project Manager). При помощи 3D-конструктора создается геометрия модели. Окно 3D-конструктора разбито на две области – дерево модели, в котором отражаются все действия пользователя в процессе построения модели, и окно модели, которое содержит ее графическое изображение. Для работы с 3D-конструктором необходимо задать единицу измерения размеров модели. Этой цели служит команда меню Modeler → Units. В открывшемся диалоговом окне из списка выберем в качестве единицы измерения mm (миллиметр) и нажмем кнопку ОК (рис. 3).

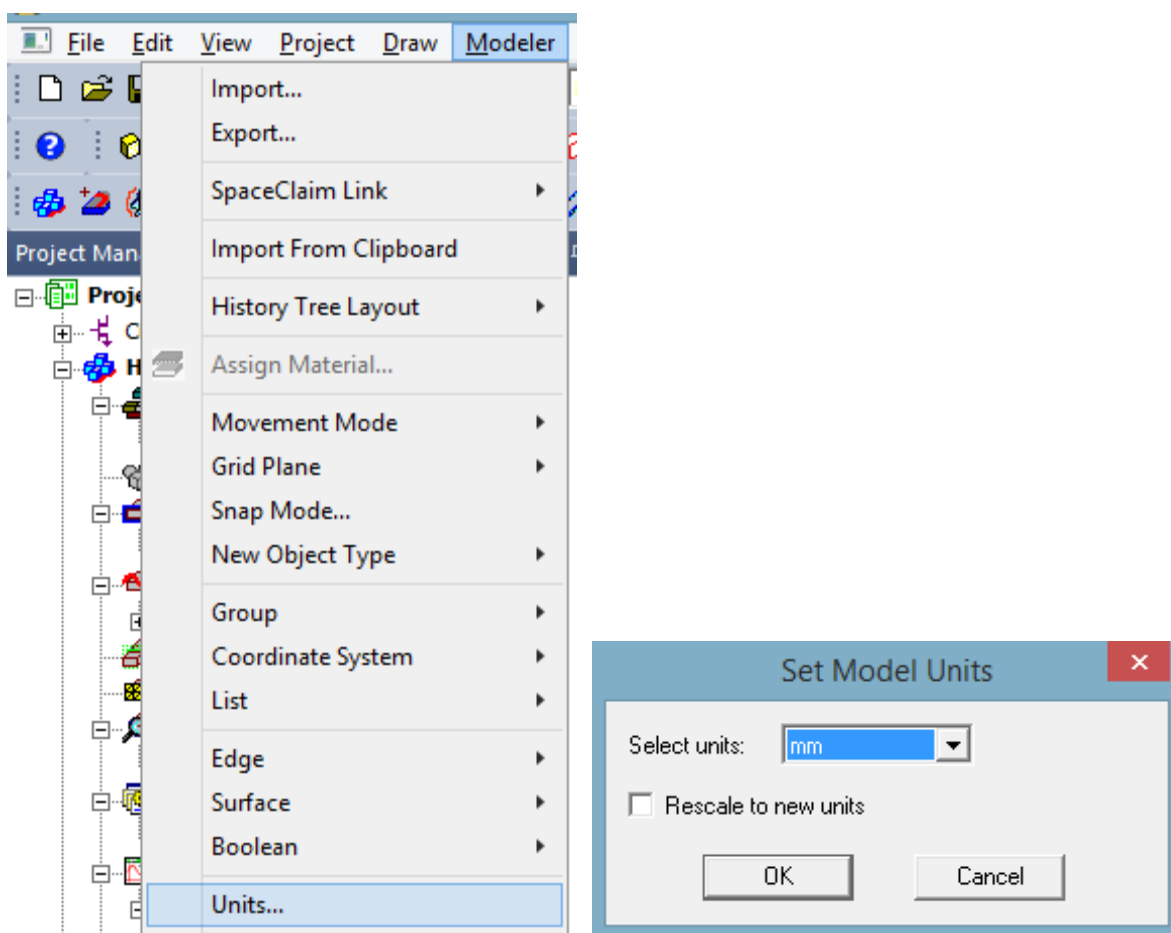


Рис. 3. Установка единицы измерения размеров в модели

Интерфейс стола HFSS содержит еще три дополнительных окна. Окно свойств отображает либо параметры выделенного элемента в модели, либо данные выделенного пункта дерева проекта. В окне сообщений выводятся сообщения, связанные с развитием проекта, такие как сообщения об ошибках, возникающих в ходе конструирования модели, или информационные сообщения о ходе выполнения анализа модели. Окно прогресса отображает процесс решения задачи анализа построенной модели. Модель в HFSS состоит из графических примитивов – базовых блоков конструкции (линий, прямоугольников, кругов, шаров, прямоугольных параллелепипедов и т. д.) с обозначенными свойствами, материалами и т. д., настроек системы координат, граничных условий, источников возбуждения, гибридных условий, настроек сетки разбиения, настроек решения, настроек оптимизации и параметрического анализа, данных постобработки решения, настроек для расчета излучения в дальней и ближней зонах.

Модуль HFSS использует метод конечных элементов (МКЭ) как основной для расчета характеристик. При использовании МКЭ вся анализируемая модель разбивается на тетраэдры, и электромагнитное поле определяется решением уравнений Максвелла в узловых точках тетраэдров, а внутри них поле аппроксимируется некими простыми функциями, соединяющими электромагнитное поле в узловых точках. Эти функции могут быть постоянными, линейными, квадратическими или смешанных порядков (разными для разных тетраэдров в модели). Не разбиваются на тетраэдры, например, идеально проводящие или хорошо проводящие тела (из материала PEC – perfect electric conductor, copper, aluminum, iron, gold, silver и т. д.), их поверхность разбивается на треугольники, которые являются основаниями тетраэдров в соседних телах, и они описываются граничными условиями на поверхности, без расчета поля внутри. По умолчанию внешние границы модели в HFSS считаются идеально проводящими стенками, если на них не заданы пользователем специальные граничные условия.

При решении задач об излучении антенн в модуле HFSS необходимо, таким образом, задавать граничные условия на внешних поверхностях модели, иначе моделируемая антенна окажется экранированной от внешнего пространства. Самыми распространенными при анализе антенн граничными условиями являются условия излучения (Radiation). Они поглощают электромагнитную волну на границе модели, по сути, «раздувая» границы бесконечно далеко от модели. В HFSS они иногда описываются как поглощающие граничные условия (Absorbing Boundary Condition или ABC).

Излучающая поверхность не обязательно должна быть сферической, но она должна быть внешней по отношению к модели, выпуклой по отношению к источнику излучения, и отдалена по меньшей мере на четверть длины волны от излучающего источника. Если расстояние от излучателя до этой границы будет меньше, то накладываемые на решение граничные условия не будут соответствовать действительности, и решение будет ошибочным. Соответствие накладываемых на модель условий излучения реальности будет тем лучше, чем дальше граница излучения от излучателя, но тем большую область пространства

необходимо будет разбивать на конечные элементы и больше тратить вычислительных ресурсов на это. В некоторых случаях граница излучения может располагаться ближе к излучателю, чем четверть длины волны, например, в той части границы излучения, где ожидается слабое излучение. Поле в дальней зоне антенны после наложения условий излучения рассчитывается в соответствии с теоремой эквивалентности как поле, излученное токами с границы излучения.

При оптимальном разбиении модели на конечные элементы, чем больше будет тетраэдров в модели, тем точнее будет расчет, но тем больше времени и вычислительных ресурсов он будет требовать. Для определения оптимального количества и конфигурации конечных элементов в ANSYS реализован адаптивный метод дискретизации модели. Он заключается в последовательном многошаговом разбиении модели на все большее количество тетраэдров с преимущественным уменьшением их размера в электроразличимых областях (областях с наиболее быстрым изменением величины и направления напряженности поля).

На первой итерации модель разбивается на тетраэдры с размерами, связанными с длиной волны в примитивах модели и размерами самих элементов (чем меньше примитивы, тем меньше тетраэдры вблизи них), притом разбивается достаточно грубо при настройках по умолчанию (на малое количество больших по размеру конечных элементов), после чего происходит расчет характеристик модели с определением ее матрицы рассеяния. На второй итерации сетка разбиения учащается, увеличивается количество элементов, преимущественно, в электроразличимых областях, и снова происходит расчет характеристик модели с определением ее матрицы рассеяния. Матрицы рассеяния на двух итерациях сравниваются и рассчитывается числовая оценка их различия (Delta S). Эта оценка сравнивается с заданным максимальным для нее значением в настройках решения (maximum Delta S), и, если ошибка не превышает заданное значение, то разбиение на последней итерации считается достаточно точным и дальнейший расчет характеристик происходит именно с этой сеткой.

Если же ошибка превышает заданное значение, то происходит следующая итерация адаптивного уменьшения размеров конечных элементов, расчет характеристик и матрицы рассеяния модели и сравнение ее с полученными в предыдущей итерации. При снижении ошибки до заданного уровня, последняя итерация считается решенной с достаточной степенью точности.

Аналогичным образом происходит разбиение конечноэлементной сетки в модуле HFSS-IE с той поправкой, что в нем используется преимущественно метод интегральных уравнений (IE – Integral Equations) для решения внутренней задачи поиска распределения токов по поверхностям примитивов в модели без вычисления поля в объеме этих примитивов (если это не задано в самих условиях решения). Токи определяются в узловых точках треугольников на поверхностях примитивов модели. Электромагнитное поле в антенных задачах в дальней зоне затем определяется как решение задачи об излучении этих токов. Соответственно в модуле HFSS-IE нет необходимости ограничивать модель антенны дополнительными граничными условиями, в отличие от модуля HFSS. Получается, что в HFSS-IE для той же модели будет меньше конечных элементов, чем в HFSS, что приведет к меньшему расходу вычислительных ресурсов, однако круг решаемых задач получится уже. Поскольку на конечные элементы разбиваются только поверхности в модели, для экономии времени расчета лучше, там, где это обосновано, криволинейные поверхности аппроксимировать плоскими: криволинейные примитивы (цилиндры, сферы и т. д.) заменять на примитивы с плоскими гранями (многогранники, кубы и т. д.), а малые по размеру объемные примитивы в модели (многогранники, цилиндры, спирали и т. д.) заменять плоскими (прямоугольники, круги и т. д.).



## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН**

Цель работы – ознакомиться с основами автоматизированного проектирования и моделирования микрополосковых антенн в ANSYS Electronics Suite, исследовать их характеристики.

Перед началом работы настоятельно рекомендуется ознакомиться с принципами работы полосковых (микрополосковых) антенн [1].

### **Теоретическая часть**

Возросшая потребность в легких, низкопрофильных, конформных и недорогих антеннах, которые можно размещать на ракетах, самолетах, автомобилях и других объектах, не нарушая их аэродинамических качеств, определила в последние годы новое направление в технике антенн – создание полосковых излучателей. Полосковые излучатели просты в изготовлении с использованием технологии создания печатных плат, обладают большой стабильностью и повторяемостью параметров, могут работать с любой поляризацией поля. Указанные достоинства полосковых антенн привлекли к ним внимание специалистов и в настоящее время разработано значительное число оригинальных конструкций полосковых антенн. К недостаткам полосковых антенн следует отнести их узкополосность и относительно невысокий КПД. Полосковые антенны можно разделить по принципу действия на три группы: полосковые резонаторные излучатели, полосковые вибраторные излучатели и полосковые щелевые излучатели. В данной работе исследуются резонаторные полосковые излучатели.

Два основных типа полосковых резонаторных излучателей показаны на рис. 4. Обычно излучающий элемент возбуждается коаксиальной линией (рис. 5) либо несимметричной полосковой линией (рис. 6).

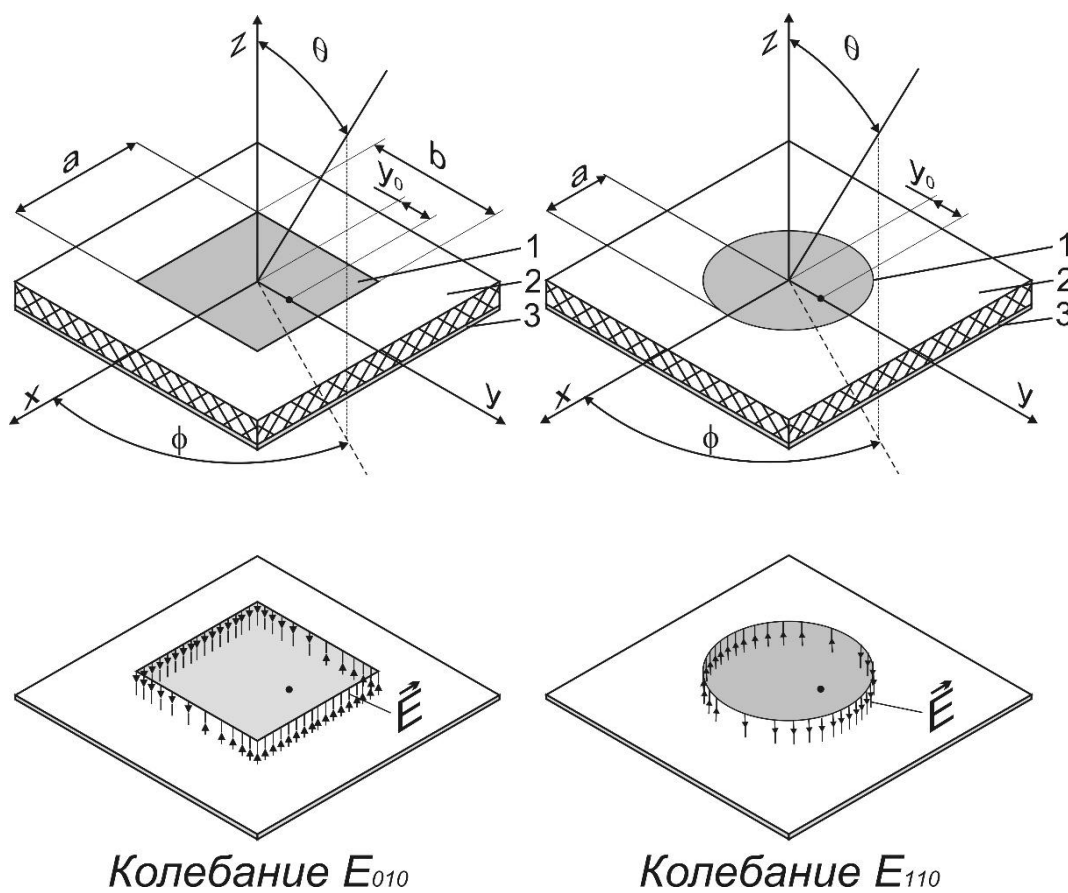


Рис. 4. Прямоугольный (слева) и круглый (справа) полосковые резонаторные излучатели:  
 1 – проводящая пластина; 2 – диэлектрическая подложка; 3 – проводящий экран

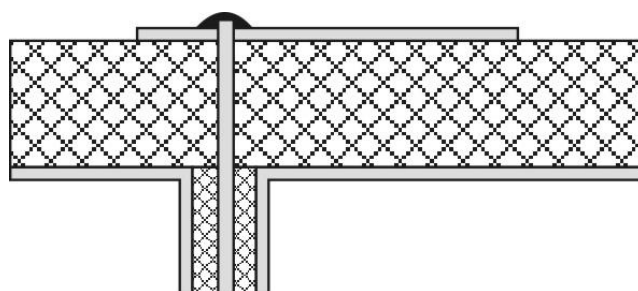


Рис. 5. Разрез полосковой антенны с питанием коаксиальной линией

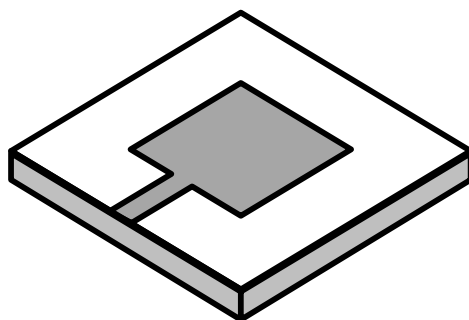


Рис. 6. Возбуждение полосковой антенны несимметричной полосковой линией

Теория прямоугольных резонаторных полосковых излучателей может быть построена на основе разных моделей. Одна из таких моделей базируется на представлении антенны в виде разомкнутого отрезка несимметричной полосковой линии длиной, равной половине длины волны в линии передачи (полуволновый разомкнутый резонатор). При возбуждении отрезка линии в нем устанавливается режим стоячей волны, который обуславливает вариацию поля вдоль резонансного размера. Энергия электромагнитного поля излучается через щели между кромками полоскового проводника и экраном. Для основного типа колебаний торцевые щели излучают синфазно, а боковые противофазно (рис. 7).

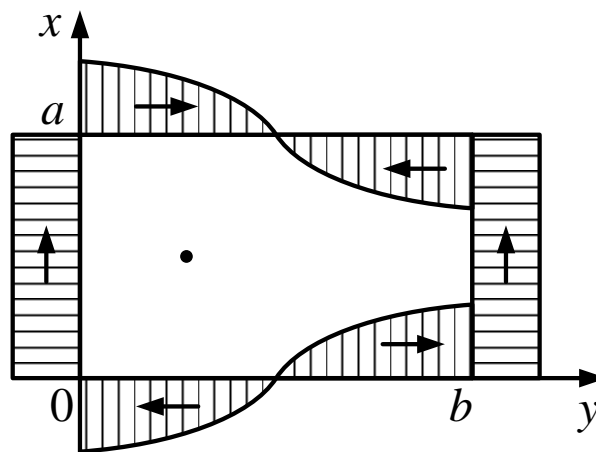


Рис. 7. Распределение токов по контуру полоскового излучателя

Резонансная частота прямоугольного излучателя определяется размером стороны, параллельно которой смещается точка питания излучателя (резонансный размер  $b$  на рис. 4):

$$f_p \approx 0,48 \frac{c}{b\sqrt{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость подложки. Другой размер  $a$  прямоугольного полоскового резонатора называется шириной, и в основном определяет входное сопротивление излучателя. Входное сопротивление в точке резонанса чисто активное и равно:

$$R_{\text{вх}} \approx \frac{60\lambda}{a} \sin^2 \left( \frac{\pi y_0}{b} \right), \quad (2)$$

где  $y_0$  – смещение точки питания вдоль резонансного размера. Для круглого резонансного излучателя (рис. 4) резонансная частота определяется следующим выражением:

$$f_p \approx \frac{c}{3,41 \cdot a_{\text{эф}} \sqrt{\varepsilon}}, \quad (3)$$

где  $a_{\text{эф}} = a \sqrt{1 + \frac{2h}{\pi a \varepsilon} \left( \ln \left( \frac{\pi a}{2h} \right) + 1,772 \right)}$ ,  $h$  – толщина подложки.

Полосковый излучатель имеет максимум излучения по нормали к плоскости экрана. При расчете диаграммы направленности излучатель можно заменить эквивалентными магнитными токами, распределенными по периметру. Исходя из распределения эквивалентных магнитных токов, ДН на главной поляризации для прямоугольного полоскового излучателя можно рассчитать следующим образом в плоскости вектора  $\vec{E}$ :

$$F(\theta) = \cos \left( \frac{kb}{2} \sin \theta \right), \quad (4)$$

и в плоскости вектора  $\vec{H}$ :

$$F(\theta) = \cos \theta \cdot \frac{\sin \left( \frac{ka}{2} \sin \theta \right)}{\left( \frac{ka}{2} \sin \theta \right)}, \quad (5)$$

где  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число.

Вектор  $\vec{E}$  излучаемого поля в окружающем пространстве ориентирован параллельно линии, вдоль которой смещена точка питания, полоскового излучателя. Таким образом поляризация излучения полоскового излучателя, точка питания которого смещена вдоль одного из его размеров, является линейной. Подробнее принципы работы и способы расчета характеристик микрополосковых антенн изложены в [1, 2].

Исследуются одиночные полосковые излучатели. На рис. 8 приведены эскизы исследуемых в работе излучателей.

В излучателе № 1 резонатор питается коаксиальной линией через штырь в подложке. Если точка питания находится линии, параллельной стороне с размером  $b_2$ , то частота резонанса будет определяться этим размером. Размер  $b_1$  будет определять частоту резонанса при расположении точки питания на линии, параллельной стороне с этим размером. При расположении точки питания на диагональной линии возможно возбуждение двух колебаний с ортогональными структурами полей на резонансных частотах, соответствующих размерам сторон резонатора. Передвигая точку питания вдоль осей, можно добиться согласования резонатора с волновым сопротивлением питающей линии (50 Ом).

В излучателе № 2 резонатор питается микрополосковой линией. Для смещения точки питания в этом случае линия подводится к излучателю через паз, глубиной которого определяется входное сопротивление антенны. Согласование проводится с линией передачи сопротивлением 50 Ом путем регулирования глубины паза.

Круглый излучатель № 3 настраивается аналогично излучателю №1 с учетом того, что  $d = 2a$  в соответствии с рис. 4.

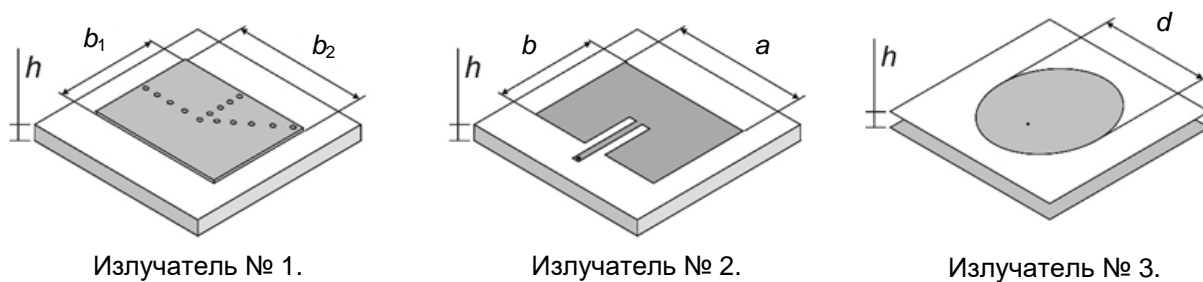


Рис. 8. Эскизы микрополосковых излучателей

### Домашнее задание

1. Рассчитать размеры излучателей № 1, 2 по формуле (1), 3 по формуле (3) (рис. 8) с использованием параметров подложки и центральной частоты рабочего диапазона из табл. 1. Для излучателя № 1 принять  $b_1 = b_2 = b$ , для излучателя № 2  $b = a$ . Рассчитать ширину микрополосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом.

**Подложки и частоты**

№ вар.	Диэлектрик подложки	$h$ , мм	$\varepsilon$	$\text{tg}\delta$ , $\times 10^{-3}$	Частота, МГц
1	Полистирол с наполнителем СТ-16	1,5	16	3	900
2	Арилокс с наполнителем ФЛАН-10	1,5	10	1,5	1200
3	Поликор	1,5	9,6	0,1	1400
4	Фторопласт ФФ-4	1,5	2,1	0,3	2100
5	Арилокс с наполнителем ФЛАН-3,8	1,5	3,8	1,2	3200
6	Фторопласт армированный ФАФ-4	1	2,6	1	3500
7	Арилокс с наполнителем ФЛАН-5	1	5	1,2	1800
8	Стеклотекстолит	1	4,5	25	2400
9	Полистирол с наполнителем СТ-3	1	3	9	3700
10	Плавленый кварц	1	3,8	0,1	2500
11	Полистирол с наполнителем СТ-16	2	16	3	433
12	Арилокс с наполнителем ФЛАН-10	2	10	1,5	868
13	Поликор	2	9,6	0,1	2000
14	Фторопласт ФФ-4	2	2,1	0,3	5200
15	Арилокс с наполнителем ФЛАН-3,8	2	3,8	1,2	5500
16	Фторопласт армированный ФАФ-4	2	2,6	1	5800
17	Арилокс с наполнителем ФЛАН-5	0,5	5	1,2	2600
18	Стеклотекстолит	0,5	4,5	25	1900
19	Полистирол с наполнителем СТ-3	0,5	3	9	2600
20	Плавленый кварц	0,5	3,8	0,1	2450

2. Определить положение (смещение от центра) точек питания в излучателях № 1 и 2 по формуле (2). Для излучателя № 3 использовать эту же формулу, взяв  $a = b$ . Волновое сопротивление питающей линии 50 Ом.

3. Рассчитать и построить в пределах углов  $-90^\circ \dots +90^\circ$  диаграмму направленности излучателей № 1 и 2 в главных плоскостях на резонансной частоте. По построенным ДН определить ширины главных лепестков.

**Практическая часть**

Загрузив программу, создадим новую модель HFSS (HFSS Design), нажав правой кнопкой на названии проекта в дереве проекта, и выбрав соответствующий пункт меню (рис. 9), либо нажав на соответствующую иконку на панели инструментов.

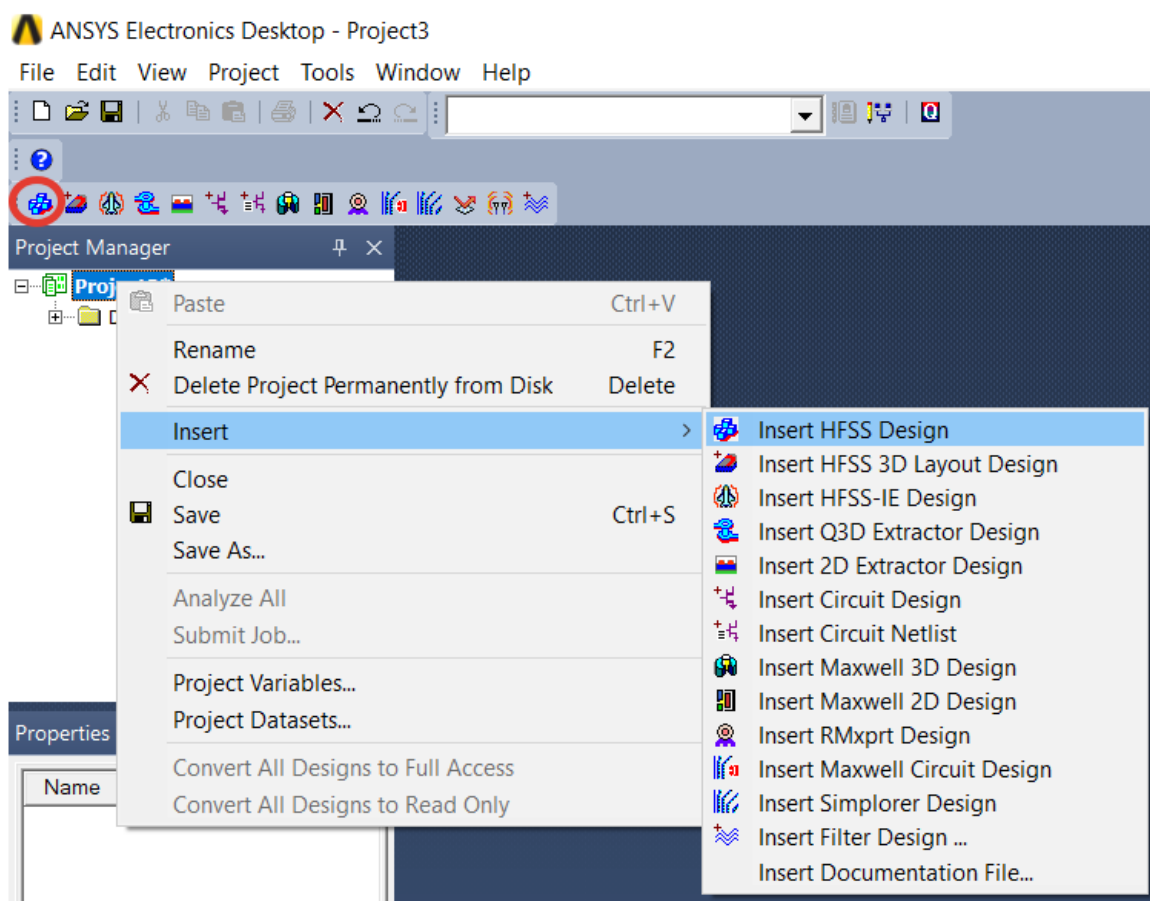


Рис. 9. Добавление модели в проект

Создадим подложку микрополосковой антенны, нарисовав прямоугольный параллелепипед (рис. 10). После нажатия на пункт меню необходимо нажать левой кнопкой мыши в окне модели последовательно на произвольные три точки для обозначения размеров и положения создаваемого примитива (элемента). Затем в дереве модели появится новый узел в разделе Solids (объемные объекты) в материале vacuum (вакуум) – Box1 (по умолчанию объекты создаются с именем *Objectp*, где *Object* – название класса объекта – Box, Cylinder, Line, Cone, Sphere и т. д., а *p* – номер объекта). Все объемные объекты в HFSS группируются по материалам, из которых они состоят. Внутри узла Box1 записываются все действия с ним и связанные объекты, если таковые есть. Первое действие – это создание объекта Box – CreateBox. В свойствах этого действия (рис. 11) можно изменить первоначально заданные при помощи мыши его размеры (XSize, Ysize, ZSize) и координаты начальной точки (Position), от которой отсчитываются размеры вдоль осей координат, в формате *x, y, z*.

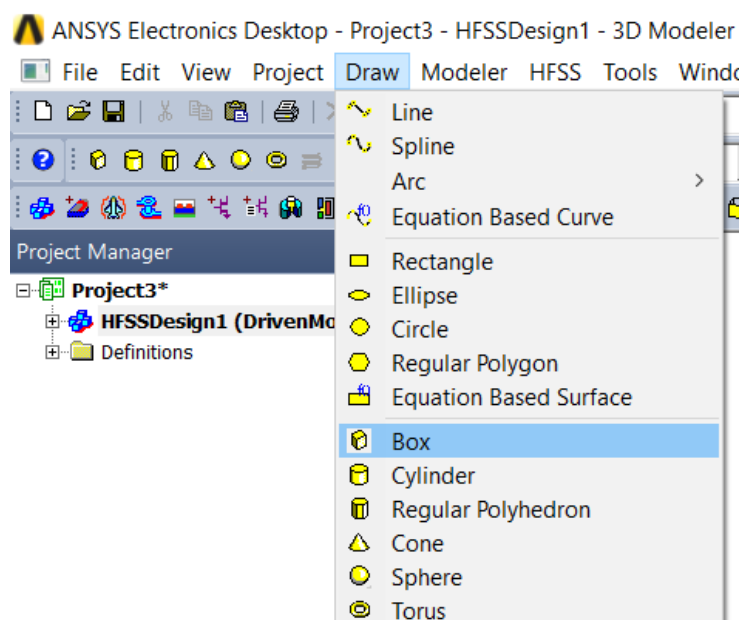


Рис. 10. Создание прямоугольного параллелепипеда

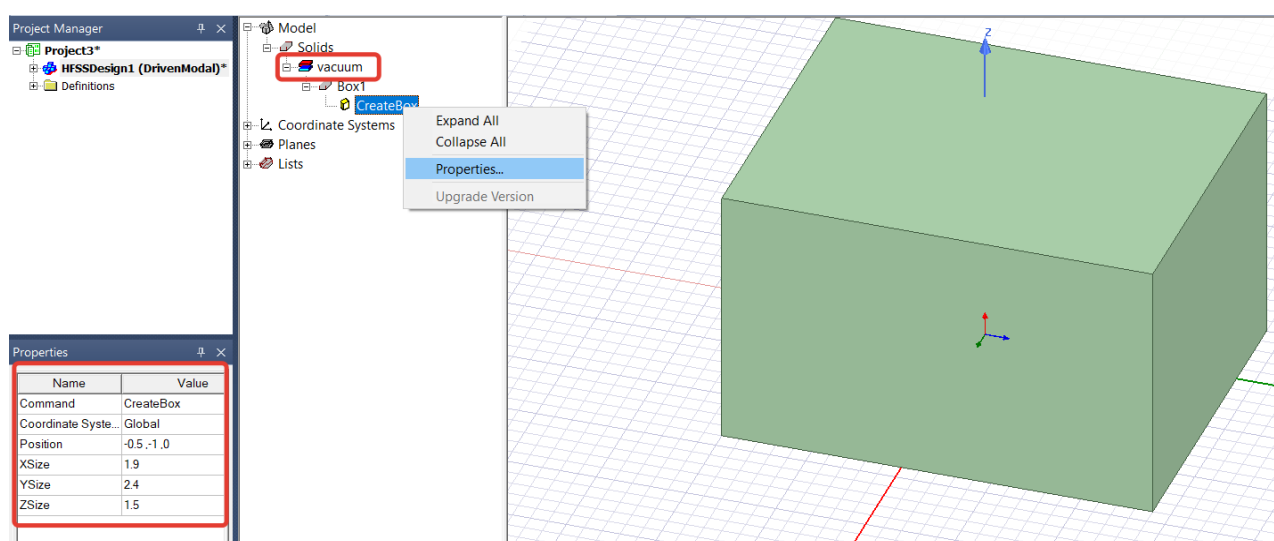


Рис. 11. Задание параметров объемной фигуры

Зададим размеры Box1. Размеры вдоль осей  $x$  и  $y$  зададим параметрами  $x_{sub}$ ,  $y_{sub}$ , а центр подложки поместим в начало системы координат: впишем в поле Position  $-x_{sub}/2$ ,  $-y_{sub}/2$ , 0 и нажмем Enter, после чего откроется окно ввода значения первого параметра  $x_{sub}$  (рис. 12). Будем считать размеры подложки вдоль осей  $x$  и  $y$  равными длине волны в свободном пространстве на заданной частоте и впишем в окно это значение, обязательно обозначив размерность (mm) после самого значения и нажмем Enter. Аналогично заполним содержимое окна для переменной  $y_{sub}$ . Далее запишем в поля XSize и YSize  $x_{sub}$ ,  $y_{sub}$  соответ-



ственно. Размер вдоль оси  $z$  обозначим буквой  $h$ , и зададим его в соответствии с табл. 1 (толщина подложки) таким же способом. После этих действий, чтобы в окне модели увидеть всю подложку необходимо нажать Ctrl+D.

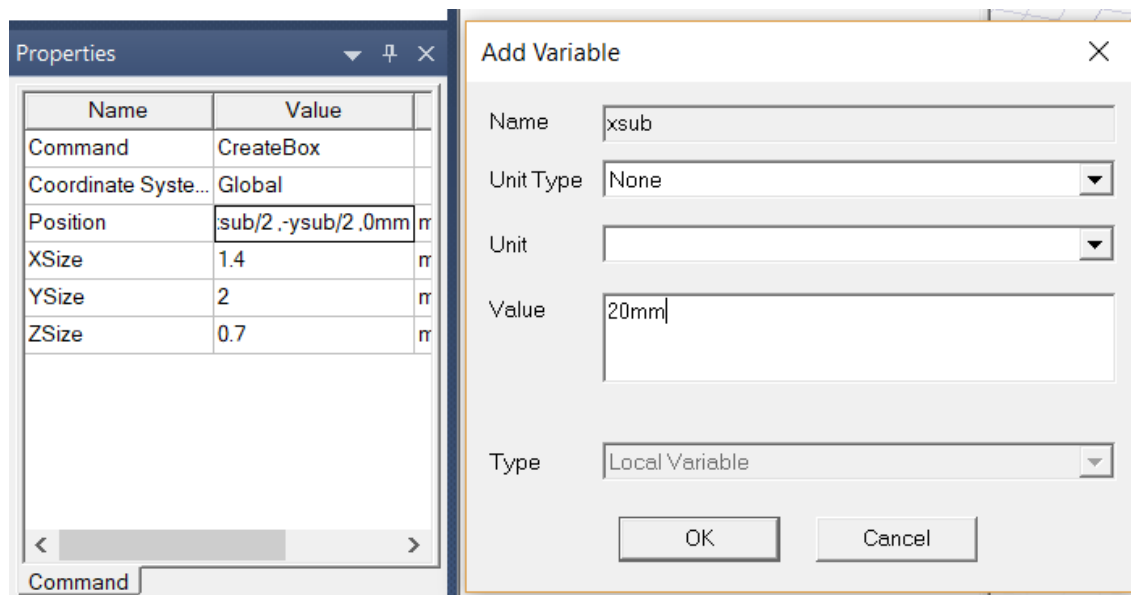


Рис. 12. Задание размеров и координат параметрами

Зададим материал подложки, нажав правой кнопкой мыши на vacuum и выбрав Properties (рис. 13). В открывшемся окне можно выбрать материал из библиотеки программы, отредактировать параметры материала в библиотеке либо добавить свое определение материала. Добавим новый материал, нажав кнопку Add Material. В открывшемся окне зададим имя материала (лучше всего называть его в соответствии с табл. 1. Впишем относительную диэлектрическую проницаемость (relative permittivity) и тангенс угла диэлектрических потерь (dielectric loss tangent) в соответствии с табл. 1. После сохранения материала и выбора его в качестве материала подложки, его название появится в дереве проекта вместо vacuum.

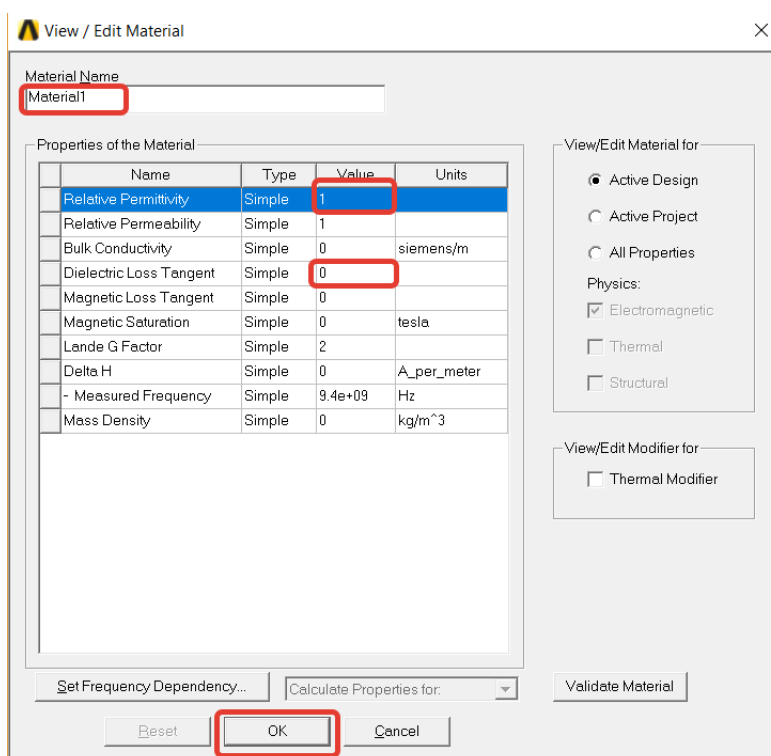
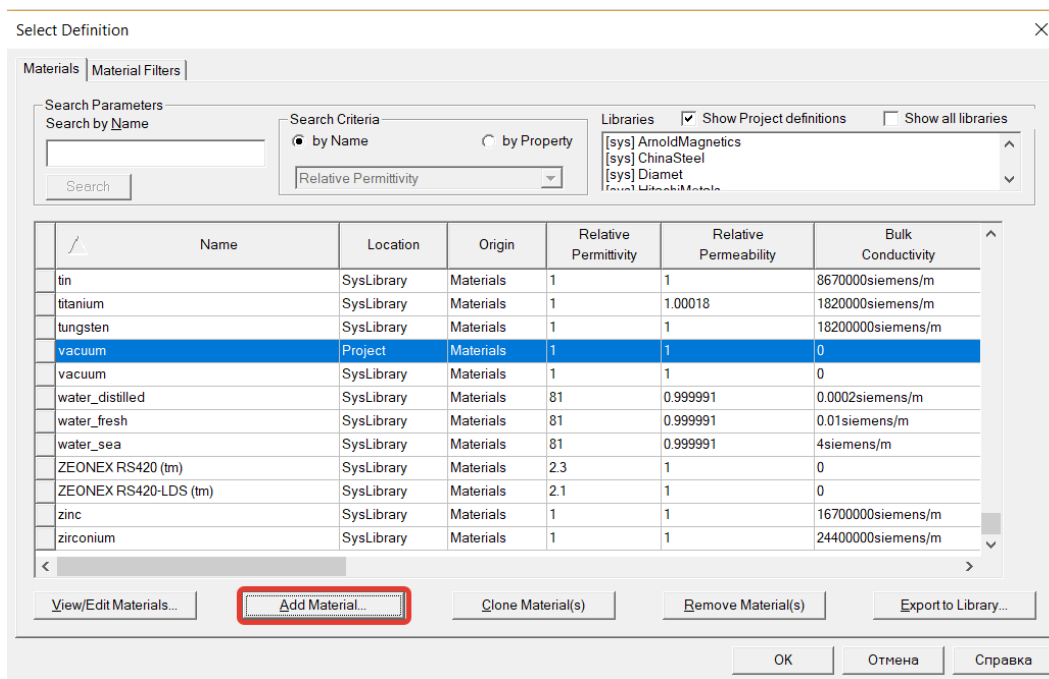
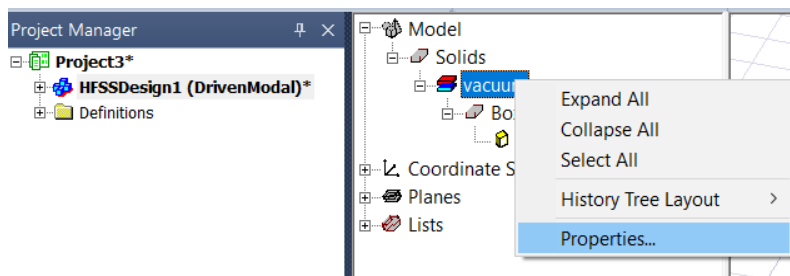


Рис. 13. Задание материала

В окне свойств материала можно задавать, кроме того, относительную магнитную проницаемость (relative permeability), удельную проводимость (bulk conductivity), тангенс угла магнитных потерь (magnetic loss tangent), параметры магнитных материалов и плотность вещества, но они в данной работе не используются. В этом же окне можно задать параметры анизотропии материала, выбрав в столбце type вместо simple другой вариант, и/или добавить частотную зависимость параметров материала (set frequency dependency...) в форме известных законов или по точкам, но эти возможности не пригодятся для данной работы.

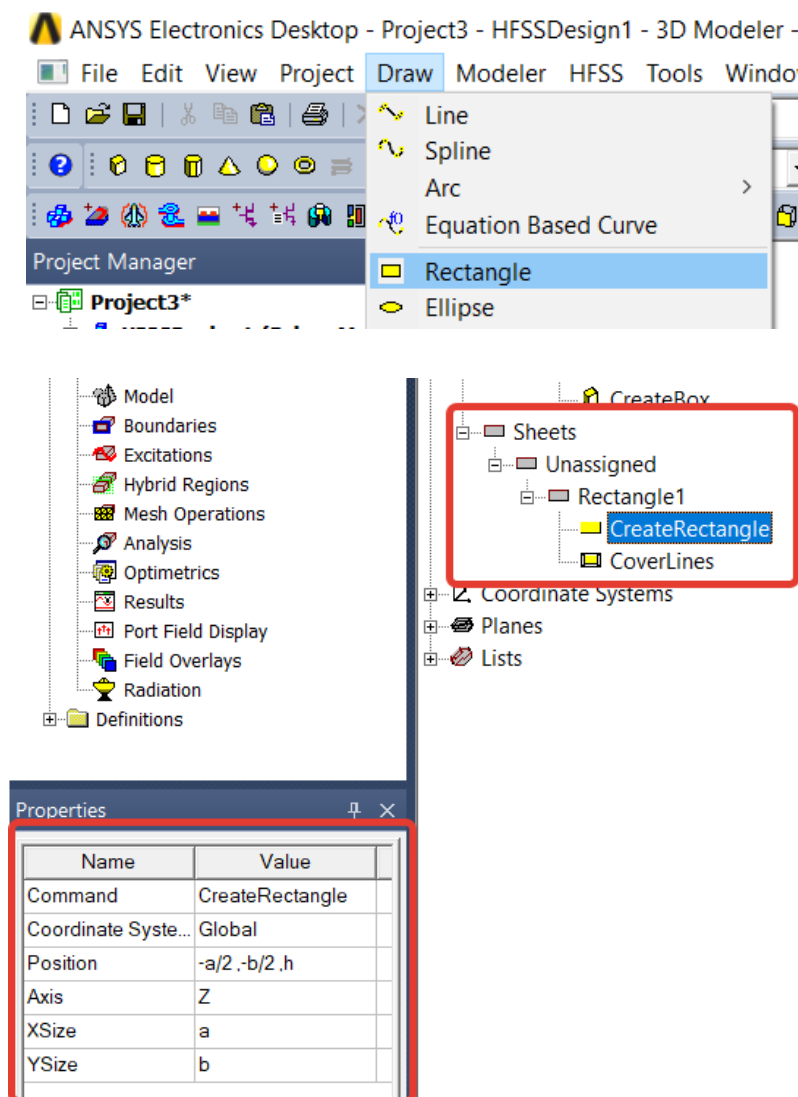


Рис. 14. Создание прямоугольника

Зададим проводящую пластину на подложке, нарисовав ее упрощенную модель в виде прямоугольника (рис. 14). После создания прямоугольника в де-

реве проекта появится объект Rectangle1, размеры которого в его свойствах необходимо задать в соответствии с рассчитанными в домашнем задании, используя переменные  $a$  и  $b$ . Axis в свойствах обозначает ось, вдоль которой расположена нормаль к прямоугольнику. Прямоугольник – не объемный объект, поэтому он возникает в дереве в узле Sheets, а не Solids. Материал ему задать нельзя, можно только задать граничные условия на нем. Зададим условия идеального проводника (рис. 15).

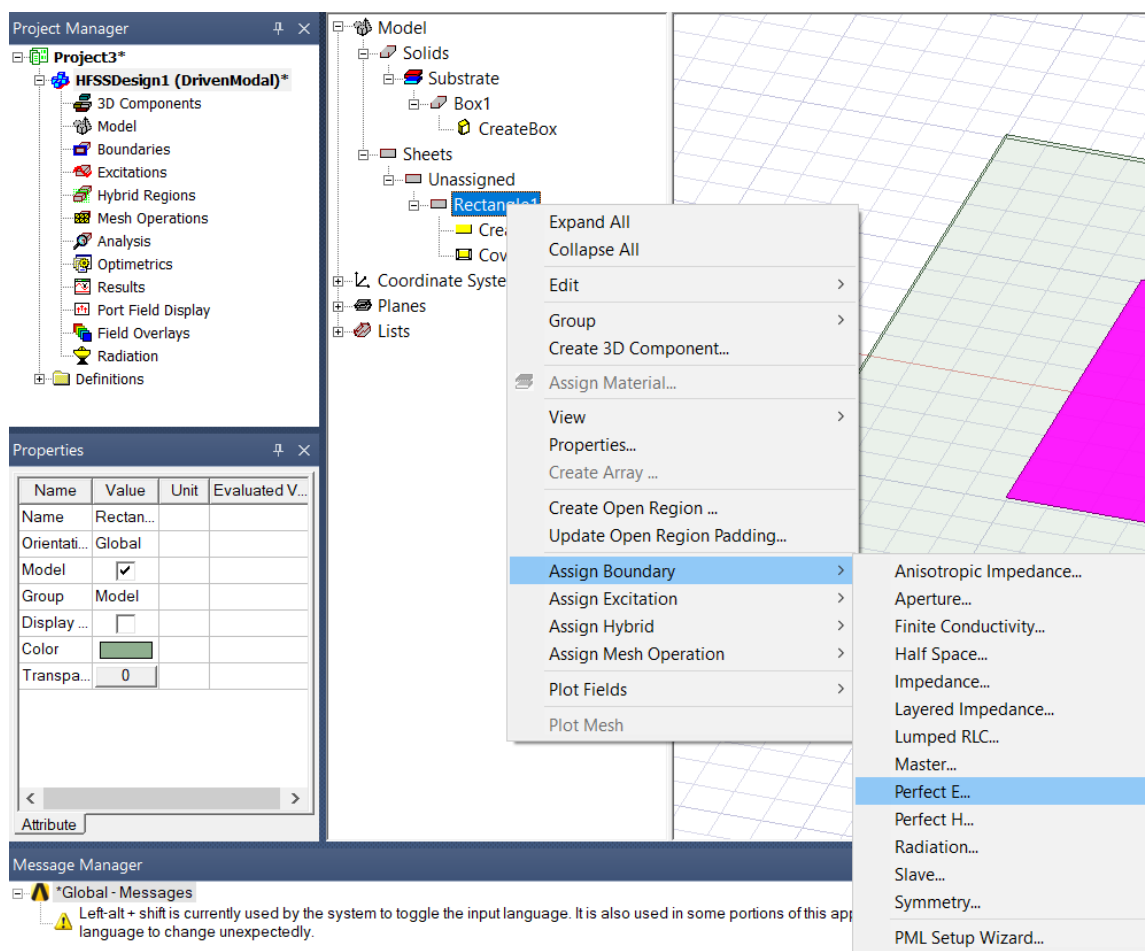


Рис. 15. Задание граничных условий на прямоугольнике

Модель необходимо ограничить условиями излучения для корректного расчета характеристик антенны. Создадим параллелепипед вокруг модели (рис. 16) задав размеры и положение вдоль осей  $x$  и  $y$  как у подложки, а вдоль оси  $z$  как половину длины волны в свободном пространстве (таким образом его стенки будут отдалены от излучающего элемента по меньшей мере на длину волны).

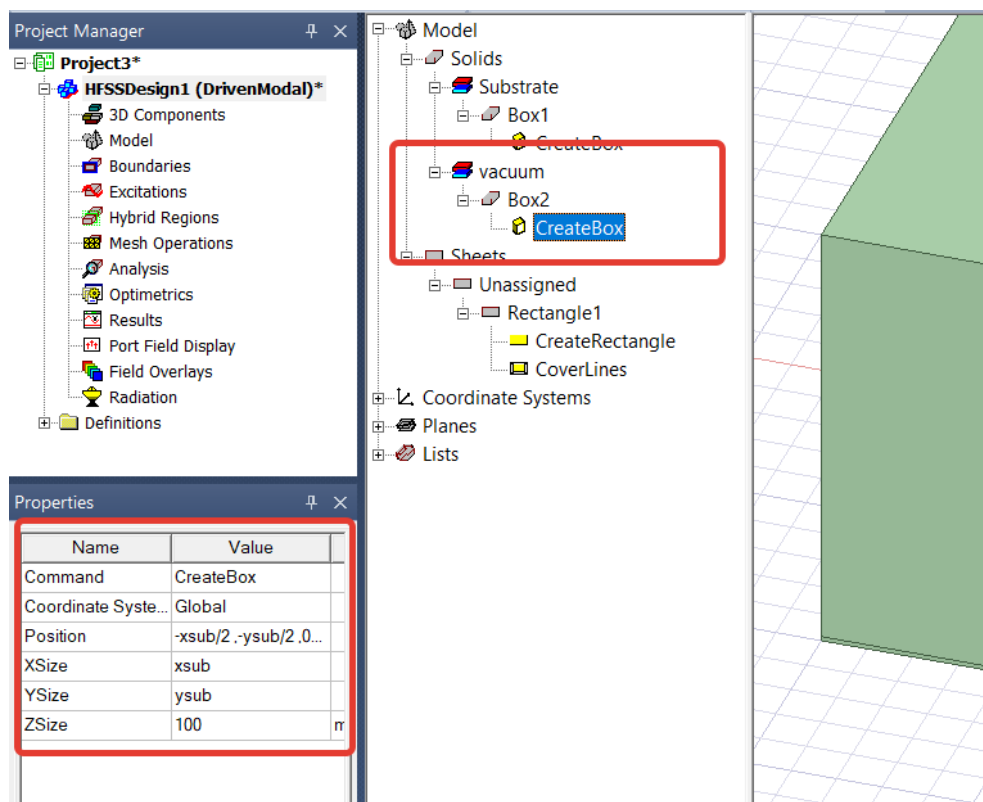


Рис. 16. Задание границ модели

Однократно нажав кнопку *F* для перехода в режим выбора граней вместо объектов, и, зажав *Ctrl*, поочередно отметим все грани параллелепипеда, кроме той, что примыкает к подложке. Вращать модель при этом можно зажав *Alt* и левую кнопку мыши. Двигать модель в окне модели можно зажав клавишу *Shift* и левую кнопку мыши, масштабировать колесиком мыши. Зададим граничные условия излучения, нажав правую кнопку мыши в окне модели на выбранной области, выбрав *Assign Boundary* и нажав *Radiation...* (рис. 17). Для перехода обратно в режим выделения объектов необходимо нажать клавишу *O*. Убедиться в правильности задания граничных условий излучения можно повернув модель к себе нижней частью (подложкой), и выбрав условие *Rad1* в дереве проекта (рис. 17).

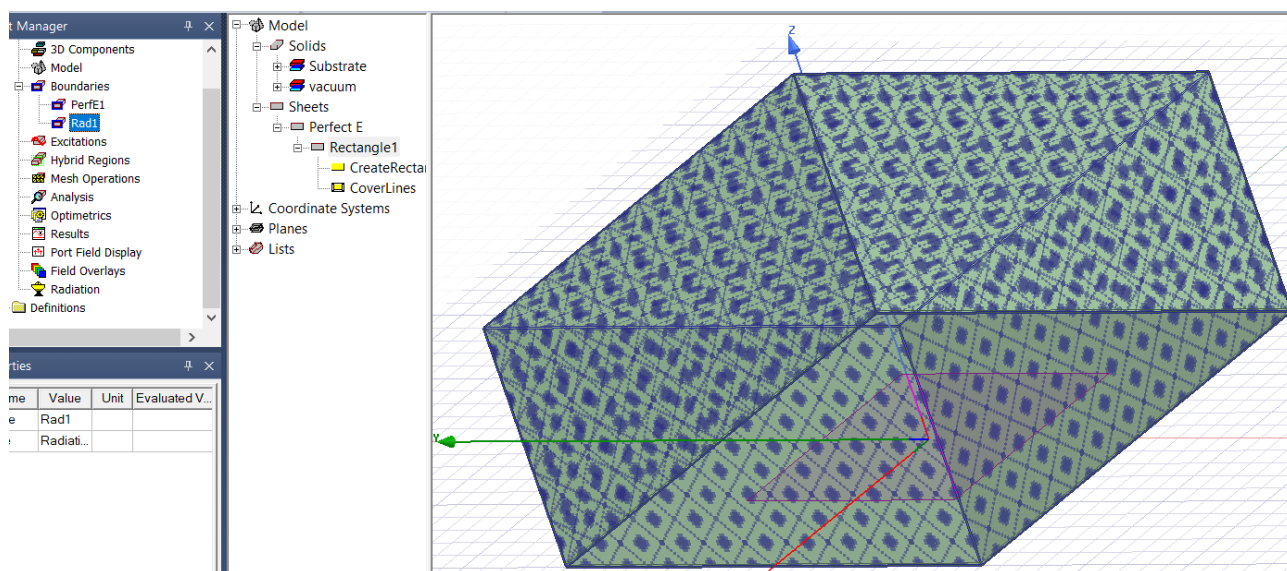
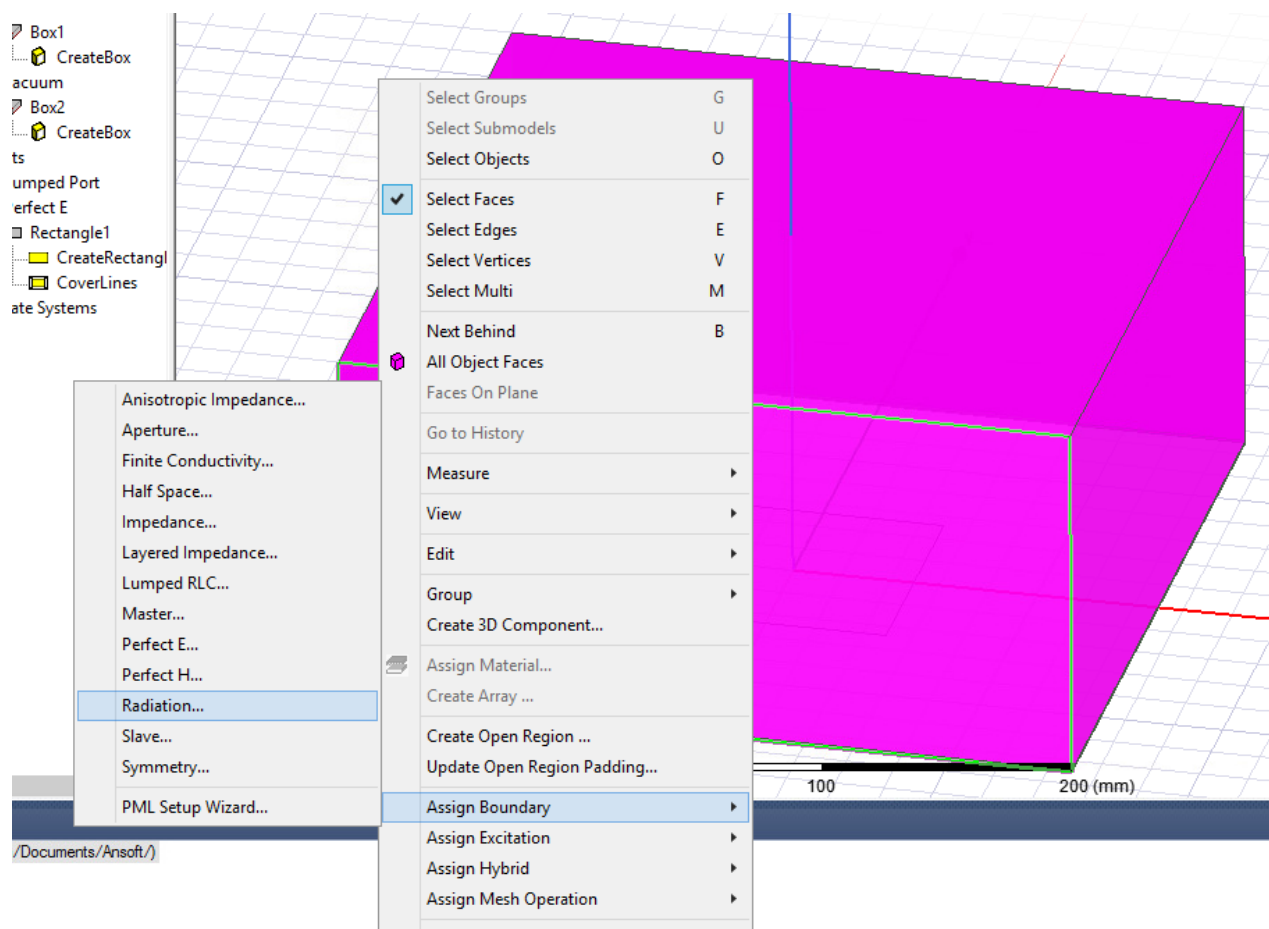


Рис. 17.Задание условий излучения на границах модели

Создадим прямоугольник, перпендикулярный оси  $x$ , с начальными координатами  $0, y_0-0.5\text{mm}, 0$  ( $y_0$  определим как переменную и присвоим ей значение из домашнего задания,  $0,5\text{ мм}$  – это поправка для того, чтобы именно его середина прямоугольника оказалась на расстоянии  $y_0$  от центра полоскового резонатора).

натора) с размером 1 мм вдоль оси  $y$ , и  $h$  вдоль оси  $z$  (рис. 18). Зададим на нем источник возбуждения в виде сосредоточенного порта (Lumped Port), как показано на рис. 20, нажимаем «Далее», задаем линию от середины ребра прямоугольника, касающегося экрана, до середины ребра, касающегося проводящей пластины (когда курсор наведен на середину ребра, он принимает форму треугольника) как показано на рис. 20. Нажимаем «Далее» и «Готово» в появляющихся окнах, оставив сопротивление значением по умолчанию (50 Ом).

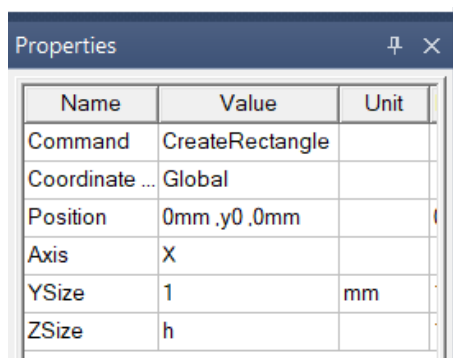


Рис. 18. Создание прямоугольника для порта

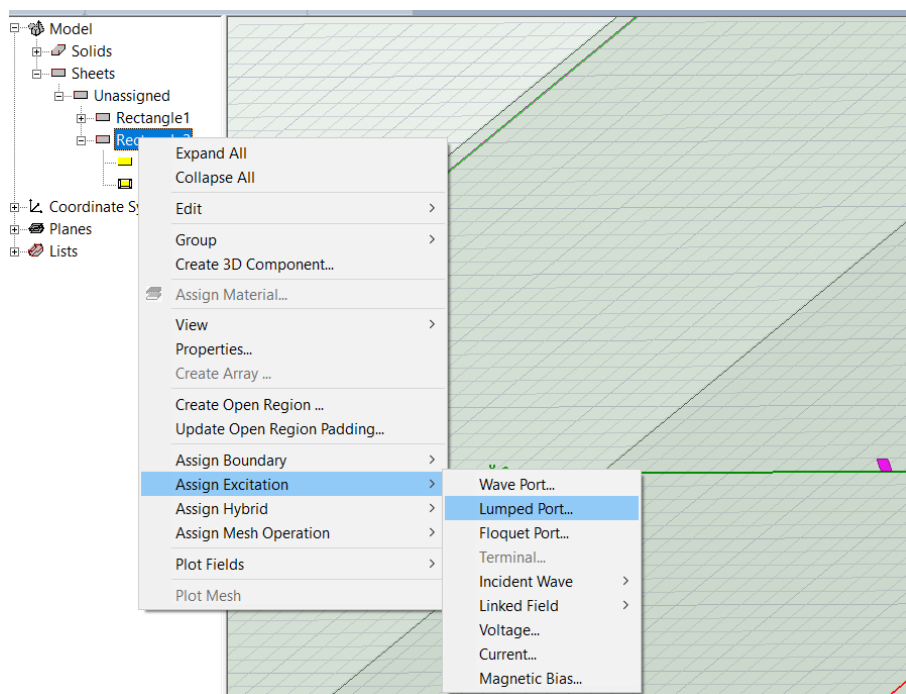


Рис. 19.Задание источника возбуждения

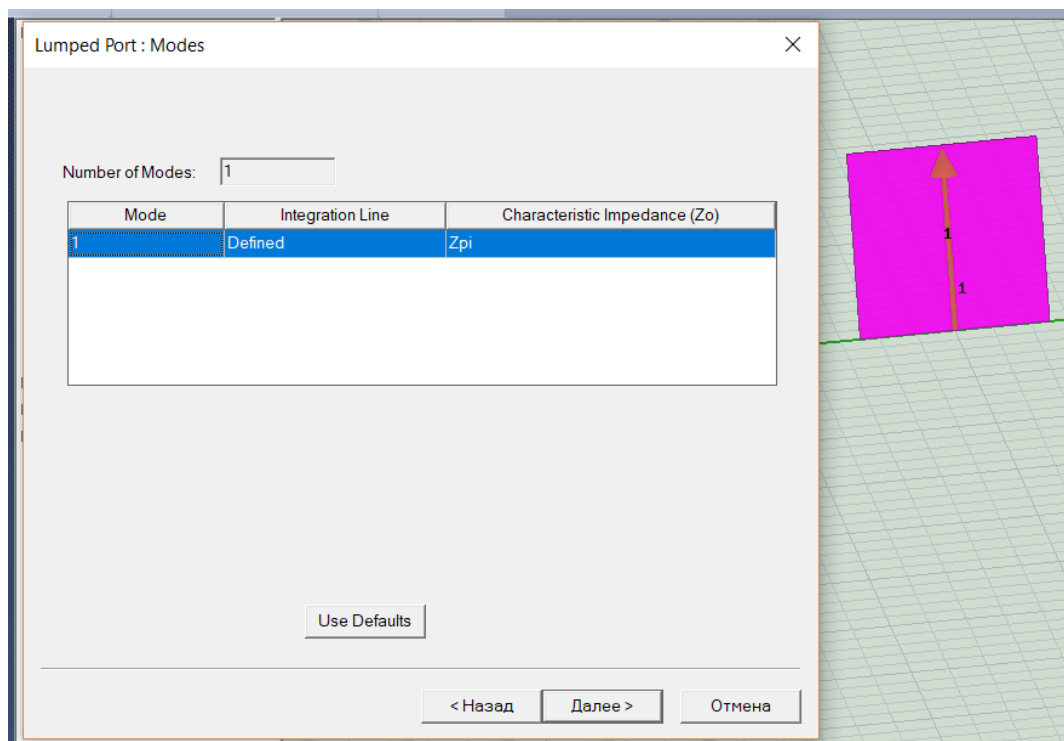
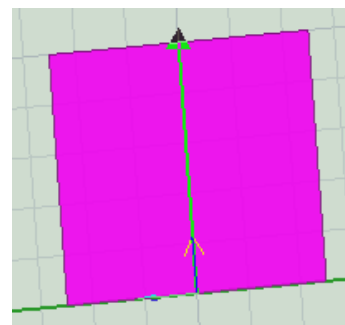
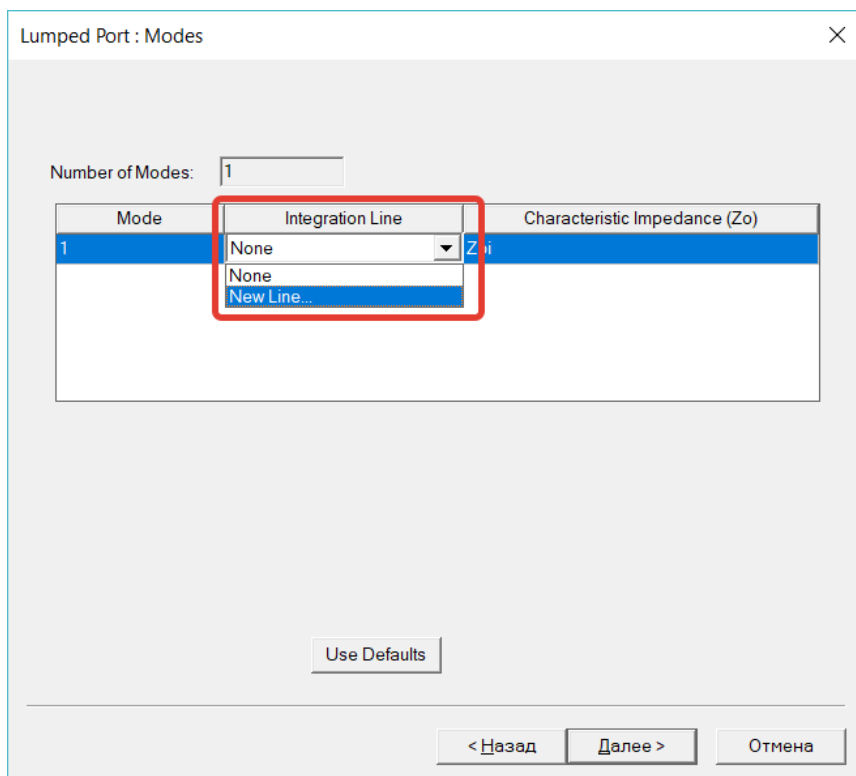


Рис. 20. Задание Integration line

Сосредоточенный порт аналогичен источнику тока и может также использоваться для возбуждения линий передачи. Такие порты применимы как



источники напряжения в разрывах проводников или других случаях, когда невозможно использовать волноводные порты. Как правило, они применяются внутри модели (не на внешних ее гранях). Они позволяют получать  $S$ ,  $Y$ ,  $Z$ -параметры и поля, но не дают никакой информации о волновом сопротивлении линии или волновом числе в ней. К результатам, полученным при помощи такого порта нельзя применить смещение плоскости отсчета, но можно произвести перенормировку характеристических матриц.

В отличие от волноводных портов, сосредоточенные порты могут поддерживать только одну моду. Они могут быть заданы на любом 2D объекте, имеющем ребра на двух проводящих телах или поверхностях. Комплексное сопротивление, определяемое при создании порта, служит волновым сопротивлением линии при нормировке  $S$ -матрицы, оно используется для определения амплитуды источника, например, модального напряжения  $V$  и модального тока  $I$ , через нормировку комплексной мощности. Линия, которую необходимо задать в процессе создания порта, соединяет две точки, в которых источников создается напряжение, поэтому поперечные размеры порта не играют важной роли.

Сосредоточенный порт в данной работе является аналогом коаксиального возбуждения микрополоскового резонатора (один проводник присоединяется к экрану, а второй к проводящей пластине). Модель получается упрощенная, однако для настройки антенны подходит достаточно хорошо, и сокращается время расчета по сравнению с точным моделированием коаксиального входа.

Зададим настройки для расчета диаграммы направленности как показано на рис. 21. В этом окне задается сетка для расчета электромагнитного поля в сферической системе координат в дальней зоне (шаг сетки по углам  $\varphi$  и  $\theta$  и их пределы). Для того, чтобы впоследствии на графиках ДН была рассчитана во всем диапазоне углов  $\theta$ , необходимо нижний их предел установить  $-180^\circ$  и нажать ОК.

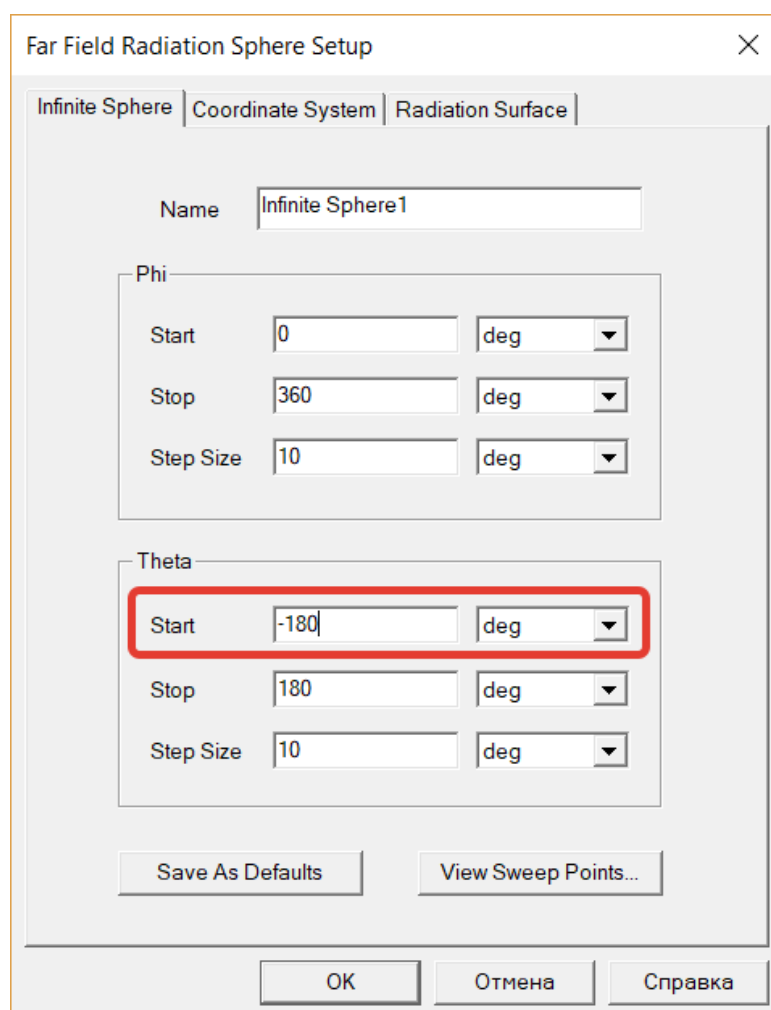
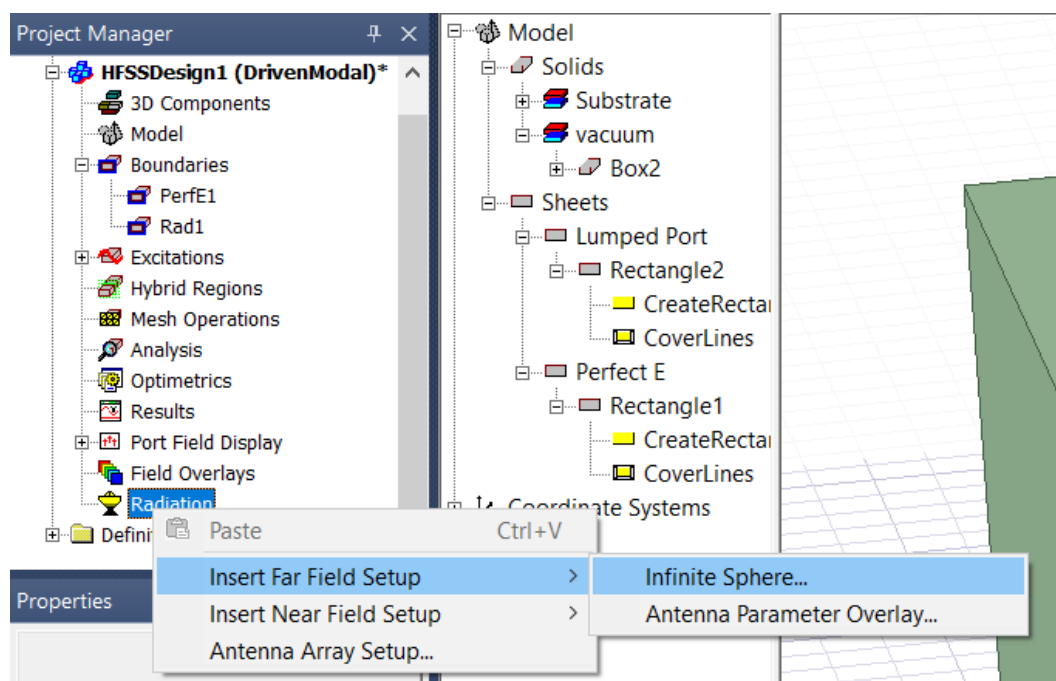


Рис. 21. Настройка для расчета диаграммы направленности

Добавим в проект настройку решения (рис. 22). Задайте частоту решения (frequency) и ее единицу измерения в соответствии с табл. 1 и максимальное количество шагов адаптивного разбиения 20 (рис. 23). Эта настройка необходима, т. к. установленного количества шагов по умолчанию как правило не хватает для анализа полосковых устройств и антенн с настройками решения по умолчанию. На вкладке Options задайте минимальное количество итераций для адаптивного разбиения 10 (рис. 24). На первых итерациях ошибки при расчете значительны, однако критерий сходимости решения может случайно выполняться еще при малом количестве конечных элементов в модели из-за ее грубости, и расчет характеристик окажется неточным.

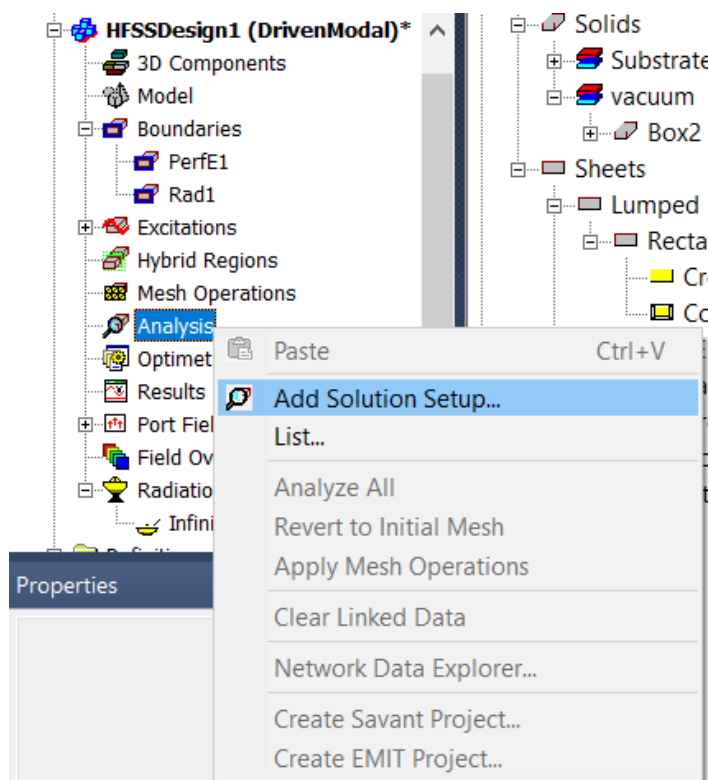


Рис. 22. Установка настроек решения

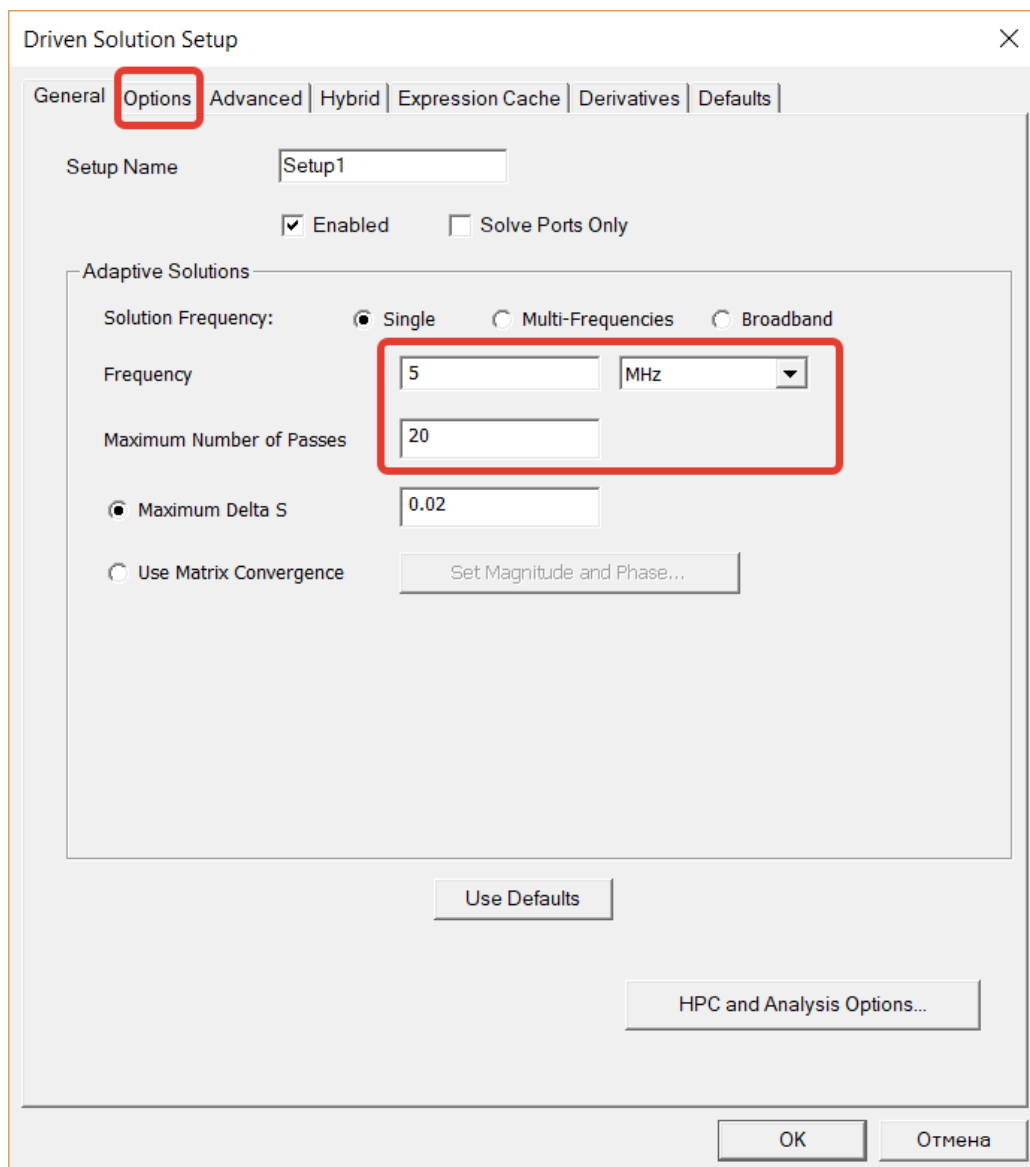


Рис. 23. Установка частоты и максимального количества итераций адаптивного решения

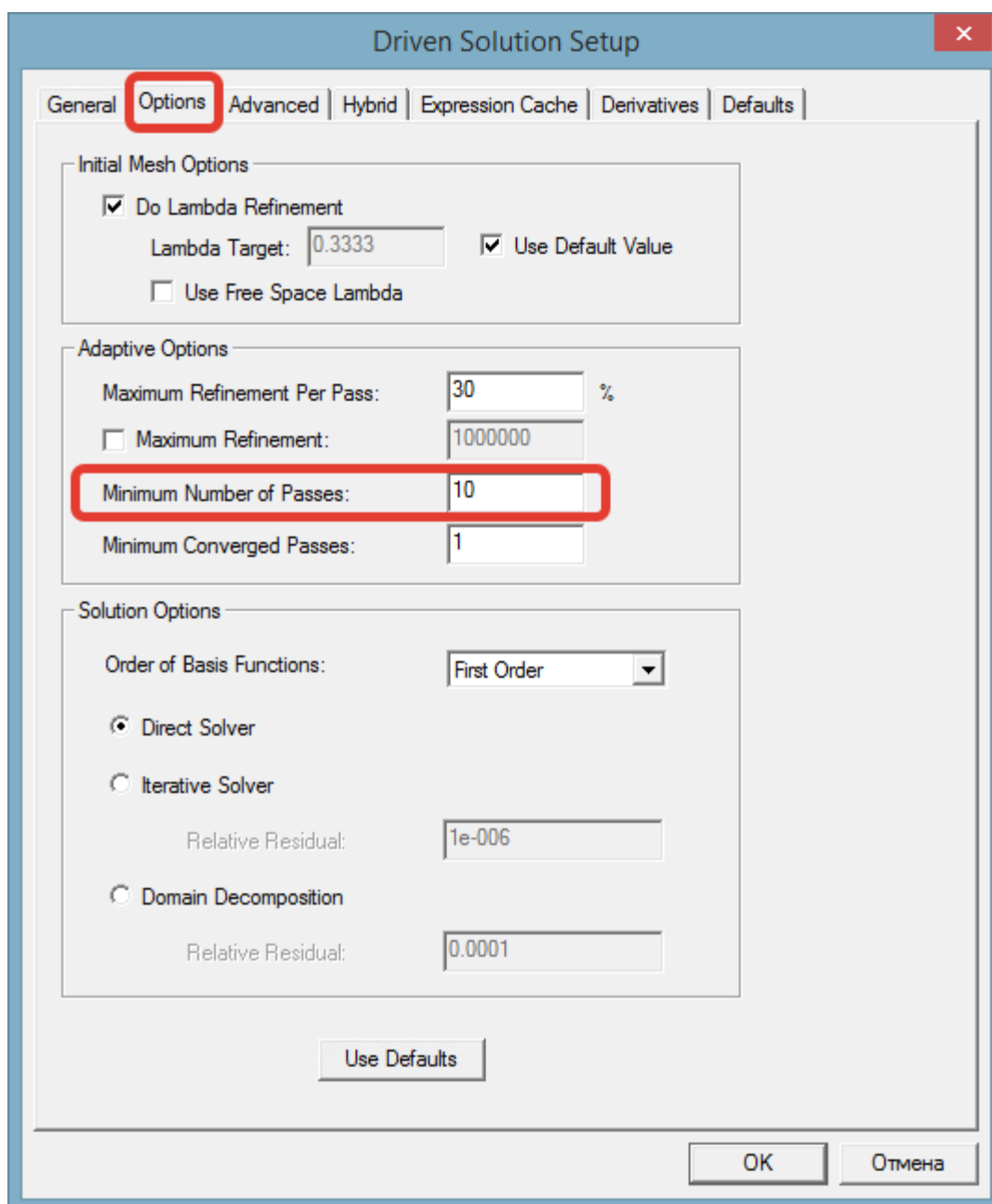


Рис. 24. Установка минимального количества итераций адаптивного решения

Добавим качание частоты (рис. 25). Установим тип качания Fast, а диапазон частот от  $\pm 10\%$  от частоты, указанной в табл. 1 (рис. 26). Остальные настройки оставим по умолчанию и нажмем ОК. Запустим расчет, нажав кнопку Analyze All на панели инструментов или в контекстном меню узла Analysis в дереве проекта (рис. 27).

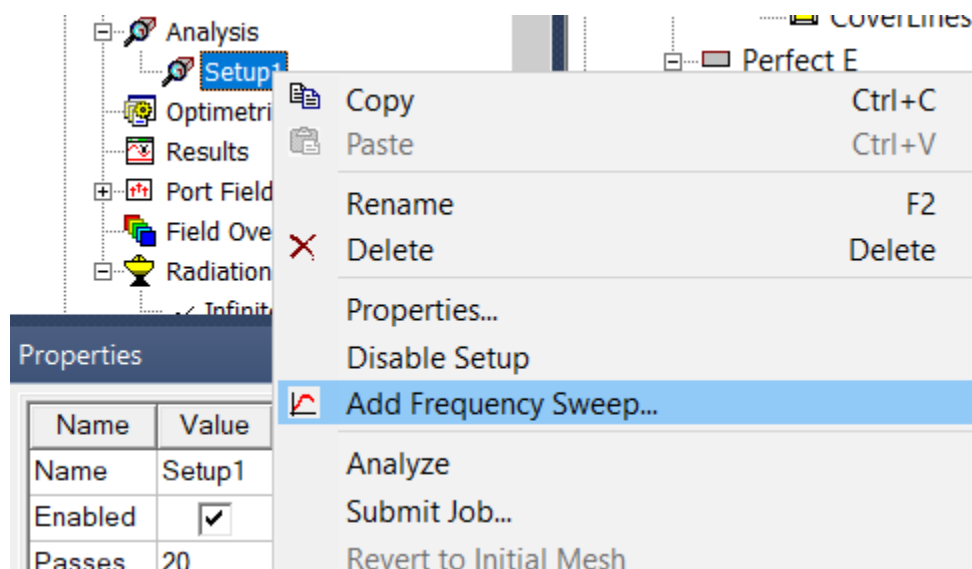


Рис. 25. Добавление качания частоты

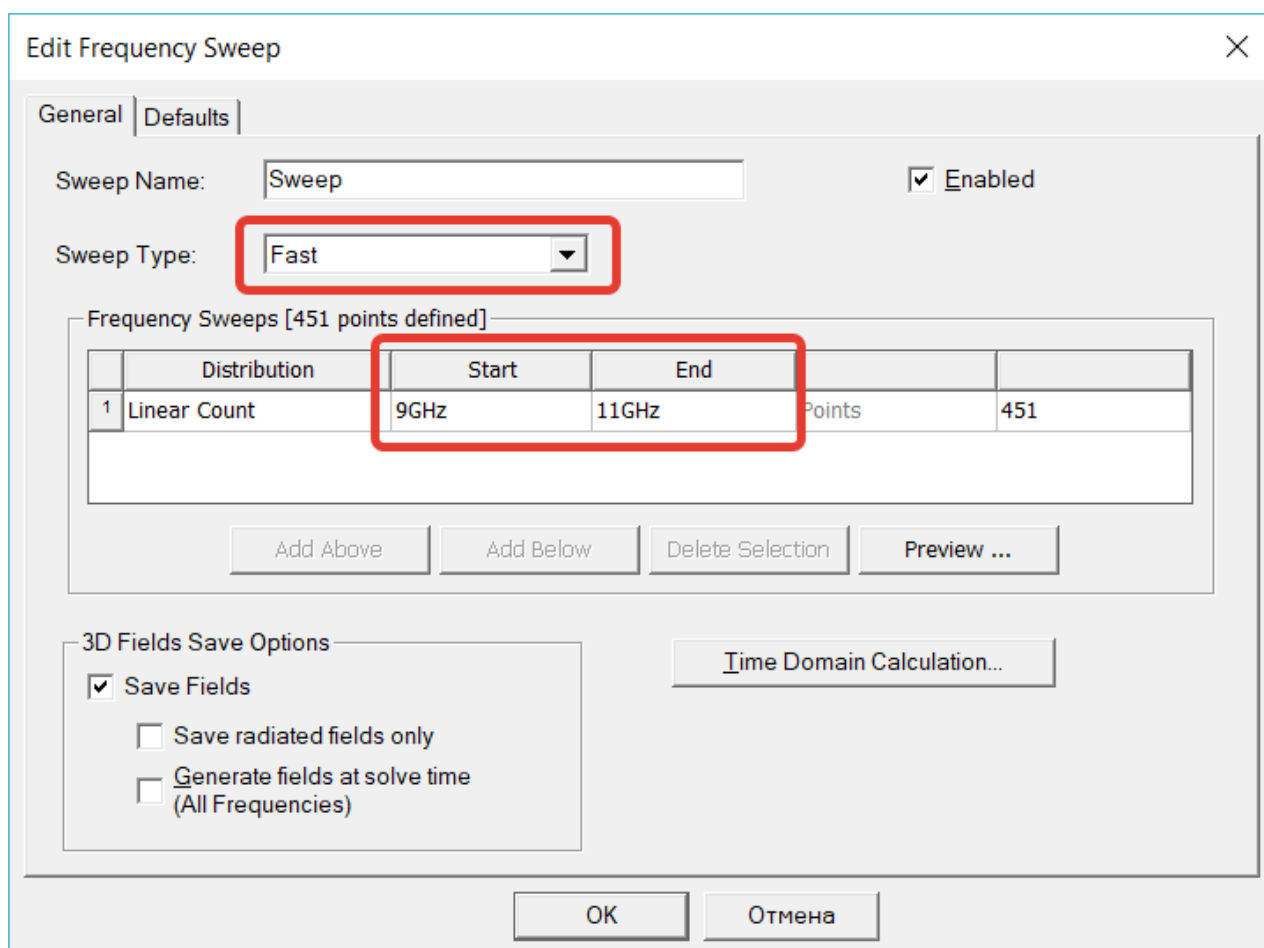


Рис. 26. Установки качания частоты

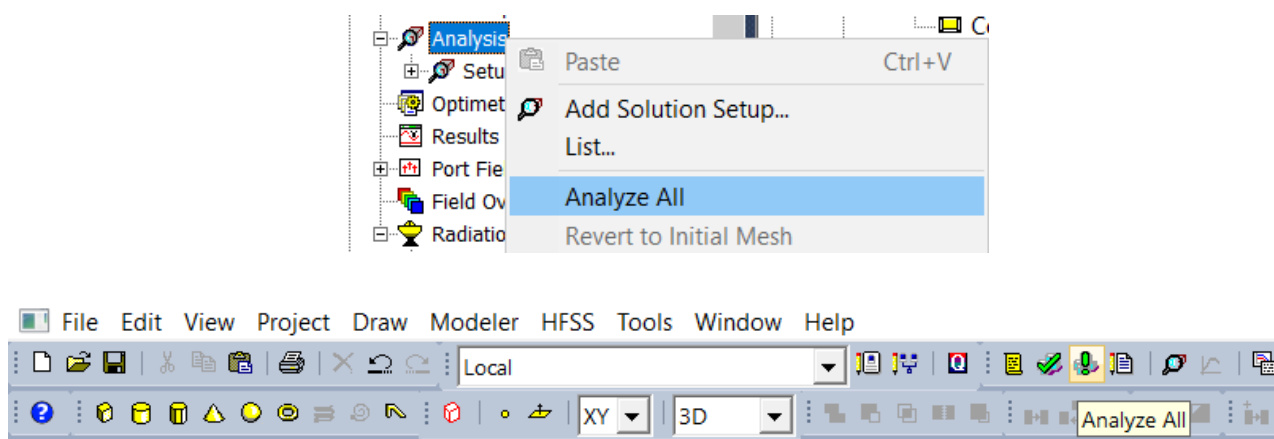


Рис. 27. Запуск расчета

Оценить сходимость адаптивного решения можно нажав Convergence в контекстном меню узла Setup1 в дереве проекта, либо по кнопке Solution Data на панели инструментов (рис. 28), перейдя на вкладку Convergence. Откроется окно, показанное на рис. 29. Здесь можно видеть количество конечных элементов и ошибку по сравнению с предыдущей итерацией для каждой итерации адаптивного решения, а также статус сходимости решения (CONVERGED – критерий сходимости достигнут или NOT CONVERGED – критерий не достигнут). Нормальным является постепенное уменьшение ошибки Max Mag Delta S с увеличением количества элементов. Изменение ошибки с новыми итерациями также можно проследить на графике, если выбрать в окне Plot, по которому можно отметить монотонное уменьшение ошибки с увеличением номера итерации решения.

На вкладке Profile можно увидеть время расчета, как реальное, так и в пересчете на ядро процессора, а также использованный для расчета объем оперативной памяти. На вкладке Mesh statistics можно увидеть количество конечных элементов в/на каждом примитиве модели. На вкладке Matrix Data отображаются данные характеристических матриц модели в выбранном формате, отсюда их можно экспортировать в стандартные для программ моделирования форматы.

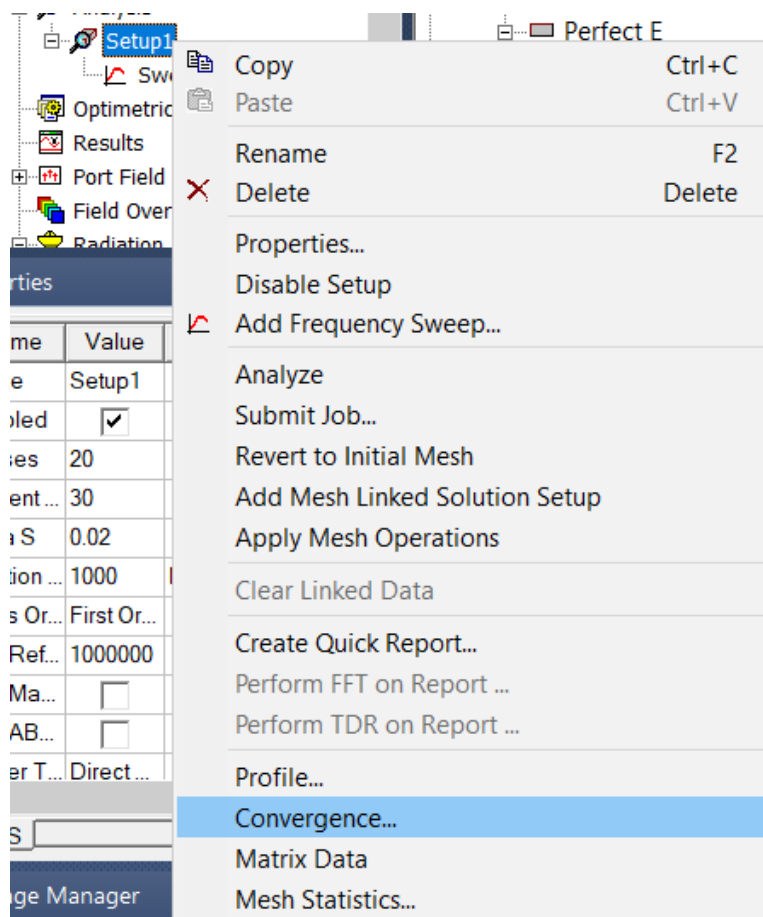


Рис. 28. Открытие окна с результатами адаптивного решения



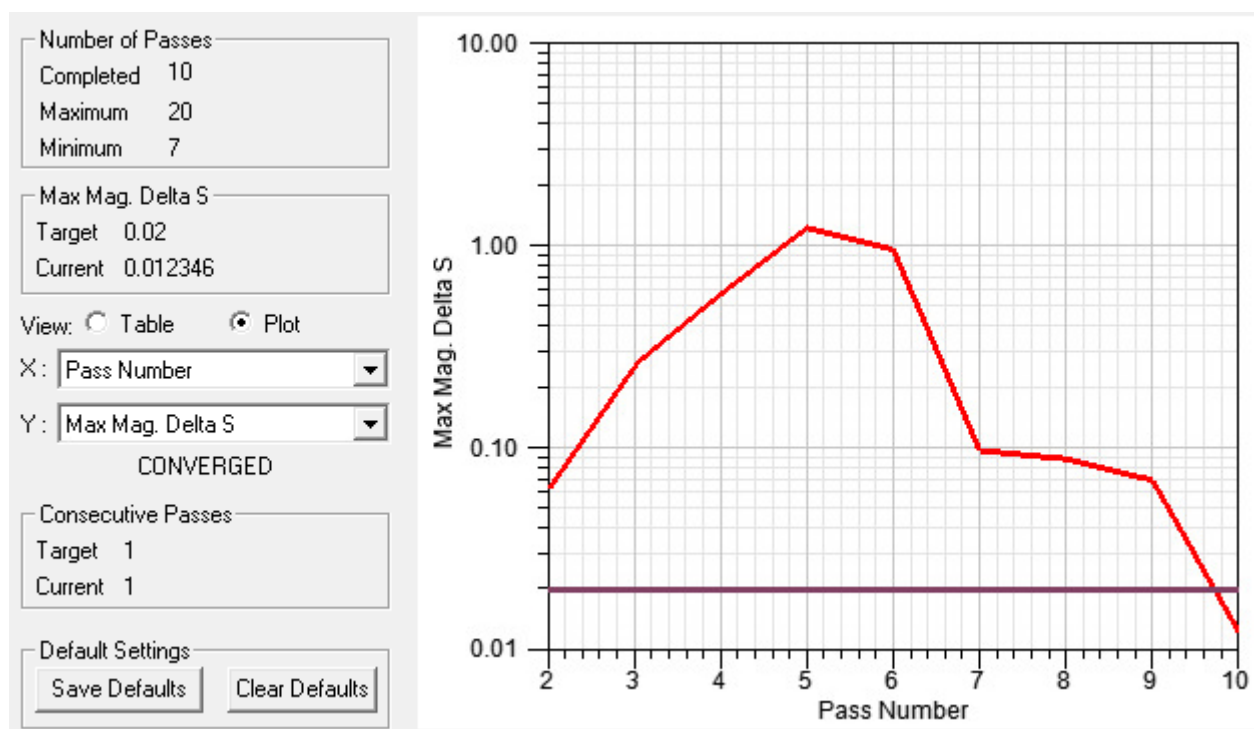
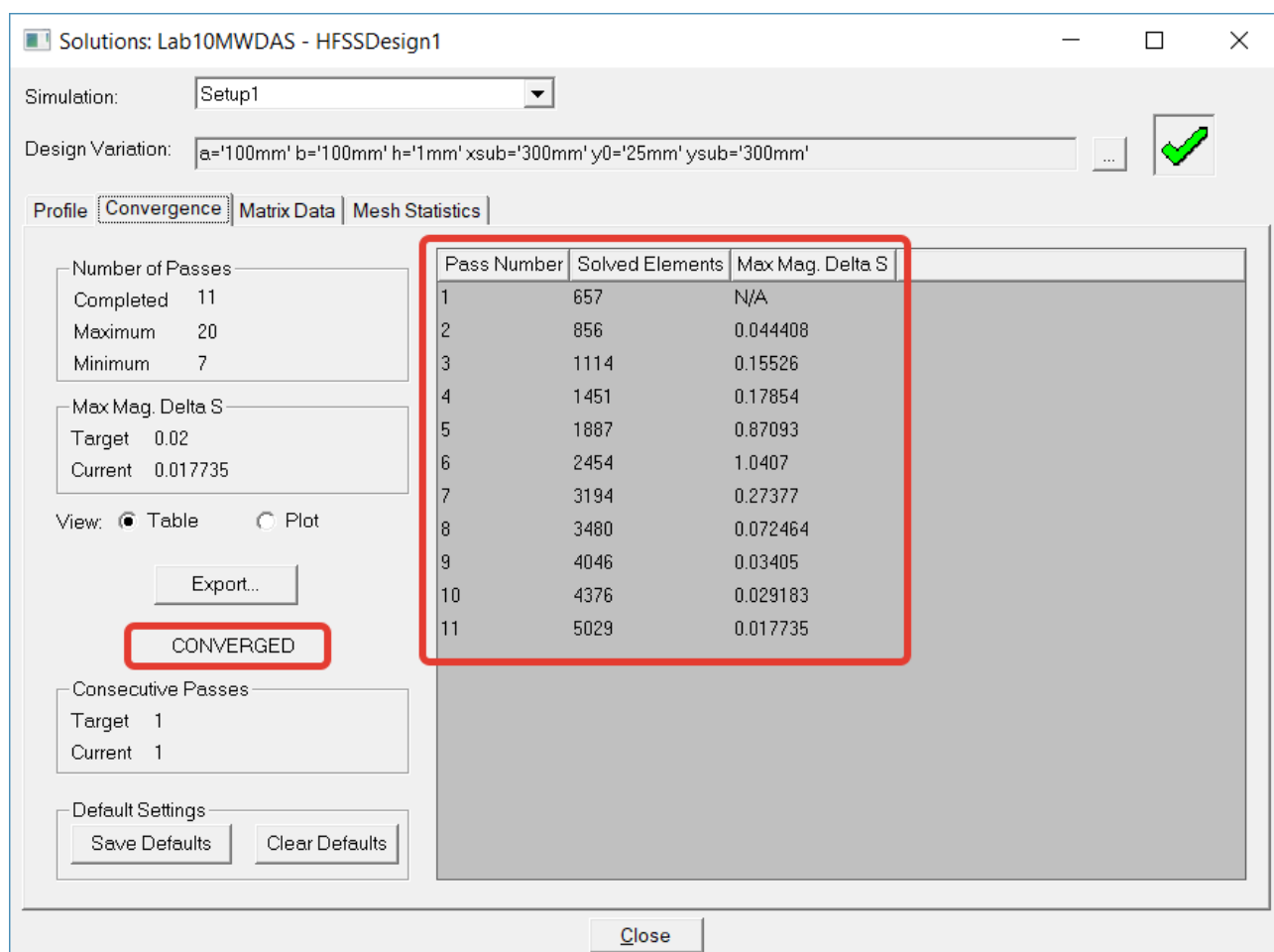


Рис. 29. Результаты адаптивного решения

Нажмите в дереве проекта на узел, соответствующий металлической пластине, правой кнопкой мыши, затем Plot Fields, E, Mag E (рис. 30). В появившемся окне можно выбрать частоту, на которой отобразится величина поля, но оставим настройку по умолчанию (частота адаптивного решения) и нажмем Done. Чтобы после этого картина поля оказалась видимой, необходимо выбрать в дереве проекта соответствующий узел левой кнопкой мыши (рис. 30).

Для анимации полученной картины по начальной фазе необходимо выбрать по нажатию правой клавишей мыши по этому узлу пункт Animate и в нем выбрать Phase как параметр для анимации (рис. 31). После этого произойдет расчет всех шагов анимации поля при изменении начальной фазы (соответствует изменению картины поля за один полупериод колебаний) и анимация будет отображена прямо на модели. В появившемся окне можно настроить скорость анимации или экспортировать ее в одном из распространенных форматов. На полученной картине можно видеть, что величина поля существенно больше на щелях на торцах резонатора.

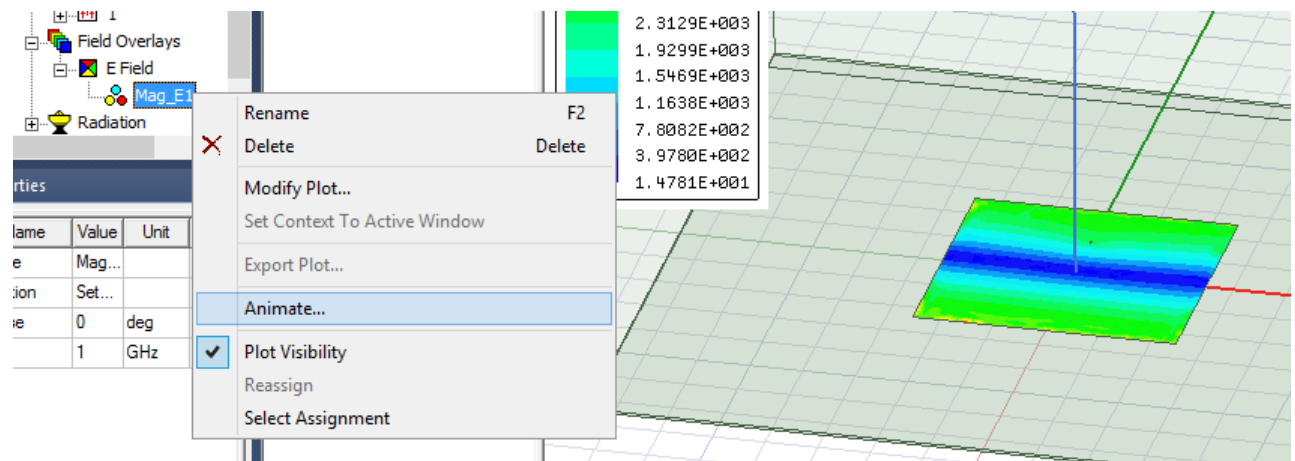
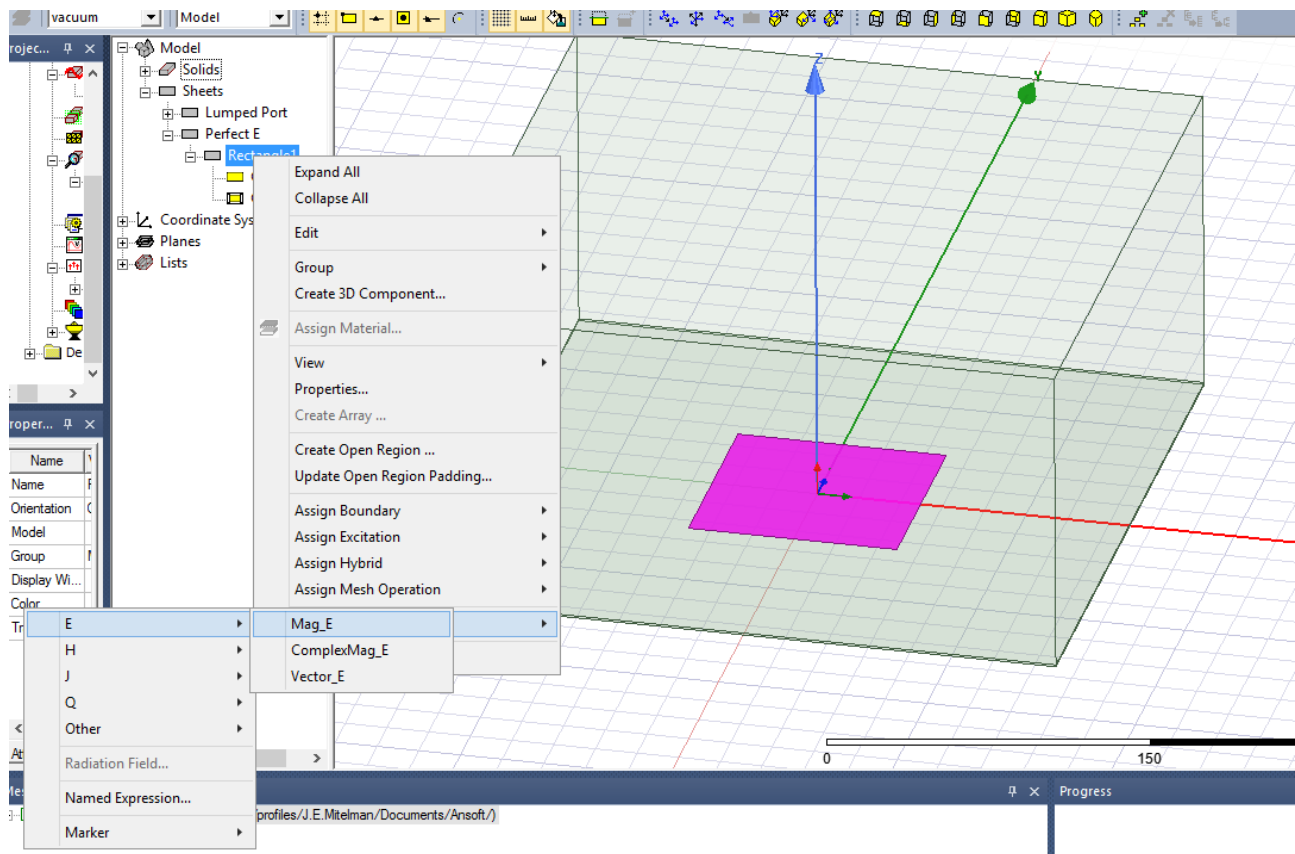


Рис. 30. Отображение напряженности электрического поля на проводящей пластине

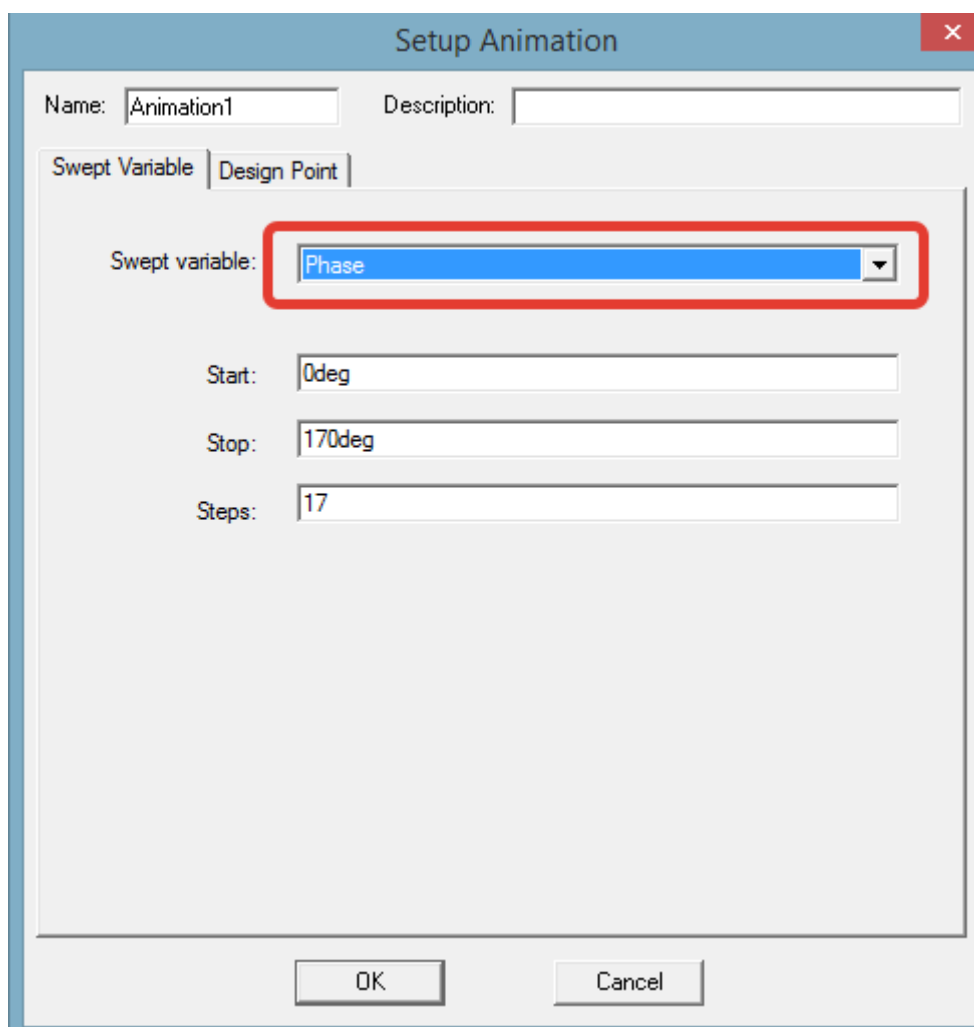


Рис. 31. Установка анимации поля

Добавим графическое поле с входными характеристиками модели, нажав в дереве проекта на пункт Results правой кнопкой мыши и выбрав Create Modal Solution Data Report (данные решения для мод в портах), Rectangular Plot (поле декартовой системы координат) как показано на рис. 32.

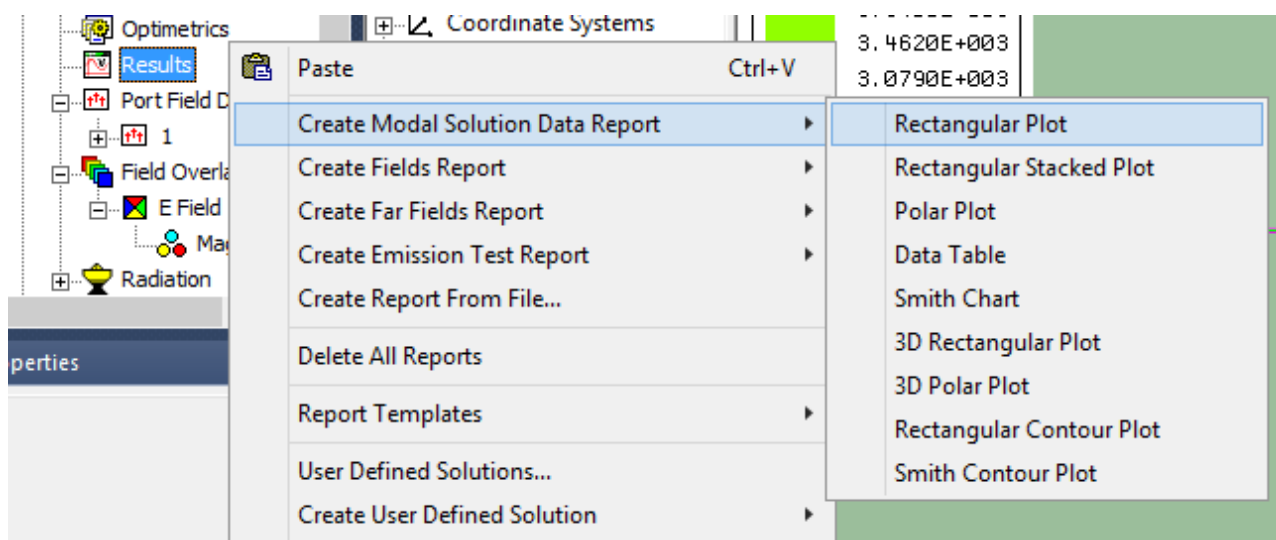


Рис. 32. Добавление графика в декартовой системе координат по модальному решению

Добавим в проект график зависимости действительной и мнимой частей входного сопротивления от частоты, выбрав в появившемся окне Z-parameters в левой части и применив к ним функции Im и Re из правой части окна (рис. 33). Выбирать несколько функций за один раз можно удерживая клавишу Ctrl. Нажмем New Report.

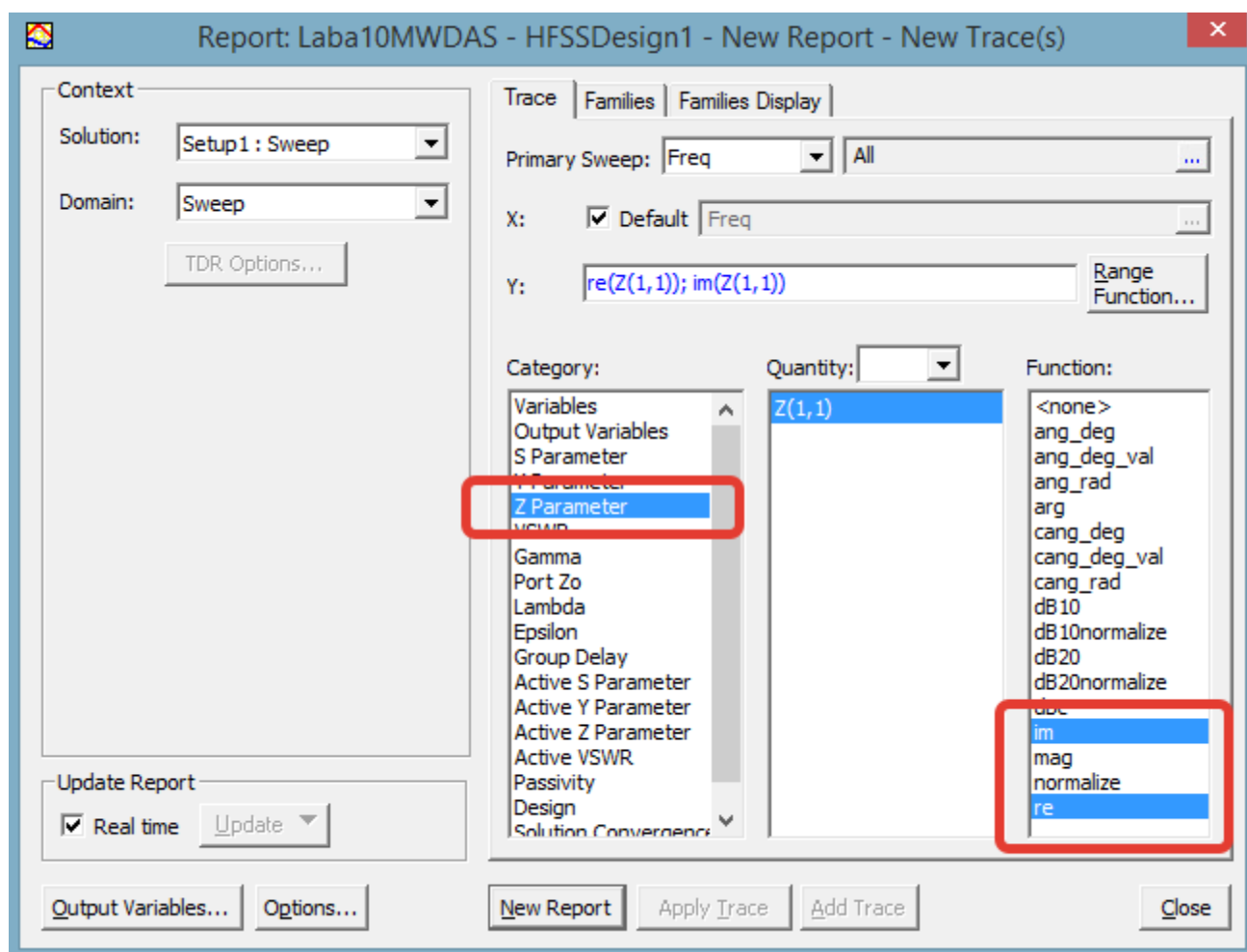


Рис. 33. Вывод на график действительной и мнимой частей входного сопротивления

Если все параметры полоскового резонатора рассчитаны верно, то на появившейся частотной зависимости можно будет наблюдать параллельный резонанс как это показано на рис. 34.

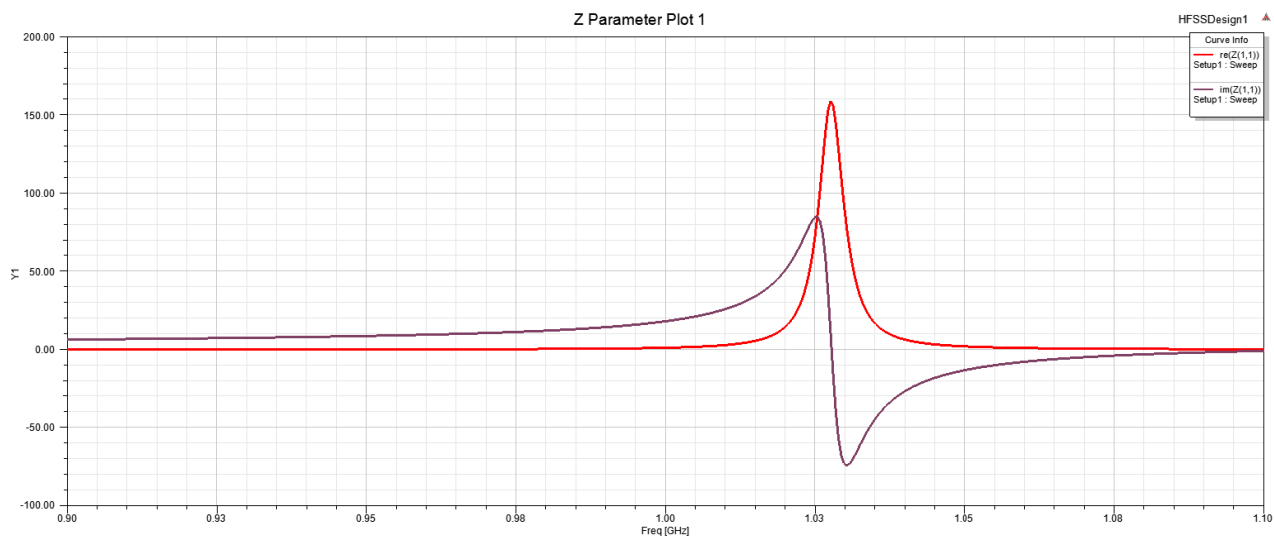


Рис. 34. Частотная зависимость входного сопротивления

Как правило резонанс получается несколько смещенным от центральной частоты, заданной по варианту из табл. 1 и антенну необходимо подстроить. Для настройки по частоте необходимо изменять резонансный размер антенны  $b$ , заданный одноименной переменной. Для этого необходимо выбрать в дереве проекта имя модели. Тогда переменные модели отобразятся в окне свойств и их там же можно будет изменять (рис. 35). После изменения размеров антенны необходимо снова запускать расчет (рис. 27). Изменяйте резонансный размер до тех пор, пока параллельный резонанс не будет наступать на центральной частоте (мнимая часть сопротивления на ней должна быть близка к нулю, а вещественная к максимуму. После настройки на параллельный резонанс, необходимо согласовать входное сопротивление антенны с волновым сопротивлением линии 50 Ом, т.е. привести значение активной части сопротивления на центральной частоте к 50 Ом. Для этого необходимо изменять смещение точки питания от центра резонатора  $y_0$ . После смещения точки питания, резонанс антенны может сместиться по частоте. Если смещение значительное, необходимо повторить настройку резонансного размера, после чего повторить настройку точки смещения и т. д. После настройки антенны частотный диапазон анализа можно сузить до  $\pm 2\text{--}3\%$  от центральной частоты (рис. 26).

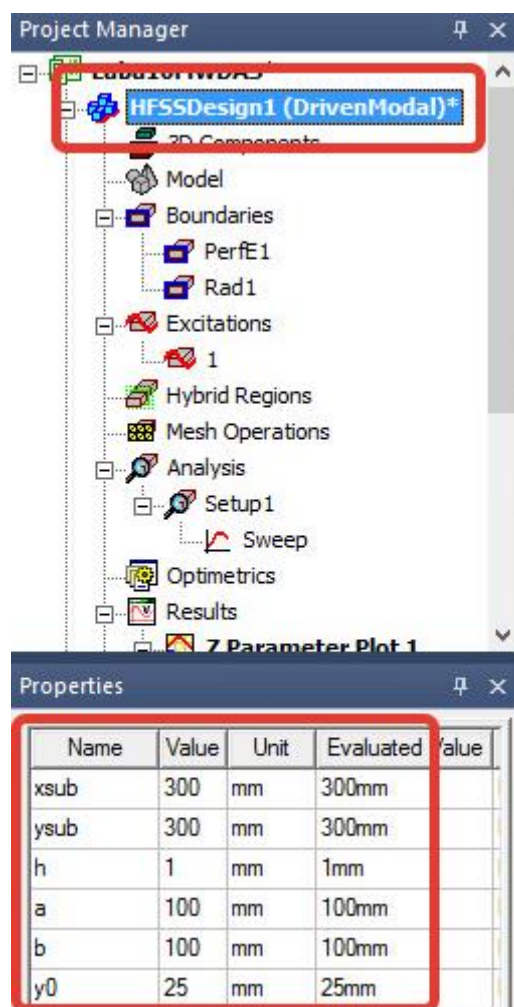


Рис. 35. Изменение переменных в модели

Выведем на график в декартовой системе координат КСВ аналогично рис. 33, но выбрав в левом списке VSWR вместо Z-parameters, а в правом списке функцию none (отсутствие функции). На полученном графике нажмите левой кнопкой мыши дважды на вертикальную ось и выберите вкладку Y1 Scaling. Задайте минимальное значение КСВ для отображения(min) 1, а максимальное (max) 5 (рис. 36). Если настройка антенны выполнена верно, то минимальное значение КСВ будет наблюдаться вблизи центральной частоты.



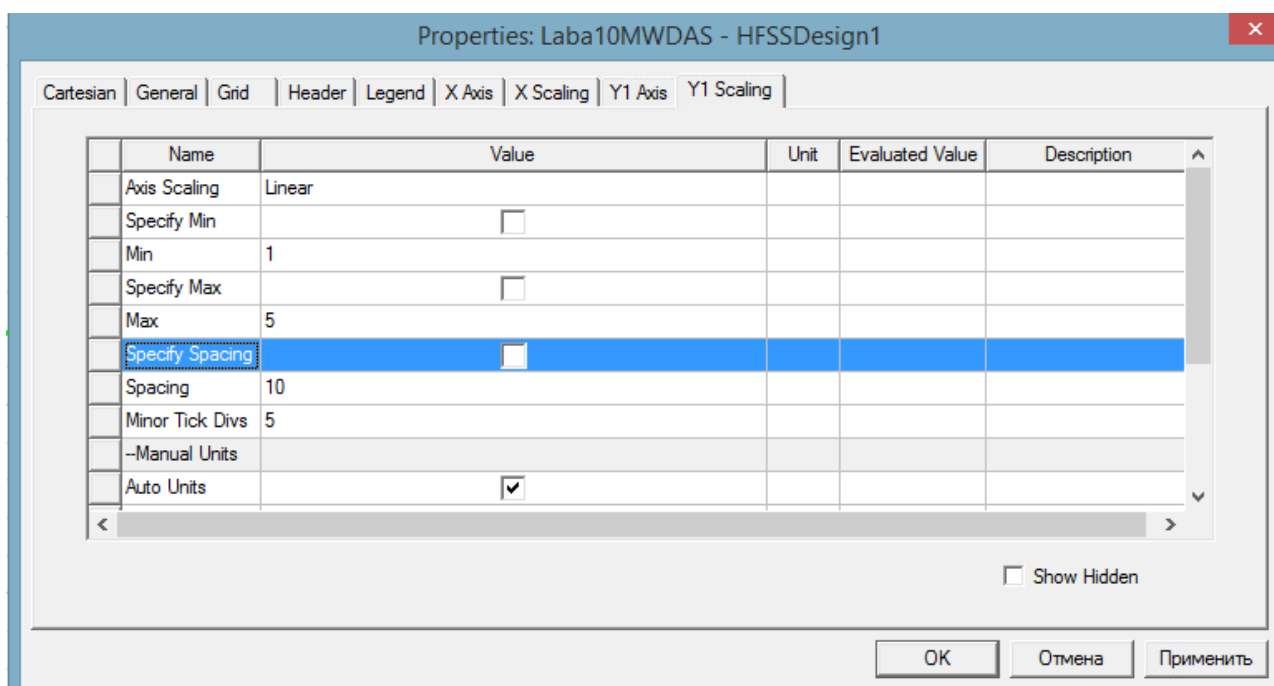
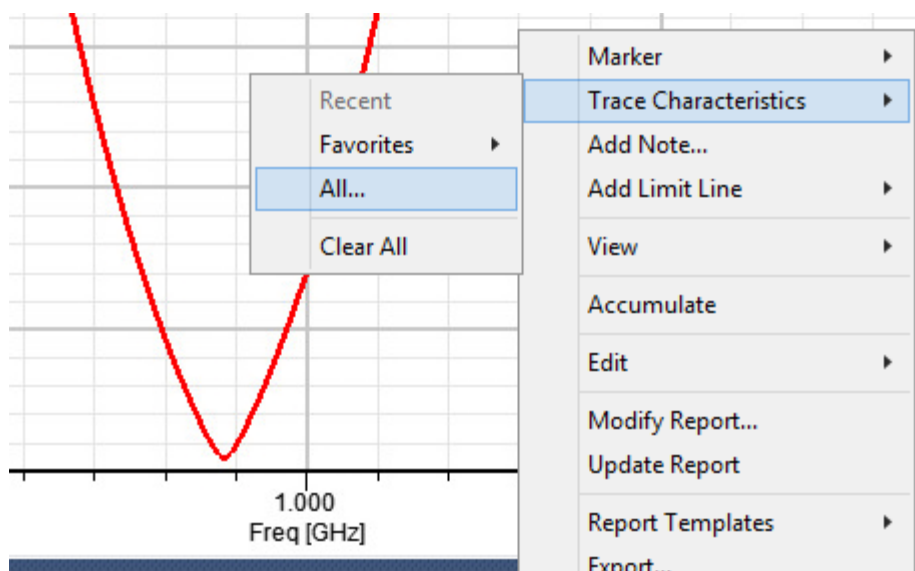


Рис. 36. Задание пределов отображения графика

Нажмите на графике правой кнопкой мыши, выбрав пункт Trace Characteristics, All... (рис. 37). В открывшемся окне выберите внизу списка XWidthAtVal (отображение ширины графика по заданному уровню) и введите значение внизу окна 2 (отображение ширины полосы согласования по уровню  $KCB = 2$ ). Нажмите кнопку Add Trace Characteristics. На графике появится значение ширины полосы частот в тех же единицах измерения, что и частоты на оси абсцисс.



Add Trace Characteristics

Category: All

	Favorite	Functions	Category	Default
65	<input type="checkbox"/>	xdb10Beamwidth	Radiation	
66	<input type="checkbox"/>	xdb20Beamwidth	Radiation	
67	<input type="checkbox"/>	XWidthAtYVal	Math	
68	<input type="checkbox"/>	YAtXMax	Math	
69	<input type="checkbox"/>	YAtXMin	Math	
70	<input type="checkbox"/>	YAtXVal	Math	

Returns the X width between the first 2 occurrence of Y value.

	Name	Value	Unit	Description
1	Y Value	2		Y Value at which we need to find X Width
2	Range	Full		

☒ Current sticky range overrides saved default

Add Trace Characteristic Save As Default Close

Curve Info	XWidthAtYVal(2)
— VSWR(1) Setup1 : Sweep	0.0030

Рис. 37. Определение полосы согласования по заданному уровню КСВ

Добавьте в проект графическое поле для отображения диаграммы направленности (ДН) антенны (рис. 38). Добавьте на графическое поле отображение нормированной величины напряженности электрического поля как показано на рис. 38. На вкладке Families (отображение семейств зависимостей) выберите  $\varphi = 0, 90^\circ$ , удерживая Ctrl (отображение ДН в главных плоскостях). Нажмите New Report. В появившемся окне аналогично рис. 37 определите ширину ДН по уровню  $-3$  дБ (0,707 по напряженности поля). Аналогично можно построить ДН антенны в децибелах в декартовых координатах, добавив графическое поле с декартовыми координатами (рис. 32) и выбрав Function к той же величине dB20Normalize в правой части окна добавления графика (рис. 38).

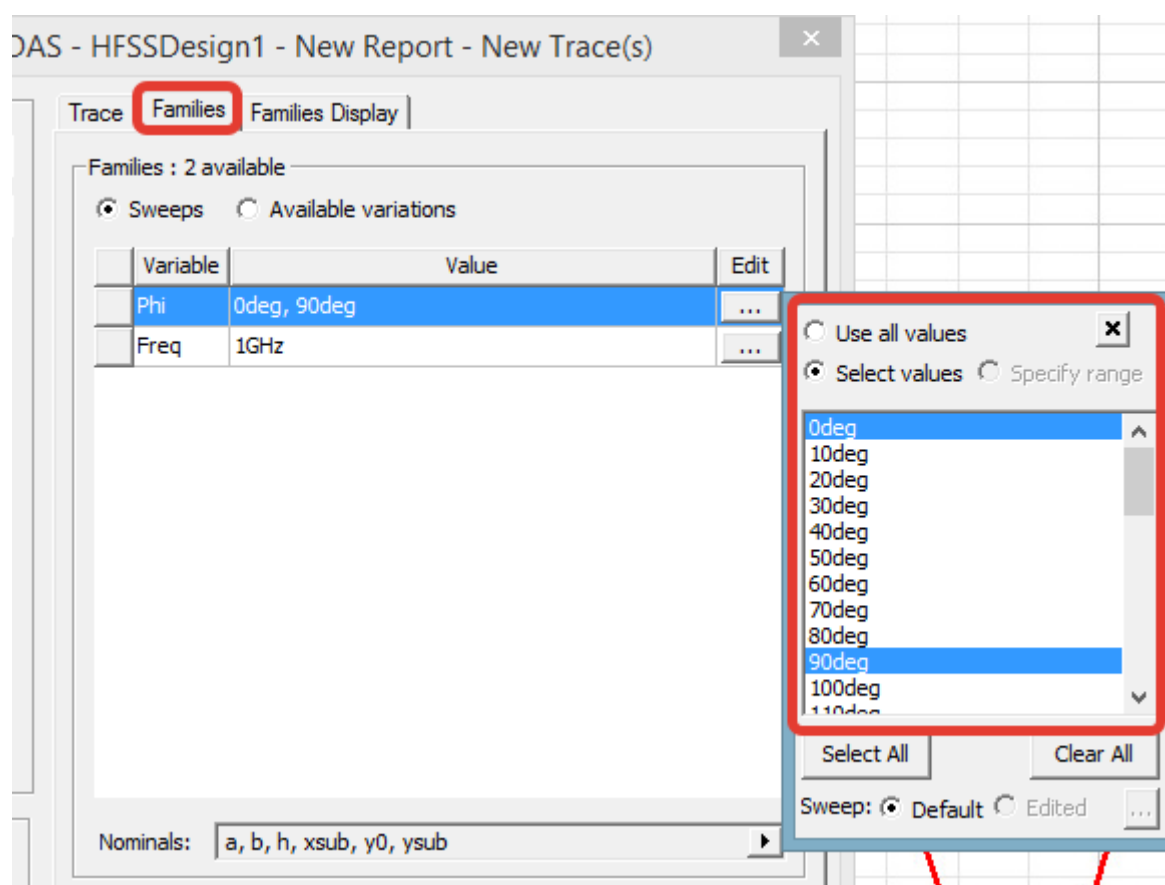
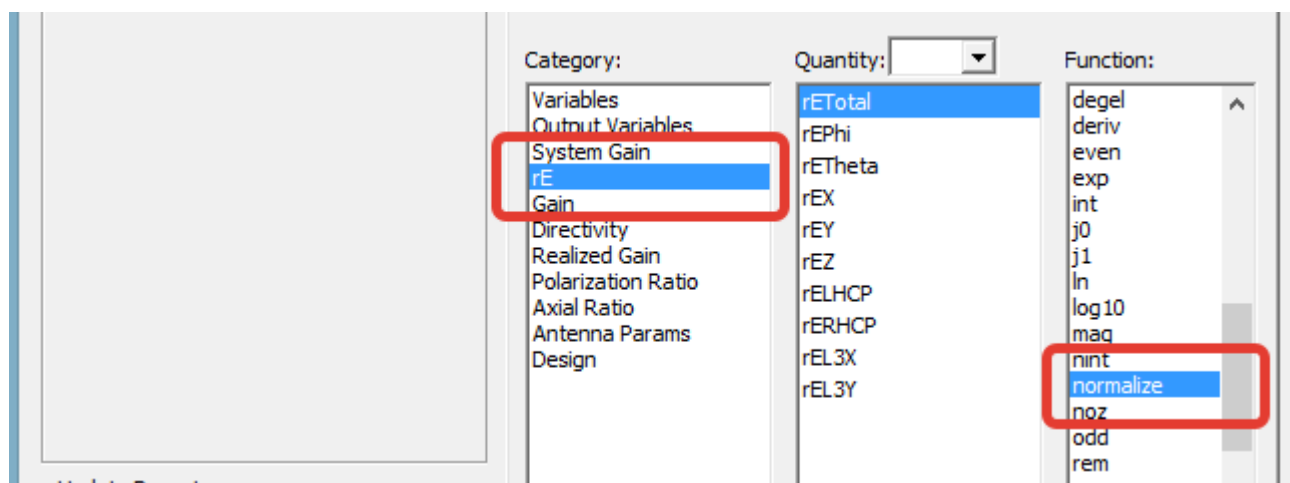
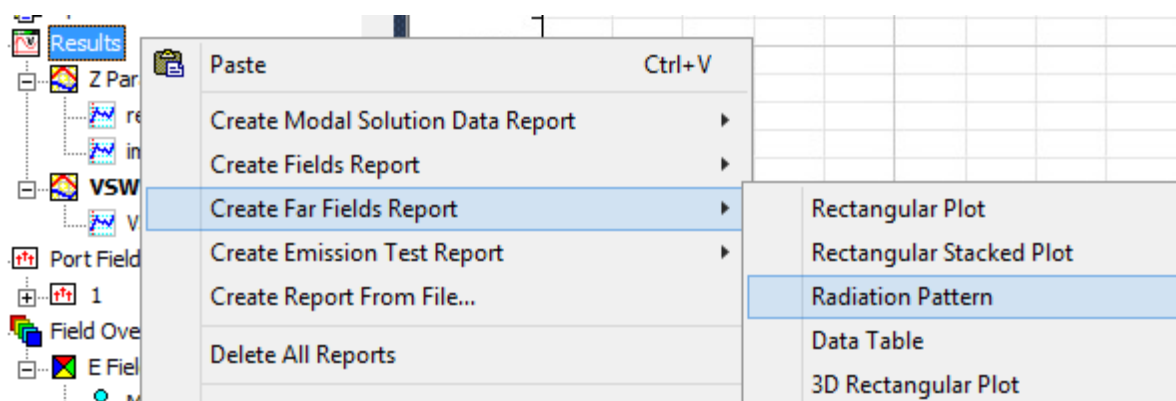


Рис. 38. Добавление в проект графического поля для диаграммы направленности

В дереве проекта нажмите на узел InfiniteSphere1 в Radiation правой кнопкой мыши (рис. 39) и выберите Compute Antenna Parameters (расчет антенных характеристик). В появившемся окне отображается максимальный коэффициент направленного действия (КНД) антенны (Peak Directivity), максимальный коэффициент усиления (КУ) антенны (Peak Gain) и его значение с учетом неидеальности согласования (Peak Realized Gain), а также углы  $\theta$ ,  $\varphi$ , при которых они наблюдаются. Кроме того, в окне можно увидеть рассчитанную эффективность излучения или КПД антенны (Radiation Efficiency) и коэффициент защитного действия (КЗД) антенны (Front to Back Ratio). Можно определить преимущественную поляризацию поля излучения антенны в различных направлениях по данным внизу окна. Например, из этих данных видно, что в направлении  $\theta = 0$ ,  $\varphi = 0$  максимальна будет у-составляющая вектора  $\vec{E}$  и антенна в этом направлении будет иметь линейную поляризацию.

Определите все перечисленные характеристики антенны.

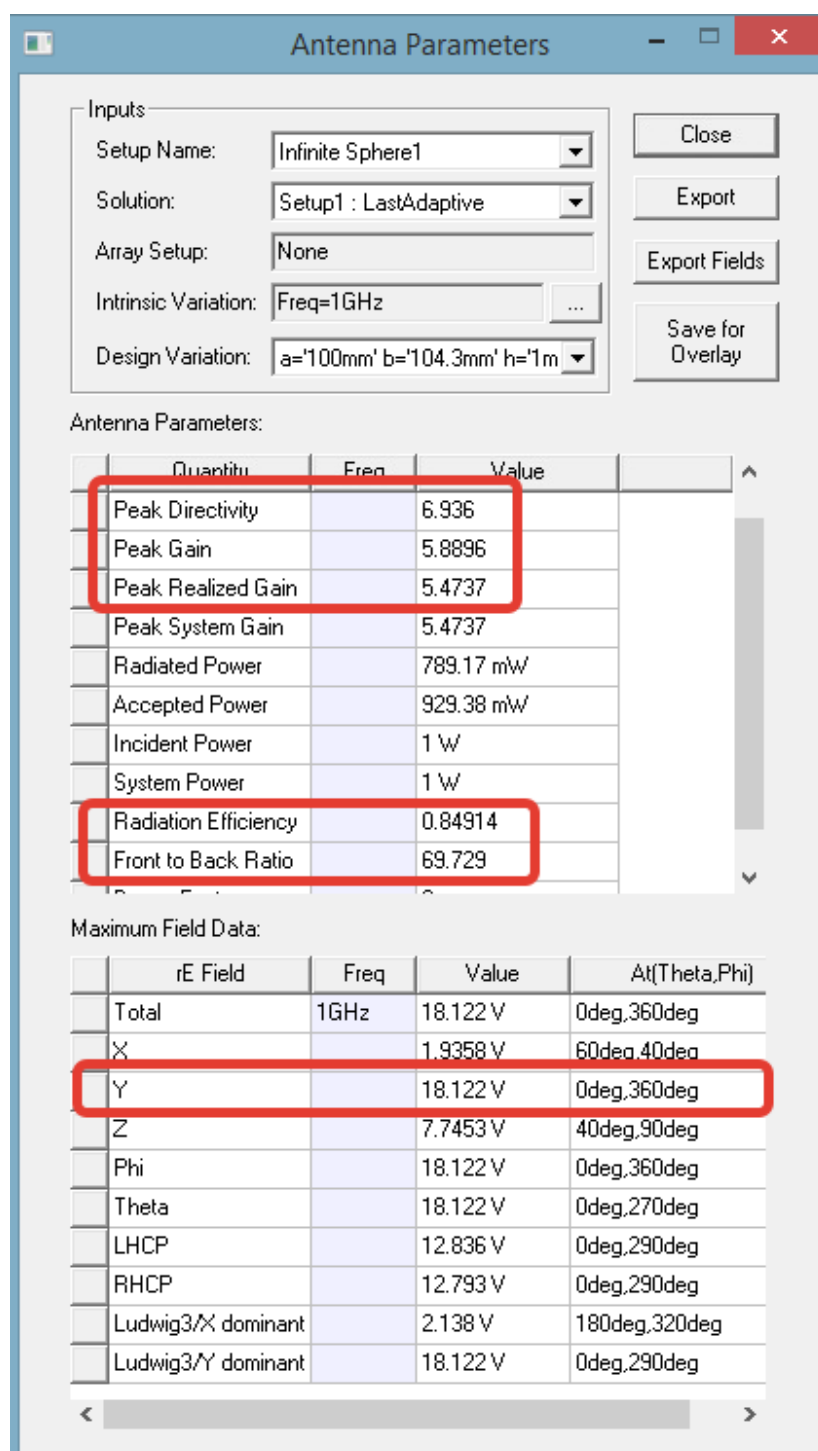
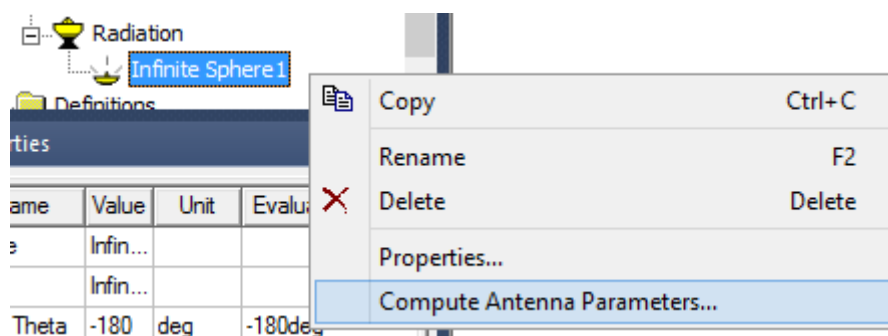


Рис. 39. Определение антенных характеристик модели

Выполните все проделанные настройки и расчет характеристик для той же антенны, продублировав созданную модель в проекте скопировав модель в дереве проекта и вставив ее в проект (рис. 40), но с в два раза увеличенной толщиной подложки  $h$ . Сравните полученные характеристики.

Выполните все проделанные настройки и расчет характеристик для круглого полоскового резонатора, рассчитанного в домашнем задании, продублировав созданную первоначально модель, удалив из дерева модели прямоугольную проводящую пластину, добавив круг соответствующих размеров (радиус  $a$ ) с координатами центра  $0, 0, h$  (рис. 41), наложив на него граничные условия идеального проводника (рис. 15).

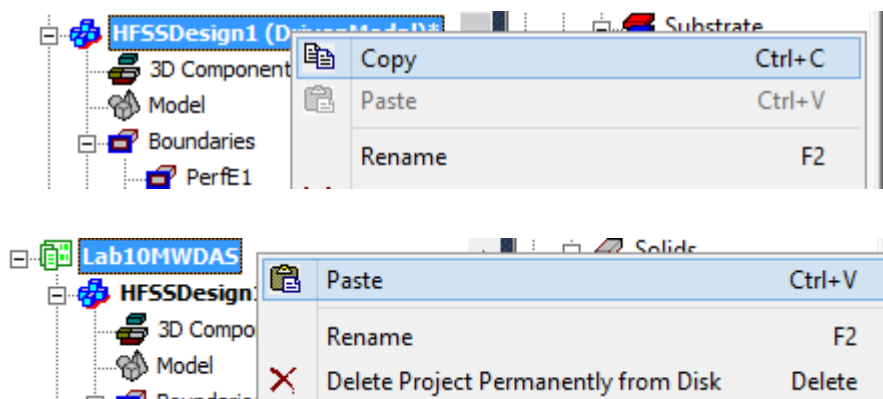


Рис. 40. Дублирование модели в проекте

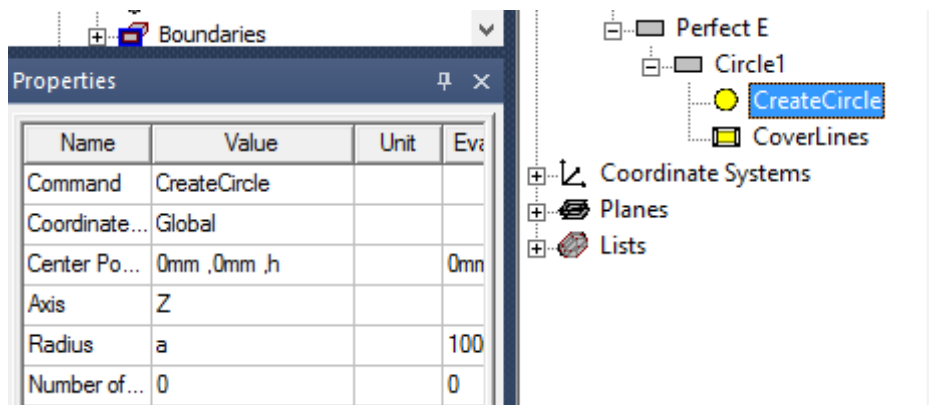


Рис. 41. Создание круглой проводящей пластины

Сравните характеристики всех смоделированных антенн и сделайте выводы.

## **Содержание отчета**

1. Цель работы.

2. Выполненное домашнее задание.

3. Модели исследуемых устройств. На изображениях моделей обозначить размеры и порты.

4. Результаты расчетов, включая все результаты, получаемые в ходе выполнения работы: графики и картины поля. Ко всем графикам должны быть даны пояснения. На всех графиках должны быть обозначены оси координат и единицы измерения величин по осям. Однотипные и сравниваемые графики рекомендуется помещать на одно графическое поле.

5. Выводы по проделанной работе с подробным анализом полученных результатов и принципов работы устройств. Для анализа рекомендуется все полученные характеристики внести в таблицу.



## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Антенны и устройства СВЧ / Сазонов Д. М. – Москва : Высшая школа, 1988. – 432 с.
2. Микрополосковые антенны / Панченко Б. А. и Нефедов Е. И. – Москва : Радио и связь, 1986. – 144 с.