



**Ю. Е. Мительман**

# **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК 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.

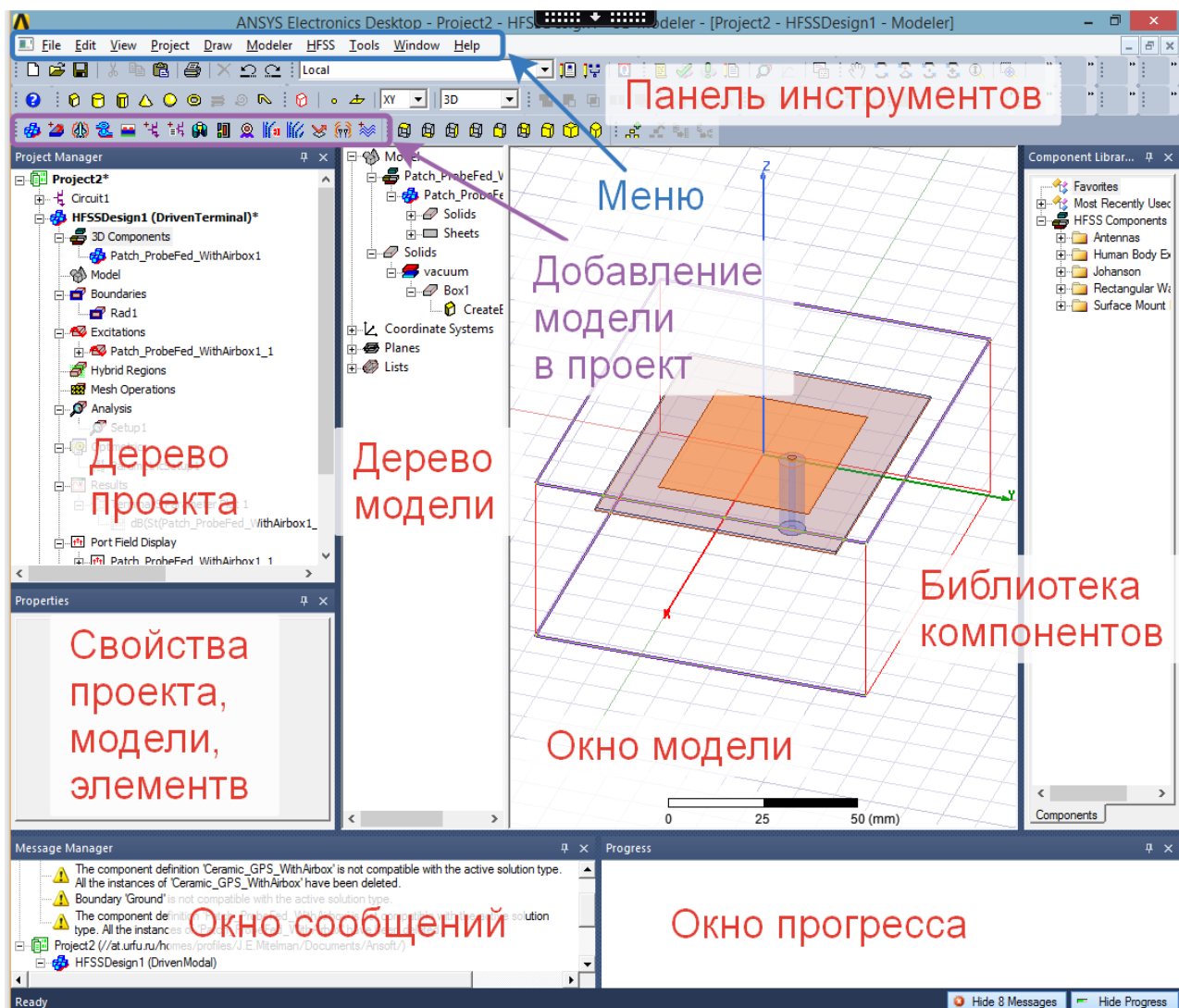


Рис. 1. Интерфейс рабочего стола ANSYS Electronics Desktop

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 дерево 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.

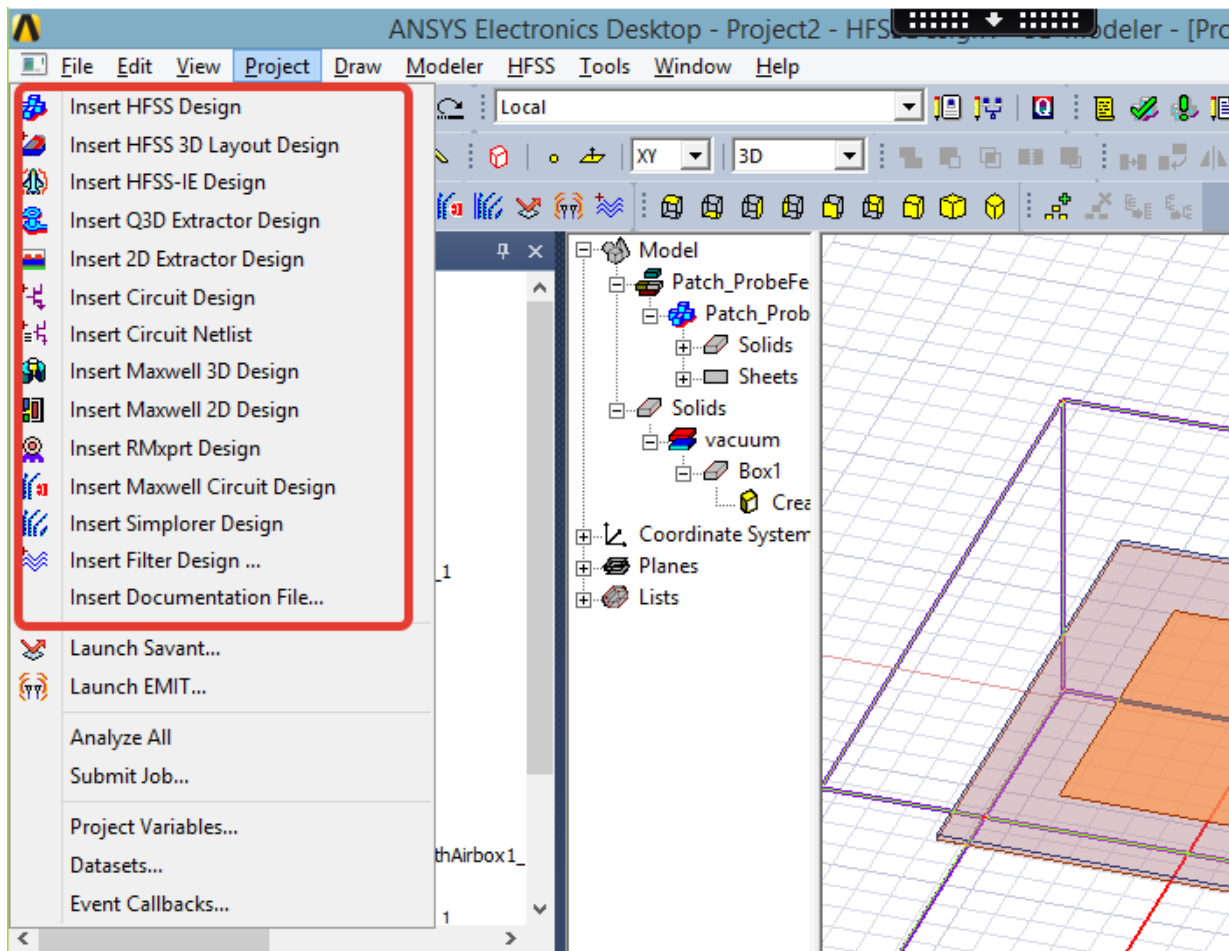


Рис. 2. Добавление модели в проект

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).

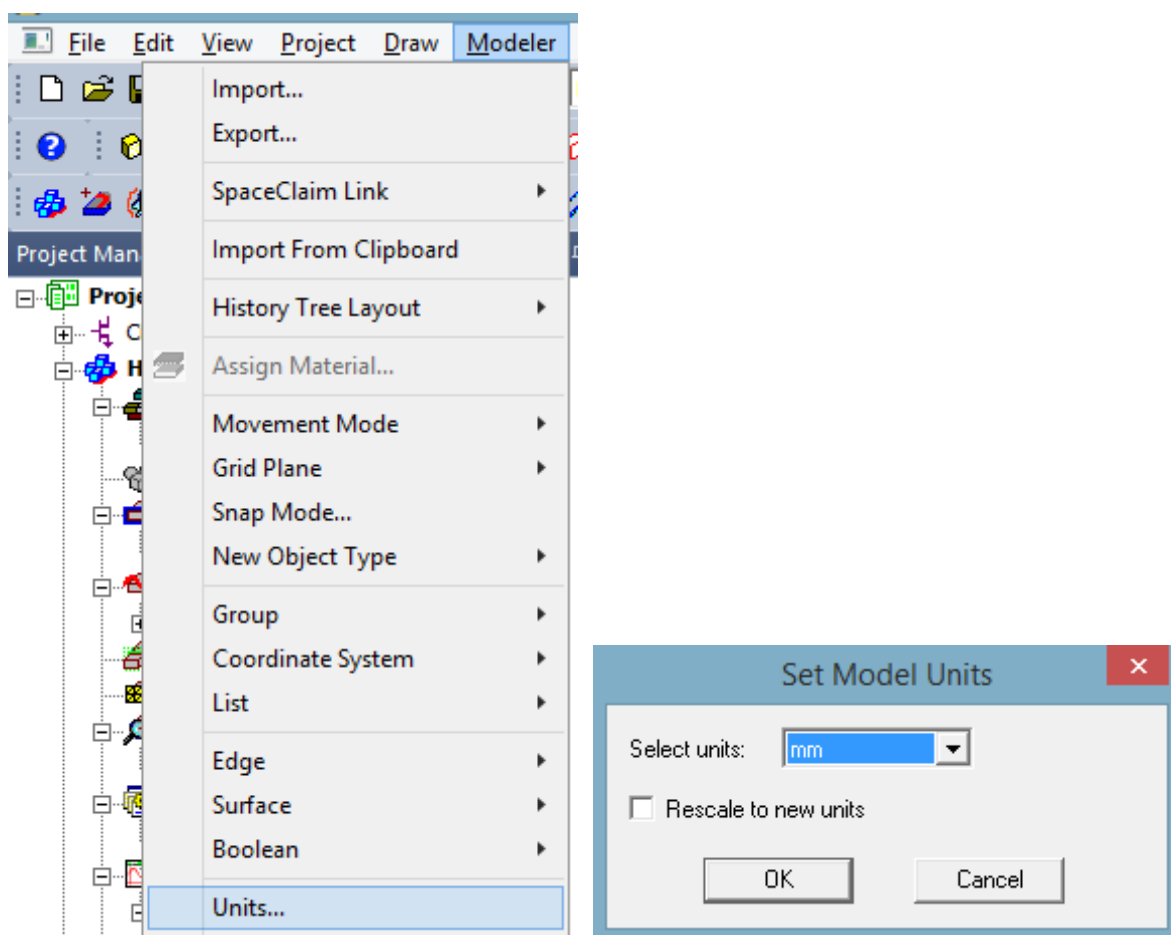


Рис. 3. Установка единицы измерения размеров в модели

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 ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Цель работы – ознакомиться с основами автоматизированного проектирования и моделирования линейных антенных решеток в ANSYS Electronics Suite, исследовать их характеристики.

Перед началом работы настоятельно рекомендуется ознакомиться с принципами работы линейных антенн и решеток [1].

## Домашнее задание

1. Рассчитать длину полуволновой вибраторной антенны с использованием центральной частоты рабочего диапазона из табл. 1.

Таблица 1

Параметры антенн

№ вар.	Частота, МГц	№ вар.	Частота, МГц	№ вар.	Частота, МГц	№ вар.	Частота, МГц
1	150	6	1500	11	2450	16	240
2	450	7	1800	12	788	17	210
3	900	8	1200	13	400	18	500
4	868	9	2100	14	300	19	600
5	433	10	800	15	270	20	1000

2. Определить коэффициент укорочения вибраторной антенны в соответствии с графиком на рис. 4. Принять диаметр проводника равным  $\lambda / 100$ .

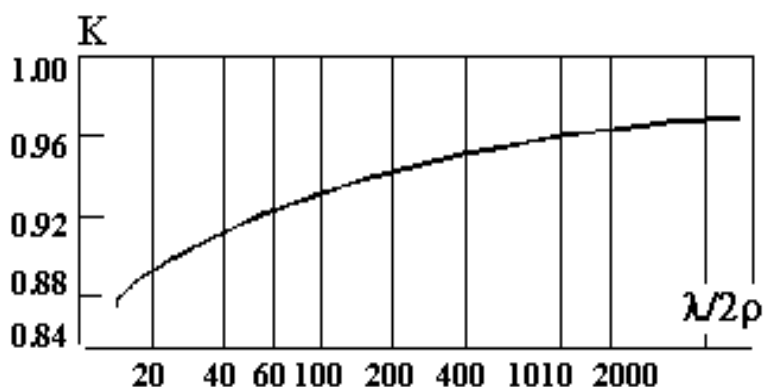


Рис. 4. Зависимость коэффициента укорочения от длины волны ( $2\rho$  – диаметр проводника)

## 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. 5), либо нажав на соответствующую иконку на панели инструментов.

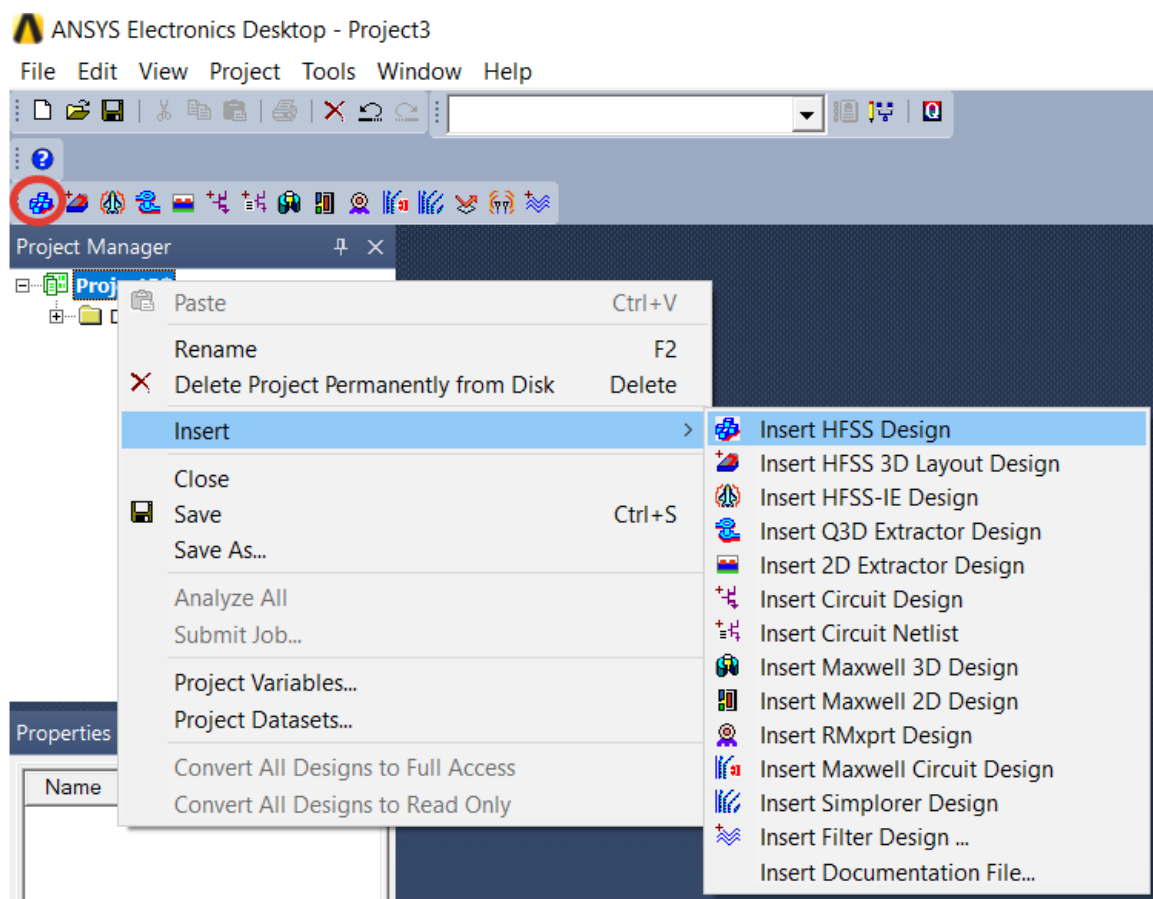


Рис. 5. Добавление модели в проект

Создадим плечо вибратора, нарисовав цилиндр (рис. 6). 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) – Cylinder1 (по умолчанию объекты создаются с именем *Objectp*, где *Object* – название класса объекта – Box, Cylinder, Line, Cone, Sphere и т. д., а *p* – номер объекта).

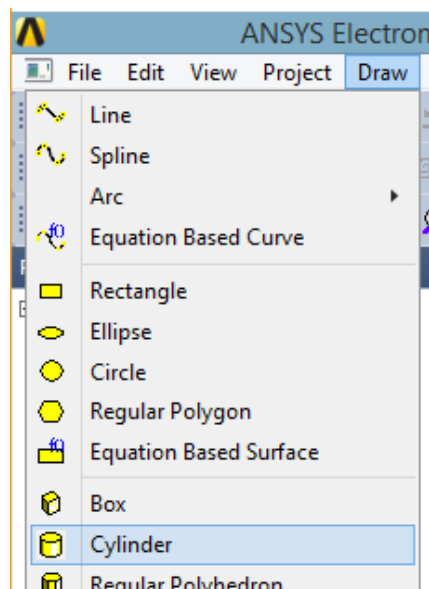


Рис. 6. Создание цилиндра

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 Cylinder – CreateCylinder. В свойствах этого действия (рис. 7) можно изменить первоначально заданные при помощи мыши его размеры (Radius, Height) и координаты центра основания цилиндра (Center Position), от которого отсчитывается радиус и высота вдоль координаты, записанной в Axis. Смените Axis на X.

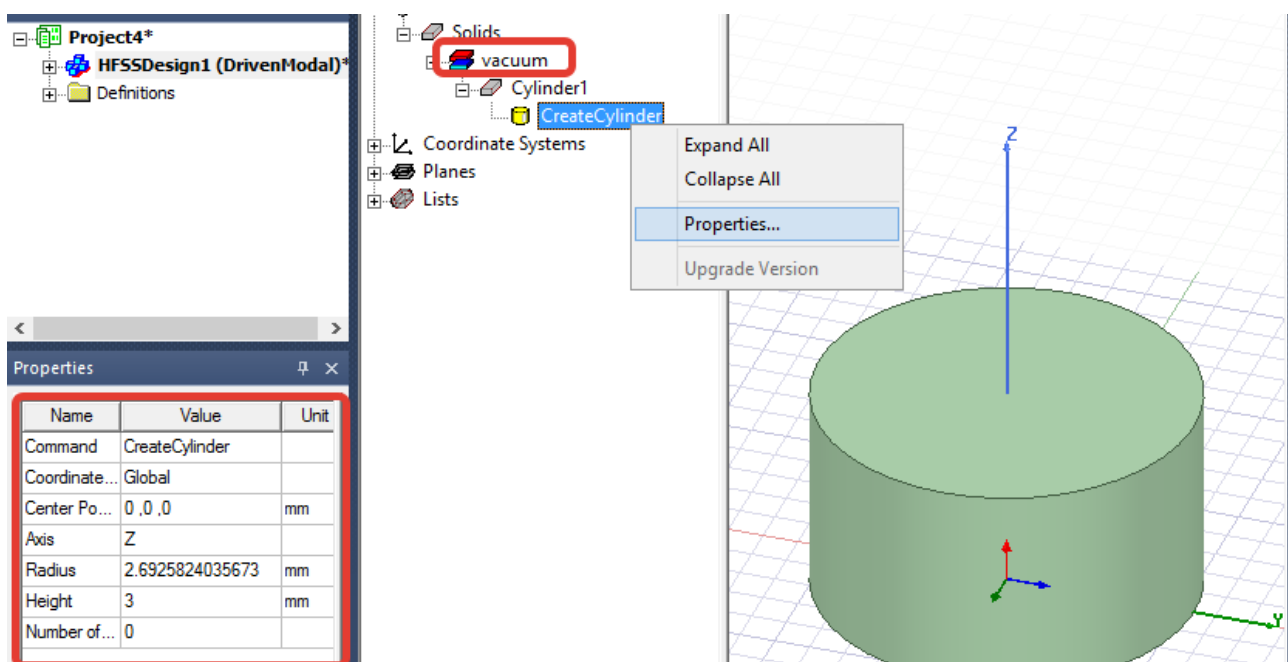


Рис. 7. Задание параметров объемной фигуры

Зададим размеры Cylinder1. центр основания поместим в смещенную от начала системы координат на  $2 \times r1$  точку: впишем в поле Center Position  $2 \times r1, 0, 0$  и нажмем Enter, после чего откроется окно ввода значения первого параметра  $r1$  (рис. 8). Радиус  $r1$  цилиндра зададим равным одной двухсотой длины волны в свободном пространстве на центральной частоте по табл. 1, вписав в окно это значение, обязательно обозначив размерность (mm) после самого значения и нажмем Enter. Запишем  $r1$  в поле Radius в окне свойств. В поле Height зададим высоту параметром  $l1$  (длина плеча – четверть длины волны) и добавим соответствующее значение переменной в проект аналогично радиусу. В нижней части окна свойств в поле Number of segments введите 4. Тем самым мы заменим цилиндр шестигранником, что существенно сократит время расчетов в будущем.

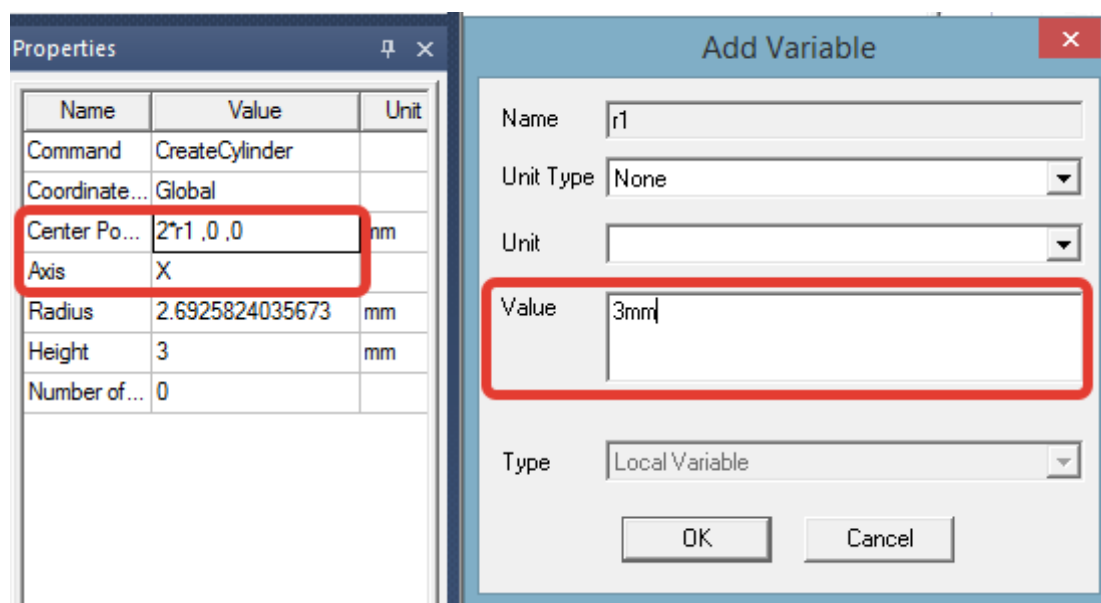


Рис. 8. Задание размеров и координат параметрами

Зададим материал цилиндра, нажав правой кнопкой мыши на vacuum и выбрав Properties (рис. 9). В открывшемся окне можно выбрать материал из библиотеки программы, отредактировать параметры материала в библиотеке либо добавить свое определение материала. Выберем материал алюминий, введя в поле Search by Name aluminum и нажав на материал в окне дважды, либо выделив его и нажав ОК. После и выбора материала цилиндра его название появится в дереве проекта вместо vacuum.

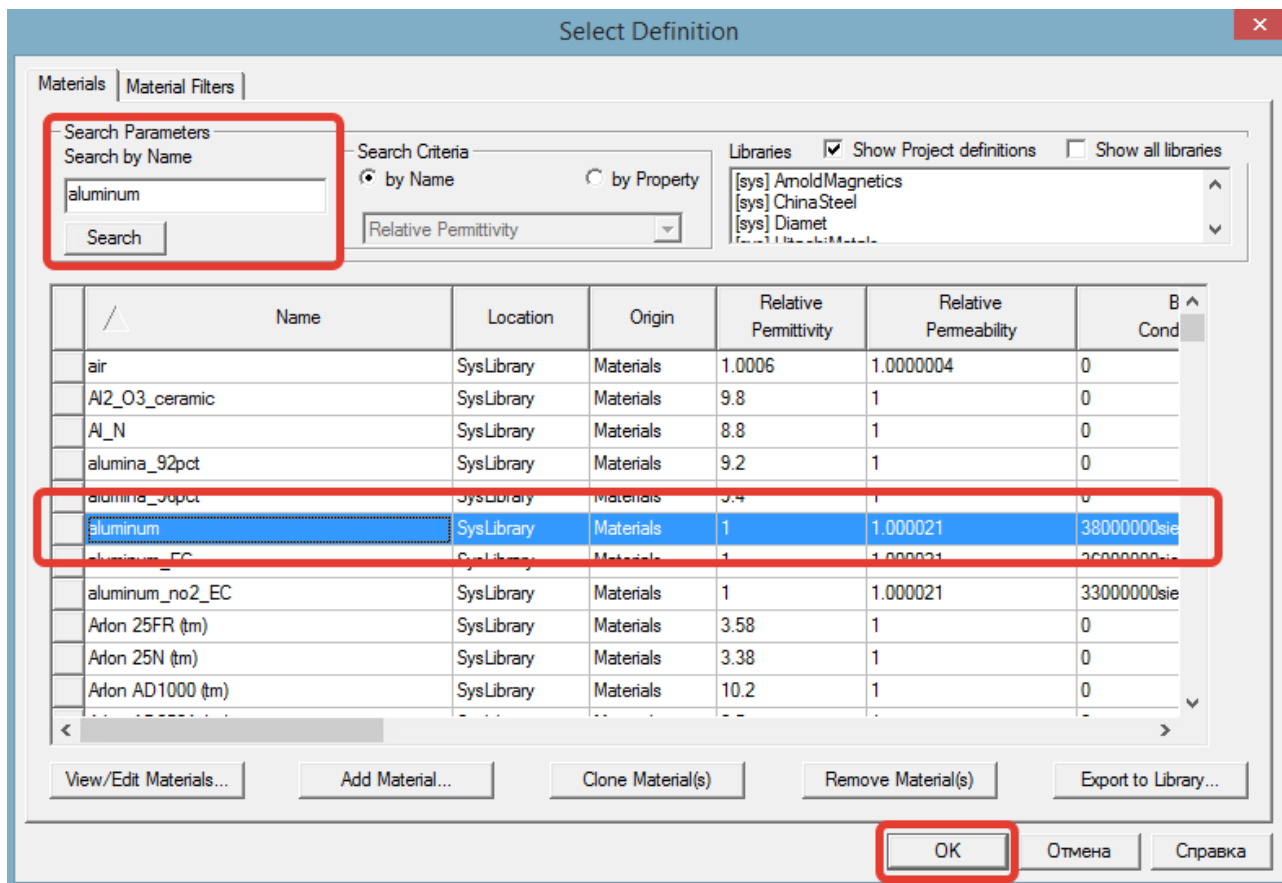
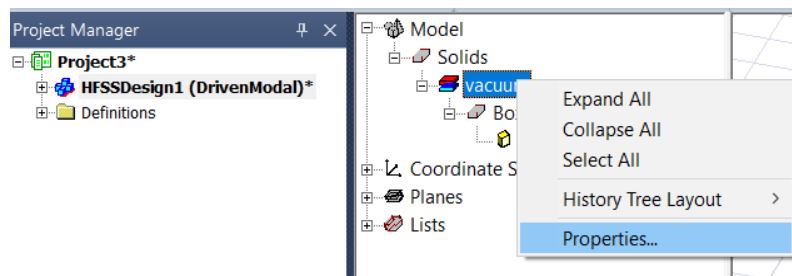


Рис. 9. Задание материала

Создадим второе плечо вибратора дублированием первого с поворотом вокруг оси Y на 180 градусов (рис. 10). После этого в дереве модели появится узел DuplicateAroundAxis под Cylinder1 и новый примитив Cylinder1\_1. В отличие от первоначального примитива Cylinder1 невозможно будет задать параметры нового примитива напрямую, можно только изменить свойства родительского узла в дереве модели и свойства операции дублирования. Теперь в модели присутствуют оба плеча вибратора, они имеют одинаковую длину и разнесены на четыре радиуса провода. Чтобы в окне модели увидеть всю модель необходимо нажать Ctrl+D.

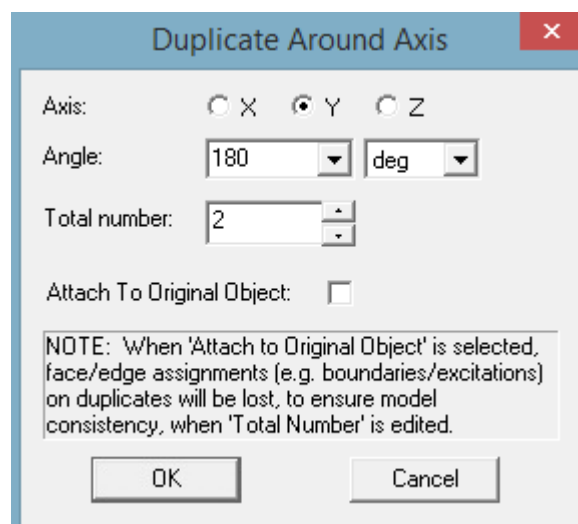
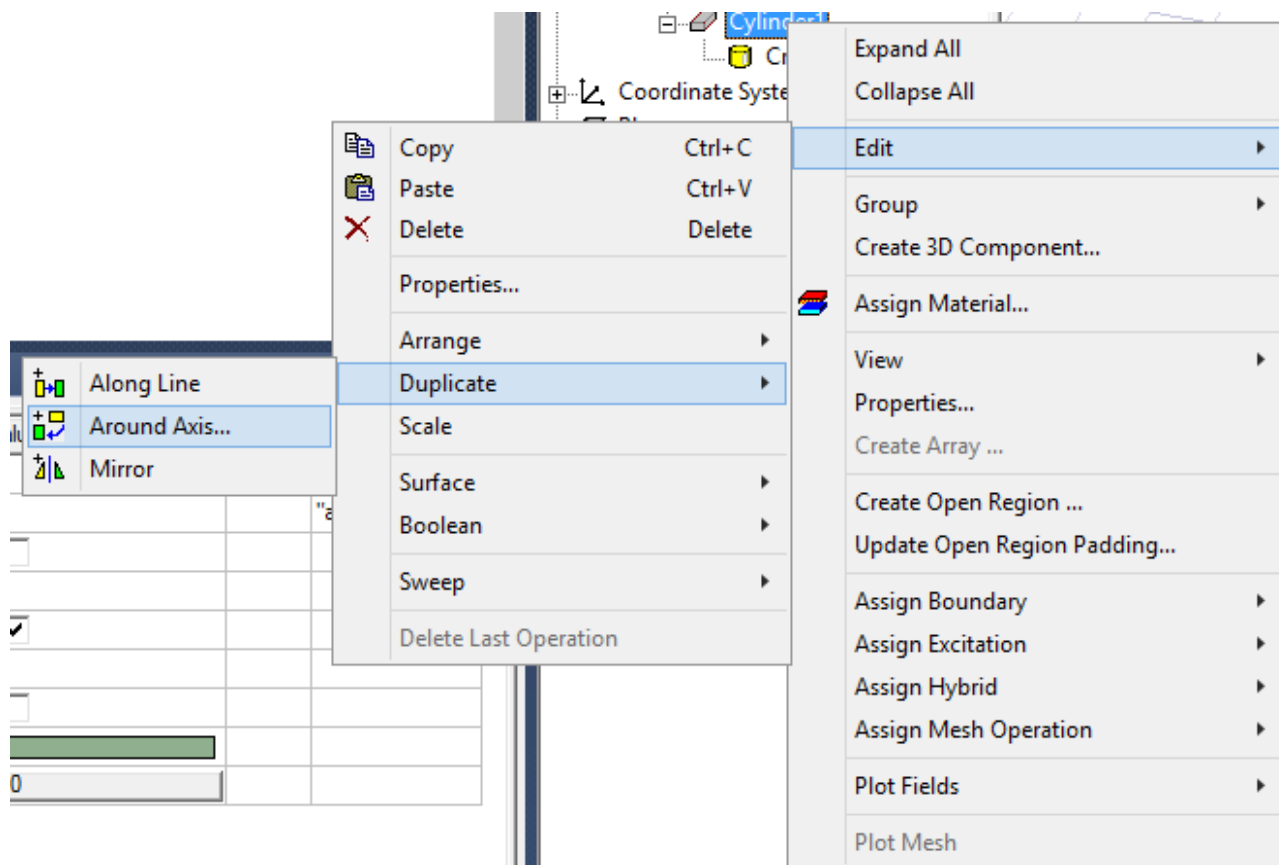


Рис. 10. Дублирование примитива через поворот вокруг оси

Прежде, чем задавать источник возбуждения изменим тип решения на Driven Terminal в свойствах модели (рис. 11). В открывшемся окне выберем Terminal и поставим галочку на Auto Open Region, в котором выберем Radiation. В модель будет автоматически добавлен примитив, ограничивающий область

расчета, с гранями, отстоящими от модели примерно на четверть длины волны. На нем автоматически будут назначены условия излучения, и он по умолчанию будет невидим для пользователя.

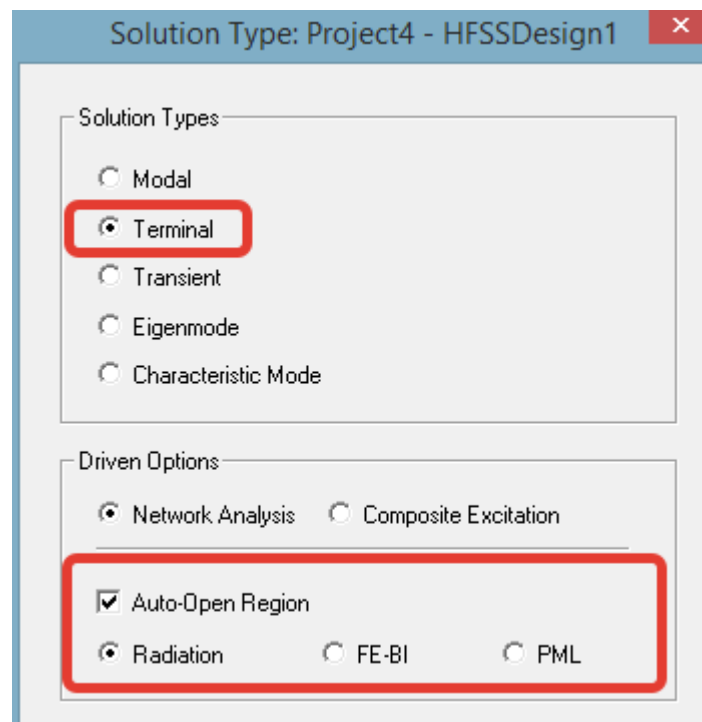
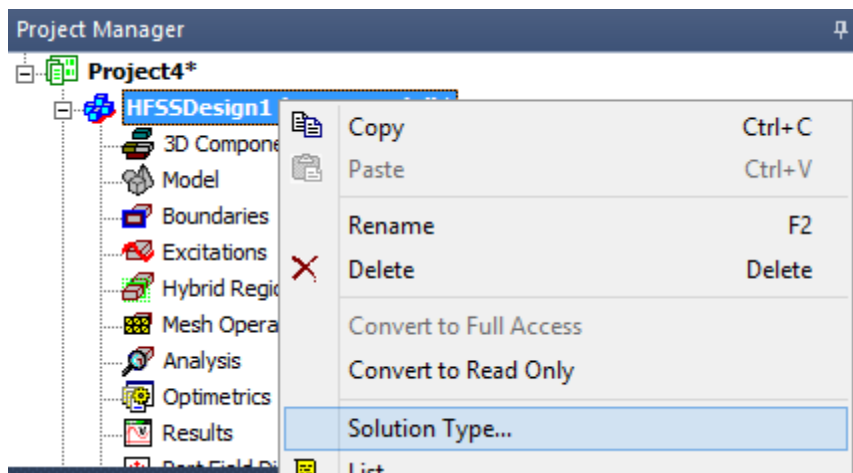


Рис. 11. Изменение типа решения

Увидеть автоматически назначенные границы модели можно нажав кнопку как показано на рис. 12 или выбрав соответствующий пункт меню, и в открытом окне перейдя на вкладку Boundaries и отметив галочкой единственный пункт.

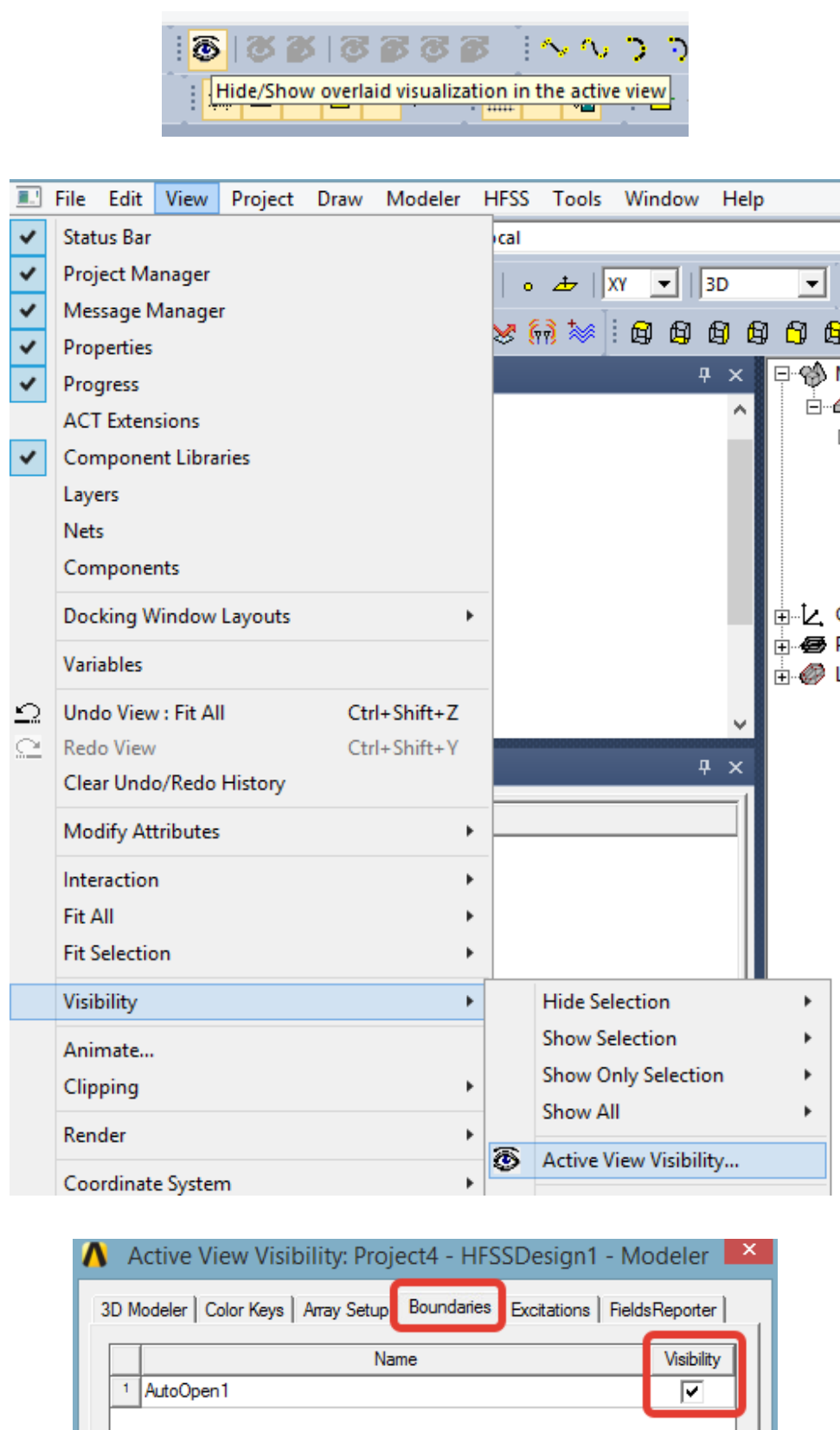


Рис. 12. Установка видимости элементов модели

Зададим источник возбуждения, создав прямоугольник командой меню (рис. 13) и дважды кликнув в произвольных местах окна модели. После создания



прямоугольника в дереве проекта появится объект Rectangle1, размеры которого в его свойствах необходимо задать координаты начального его узла, размеры и ось как показано на рис. 13. 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 или, например, источник возбуждения.

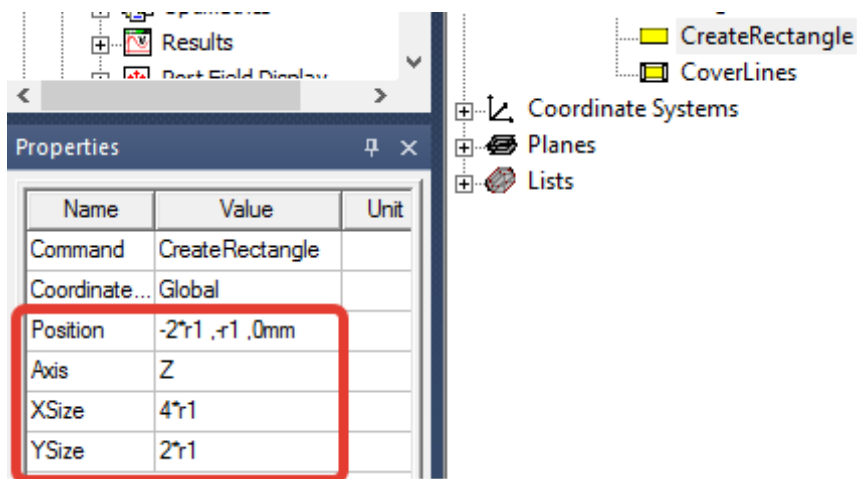


Рис. 13. Создание прямоугольника для порта

Зададим на прямоугольнике источник возбуждения в виде сосредоточенного порта (Lumped Port), как показано на рис. 14. В открывшемся окне ставим галочку напротив первоначального цилиндра. Тем самым мы задаем источник в виде напряжения на одном ребре прямоугольника по отношению к другому ребру прямоугольника (Reference – Cylinder1).

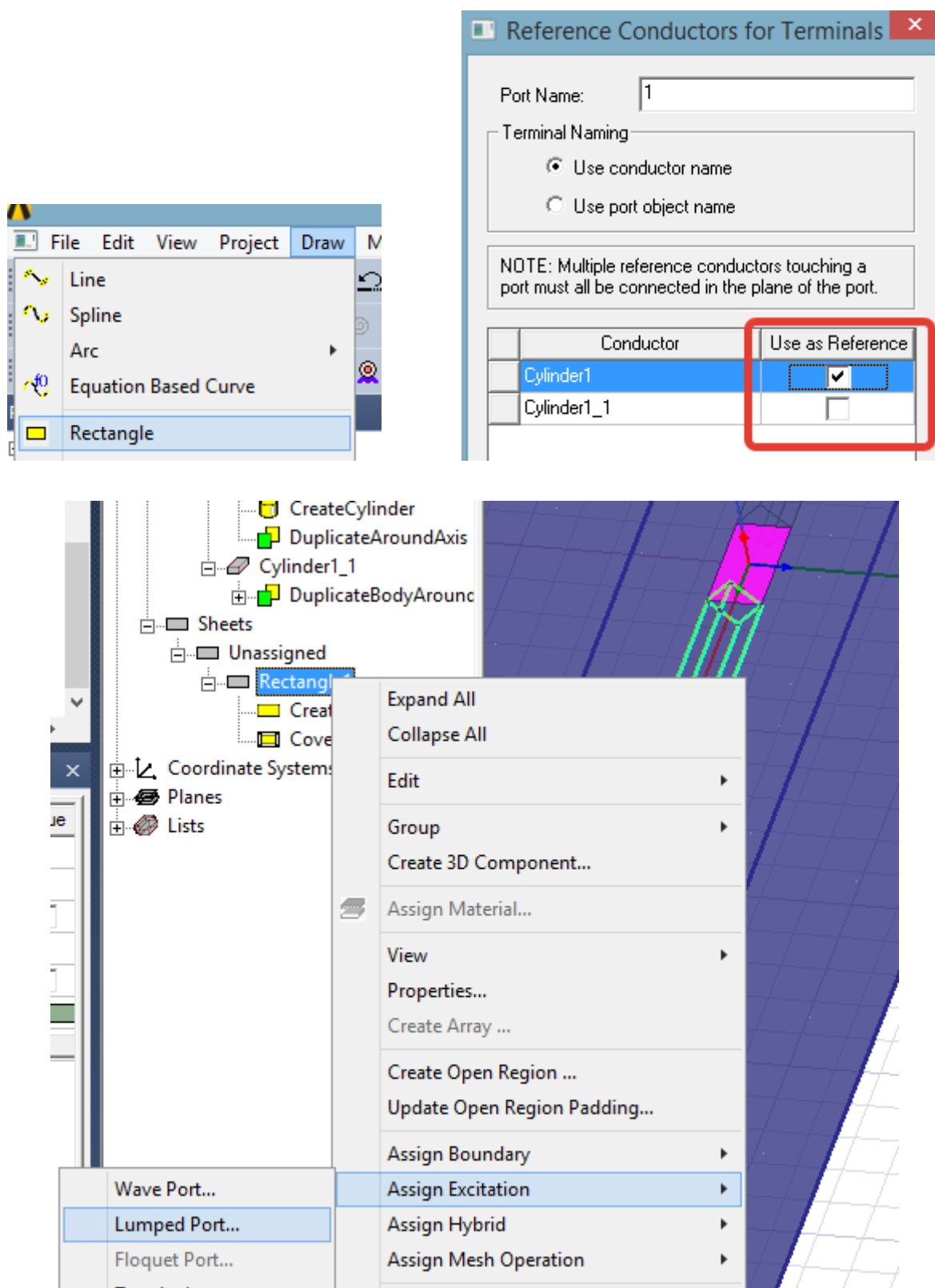


Рис. 14.Задание источника возбуждения

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 не-

возможно 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.

Сосредоточенный порт в данной работе является аналогом симметричного возбуждения полуволнового вибратора (один проводник присоединяется к первому плечу, а второй ко второму). Модель получается упрощенная, однако для настройки антенны подходит достаточно хорошо, и сокращается время расчета по сравнению с точным моделированием коаксиального входа с симметризирующим устройством.

Зададим сопротивление источника (порта) 75 Ом (рис. 15).

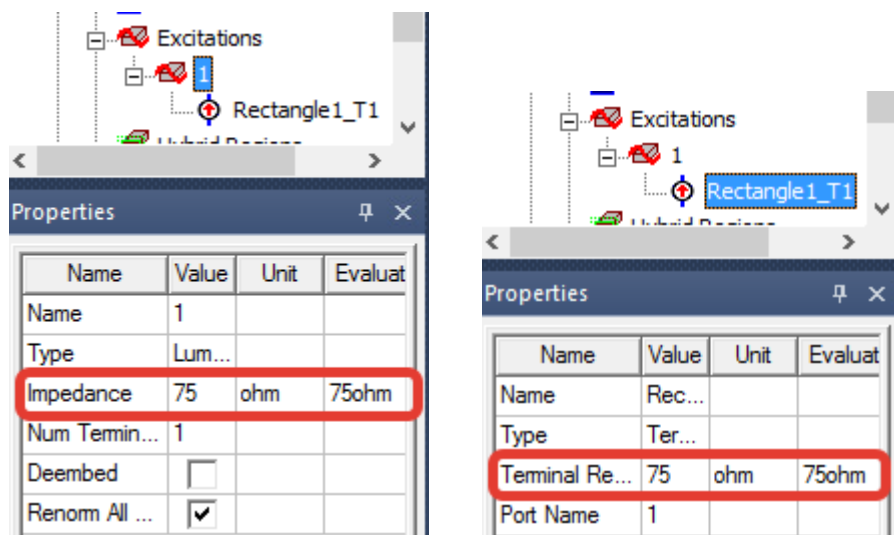


Рис. 15. Задание сопротивления порта

Добавление автоматических границ связано с длиной волны в модели, поэтому вместе с границами в модель автоматически будет добавлено решение с настройками по умолчанию, а также настройки для расчета диаграммы направленности как показано на рис. 16. При этом задается сетка для расчета электромагнитного поля в сферической системе координат в дальней зоне (шаг сетки по углам  $\phi$  и  $\theta$  и их пределы). При автоматической настройке границ модели создается три сетки: для вывода ДН в трехмерном виде (3D), в азимутальной плоскости XOY (Azimuth) и в угломестной плоскости (Elevation). Эти сетки можно изменить, дважды кликнув по пунктам дерева проекта. Для данной работы достаточно будет настроек по умолчанию.

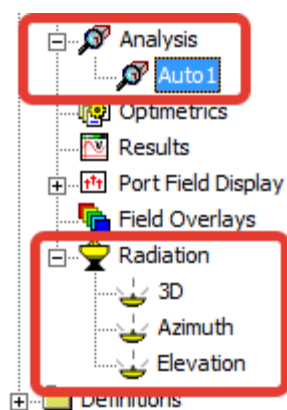


Рис. 16. Настройка для расчета диаграммы направленности

Добавим в проект настройку решения, кликнув дважды на узле Auto1 в дереве проекта (рис. 16). Задайте частоту решения (frequency) и ее единицу измерения в соответствии с табл. 1 и максимальное количество шагов адаптивного разбиения 20 (рис. 17). Эта настройка необходима, т. к. установленного количества шагов по умолчанию иногда не хватает для анализа проволочных антенн с настройками решения по умолчанию. Обратите внимание, что границы модели изменятся после изменения частоты решения, т.к. изменится и длина волны решения, в соответствии с которой границы должны быть удалены от элементов модели.

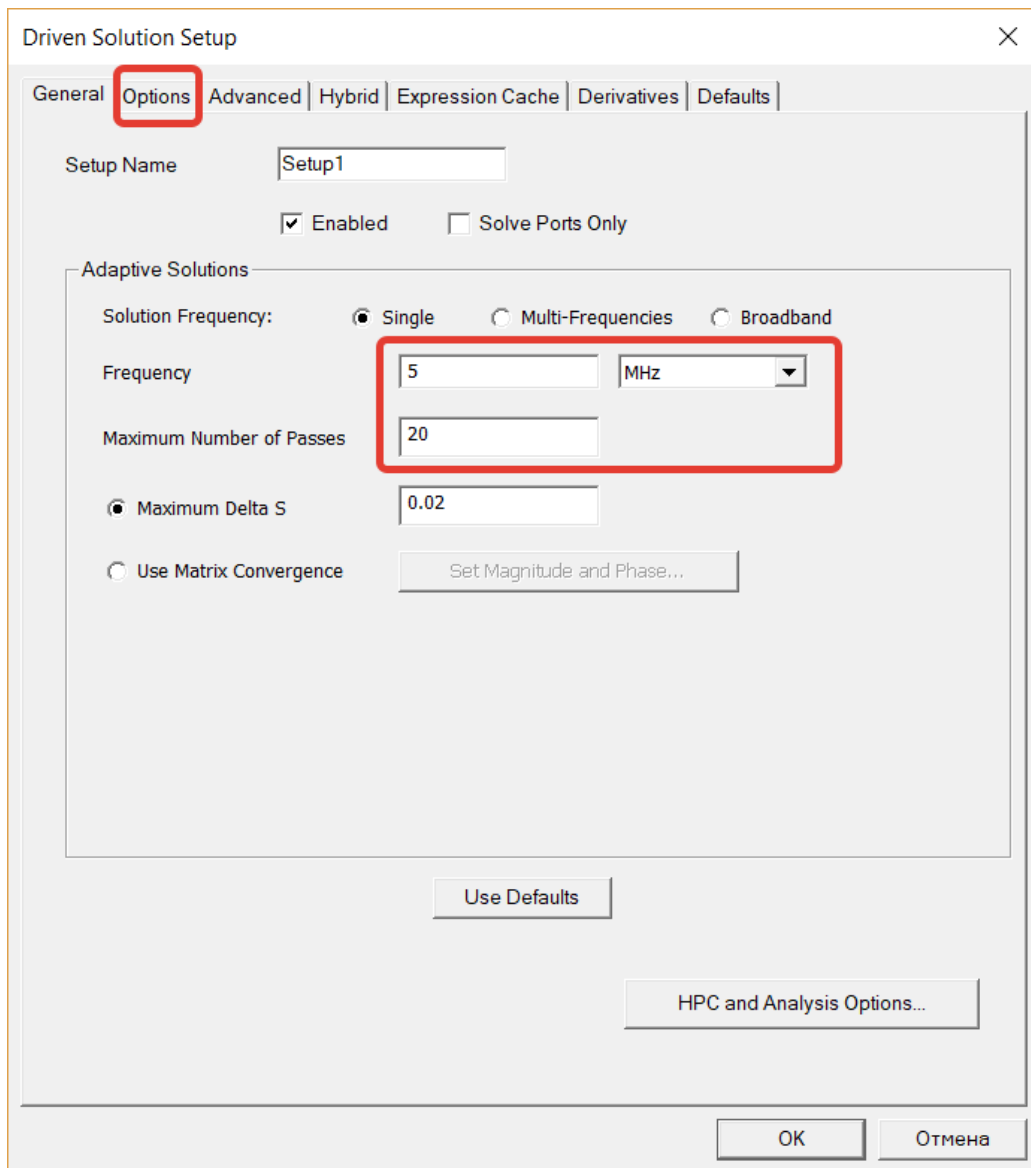


Рис. 17. Установка частоты и максимального количества итераций адаптивного решения

Добавим качание частоты (рис. 18). Установим тип качания Fast, а диапазон частот  $\pm 20\%$  от частоты, указанной в табл. 1 (рис. 19). 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. 20).

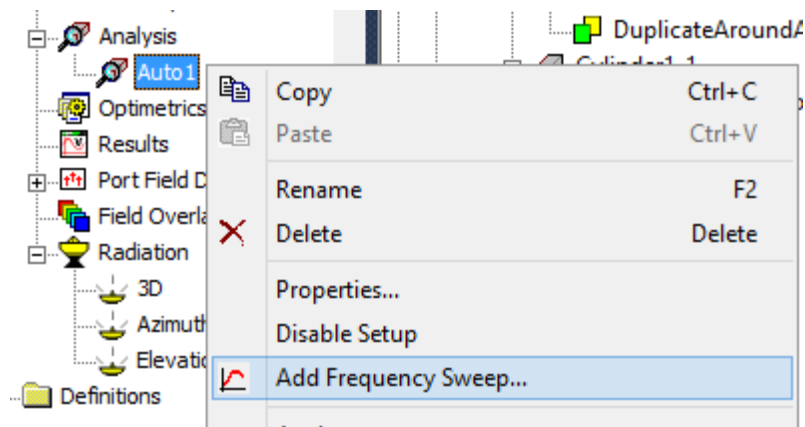


Рис. 18. Добавление качания частоты

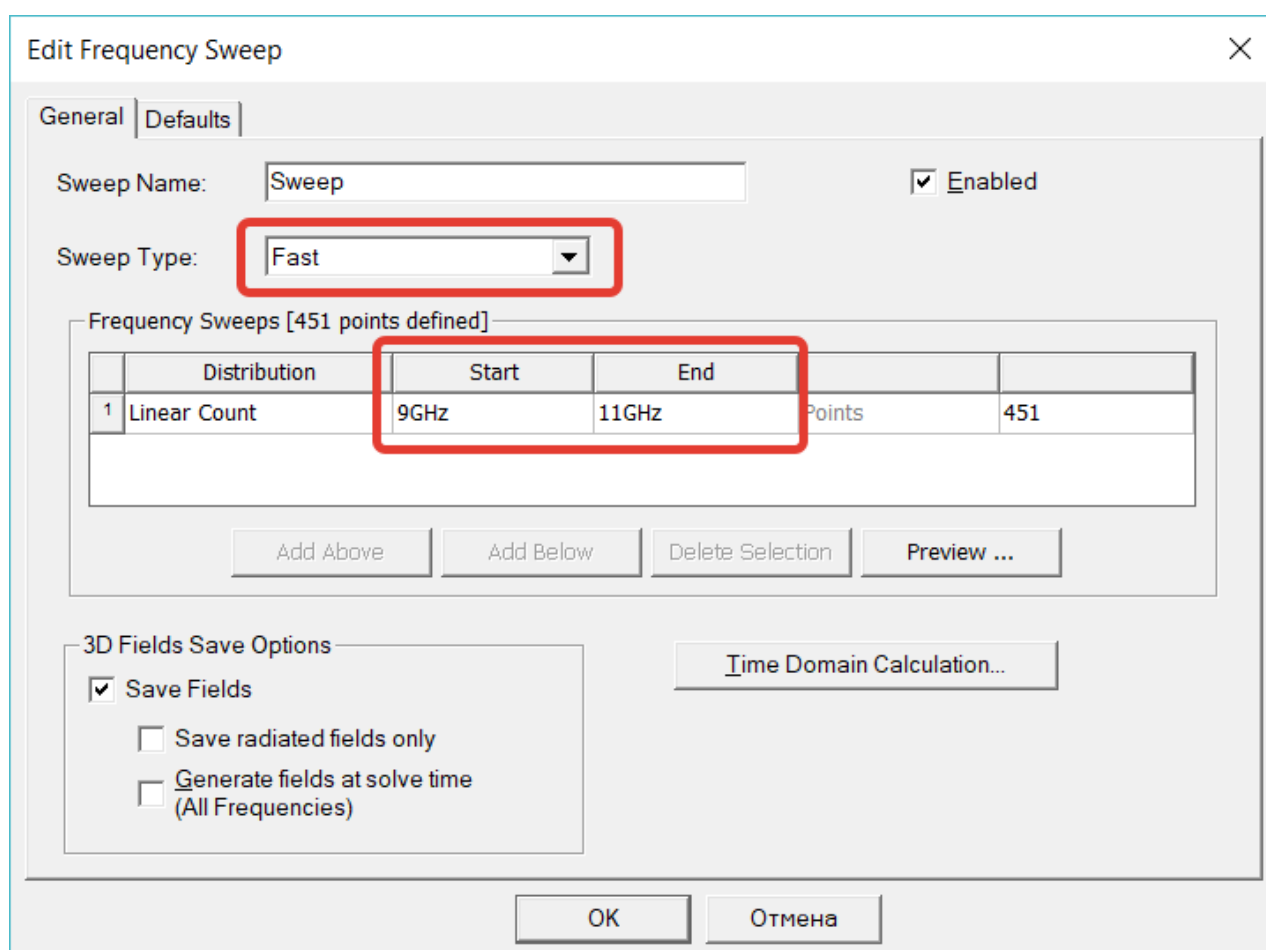


Рис. 19. Установки качания частоты

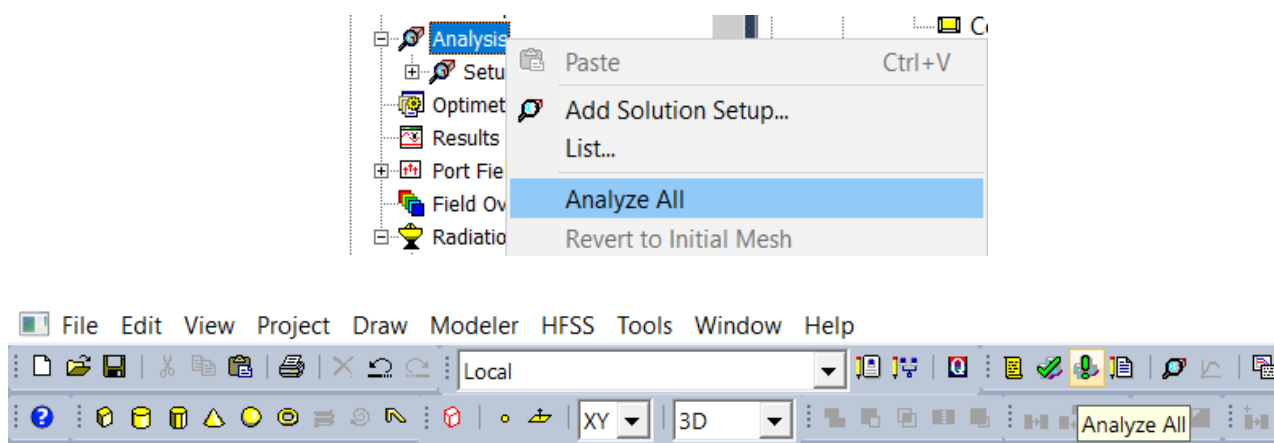


Рис. 20. Запуск расчета

Оценить сходимость адаптивного решения можно нажав Convergence в контекстном меню узла Auto1 в дереве проекта, либо по кнопке Solution Data на панели инструментов (рис. 21), перейдя на вкладку Convergence. Откроется окно, показанное на рис. 22. 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.

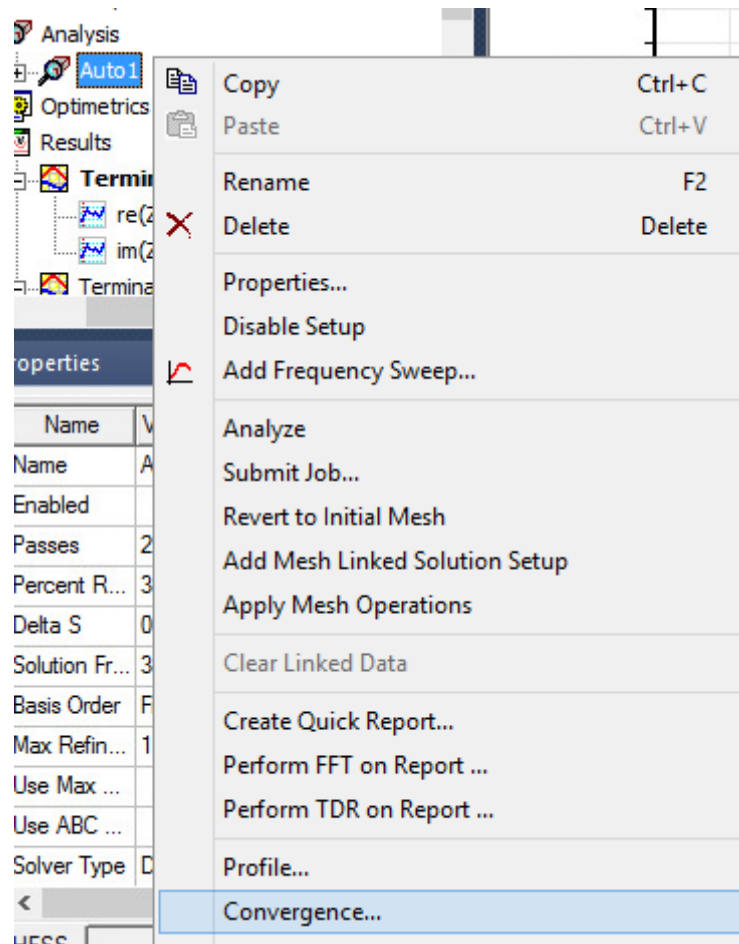


Рис. 21. Открытие окна с результатами адаптивного решения



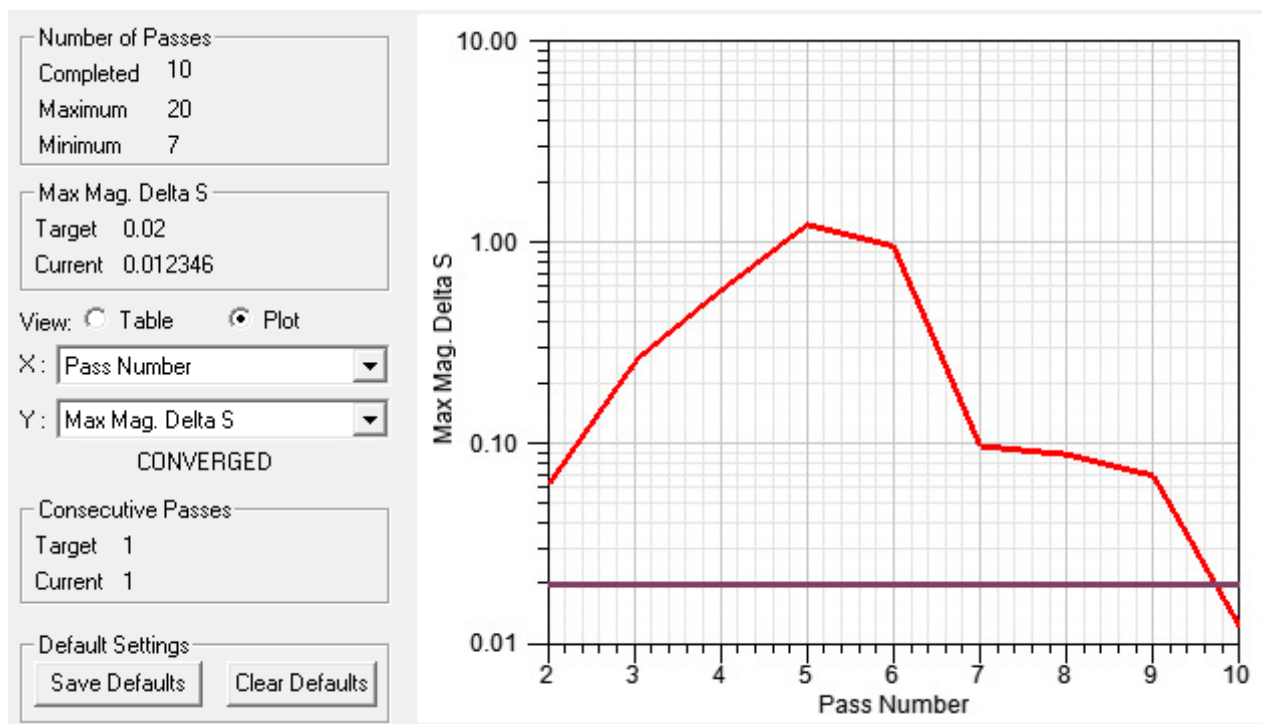
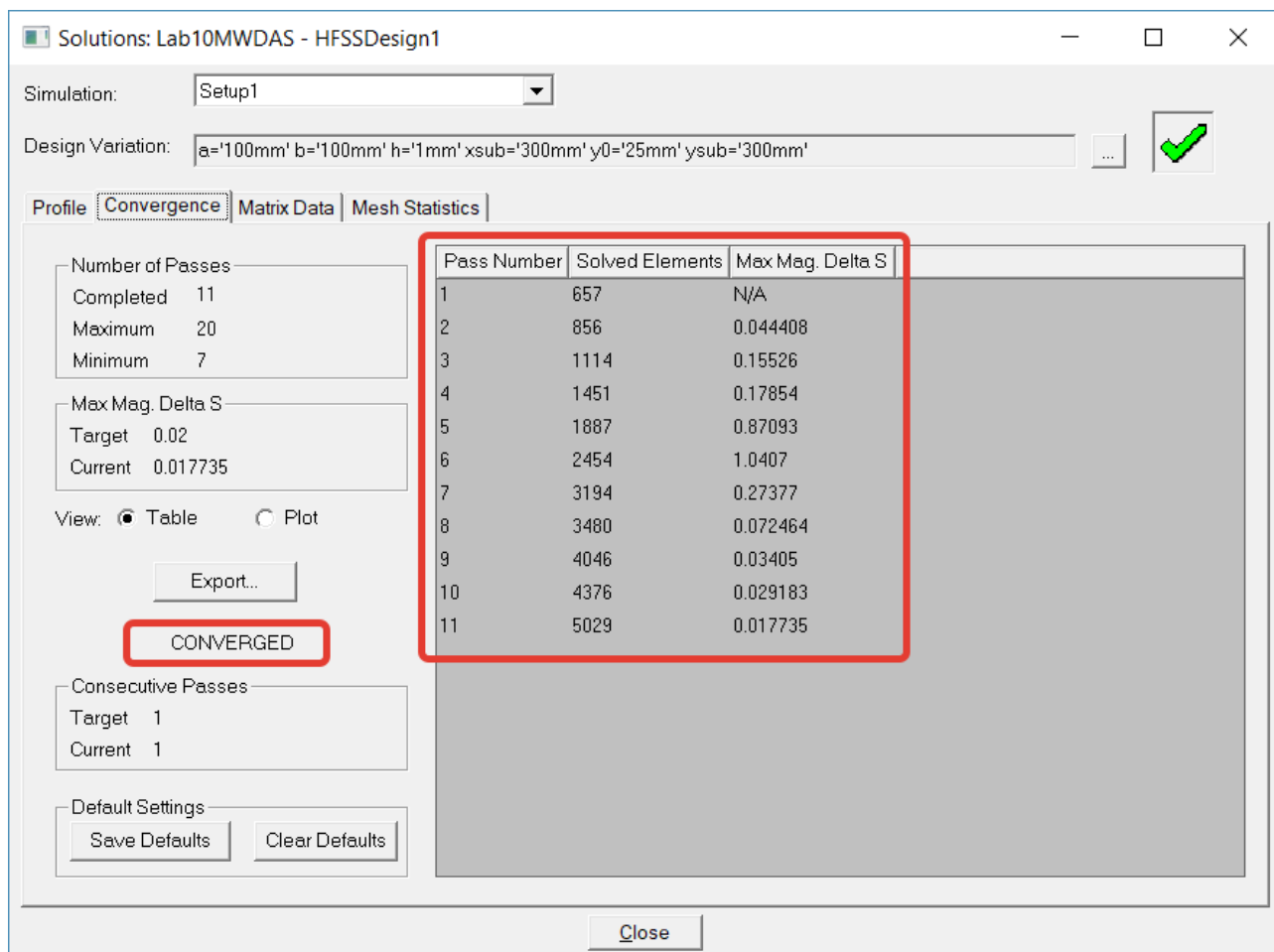


Рис. 22. Результаты адаптивного решения

Выделите в дереве проекта оба узла, соответствующие плечам вибратора, зажав клавишу Shift, нажмите на выделенные узлы правой кнопкой мыши, затем Plot Fields, J, Mag\_Jsurf (рис. 23). В появившемся окне можно выбрать частоту, на которой отобразится величина плотности тока, но оставим настройку по умолчанию (частота адаптивного решения) и нажмем Done. Чтобы после этого картина тока оказалась видимой, необходимо выбрать в дереве проекта соответствующий узел левой кнопкой мыши (рис. 23). Сделайте выводы.

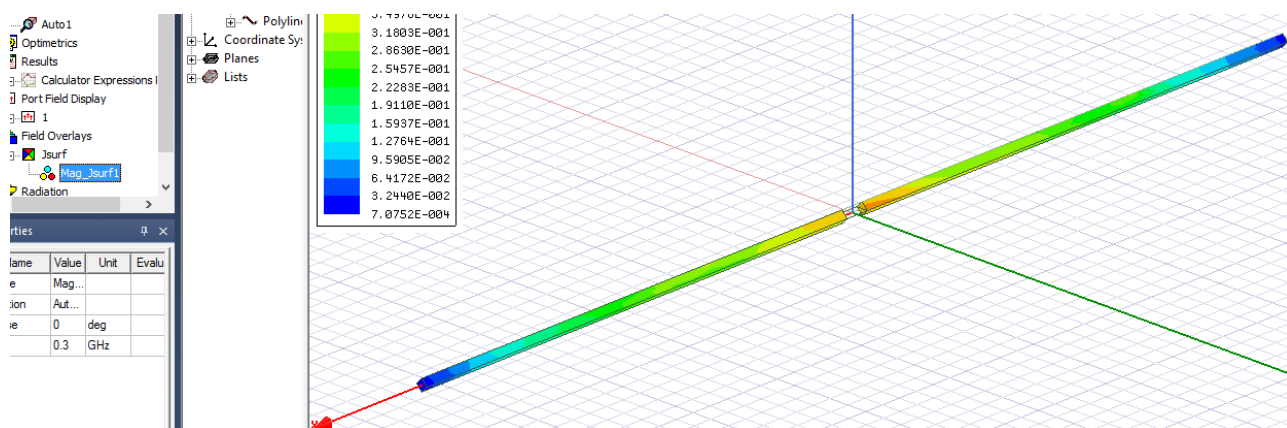
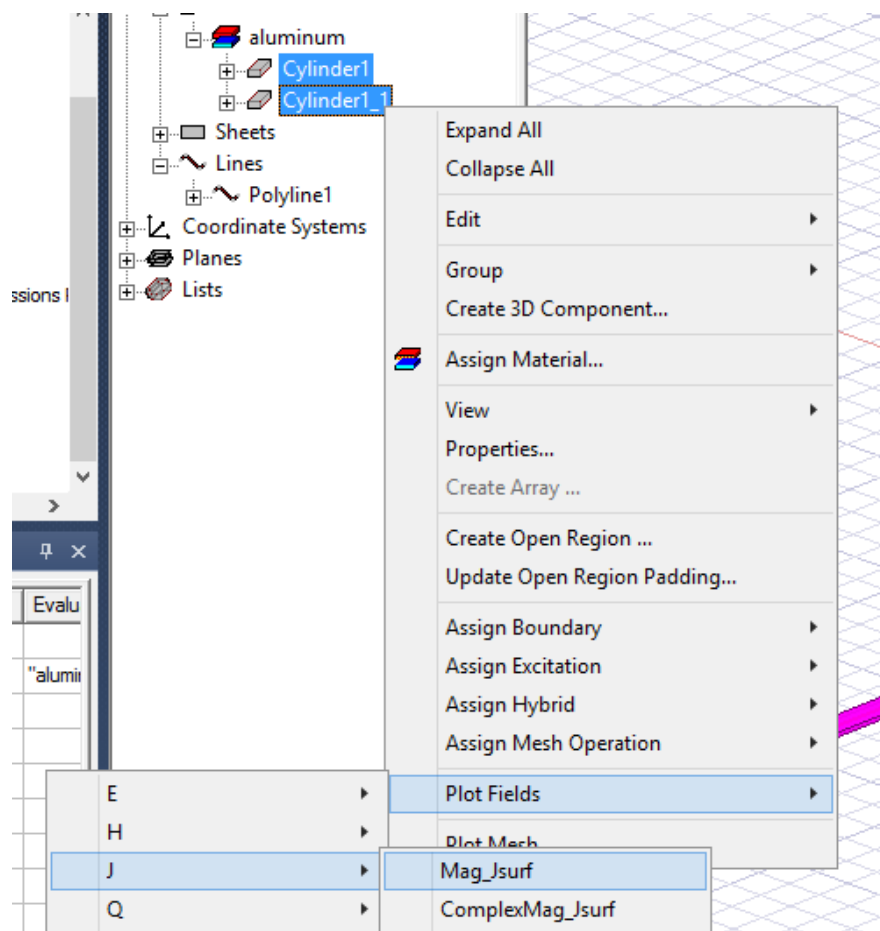


Рис. 23. Отображение плотности поверхностного электрического тока на вибраторе

Добавим графическое поле с входными характеристиками модели, нажав в дереве проекта на пункт Results правой кнопкой мыши и выбрав Create Terminal Solution Data Report (данные решения для терминалов в портах), Rectangular Plot (поле декартовой системы координат) как показано на рис. 24.

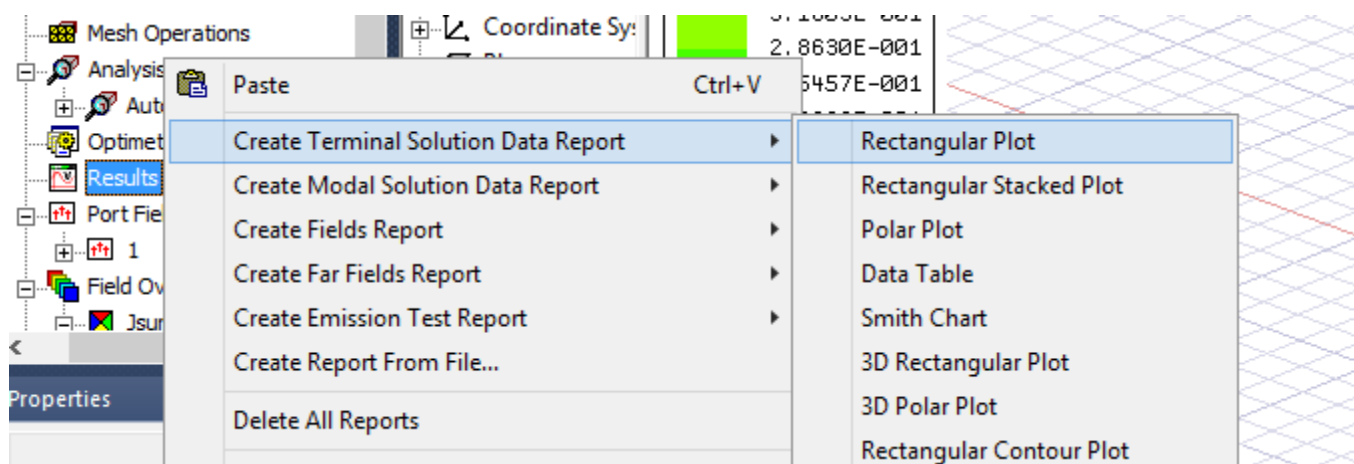


Рис. 24. Добавление графика в декартовой системе координат по терминальному решению

Добавим в проект график зависимости вещественной и мнимой частей входного сопротивления от частоты, выбрав в появившемся окне Terminal Z-parameters в левой части и применив к ним функции Im и Re из правой части окна (рис. 25). Выбирать несколько функций за один раз можно удерживая клавишу Ctrl. Нажмем New Report.

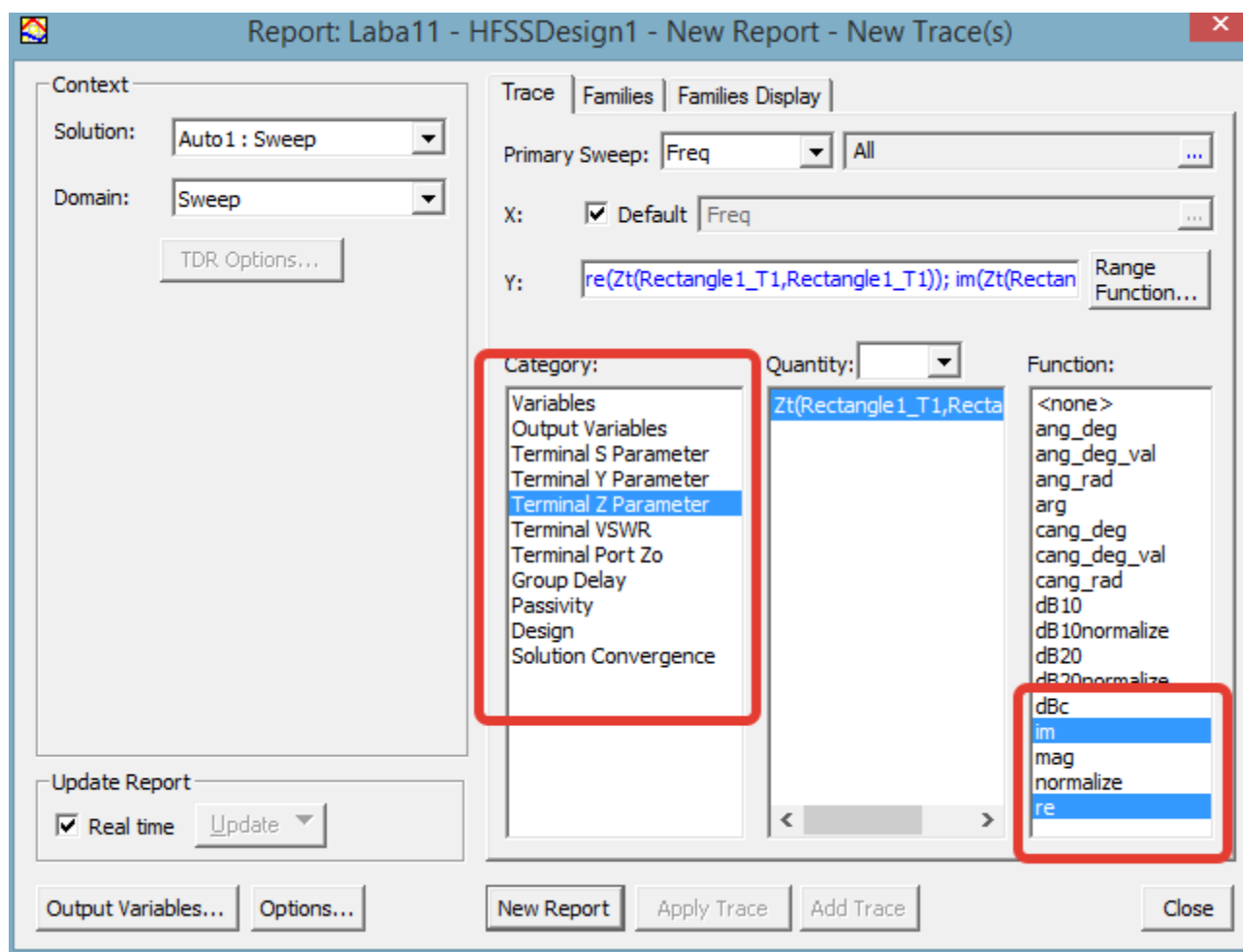


Рис. 25. Вывод на график действительной и мнимой частей входного сопротивления

Если все параметры вибратора рассчитаны верно, то на появившейся частотной зависимости можно будет наблюдать последовательный резонанс как это показано на рис. 26.

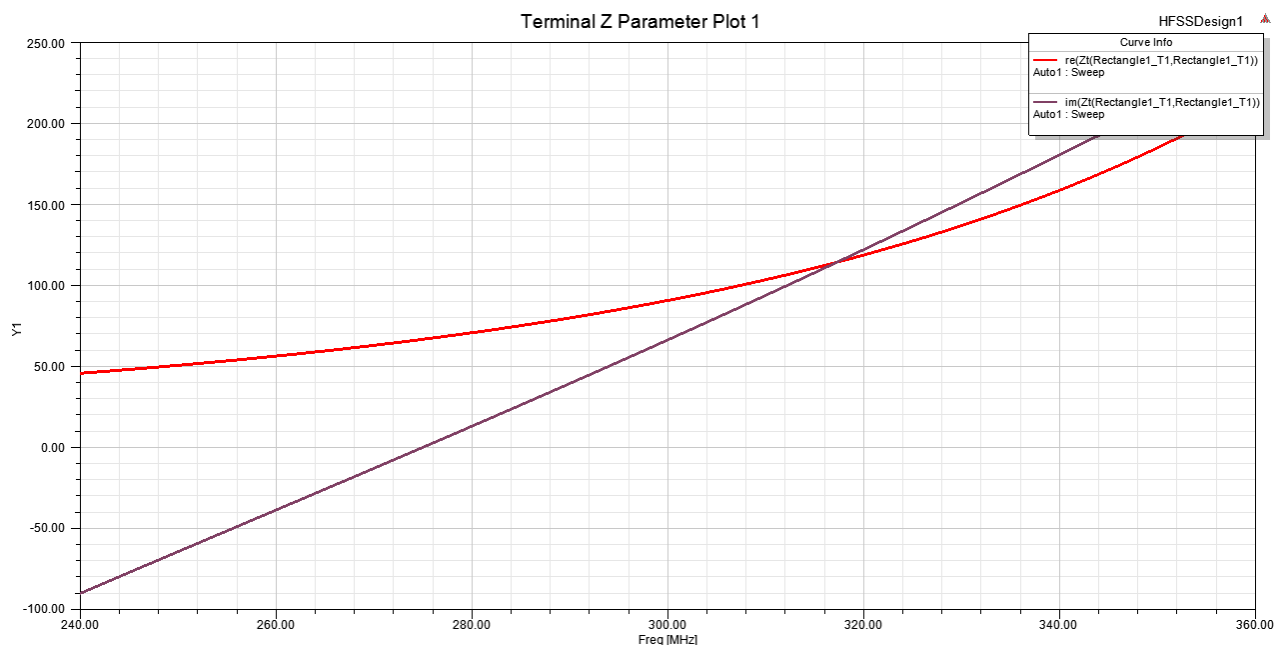


Рис. 26. Частотная зависимость входного сопротивления

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 длину плеча вибратора  $l_1$ , заданную 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. 27). После изменения размеров антенны необходимо снова запускать расчет (рис. 20). Изменяйте резонансный размер до тех пор, пока последовательный резонанс не будет наступать на центральной частоте (мнимая часть сопротивления на ней должна быть близка к нулю, а вещественная к 75 Ом).

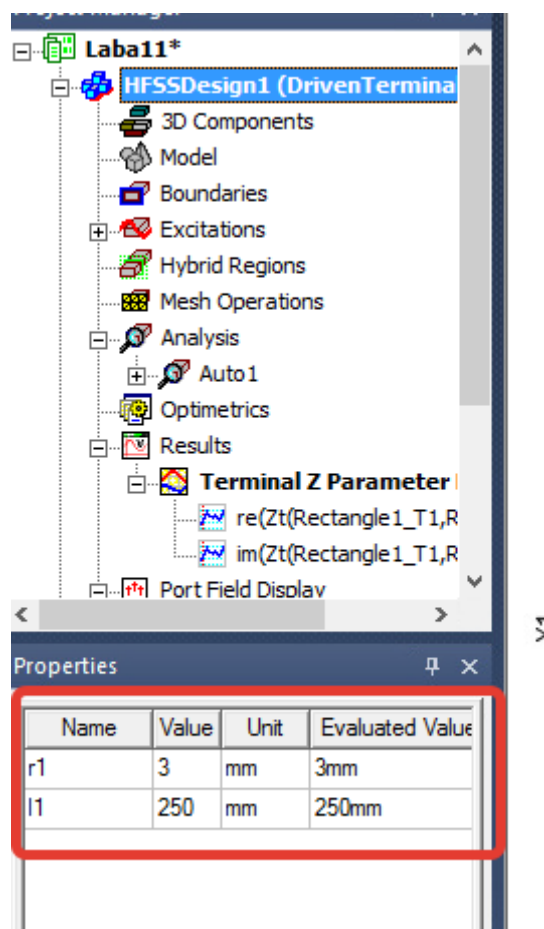


Рис. 27. Изменение переменных в модели

Выведем на график в декартовой системе координат КСВ аналогично рис. 25, но выбрав в левом списке Terminal VSWR вместо Terminal 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. 28). Если настройка антенны выполнена верно, то минимальное значение КСВ будет наблюдаться вблизи центральной частоты.

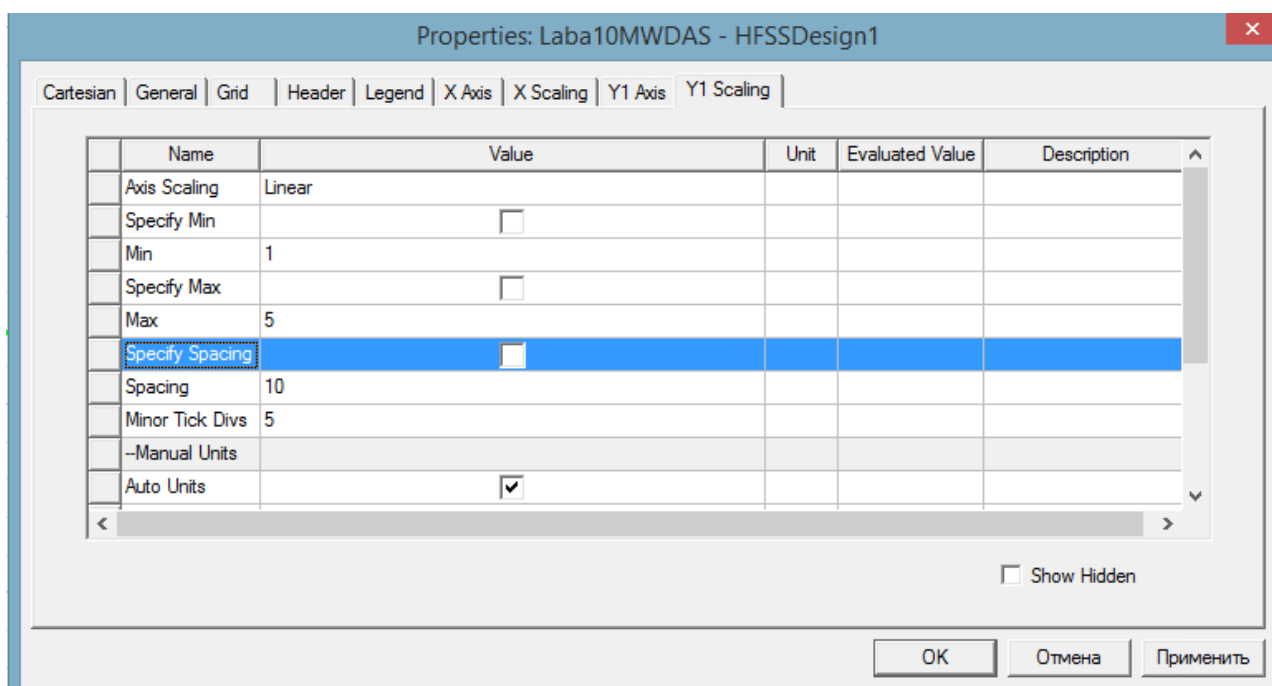
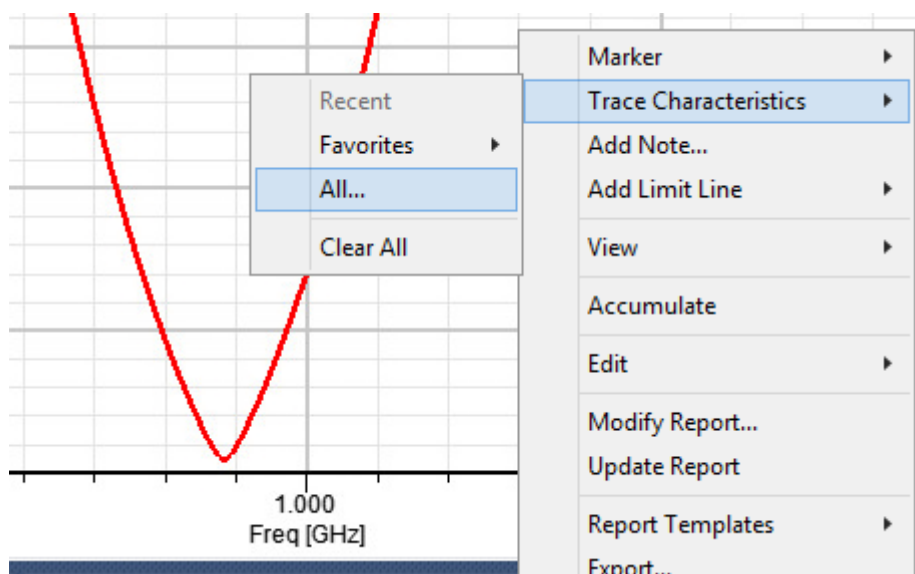


Рис. 28. Задание пределов отображения графика

Нажмите на графике правой кнопкой мыши, выбрав пункт Trace Characteristics, All... (рис. 29). 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  $K_{CB} = 2$ ). 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. 29. Определение полосы согласования по заданному уровню КСВ

Добавьте в проект графическое поле для отображения диаграммы направленности (ДН) антенны (рис. 30). Добавьте на графическое поле отображение нормированной величины напряженности электрического поля как показано на рис. 30. На вкладке Families (отображение семейств зависимостей) выберите  $\varphi = 0, 90^\circ$ , удерживая Ctrl (отображение ДН в главных плоскостях). Нажмите New Report. Аналогичный результат можно получить, если выбрать в левой верхней части окна Elevation вместо 3D. При этом выбор углов Phi сразу будет ограничен 0 и  $90^\circ$ .

В появившемся окне аналогично рис. 29 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. 24) и выбрав Function к той же величине dB20Normalize в правой части окна добавления графика (рис. 30).

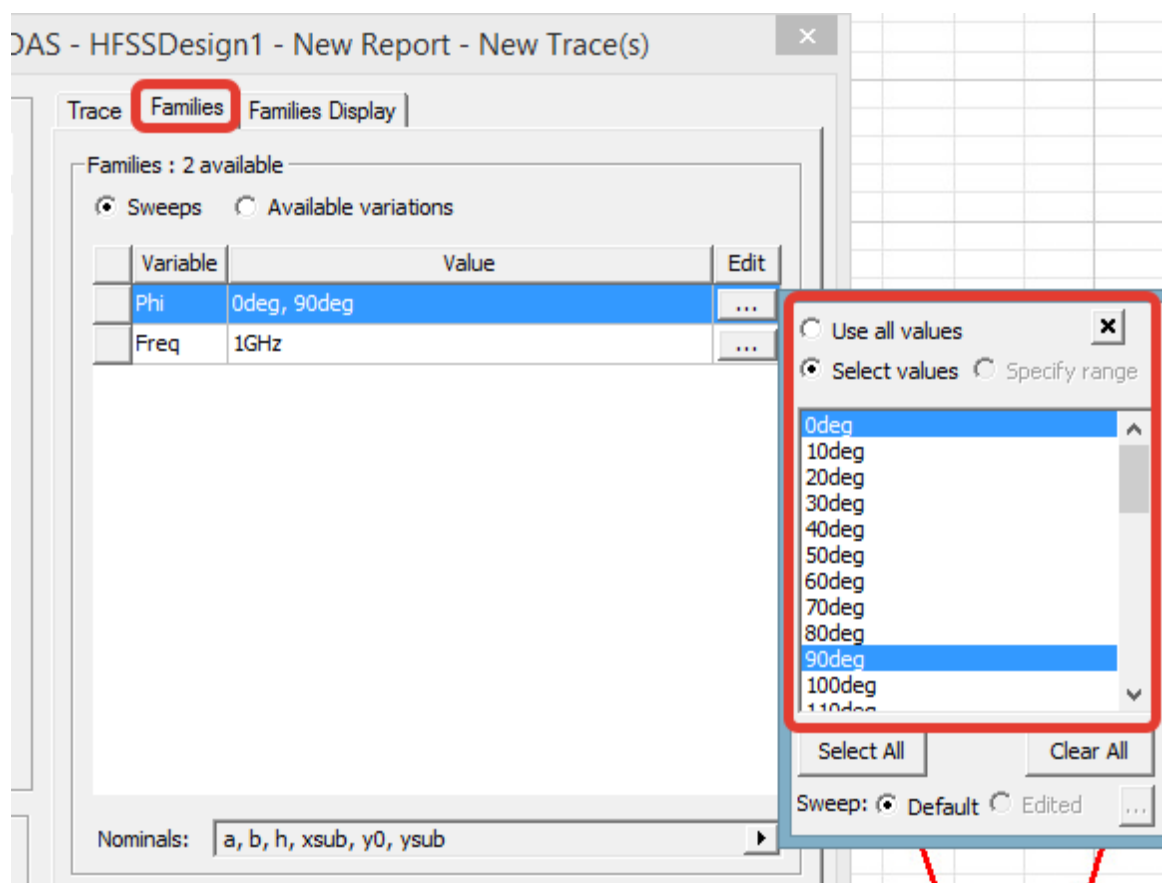
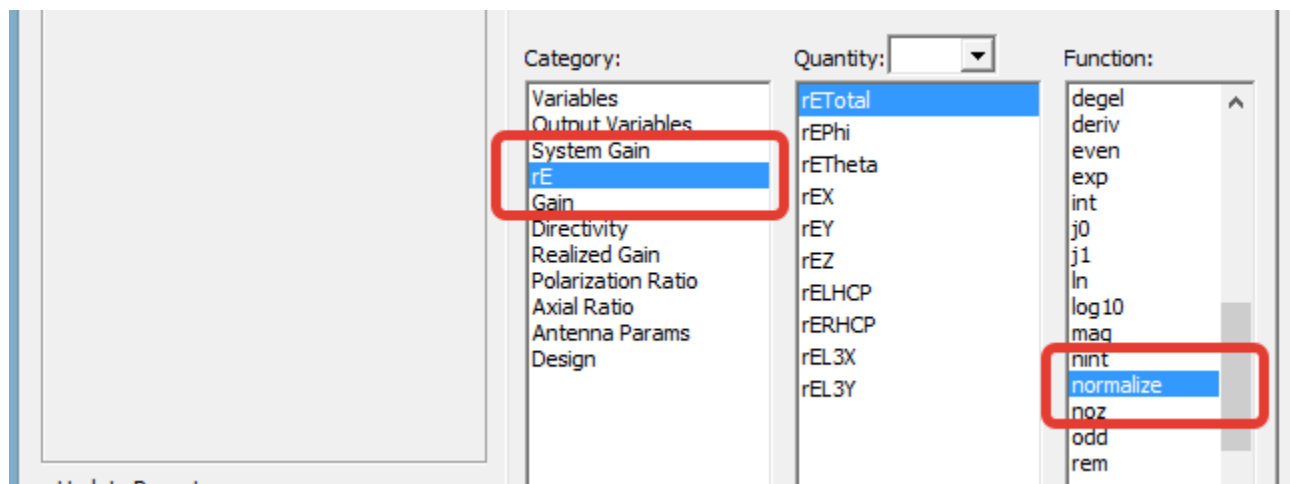
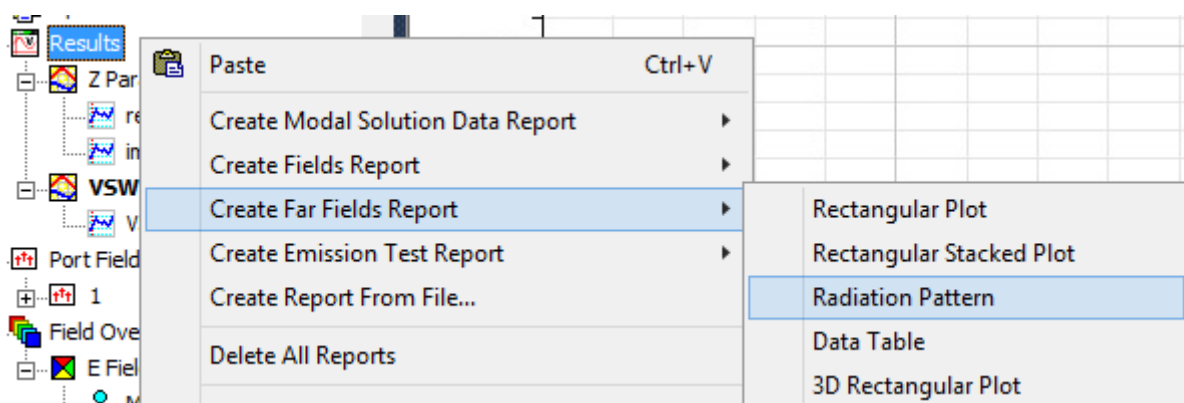


Рис. 30. Добавление в проект графического поля для диаграммы направленности

В дереве проекта нажмите на узел 3D в Radiation правой кнопкой мыши (рис. 31) 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  $\theta = 140^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$  максимальна будет  $x$ -составляющая вектора  $\vec{E}$  и антенна в этом направлении будет иметь линейную поляризацию.

При отсутствии диэлектрика с потерями в модели расчеты КПД антенны, как правило, некорректны, и дают значения больше единицы. Определите КНД антенны и сравните его с теоретическим.

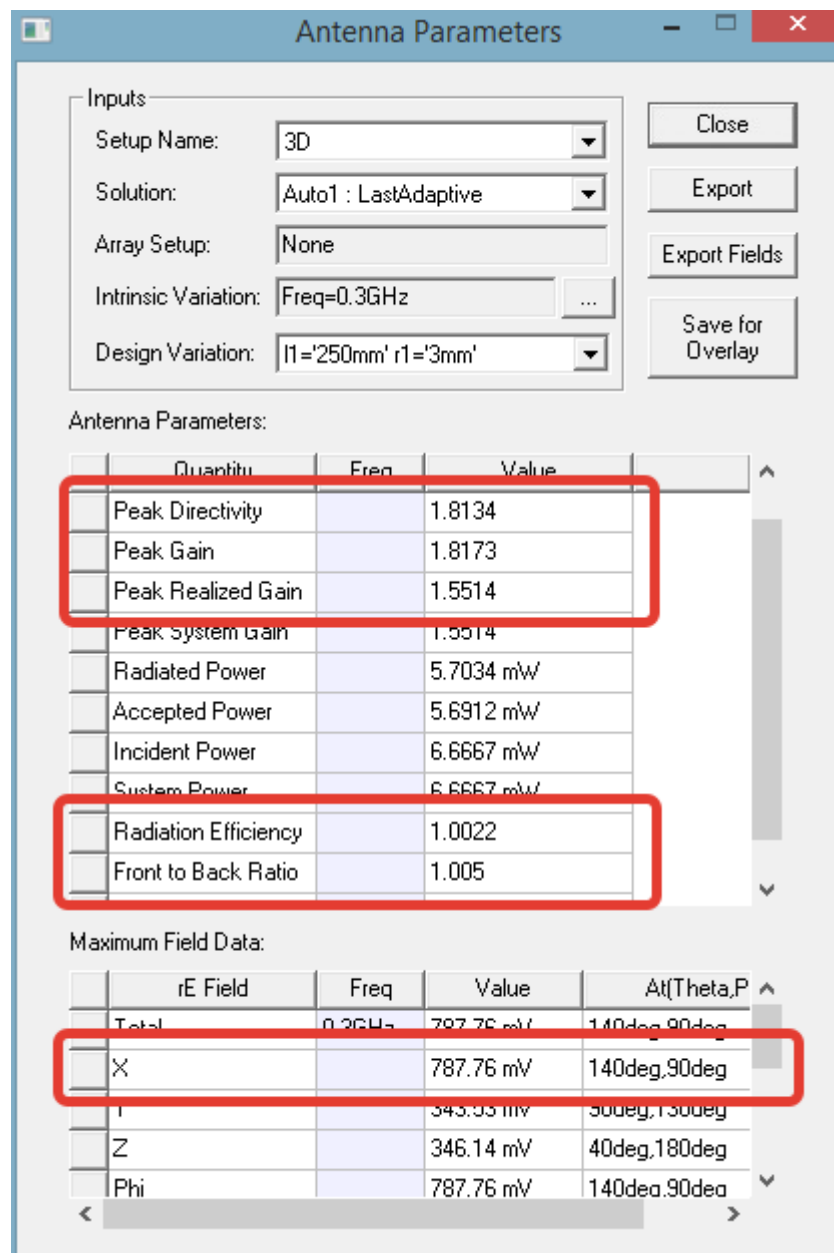
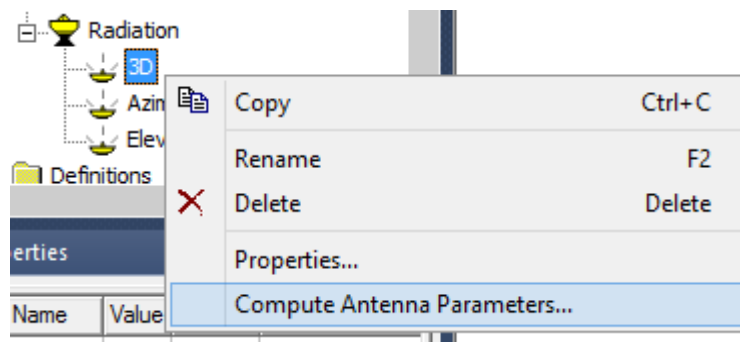


Рис. 31. Определение антенных характеристик модели

Продублируем созданную модель в проекте скопировав модель в дереве проекта и вставив ее в проект (рис. 32).

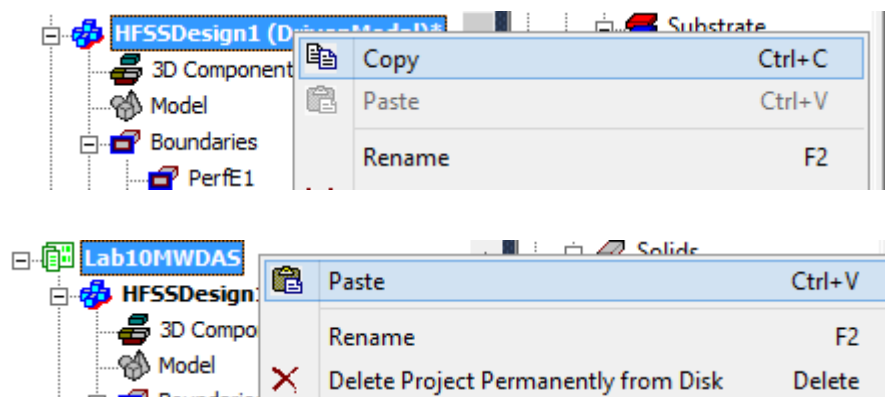


Рис. 32. Дублирование модели в проекте

В новой модели уберем автоматически созданную область с условиями излучения на стенках: уберем галочку с пункта Auto-Open Region в настройках типа решения (рис. 11) и удалим граничные условия и соответствующий объект из модели.

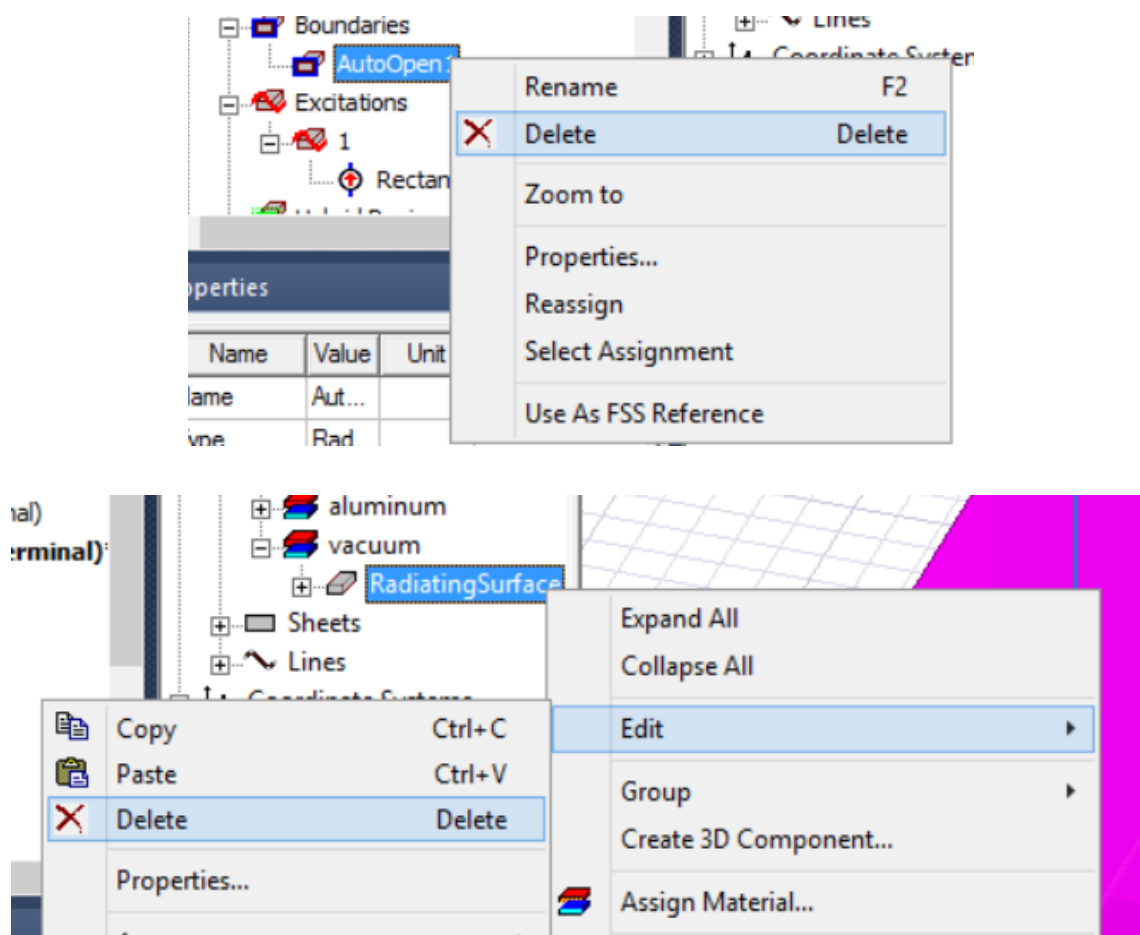


Рис. 33. Удаление автоматически созданных граничных условий

Добавим область воздушного пространства в модель, указав частоту в соответствии с табл. 1 (рис. 34). В модель при этом будет добавлен объект, грани которого отстоят от вибратора примерно на четверть длины волны.

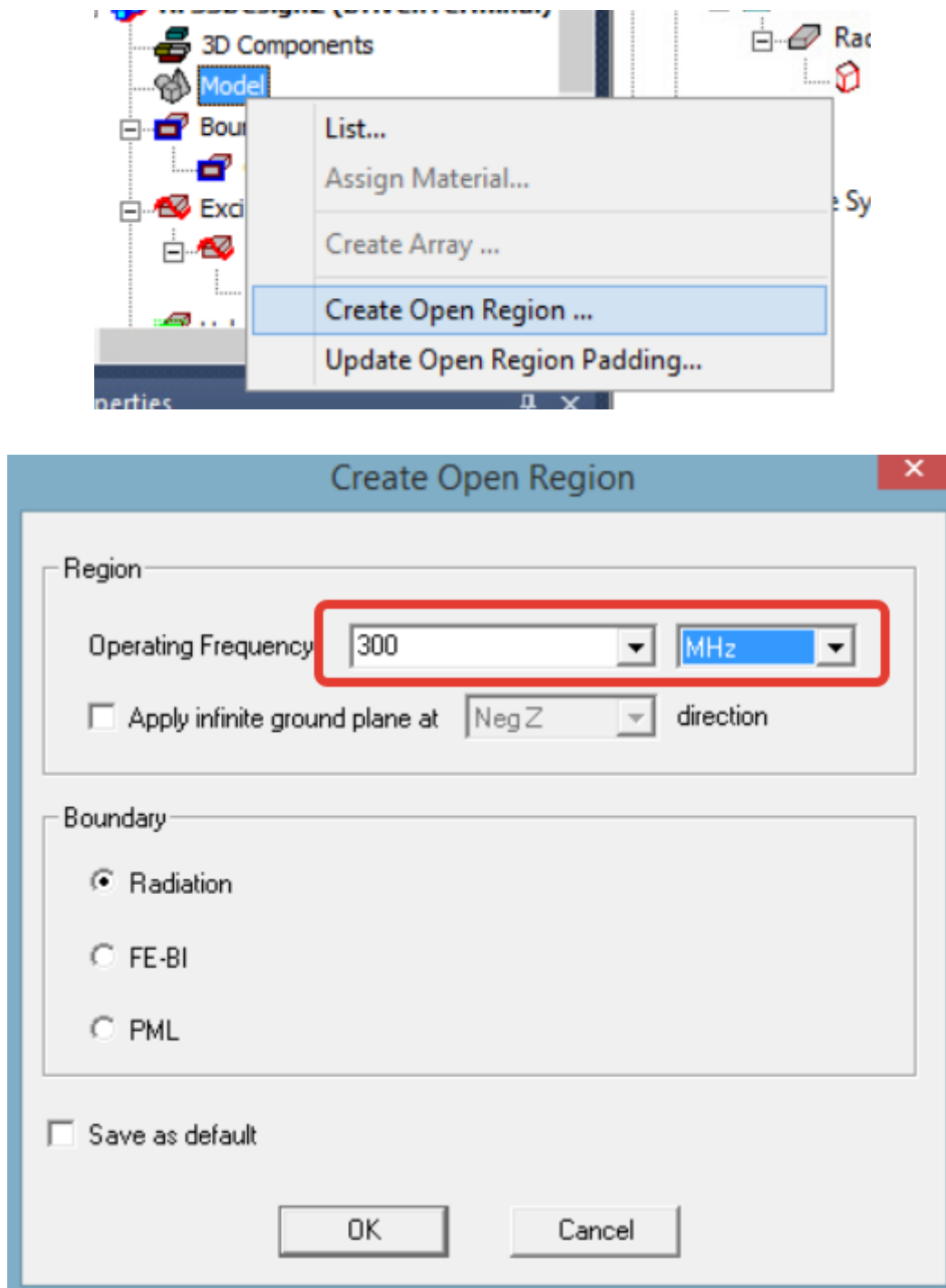


Рис. 34. Добавление воздушной области в модель

В свойствах этого объекта изменим расстояние между вибратором и нижней гранью объекта (-Z Padding), задав его переменной d1, и назначив ей значение четверти длины волны на центральной частоте (рис. 35).

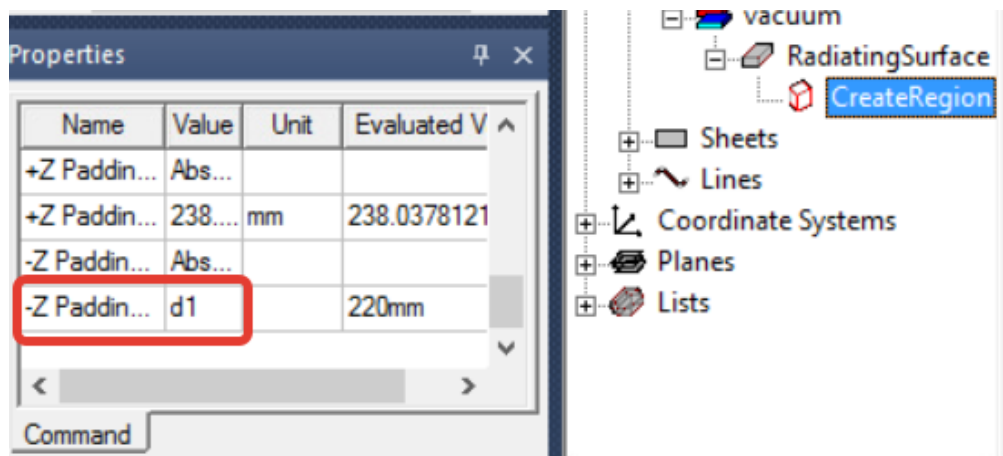


Рис. 35. Изменение свойств воздушной области

Заново добавим диаграмму направленности в модель (рис. 30), только на этот раз выбрав только  $\varphi = 90^\circ$ . Выполните расчет модели. Добавьте в модель настройки антенной решетки (рис. 36). При добавлении настроек решетки выберем эквидистантную антенную решетку (Regular array) и перейдем на соответствующую вкладку. В этой вкладке задается сетка плоской эквидистантной антенной решетки с координатами первого элемента (First Cell Position), в которой элементы повторяются вдоль направлений векторов  $\vec{U}$  и  $\vec{V}$ . Направления (Directions) этих векторов обозначаются указанием коэффициентов к ортам декартовой системы координат  $X_U, Y_U, Z_U, X_V, Y_V, Z_V$ :  $\vec{U} = X_U \vec{x}_0 + Y_U \vec{y}_0 + Z_U \vec{z}_0$ ,  $\vec{V} = X_V \vec{x}_0 + Y_V \vec{y}_0 + Z_V \vec{z}_0$ . По умолчанию вектора  $\vec{U}$  и  $\vec{V}$  совпадают с ортами осей  $x$  и  $y$  соответственно, и эти настройки нам подходят. Зададим шаг решетки (Distance Between Cells) в направлении вектора  $\vec{V}$  (вдоль оси  $y$ ) как четверть длины волны на центральной частоте и число элементов (Number of Cells) вдоль этого вектора 2, а вдоль вектора  $\vec{U}$  (вдоль оси  $x$ ) – 1. Для задания разности фаз (или сканирования – Scan Definition) используем разность фаз между соседними элементами (Use Differential Phase Shift) и зададим ее в направлении вектора  $\vec{V}$  (вдоль оси  $y$ ) как переменную  $\text{deltaphiy}$ , которой присвоим значение 0. При такой настройке модели расчет ДН и антенных характеристик будет происходить с учетом множителя направленности антенной решетки, однако взаимное влияние элементов решетки учитываться не будет.



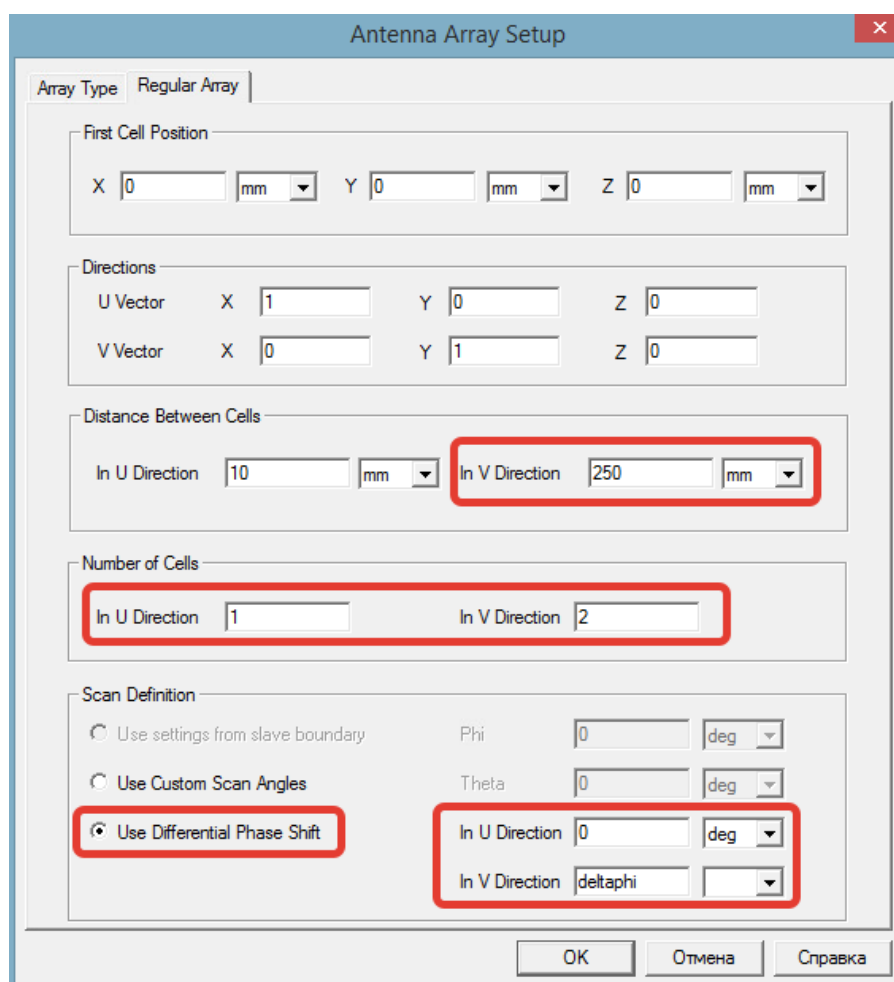
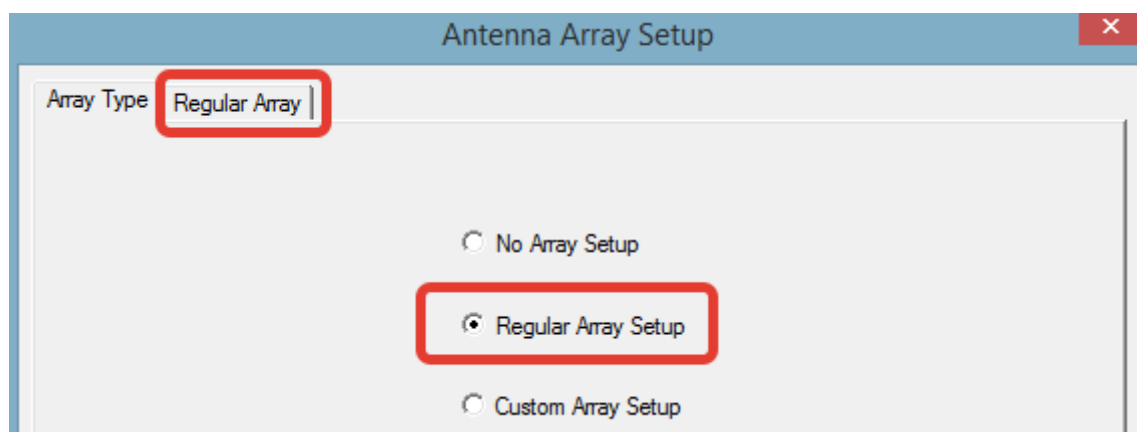
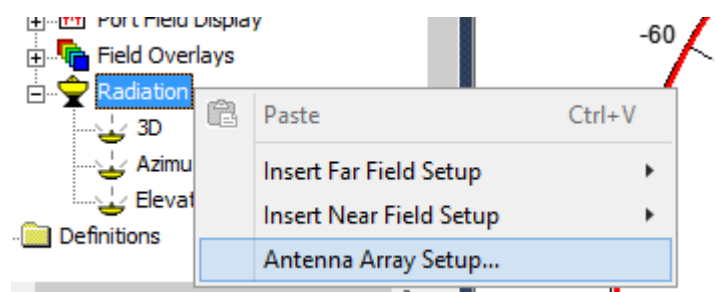


Рис. 36. Добавление настроек антенной решетки

Устанавливая значение этой переменной в свойствах модели последовательно  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ , наблюдайте за ДН и сравните ее с таковой из [1] на рис. 37. Если все сделано верно, то ДН должны с высокой точностью совпадать (с учетом поворота на  $90^\circ$ , поскольку на графике ДН в HFSS при этом ось  $x$  оказывается вертикальной, а  $y$  – горизонтальной).

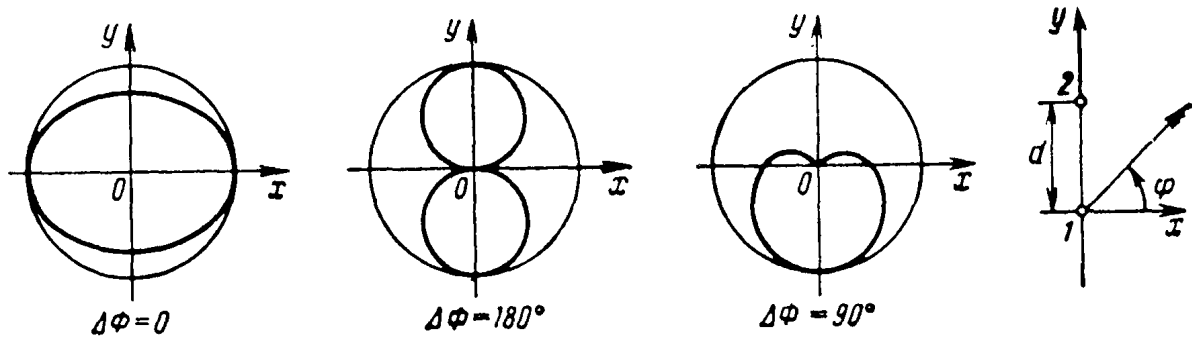


Рис. 37. Множитель направленности двух равноамплитудных изотропных источников  
( $d / \lambda = 0,25$ ) [1]

Однократно нажав кнопку  $F$  для перехода в режим выбора граней вместо объектов, выделим нижнюю грань воздушной области (в области отрицательных  $z$ ). 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 идеального проводника, нажав правую кнопку мыши в окне модели на выбранной области, выбрав *Assign Boundary* и нажав *Perfect E...* (рис. 38), а также нажав  $OK$  в открывшемся окне. Для перехода обратно в режим выделения объектов необходимо нажать клавишу  $O$ . Таким образом на нижней грани одновременно окажутся заданными условия излучения и идеальной проводимости, о чем появится предупреждение в окне сообщений. При этом условия излучения на этой грани будут игнорироваться. Как правило при проектировании следует избегать наложения разных условий на одной грани, но в рамках данной работы для экономии времени оставим условия определенными так. Теперь мы будем выполнять анализ вибратора над проводящим экраном. Удалите настройку ре-

шетки из модели (No Array Setup на рис. 36) и снова добавьте на график ДН  $\varphi = 0$  (рис. 30).

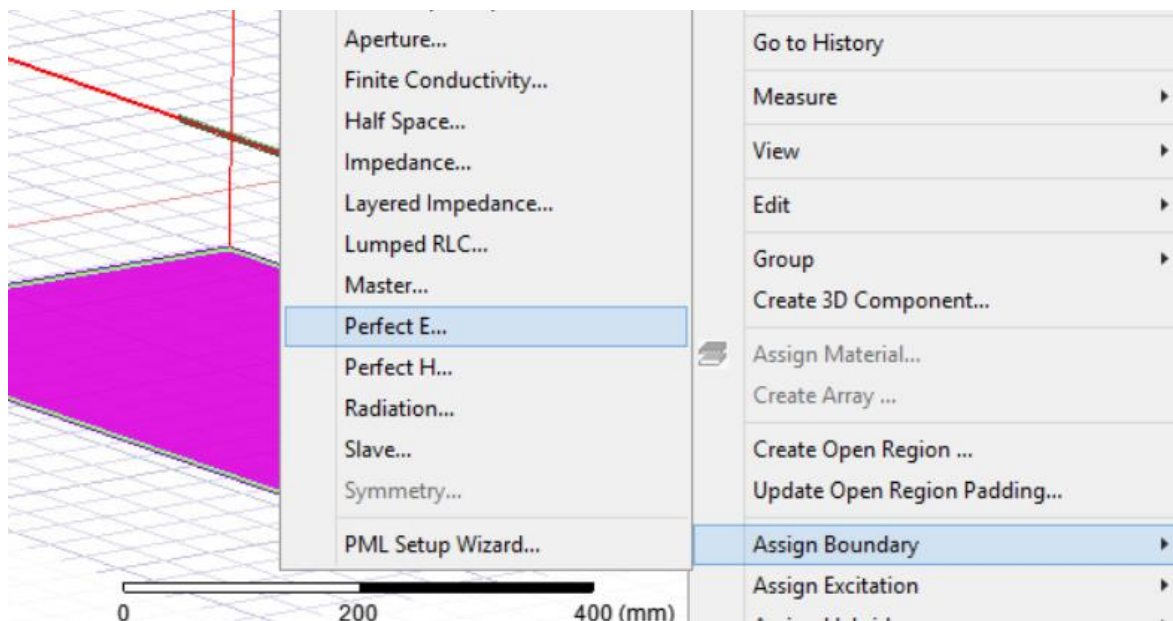


Рис. 38. Задание условий идеального проводника

Определите как изменились характеристики модели по сравнению с первоначальным вибратором в свободном пространстве: входное сопротивление, КСВ, ДН, КНД. Проведите настройку модели заново, изменяя расстояние до экрана и длину плеч вибратора для получения КСВ близкого к единице (хотя бы ниже 1,3) на центральной частоте.

Снова добавьте в модель настройку антенной решетки (рис. 36), на этот раз установив 4 элемента вдоль оси  $x$ , и 1 вдоль оси  $y$ , и шаг решетки вдоль оси  $x$  как переменную  $dx1$  в четверть длины волны на центральной частоте и разность фаз возбуждения соседних элементов вдоль оси  $x$   $\Delta\varphi_{x1} = 0$ . Таким образом мы получим линейную синфазную антенную решетку из коллинеарных вибраторов. Обратите внимание на то, что входное сопротивление антенны при этом не изменилось, т. к. уже отмечалось, что в такой модели не учитывается взаимное влияние элементов решетки (в данной модели при таком шаге решетки соседние излучатели наложатся бы друг на друга и решетка не должна была бы работать). Пронаблюдайте и опишите изменения в ДН и антенных характеристиках по сравнению со случаем одиночного излучателя. Увеличивая шаг ре-

шетки до двух длин волн с шагом в четверть длины волны наблюдайте и опишите изменения ДН и антенных характеристик, сведя их на график или в таблицу. Установите шаг решетки в  $0,75 \lambda_0$ . Добавьте переменную  $\text{deltaphix}$  (разность фаз между соседними элементами вдоль оси  $x$ ) для подстройки от  $0$  до  $180^\circ$  с шагом в  $10^\circ$ , как показано на рис. 39.

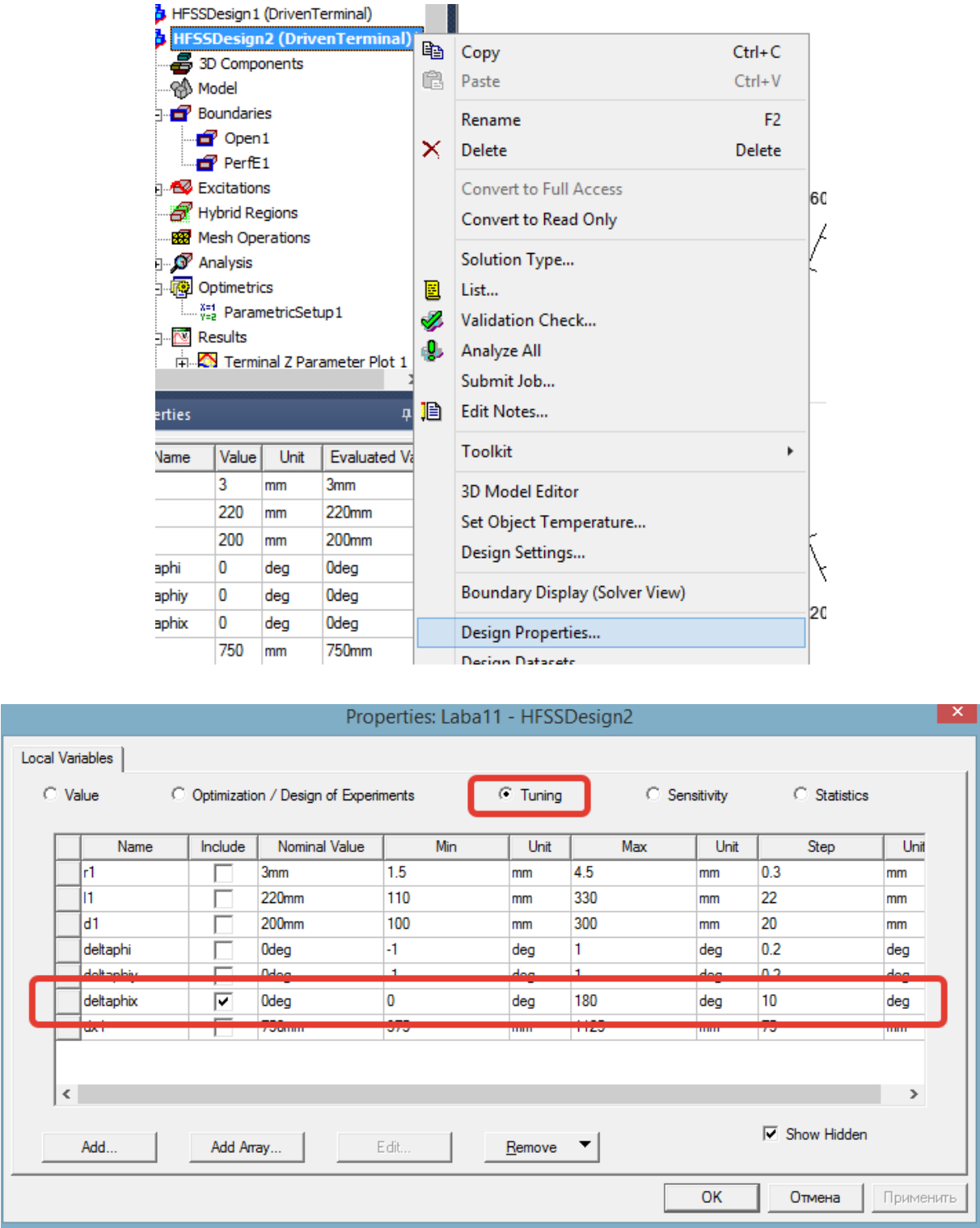


Рис. 39. Установка переменной для подстройки

Увеличивайте разность фаз между соседними элементами, используя инструмент подстройки переменной (Tuning), установив галочку реального времени (Real time), и перемещая ползунок снизу вверх, как показано на рис. 40, и выведя на экран ДН решетки в главных плоскостях. Пронаблюдайте и опишите изменения ДН и антенных характеристик при изменении разности фаз на соседних элементах решетки. Обратите внимание на то, как изменяется ДН в плоскости  $\varphi = 90^\circ$  при разностях фаз  $90^\circ$  и  $180^\circ$ . Это происходит из-за того, что в этой плоскости элементы решетки создают противофазное поле из-за противофазного возбуждения, и расчет ДН оказывается некорректным.

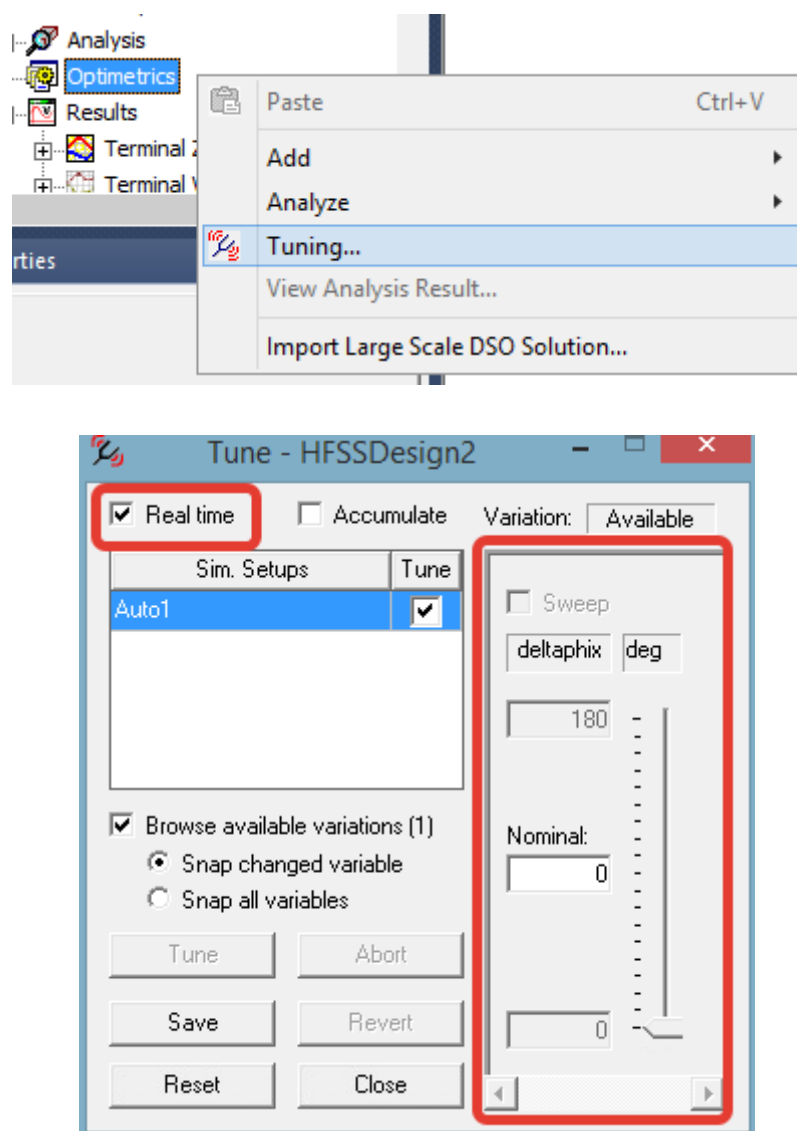


Рис. 40. Подстройка переменной

Нарисуйте графики зависимостей положения главного максимума ДН в плоскости  $\varphi = 0^\circ$ , ширины ДН по уровню  $-3\text{дБ}$  и уровня боковых лепестков от разности фаз. Определите разность фаз, при которой в ДН появляется побочный максимум и сравните ее с теоретическим значением.

### **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.