

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра «Радиоэлектронные системы и технологии»

ОСНОВЫ ТЕОРИИ АНТЕНН И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторного практикума
и проведению практических занятий по дисциплине
для обучающихся очной и заочной форм обучения направления
11.04.02 - Информационные технологии и системы связи

В трех частях

Часть 2

Севастополь
СевГУ
2023

УДК 621.396.67+535.92(076.5)
ББК 32.845я73
О-753

Р е ц е н з е н т :
И. Л. Афонин - д-р. техн. наук, профессор

Ответственный за выпуск:
И. Л. Афонин - заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы и технологии»,
д-р техн. наук, профессор

Составители: В. В. Головин, М. О. Ткаченко

О-753 Основы теории антенн и волоконной оптики: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума и проведению практических занятий по дисциплине для обучающихся очной и заочной форм обучения направления 11.04.02 Информационные технологии и системы связи. – В 3-х частях. Ч. 2 / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, кафедра «Радиоэлектронные системы и технологии» ; сост.: В. В. Головин, М. О. Ткаченко. – Севастополь : СевГУ, 2023. – 90 с. – Текст : электронный.

Целью пособия является оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении заданий практических занятий по дисциплине «Основы теории антенн и волоконной оптики», а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков расчёта и моделирования характеристик антенн.

УДК 621.396.67+535.92(076.5)
ББК 32.845я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии», протокол № 4 от 02 ноября 2023 г.

© Головин В. В., Ткаченко М. О., сост., 2023
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Общее описание системы автоматизированного проектирования <i>FEKO</i>	5
2. Лабораторная работа № 1. Исследование характеристик симметричного и несимметричного вибраторов	30
3. Лабораторная работа № 2. Исследование характеристик спиральных антенн	46
4. Лабораторная работа № 3. Исследование характеристик волноводно-щелевых антенн	61
5. Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик параболических антенн	72
Библиографический список.....	86
Приложение А. Образец оформления титульного листа отчета по лабораторной работе.....	87
Приложение Б. Пример написания программы для расчета диаграмм направленности параболической антенны	88

ВВЕДЕНИЕ

В данную методическую разработку включены лабораторные и практические работы, которые выполняются с применением специализированной САПР.

Методические рекомендации содержат следующие разделы: цель работы; теоретическая часть; порядок выполнения работы; контрольные вопросы для допуска к выполнению и подготовки к защите работы.

Задания выполняются студентами по подгруппам в составе 2-3 человек.

Подготовка к выполнению каждого задания предполагает изучение теоретического материала, приведённого в методическом пособии, а также из рекомендованной учебной литературы по дисциплине.

Допуск к работе со стендами предполагает опрос каждого из студентов:

- по технике безопасности;
- по правилам работы со специализированной САПР.

Моделирование проводится в соответствии на основании индивидуальных исходных данных, выбираемых студентами из соответствующих таблиц — один вариант на подгруппу.

Результаты моделирования оформляются студентами подгруппы в виде единого отчёта согласно утверждённым требованиям [1]. Отчёт должен иметь титульный лист и содержать следующие разделы:

- цель работы;
- описание модели исследуемого устройства или системы;
- предварительные расчеты;
- результаты моделирования;
- анализ полученных результатов моделирования;
- выводы.

Образец оформления титульного листа отчёта показан в Приложении А.

При выполнении заданий использовался программный продукт, находящийся в свободном доступе *FEKO-lite* [2]. Для освоения данного САПР приведён раздел с общими для всех работ рекомендациями по моделированию.

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ *FEKO*

1.1. Характеристика системы *FEKO* и применяемых в ней методов расчета

Название программы *FEKO* происходит от немецкой фразы «*Feldberechnung bei Korpern mit beliebiger Oberflache*» (расчет поля с учетом тел произвольных форм). Программа *FEKO* предназначена для решения широкого круга задач, связанных с проектированием СВЧ устройств и антенн, рассеянием электромагнитных волн на сложных объектах, распространением радиоволн в городских условиях и так далее, используется для расчета электромагнитных волн в пространстве, включающем объекты произвольных форм.

Базовым методом *FEKO* является метод моментов (МоМ). Метод моментов — это способ решения интегральных уравнений (иногда его называют методом Галеркина или Бубнова - Галеркина). В отличие от метода конечных элементов [2], где пространство расчета замкнутое и ограниченное, метод, в основе которого лежит решение интегральных уравнений, не ограничивает размеры рассчитываемых моделей. Метод МоМ — базовый, но не единственный метод, реализованный в *FEKO* (рис. 1.1).

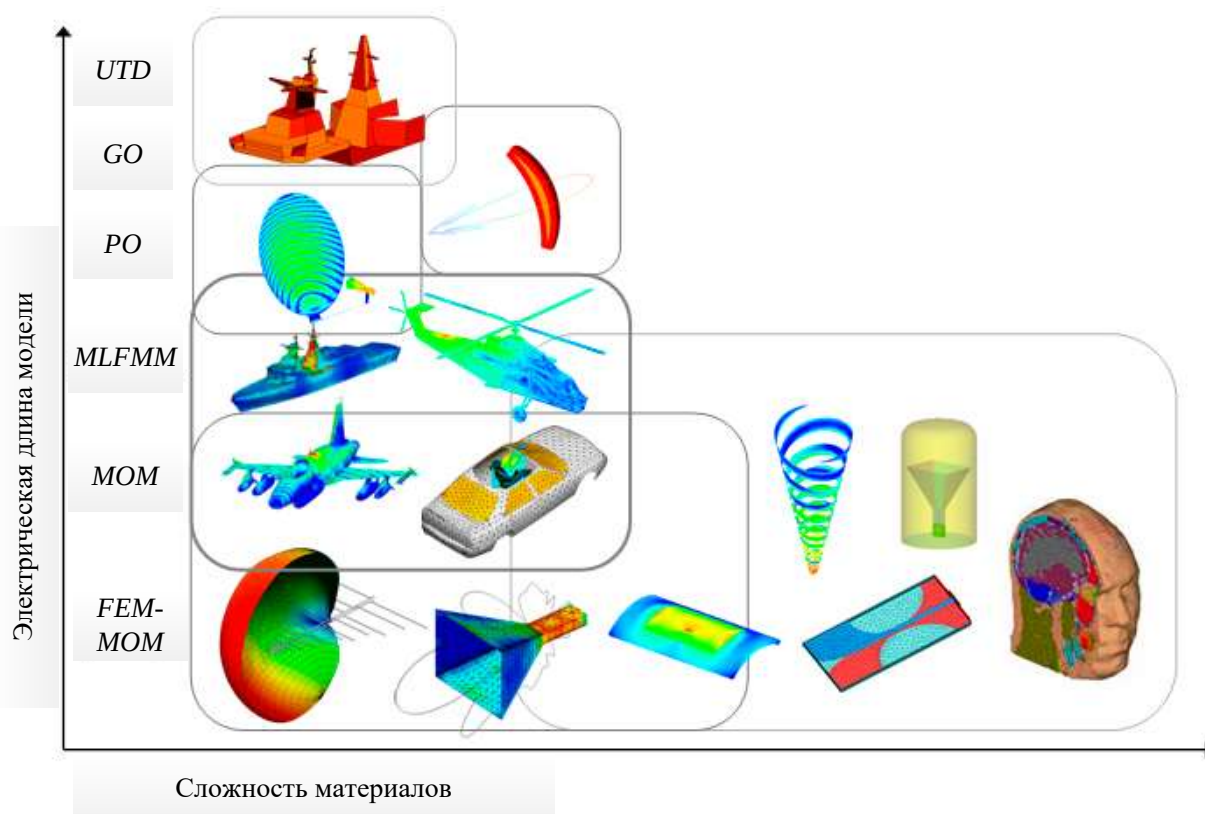


Рис. 1.1 — Применение реализованных в *FEKO* методов расчета для решения различных задач

Электромагнитные поля вычисляются после расчета токов на проводящих поверхностях и эквивалентных электрических и магнитных токов на поверхности диэлектрического твердого тела.

Токи рассчитываются, используя линейную комбинацию базовых функций, а коэффициенты при них получаются, решая систему линейных уравнений. Как только распределение тока найдено, могут быть рассчитаны: ближнее поле, дальнее поле, диаграмма направленности излучения, направленность и входное сопротивление антенн.

Задачи, включающие большие объекты, обычно решаются с помощью метода физической оптики (МФО) и её вариантов, или используя однородную теорию дифракции (ОТД). В комплексе *FEKO* эти решения объединяются с МоМ на уровне матрицы взаимодействий. Этим делается существенный шаг к решению задач, когда рассматриваемый объект слишком большой (относительно длины волны) чтобы его моделировать методом МоМ, но слишком маленький, чтобы применять только асимптотическую аппроксимацию UTD. Используя гибридизацию методов МоМ/МФО или методов МоМ/ ОТД, критические области структуры могут рассматриваться, используя МоМ, а остающиеся области (обычно большие, плоские или искривленные металлические поверхности) используют аппроксимацию МФО или ОТД.

Метод моментов предусматривает следующие этапы решения электродинамической задачи. Металлические элементы анализируемой структуры заменяются эквивалентными электрическими поверхностными токами. Затем решается задача возбуждения окружающей среды данными токами. При этом среда может быть сложной, то есть может содержать магнито-диэлектрические слои.

Решение задачи возбуждения среды осуществляется с помощью аппарата тензорных функций Грина. После того, как задача возбуждения решена и найдено электрическое поле, используются граничные условия на металлических элементах. Это условие используется для определения эквивалентных токов. Важным моментом решения является разбиение поверхности металла на элементарные площадки и аппроксимация электрического тока в пределах площадки. Пример разбиения показан на рис. 1.2.

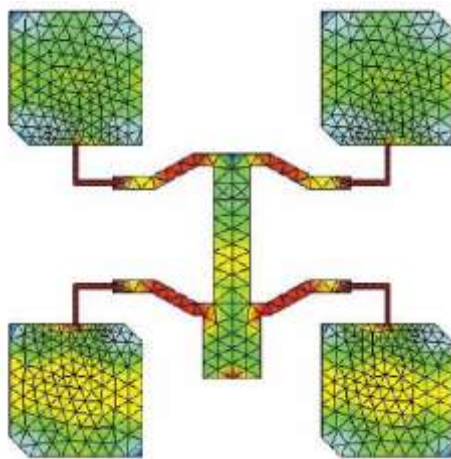


Рис. 1.2 — Пример разбиения микрополосковой антенны на элементарные площадки

В программе *FEKO* для аппроксимации тока используются постоянные, линейные и треугольные функции, которые принято называть базисными функциями. Граничные условия на поверхности металла в МОМ выполняются приближенно, а именно в нескольких точках в пределах каждой элементарной площадки (строго эти условия должны выполняться во всех точках). В результате задания граничных условий в дискретных точках получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно коэффициентов при базисных функциях, которые имеют смысл амплитуд токов, текущих в пределах элементарной площадки. Данная СЛАУ решается ЭВМ с помощью известного метода исключения Гаусса.

В программе *FEKO* элементарная площадка имеет треугольную форму, что позволяет хорошо описывать искривленные поверхности.

Точность МоМ тем выше, чем меньше размер площадки разбиения. Из опыта расчета известно, что для получения приемлемой точности размер площадки не должен превышать $\lambda/10$, где λ длина волны в свободном пространстве. Количество уравнений в СЛАУ равно числу элементарных площадок N , которое неизбежно увеличивается при увеличении размеров анализируемого объекта или при увеличении частоты. Поэтому легко увидеть, что непосредственное решение задачи типа рассеяния радиоволн на автомобиле с помощью МоМ потребует решения СЛАУ огромной размерности. На практике оно просто невозможно из-за ограниченной оперативной памяти ЭВМ.

Метод физической оптики (МФО) — это классический метод приближенного решения электродинамических задач, который еще называется методом Кирхгофа. В рамках этого метода задача поиска токов на металлических поверхностях исключается, а ток приближенно вычисляется через магнитное поле падающей на объект волны. Конкретно его полагают равным удвоенному касательному магнитному полю падающей волны. Далее рассеянное поле вычисляется с помощью аппарата функций Грина через заданное распределение токов. МФО хорошо работает при решении задач рассеяния плоских волн на объектах больших размеров. При уменьшении размеров объекта аппроксимация тока магнитным полем падающей волны становится неверной.

Однородная теория дифракции (ОТД) — более современный метод приближенного решения задач рассеяния волн на больших объектах. В рамках этого метода поверхность объекта представляется набором плоских многоугольников, имеющих общие ребра. Поле, рассеянное многоугольником, разделяется на две составляющие: геометро-оптическая часть, порожденная плоской поверхностью и поле порожденное ребрами. Метод ОТД считается более точным, чем МФО и имеет примерно те же пределы применимости.

1.2. Создание моделей исследуемых объектов в системе *FEKO*

Первоначально *FEKO* был создан и приобрел мировую известность, как программа, которую запускали в виде пакета перфокарт. Но в 90-х годах 20-го столетия компания *EMSS* создала интерфейс *CADFEKO*, который приближает

работу пользователя к пользователю операционной системы *Windows*. Так что сейчас большинство моделей небольшой и средней сложности удобно создавать в программе *CADFEKO*, являющейся составной частью системы *FEKO*.

В программе *CADFEKO* чертится модель, информация о ней сохраняется в файле *.cfm, а топология — в файле *.cfs. После черчения структуры, из меню *Run* запускается на расчет программа *PREFEKO*. *CADFEKO* обрабатывает файлы *.cfm и *.pre и генерирует файл *.fek. Результаты расчета сохраняются в файле *.bof, из которого они могут просматриваться в *POSTFEKO*. Результаты также сохраняются в читаемом файле ASCII *.out. Для сложных моделей можно использовать и редактировать файл *.pre. Этот файл содержит последовательность команд (макросы) и дает полный контроль над процессом расчета.

CADFEKO был разработан, чтобы облегчить создание моделей в графической среде автоматизированного проектирования. Этот процесс включает черчение геометрии и разбиение её на ячейки, а также задание электромагнитных параметров и конфигурации решения.

CADFEKO дает возможность строить параметрические модели. Если модель создана с использованием переменных, то при изменении этих переменных вся модель перечерчивается. Это необходимо, например, чтобы найти размер антенны с заданной резонансной частотой. Кроме того, *CADFEKO* сохраняет хронологию создания конструкции так, что операция объединения автоматически модифицируется, если какой либо из объектов изменяется впоследствии. Если созданы диэлектрические материалы, которые заполняют диэлектрические области модели, то параметры среды можно в дальнейшем изменять.

CADFEKO может также импортировать сложные модели в различных форматах. Однако в некоторых случаях может быть доступна только модель, разбитая на ячейки.

1.2.1 Описание программы *CADFEKO*

Интерфейс *CADFEKO*, показанный на рис. 1.3, содержит главное меню и инструментальную панель сверху, дерево проекта слева, информационное окно и строку состояния внизу, и область черчения.

Информационное окно внизу (рис. 1.3) сообщает о каждом шаге пользователя при создании геометрии, разбиении на ячейки и так далее. В нём также выводится информация об ошибках.

Статус-бар показывает единицы длины, режим захвата точки и координаты текущей позиции курсора — в глобальных координатах с использованием выбранного режима захвата.

CADFEKO имеет гибкий интерфейс. Например, рабочая плоскость *workplane* и вид объекта могут быть изменены, или может быть задана новая переменная, без закрытия окна создания геометрии. Если открыто новое окно и в то же время открыто другое окно, все поля ввода данных в первом окне блокируются, пока не будет закрыто новое окно. Если было открыто

несколько окон, они будут доступными в обратном порядке, когда будет закрываться каждое окно. Сами окна не блокируются, и, таким образом, они могут всё еще находиться на экране. Но второе окно не может быть открыто для редактирования того же самого элемента.

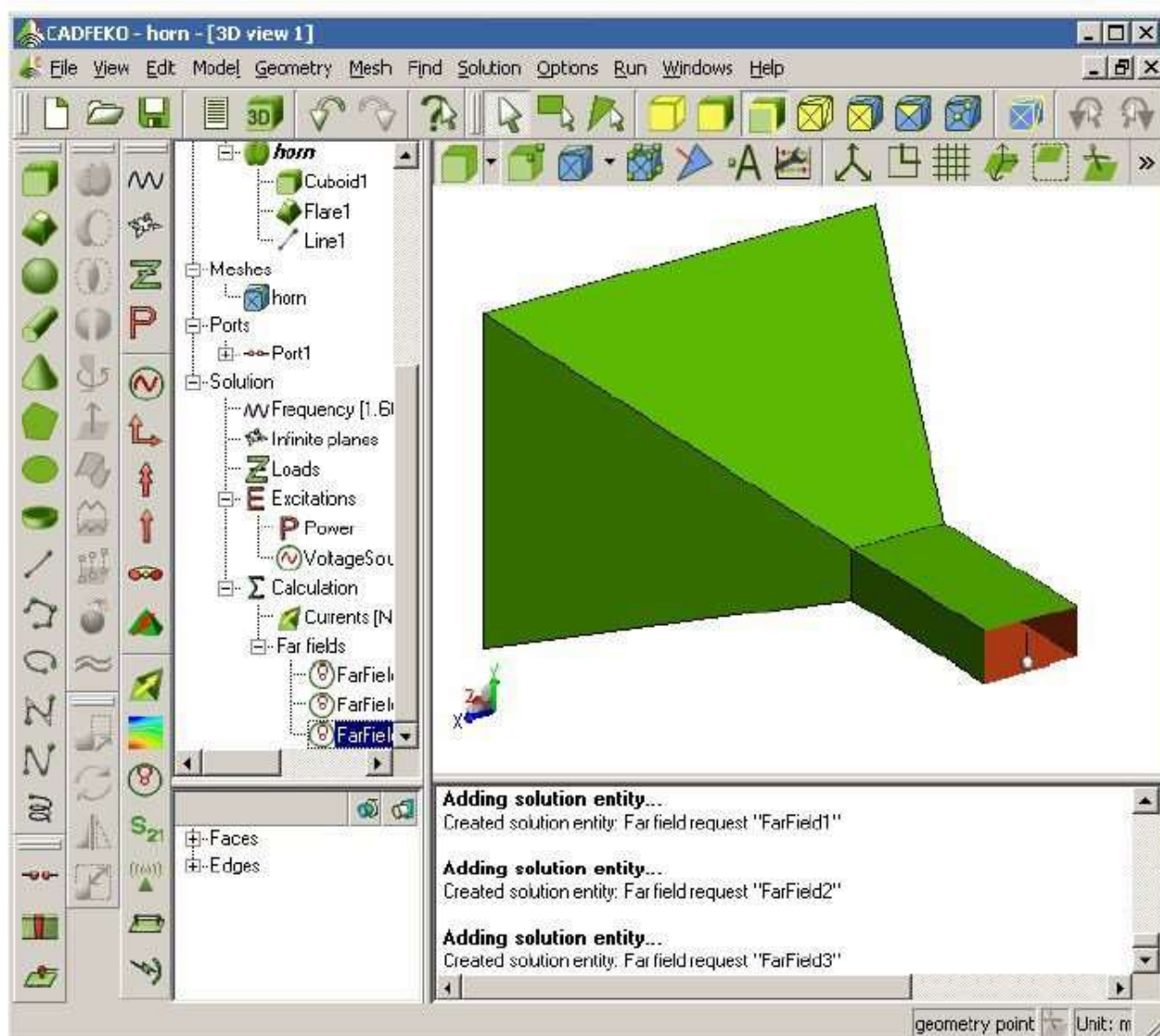


Рис. 1.3 — Главное окно программы CADFEKO

1.2.3. Стандартная инструментальная линейка

Инструментальная линейка (рис. 1.4) дает быстрый доступ к пунктам меню *File*, для создания, открытия и сохранения модели. Кнопка «Notes» открывает текстовый файл, в котором можно редактировать описание задачи. Кнопка «New 3D view» создает новое трехмерное окно на экране дисплея.



Рис. 1.4 — Стандартная инструментальная линейка

Команды *Undo* и *Redo* (отменить и делать вновь) относятся ко всем действиям с моделью: создание, изменение геометрии, переменных, носителей, конфигурации решения, и так далее. Действия (вращение, изменения масштаба и так далее) имеют отдельный список *Undo/Redo*. Списки отмены не сохраняются, если модель сохранена и запущена на расчет. Если объект повторно разбивается на ячейки, или сеть удалена, полная существующая сетка сохраняется в списке *Undo/Redo*. Это позволяет производить быструю отмену операций.

Создание, открытие и сохранение моделей в программе *CADFEKO* осуществляется следующим образом. Команда *File* → *New* закрывает текущую модель и открывает новую задачу. Аналогично, *File* → *Open* или *File* → *Save* открывает и сохраняет модели *CADFEKO*. При сохранении модели, *CADFEKO* автоматически сохраняет файл *.cfs — содержание рабочего пространства (представления, плоскости сечения, параметры настройки видимости, и так далее).

При запуске *CADFEKO* из командной строки, модель задается как параметр командной строки. Если файл не существует, *CADFEKO* создает новую модель *cadfeko model.cfx*, убедившись, что каталог не содержит файл *.cfs, *.pre или *.cfm с этим именем.

По команде *File* → *Export* → *.cfm file можно экспортировать текущую сетку в файл *.cfm, которая может тогда быть импортирована в файле *.pre. Сетка экспортируется, как есть, то есть не выясняется, правильная ли она в этот момент. Если не имеется никаких элементов сетки, переменных или поименованных точек в модели, файл *.cfm будет пустой, и импорт его в файле *.pre не будет иметь никакого влияния. Этот пункт меню только экспортирует сетку, но не сам файл, использованный снова *CADFEKO*. При запуске компонентов *FEKO* из меню *Run*, *CADFEKO* автоматически экспортирует файл *.cfm, используя имя модели.

1.2.3. Инструментальная линейка 3D вида программы *CADFEKO*

Первые десять кнопок на инструментальной панели сверху трехмерного представления (рис. 1.5) управляют видимостью объектов. Геометрия (твердый объект, поверхности и линии), точки геометрии, элементы сетки, узлы сетки, нормали элементов сетки, поименованные точки, индикаторы конфигурации решения, глобальные оси, сетки могут быть показаны или скрыты соответствующими кнопками.



Рис. 1.5 — Инструментальная линейка 3D вида *CADFEKO*

Скрытие рабочей плоскости также скрывает сетку вокруг. Кнопка «*Highlight mesh edges*» на основной инструментальной панели также управляет

видимостью элемента, но это относится к выбранным объектам и применяется ко всем трехмерным представлениям одновременно.

Стрелки, следующие за кнопками «Geometry» и «Mesh», позволяют выбрать вид. В виде типа *Default*, все части твердых поверхностей чертятся в одном цвете. Эти кнопки также выбирают, чтобы показать детали. Если снята опция *Show ports* в списке *geometry / mesh*, то маркеры для портов прикладываются к геометрии и сетке и не будут показаны. В сетке также возможно показать радиусы сегмента и радиусы покрытий сегмента. Выбор показа покрытия покажет также радиусы сегмента, а выключение радиусов также выключит показ покрытия.

Если выбрана видимость среды *Colour by medium*, каждая среда области отображена своим цветом, как обозначено в списке под *Media* в дереве. Элементы на поверхности окрашены на каждой стороне согласно среде на этой стороне фаски. Например, при просмотре сетки диэлектрического объекта снаружи, весь объект будет иметь вид как из свободного пространства. Различные цвета внутри станут видимыми, если введены плоскости сечения. Так как пользователь может установить произвольную среду на каждой стороне треугольника, эта схема окраски дает возможность проверить, что среды были определены правильно. То же самое относится к фаскам геометрии, лежащей между различными диэлектриками.

Следовательно, диэлектрический объект будет отображен как диэлектрик, когда просматривается снаружи. Если радиусы сегмента и покрытия отображены, они окрашены согласно материалу среды или среды покрытия.

Если выбрана опция *Wire-frame*, то показываются только грани модели. Это позволяет рассматривать скрытые объекты, но может дать очень запутанный вид. Так как только грани отображены, цилиндры будут выглядеть как два диска, а сфера будет полностью невидимая.

Кнопки «*Edit workplane*», «*Transform workplane*» и «*Specify cutplanes*» обеспечивают быстрый доступ к этим функциям. Кнопка «*Vertical Z axis*» управляет вращением модели так, что ось *z* остается вертикальной осью на экране. Следующие две кнопки изменяют масштаб изображения к полной модели или к выбранному окну соответственно. Кнопка «*Restore default view*» устанавливает углы обзора к стандартной позиции.

1.2.4. Дерево модели в программе CADFEKO

Дерево показывает представление текущей модели (рис. 1.6). Верхняя часть дерева содержит списки переменных, поименованных точек и сред. Далее идет общее содержание геометрии, сетка разбиения, порты и конфигурация расчета.

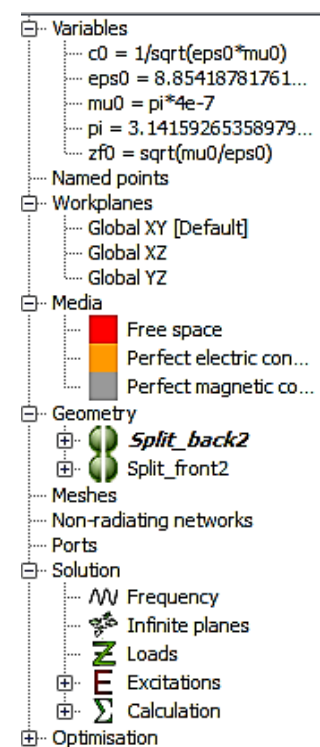


Рис. 1.6 — Дерево модели в программе CADFEKO

Всю последовательность создания геометрии можно видеть в дереве. Когда объекты получены из операций, то первоначальные (исходные) объекты удаляются из верхнего уровня модели и находятся под новым объектом в дереве. Термин «части» используется для объектов с самым высоким уровнем. Они могут быть на корневом уровне под *Geometry* или на максимальном уровне узла. Дерево может быть развернуто с помощью кнопок «+» или выбирая *Collapse / Expand all* из всплывающего меню.

Эта команда относится к назначенному пункту, независимо от того, какие объекты выбраны.

1.2.5. Прimitives и действия над ними в программе CADFEKO

В программе CADFEKO можно создать структуру любой сложности, используя основные элементы (прimitives), показанные на рис. 1.7.



Рис. 1.7 — Прimitives в CADFEKO

Кусочно-ломанную линию, аппроксимацию через заданные точки и многоугольник можно создавать с помощью импортированных точек. Для импорта необходим текстовый файл, в котором в трех столбцах записаны координаты x , y , z каждой точки соответственно.

Над каждым примитивом или группой примитивов можно производить различные действия (рис. 1.8).

Действия, перечисленные на рис. 1.8, можно выполнять над одним либо несколькими примитивами. Если действие возможно, то соответствующая иконка меняет цвет и становится зеленой, в противном случае она остается серой.

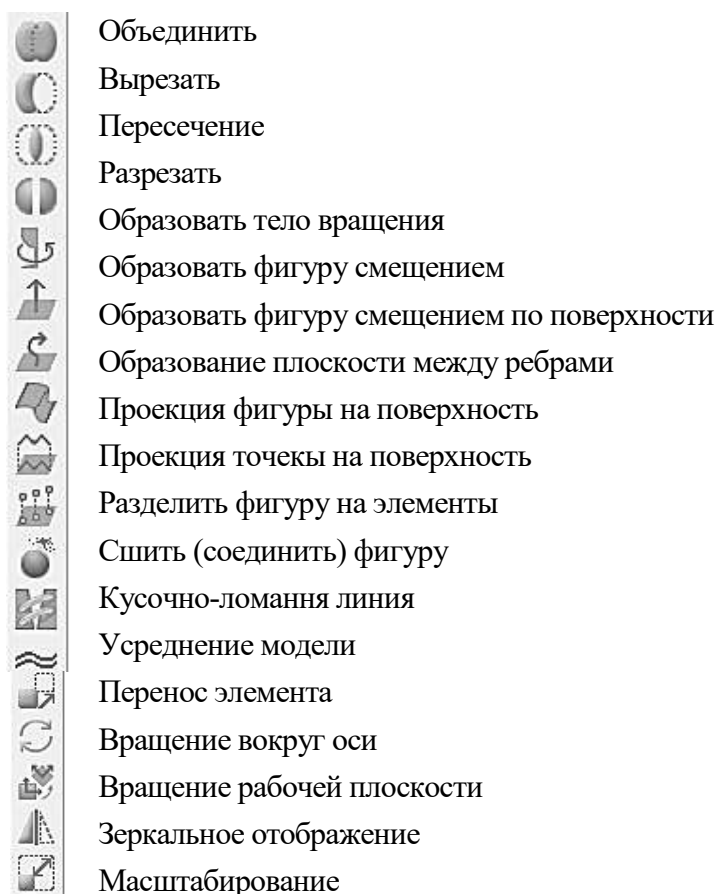


Рис. 1.8 — Иконки действия над примитивами в программе *CADFEKO*

1.2.6. Дерево

составляющих общей модели

Дерево составляющих находится непосредственно под деревом модели.

В дереве составляющих находится перечень граней структуры, поверхностей и областей заполнения объемных элементов структуры (рис. 1.9). Справа от каждого элемента обозначен его материал. Цвет, используемый для каждого материала, может быть установлен нажатием правой кнопки мыши на среднюю в списке *Media* дерева модели.

Каждая составляющая может быть выполнена из следующих материалов: проводник (идеальный или с заданными параметрами) или

диэлектрик. Объемные структуры могут быть заполнены проводником, диэлектриком или оставаться незаполненными.

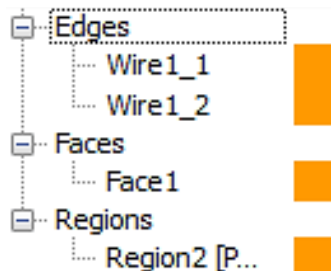


Рис. 1.9 — Дерево составляющих модели в программе *CADFEKO*

Характеристики материалов можно задать в списке *Media* дерева модели. Создать можно следующие материалы (рис. 1.10): диэлектрик, проводник, слоистый диэлектрик, поверхность с заданным сопротивлением, стекло.



Рис. 1.10 — Создание материала в программе *CADFEKO*

Выбор составляющих структуры возможен с помощью панели *Selection* (рис. 1.11).



Рис. 1.11 — Выбор составляющих структуры в программе *CADFEKO*

С помощью этой панели можно выбрать любой элемент или составляющую структуры и сетки разбиения.

1.2.7. Переменные

Программа *CADFEKO* поддерживает параметрические модели. Таким образом, большинство параметров могут быть определены, используя переменные или математические выражения.

Когда переменная изменяется, все объекты, параметры которых зависят от нее, модифицируются. Поэтому очень просто изменять модель, используя переменные, например, изменять геометрию на различных частотах. Так как возможно редактировать объекты геометрии, переменные могут быть введены после построения модели.

Переменные могут быть добавлены двойным нажатием в разделе *Variables* в дереве модели или выборе *Geometry* → *Add variable* из главного меню (рис. 1.12). Первый символ имени переменной должен быть буквой от «a» до «z» и от «A» до «Z» или символ подчеркивания. Имена переменной не чувствительны к регистру, то есть «a» и «A» обрабатываются как тот же самый символ. Значение переменной может быть как числом, так и математическим выражением.

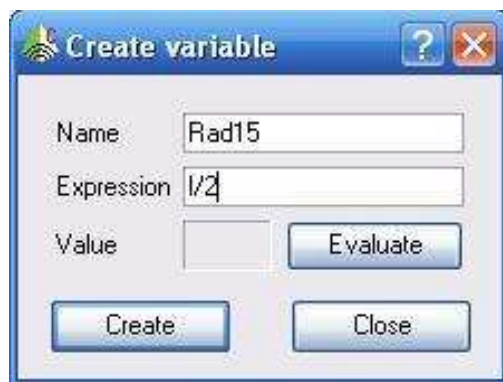


Рис. 1.12 — Окно создания переменной в программе *CADFEKO*

Если имеется ошибка в выражении, сообщение об ошибках будет отображено внизу окна. Переменная может только быть добавлена, когда выражение правильно. Кнопка «*Evaluate*» оценивает и проверяет правильность выражения без закрытия окна.

Значения переменных могут быть изменены двойным нажатием на их обозначении. *CADFEKO* покажет ошибку, если переменная зависит сама от себя. Все объекты в зависимости от переменной будут изменяться одновременно. Если это приводит к недопустимой геометрии (например, радиус сферы становится нулевой либо пересечение или разбиение становится невозможным), в информационном окне записывается ошибка, и переменная не изменяется.

Некоторые переменные создаются вместе с проектом: скорость света в свободном пространстве ($c0$); диэлектрическая проницаемость свободного пространства ($\epsilon s0$); магнитная проницаемость свободного пространства ($\mu 0$); число π (π); волновое сопротивление свободного пространства ($z f0$).

Стоит отметить, что удаление какой-либо переменной возможно только в том случае, если убрана зависимость от нее в геометрии структуры или задании на расчет.

1.2.8. Выбор единиц измерения длины и размеров рабочей среды

Единицы измерения длины в *CADFEKO* устанавливаются командой *Model* → *Model unit*. Помимо стандартных единиц, можно выбрать произвольные единицы. Например, можно задать 1×10^{-6} при работе с микронами.

Изменение единиц длины не изменяет самих чисел, а только интерпретацию их до и после изменения единиц, следовательно, выбор единиц длины можно сделать в любое время при построении модели.

Операции на геометрии требуют задания числового допуска. Этот допуск зависит от размера модели. Например, микрополосковые структуры могут быть созданы с точностью до нескольких микрон, но эта точность не нужна при изучении распространения радиоволн в горах.

Максимальные размеры модели выбираются в *CADFEKO* командой *Model* → *Extents* из главного меню. Расширение геометрии выполняется одинаково во всех направлениях и, таким образом, нужно задать только одно значение. Это максимальная координата, которая дает самое большое смещение в любом направлении по любому из этих трех параметров. Например, если максимальная координата равна 500, вся геометрия должна находиться внутри поля $1000 \times 1000 \times 1000$ заданных единиц длины, с центром в начале координат.

1.2.9. Разбиение модели

Разбиение модели на элементарные участки, необходимые для использования МоМ, выполняется с помощью опирации *Mesh* → *Create Mesh*. Интерфейс окна *Create Mesh* показан на рис. 1.13.

В окне разбиения необходимо ввести размеры элементарных участков для

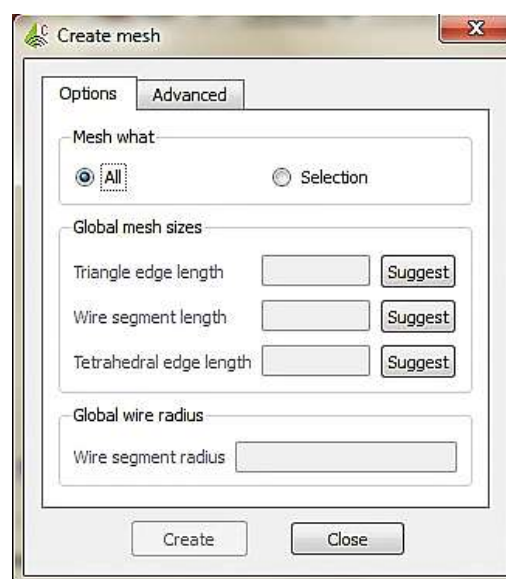


Рис. 1.13 — Окно разбиения модели в программе *CADFEKO*

поверхностей, проводов и объемных структур, а также радиус используемых проводов. При нажатии на кнопку «*Suggest*» программа автоматически устанавливает указанные размеры.

1.2.10. Установки характеристик элементов модели

Если в модели используются какие-либо материалы, то они должны быть описаны до начала ее построения. Диэлектрические материалы в модели задаются установкой диэлектрической среды в геометрических областях. Потери в проводниках учитываются тем, что проводящие поверхности создаются как металлические среды. Покрываются и тонкие диэлектрические листы задаются на поверхностях, используя определяемый слоистый диэлектрик из отдельных диэлектрических слоев. В некоторых случаях свойства материала описываются как поверхностный импеданс на квадрат.

Все используемые диэлектрики перечисляются в разделе *Media*. Каждый тип перечисляется отдельно, названия сред должны быть уникальны и содержать не больше 43 букв.

Цветной значок рядом с каждой средой указывает, какой цвет используется в индикации этой среды на трехмерном дисплее и в дереве подробностей. Они могут быть изменены командой *Change* из всплывающего меню (цвета сохраняются в файле *. cfs.). Первые три значка — идеальный проводник, идеальный магнитный проводник и свободное пространство *Free space*, которые нельзя удалить.

Диэлектрические среды могут быть переименованы или изменены в дереве или в разделе *Properties*. Эти изменения будут тогда относиться ко всем частям, в которых используется этот диэлектрик. Среда может быть удалена, если она не используется в проекте.

Любая область может быть заполнена диэлектриком. Диэлектрики создаются, используя раздел *Media* в дереве проекта, или выбирая команду *Model* → *Add medium* → *Dielectric* из главного меню.

В качестве параметров диэлектрической среды задаются: относительная диэлектрическая проницаемость, относительная магнитная проницаемость, коэффициент магнитных потерь, тангенс диэлектрических потерь или проводимость.

Тангенс диэлектрических потерь и проводимость определяют потери в диэлектрике, но имеют различные частотные зависимости. Выбор зависит от задачи. Например, небольшие потери в подложках обычно определены в терминах коэффициента потерь, в то время как потери в биологической ткани (при расчете уровня поглощения мощности) определены в терминах проводимости.

Плотность массы *Mass density* используется только для расчета уровня удельного поглощения (SAR), но это значение должно быть определено и должно быть больше 0.

Потери в металле (из-за скин-эффекта) определяются установкой поверхности как металла с потерями. Но они не могут быть выполнены для

поверхностей, ограничивающих области идеальной электрической проводимости.

Металлические среды создаются, нажимая на *Media* правой кнопкой мыши и выбирая *Create metallic medium*, или выбирая команду *Model* → *Add medium* → *Metallic* из главного меню. Отметим, что невозможно установить твердый объект как металлическую среду. Это можно выполнить заданием внутренней области как свободное пространство и установке толстой металлической среды на поверхности. «Толстая» здесь подразумевает, что поверхность намного более толстая, чем глубина поверхностного слоя.

Металлические среды определяются значениями проводимости *Conductivity*, относительной магнитной проницаемости *Relative permeability* и коэффициента магнитных потерь *Magnetic loss*.

Поверхности между областями свободного пространства могут быть заданы как тонкие диэлектрические листы или как провода, покрытые диэлектриком.

Это выполняется с помощью слоистых диэлектрических сред, которые состоят из произвольного числа диэлектрических слоев указанной толщины. Заметим, что диэлектрические среды, составляющие различные слои, должны быть определены прежде, чем может быть определен слоистый диэлектрик.

Окно создания слоистого диэлектрика *Create layered dielectric* содержит таблицу с толщиной и материалом каждого слоя. В этом списке *Medium* могут быть только диэлектрические среды. Кнопкой «Add» добавляется новый слой, а кнопкой «Remove» слой удаляется. Таким образом, можно вставить новые слои между любыми двумя слоями.

Покртия и тонкие слои диэлектрического материала должны быть геометрически или электрически тонкие в зависимости от выбранного решения. *CADFEKO* выдаст предупреждения, если толщина соответствующего слоя приближается к пределу и об ошибке, если предел толщины превышен.

По умолчанию все объекты — идеальные электрические проводники.

Свойства устанавливаются для областей, фасок и гранях-проводах. Области — полностью замкнутые объемы, которые перечислены в дереве проекта. Они могут быть выбраны из дерева подробностей проекта. Некоторые импортированные модели используют поверхностные части, чтобы определить границы твердых областей. Эти модели не имеют никаких областей, и невозможно определить твердый диэлектрик. Однако, если поверхности объединены операцией *Union*, чтобы создать замкнутые поверхности, *CADFEKO* автоматически создает соответствующие области для новых частей.

Фаски — отдельные поверхности объекта и также перечислены в дереве подробностей. Они могут быть выбраны или в дереве подробностей, или трехмерного представления, когда активен выбор фаски.

Термин «фаска» используется, чтобы отличить её от «поверхности», которая в *CADFEKO* является двумерной геометрической поверхностью типа полигона. Грани, которые перечисляются в дереве подробностей, включают грани фасок, а также свободные кривые (называемые как и провода или *wire*).

Характеристики среды сохраняются во время геометрических преобразований. Например, если фаска разбивается на две фаски операцией вычитания, обе получающиеся фаски наследуют характеристики исходной; или, если две накладывающиеся поверхности пересечены, получающаяся поверхность будет иметь свойства, одинаковые для обеих поверхностей. Если невозможно объединить свойства нового объекта с исходным, то объекты отмечаются как сомнительные.

Чтобы установить свойства диэлектрика или свободной области, необходимо выбрать одну или большее количество областей и команду *Properties* из выпадающего меню. Это открывает окно *Region properties*.

Поле *Type* используется для определения типа среды — для области, это может быть идеальный электрический проводник, свободное пространство или диэлектрик. Тип диэлектрической среды доступен только тогда, когда список *Media* содержит диэлектрические среды.

Окно *Face properties* имеет две закладки: *Properties* и *Solution*. Параметры фаски, находящейся в среде, устанавливаются в закладке *Properties*.

Опции для поля *Face type* в группе *Face medium* зависят от областей с двух сторон фаски. Если с обеих сторон свободное пространство, то параметры могут быть следующие: *Perfect electric conductor*, *Lossy conducting surface*, *Impedance sheet*, *Thin dielectric sheet* и *Default* (по умолчанию). Некоторые параметры доступны только после того, как были определены соответствующие материалы.

В данном конкретном случае опция по умолчанию *Default* такая же, как *Perfect electric conductor*. Если выбрана опция *Lossy conducting surface*, то должны быть определены металлическая среда и толщина. Заметим, что невозможно установить среду *Metallic* в областях, но это может быть эффективно достигнуто установкой фаски на границе к области с поверхностными потерями слоев, более толстых, чем глубина поверхностного слоя.

Импедансный слой *Impedance sheet* — бесконечно тонкая проводящая поверхность с указанным поверхностным импедансом (отношение между тангенциальным электрическим полем на поверхности и электрическим поверхностным током). Если выбрана опция *Thin dielectric sheet*, поле *Medium* перечисляет все слои *Layered dielectric*. Это плоские многослойные диэлектрические структуры типа автомобильного окна.

Если фаска формирует границу между двумя диэлектрическими областями или между диэлектрической областью и свободным пространством, параметры для *Face type* заданы по умолчанию *Dielectric boundary*, *Lossy conducting surface* и *Perfect electric conductor*. Если выбрана *Dielectric boundary*, то фаска представляет границу между двумя различными диэлектрическими областями. Опции *Lossy conducting surface* и *Perfect electric conductor* используются для определения границы проводимости на диэлектрической области. Например, при моделировании планарной антенны на подложке конечного азмера, стороны и большинство пространства сверху должны быть установлены как

Dielectric boundary, в то время как плата и земляная плата должны быть проводящими поверхностями. Здесь *Default* становится *Dielectric boundary*.

Если же все граничащие области являются идеальным проводником, то единственные доступные параметры *Face type* заданы как *Default* и *Perfect electric conductor*.

В идеале свойства объектов должны быть установлены на геометрии, до преобразования геометрии в сетку ячеек. Любые изменения геометрии (или свойств геометрии), сделанные после объединения, не будут отражены в сетке разбиения. Только параметры сред могут быть изменены после объединения, и это будет учтено в расчёте.

1.3. Подготовка к вычислению и выполнение расчётов в программе FEKO

1.3.1. Создание портов

После создания геометрии необходимо задать порты, источники возбуждения, частоты, выбрать метод решения и подготовить все данные для запуска на расчёт.

Источники напряжения и дискретные нагрузки прикладываются к портам, которые должны быть определены перед созданием источника или нагрузки.

Порты перечисляются в разделе *Ports* в дереве проекта. Каждый порт содержит подэлементы, или модели, указывающие геометрию и сетку разбиения, с которыми он связан. Порты устанавливаются на геометрии, например, в линии. Другая характеристика порта, это разбиение на сетку, оно автоматически создаётся, когда мешируется вся структура. Тогда раздел *Port* в дереве проекта будет содержать образы геометрической модели и всех элементов разбиения порта. Ниже приведено описание основных типов портов.

Порты могут также быть созданы на сетке. Эта опция доступна из меню *Mesh* → *Create port* и выполняется только для импортированной сетки разбиения. Если порт создан на сетке разбиения, он будет содержать только модель разбиения на сетку.

Если порт содержит геометрическую модель, то, выбирая *Properties* из всплывающего меню портового элемента, можно открыть описание геометрии. Если порт содержит только раздел разбиения на сетку, это открывает свойства этого разбиения. Преобразование порта состоит в том, что если положительное напряжение приложено к порту, электрический ток течёт через порт от отрицательной клеммы к положительной клемме.

Как геометрия, так и сетка разбиения, не могут быть удалены, пока с ними связан какой-либо порт. Однако, иногда удаётся удалить элементы, на которых установлены порты. Порты тогда отмечаются как подозрительные и должны быть переустановлены, чтобы снять эту установку. Геометрия и сетка, связанные с портом, должны быть удалены отдельно. После этого удаляется сам порт. Если порт установлен на сетке или геометрия удалена после объединения, то порт содержит только разбиение на сетку. Любая часть сетки разбиения, к которой такой порт обращается, не может быть повторно объединена, если порт не удален полностью.

Проводные порты создаются на рёбрах и проводах командой *Geometry* → *Create port* → *Wire port* из главного меню (рис. 1.14).

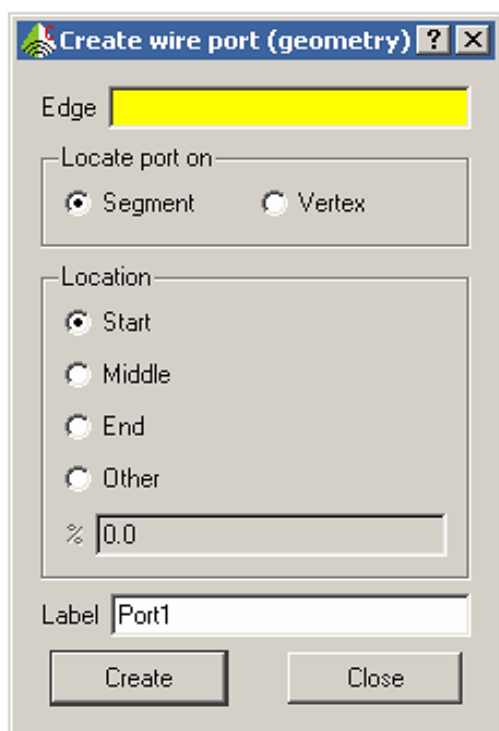


Рис. 1.14 — Окно создания проводного порта

В поле *Edge* устанавливается провод, на котором будет создаваться порт. Он может быть вставлен выбором его в трехмерном представлении или в дереве проекта. Окно создания порта может быть открыто также нажатием правой кнопки на краю провода в дереве проекта и выбором *Create port* → *Wire port* из всплывающего меню в дереве подробностей. Тогда выбранное ребро автоматически вводится в поле *Edge*.

Когда провод разбит на ячейки, порт может быть помещен в один сегмент или на вершине между двумя сегментами. Порт на вершине главным образом используется, когда провода соединены с другими структурами, и разность фаз от конечной точки до центра первого сегмента может значительно изменить входное сопротивление.

В разделе *Location* (рис. 1.14) задаётся, в каком месте на проводе будет находиться порт. Если точки *Segment points* определены в начальной точке, используется сегмент *Start*, в середине — *Middle*, и *End* в конце. Когда выбрана опция *Other*, пользователь должен задать положение по проводу. Поле % определяет положение, в процентах от длины провода от 0 % в начальной точке, до 100 % в конечной точке.

Порты на ребрах (*Edge ports*) выбираются вдоль границ между двумя фасками. Фаски должны принадлежать той же самой части конструкции проекта. Порт на ребрах создается командой *Geometry* → *Create port* → *Edge port* из главного меню (рис. 1.15).

Окно *Create edge port* содержит два списка, в которых пользователь может прибавлять и удалять фаски, на которых будет расположен порт. Если ввод в таблице можно выполнить, фон желтый, и можно щелкнуть на фаске в трехмерном представлении или в дереве деталей, чтобы ввести эту фаску в список.

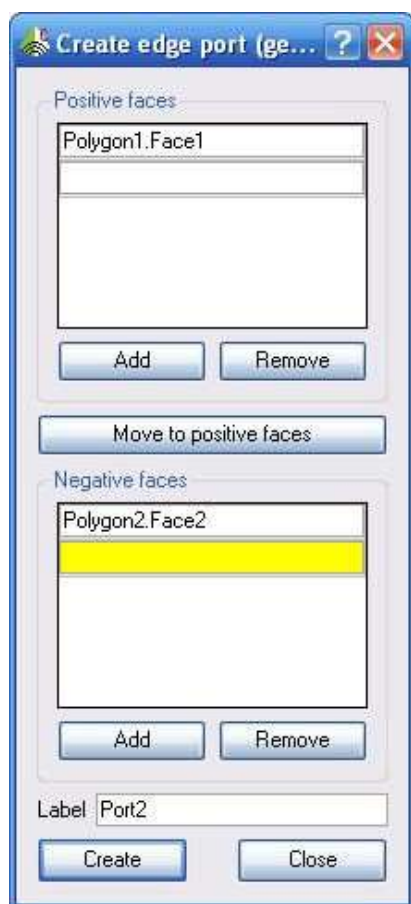


Рис. 1.15 — Окно создания порта на рёбрах структуры

Когда данные добавлены в список, добавляется новая незаполненная строка.

Фаски можно переключить между списками, щелкая кнопку между списками или выполняя двойное нажатие. Это окно также можно открыть, выбирая фаски геометрии или грани, ограничивающие фаски, выбирая порт командой *Create port* → *Edge port* из всплывающего меню в дереве подробностей. Выбранные фаски или все фаски, ограничивающие выбранные грани, добавляются в список *Positive faces*. Пользователю нужно только переместить соответствующую фаску в список *Negative faces*.

Граница между двумя фасками высвечивается как серый цилиндр. Положительные фаски отмечены вторым, красным цилиндром, а отрицательные фаски отмечены синим цилиндром. Заметим, что край не должен быть обязательно прямым, он может даже замыкаться, и можно, например, создать порт в центре толстого вибратора, созданного как цилиндр.

Полосковые порты используются для создания источника на полосковых структурах. Они задаются на ребре или на нескольких гранях, которые формируют прямое, горизонтальное (то есть лежащее при постоянном z) ребро, ограничивающее только одну фаску. Кроме того, модель должна содержать плоскую диэлектрическую подложку с проводящей земляной платой. Окно *Create stripline port* содержит список граней, который подобен спискам фасок в разделе *Edge port*. К этому порту обращаются, выбирая *Geometry* → *Create port* → *Stripline port* или выбирая несколько фасок и затем выбирая *Create port* → *Edge port* из всплывающего меню в дереве подробностей.

1.3.2. Создание источников энергии

Для проведения расчета хотя бы к одному порту должен быть подключен источник энергии.

Для добавления источника напряжения необходимо выбрать *Solution* → *Add excitation* → *Voltage source* из главного меню, либо щёлкнуть правой кнопки мыши на *Excitation* в дереве проекта и выбрать *Voltage Source*, чтобы задать источник напряжения. Окно (рис. 1.16) содержит поле *Port*, которое перечисляет все доступные порты, и входные поля для величины напряжения и фазы. Указанное напряжение дает разность потенциалов между положительной и отрицательной клеммой. Положительное напряжение вызывает ток, вытекающий из положительной клеммы.

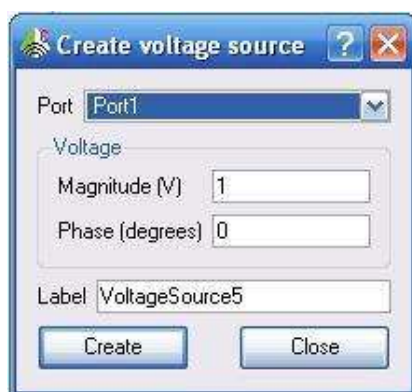


Рис. 1.16 — Окно создания источника напряжения

1.3.3. Задание диапазона рабочих частот

Для установки рабочей частоты (или частот) необходимо выбрать команду *Solution* → *Set frequency* или дважды нажать на *Frequency* в разделе *Solution* в дереве проекта, чтобы открыть окно *Solution frequency*. Здесь имеется четыре опции частотного диапазона. Режим *Single frequency* позволяет установить конкретную частоту решения.

Если выбран режим *Continuous*, все требуемые результаты рассчитываются, используя адаптивные выборки в диапазоне частот от *Start frequency* до *End frequency*. Алгоритм выбора частотных точек использует лучший алгоритм частотных выборок, для обеспечения того, чтобы все резонансные эффекты были рассчитаны точно. Установка параметра *Maximum number of samples* ограничит число решений или время расчета, но результаты могут быть получены неточные, если не будет перекрытия всего диапазона частот.

Параметр *Minimum frequency increment* используется для ограничения плотности создания частотных точек. Это полезно, если имеются небольшие расхождения результатов расчета.

Используя опции *Linearly spaced discrete points* и *Logarithmically spaced discrete points*, можно задать фиксированное число точек между начальной и конечной частотой.

1.3.4. Выбор рассчитываемых характеристик

Дерево проекта содержит список рассчитываемых характеристик. Они перечислены в разделе *Calculation* (рис. 1.17). Эти результаты рассчитываются для всех частот с заданными нагрузками и возбуждениями. Некоторые требуемые характеристики могут быть скрыты, переименованы и удалены (кроме токов). Они могут быть также установлены двойным нажатием на них или выбором *Properties* из всплывающего меню.

Каждая характеристика отмечается меткой *Label*, которая используется, чтобы идентифицировать запрос в *CADFEKO* и для показа этой характеристики в *POSTFEKO*.



Рис. 1.17 — Выбор рассчитываемых характеристик

Для расчета токов на металлических поверхностях необходимо двойное нажатие на *Currents* в разделе *Solution*.

Окно *Request S-parameters* (рис. 1.18) содержит таблицу, в которой можно задать порты и импедансы каждого порта для расчета S-параметров. Если отмечается режим *Active* в таблице, то порт используется как источник. Иначе этот порт служит только для приема сигнала. Например, если список содержит два порта и активен только порт 1, *FEKO* вычислит S_{11} и S_{21} , но не S_{12} и S_{22} . Если активен также порт 2, также рассчитываются S_{12} и S_{22} . Кнопки «Add» и «Remove» позволяют прибавлять или удалять порты в списке.

Если отмечено *Export S Parameters to Touchstone file*, рассчитанные S параметры записываются в файл *. snp.

При расчете S параметров *FEKO* нагружает все порты указанными импедансами. Эти нагрузки обычно остаются как нагрузки портов, после вычисления S параметров. Если отмечен режим *Restore loads after calculation*, то нагрузки после расчета S параметров удаляются.

Для расчета диаграммы направленности необходимо выбрать *Request far fields*. В закладке *Position* окна расчета дальнего поля можно выбрать одну из двух опций: расчет поля в направлении излучения во все стороны, или расчет поля в направлении плоской падающей волны. В последнем случае направление падения используется вместе с возбуждением плоской волны с несколькими падающими направлениями, главным образом, чтобы вычислить эффективную поверхность рассеяния (RCS). В этом случае никакие параметры в закладке *Position* не требуются, поскольку рассеянные поля рассчитываются только в обратном направлении к падающей волне. Если эта опция выбрана, модель должна содержать возбуждение плоской волны с несколькими направлениями падения. Иначе программа даст ошибку во время решения.

Если выбран режим *Calculate field as specified*, то задаются начальный и конечный углы, а также шаг угла для каждой угловой оси. *CADFEKO* вычисляет и выводит дальнее поле в этих точках. Фактические конечные углы зависят от начальных углов, количества точек и приращений, и могут не совпадать точно с указанными конечными углами.

Когда число приращений больше 1 для обоих угловых параметров, *FEKO* вычисляет также интеграл вектора Пойнтинга (то есть полную мощность излучения) через сегмент, заданный начальным и конечными углами также как вторым сектором, который расширяет приращение наполовину вне указанного диапазона. Это нужно для ликвидации неоднозначности в определении замкнутых поверхностей в сферических координатах. Полный срез по углу ϕ выполняется от 0° до 360° , но последнее направление соответствует первому.

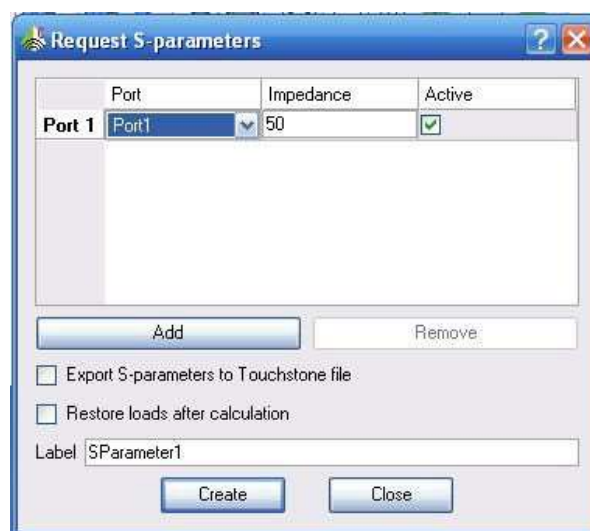


Рис. 1.18 — Окно *Request S-parameters*

Запуск проекта на расчет производится командой *Run* → *FEKO*.

1.4. Обработка результатов расчета в *POSTFEKO*

После выполнения расчета в ядре *FEKO* и нахождения результатов решения запускается *POSTFEKO*. *POSTFEKO* автоматически загружает файлы геометрии файла текущей задачи *.fek и файла результатов *.bof. В одном сеансе могут быть загружены несколько файлов *.fek и *.bof, и информация в них отображается в нескольких окнах. Если то же самое имя файла загружено из различных каталогов, модели различаются автоматическим добавлением номер к имени файла. Полный путь можно определить, выбирая модель в браузере базы данных и выбирая *Properties* из всплывающего меню щелчком правой кнопки мыши.

1.4.1. Интерфейс программы *POSTFEKO*

Интерфейс *POSTFEKO* (рис. 1.19) подобен *CADFEKO*. Экран вывода результатов автоматически изменяется, когда модель или результаты модифицируются. Сверху находится главное меню и основная инструментальная панель. Панель управления находится слева, и управляет видом активного окна. Область вывода данных может содержать несколько трехмерных представлений и двумерных графиков. Строка состояния (снизу справа) показывает текущие углы обзора и результат вычисления расстояния. Все окна на экране и их параметры настройки сохраняются в файле сеанса *.pfs.

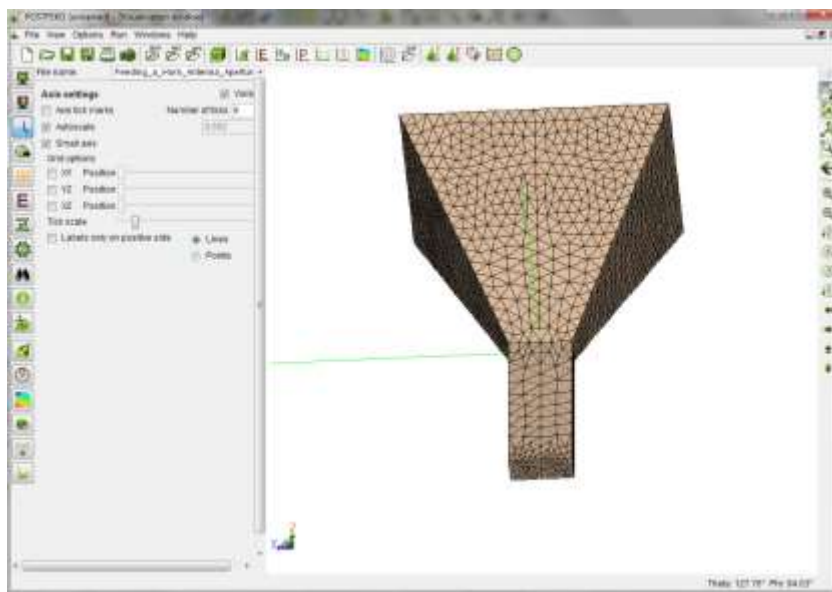


Рис. 1.19 — Главное окно *POSTFEKO*

Все страницы результатов содержат группу выбора результатов, показанную на рис. 1.20. Для просмотра результата расчётов на конкретной частоте рабочего диапазона необходимо выбрать соответствующую частоту из списка *Frequency*. Заметим, что новый ввод добавляется к этому списку каждый раз, когда меняются частоты расчёта. Таким образом, если расчёты были выполнены на частотах 1 ГГц, 1.1 ГГц и снова на 1 ГГц, будут иметься три цифры в списке. Список *Solution* содержит вывод для каждого решения на

данной частоте. Например, если расчёт выполнен с двумя наборами источников на данной частоте, будут иметься два вывода в этом списке.

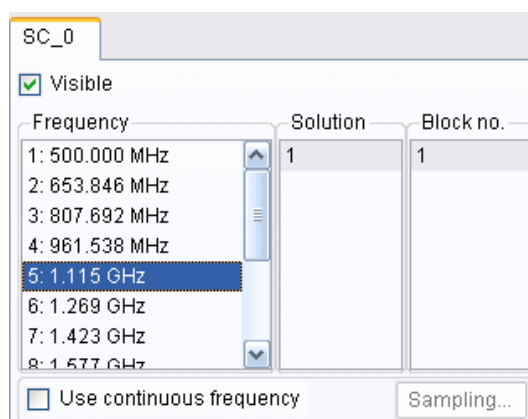


Рис. 1.20 — Выбор результатов расчёта в частотном диапазоне

1.4.2. Работа с трёхмерными графиками

Для просмотра результатов расчёта токов на металлических поверхностях нужно выбрать опцию *Currents and charges* на главной странице (рис. 1.21). Можно выбрать электрические токи на металлических поверхностях и магнитные токи *Magnetic currents*, применимые только к диэлектрическим поверхностям, которые моделируются на основании теоремы эквивалентных поверхностей.

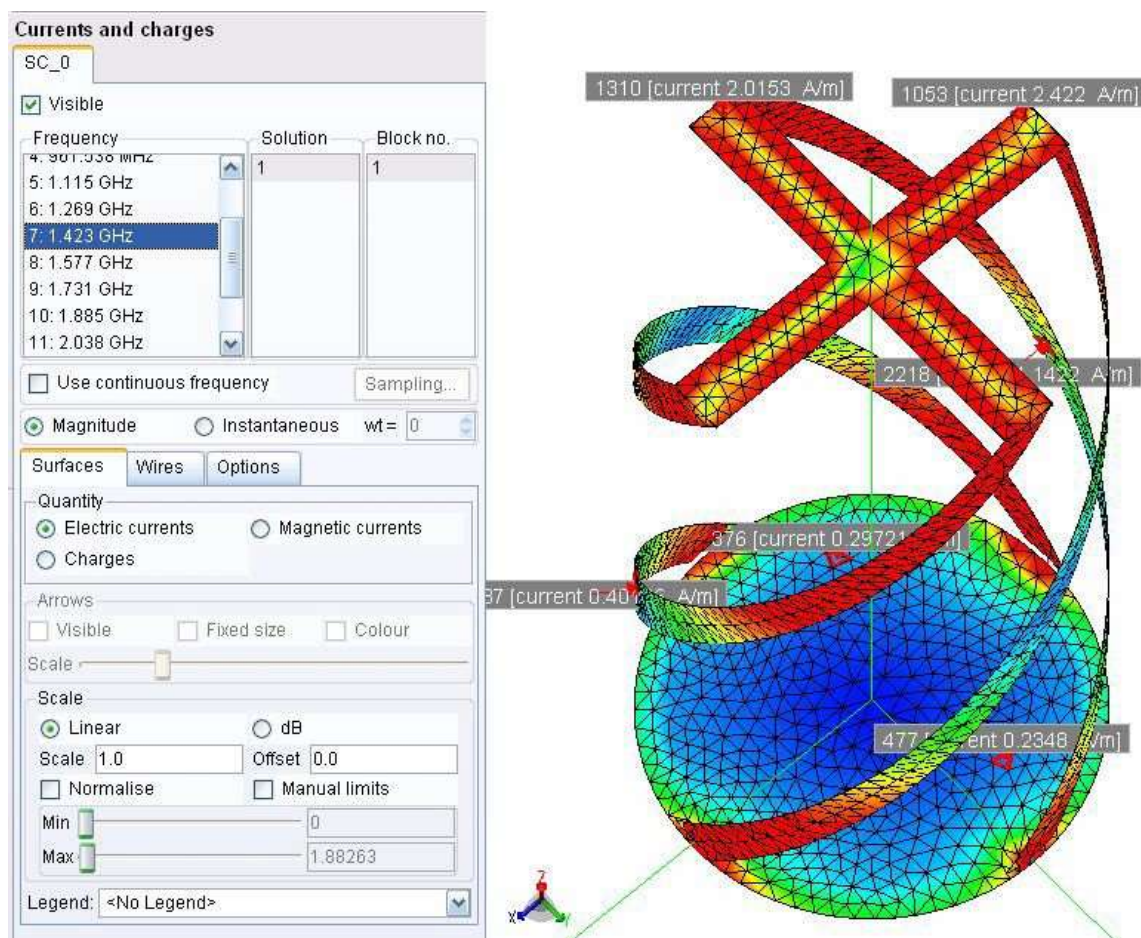


Рис. 1.21 — Вывод токов и зарядов на металлические поверхности

Для анализа результатов расчёта диаграммы направленности необходимо выбрать страницу 3D диаграммы направленности. На этой странице (рис. 1.22) выводятся результаты расчёта поля в дальней зоне в трёхмерном представлении. При выводе значения поля на двумерный график, величины *Quantity* выводятся как составляющие дальнего поля в зависимости от направления излучения. Характеристика в виде комплексного числа может иметь отрицательные реальные и мнимые части, модуль и фазу.

POSTFEKO также показывает величину осевого отношения коэффициента эллиптичности *Axial ratio*.

Закладка *Options* управляет видом модели. Если опция *Surface* снята, ДН отображается только в виде линий. Эти линии, с другой стороны, могут быть скрыты, снимая опцию *Mesh*. Если отмечено *Close*, *POSTFEKO* стремится завершить ДН, связывая результаты с самым большим и с самыми малыми значениями ϕ . Размер ДН может изменяться слайдером *Scale factor*. Смещение *Offset* может использоваться для изменения положения ДН относительно геометрии. Это используется, например, для показа ДН антенны, установленной на транспортном средстве (которая обычно не лежит в начале координат).

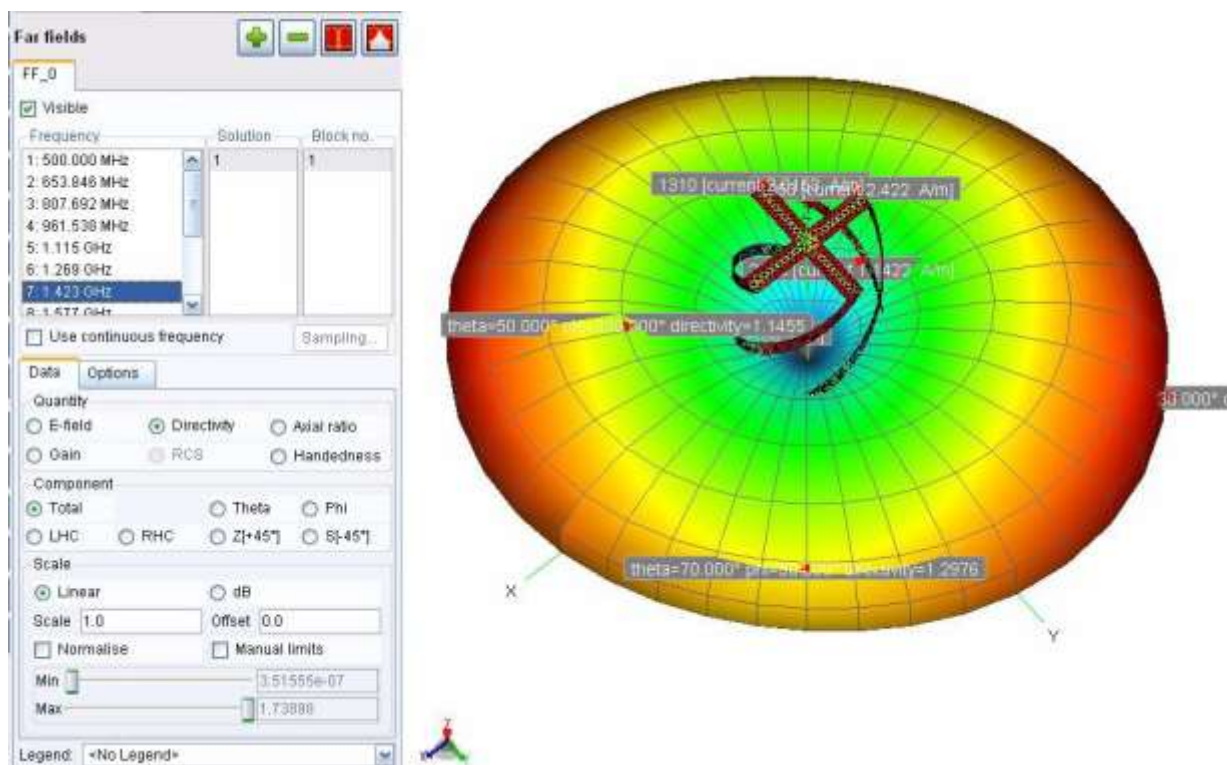


Рис. 1.22 — Рассчитанная объёмная диаграмма направленности

1.4.3. Работа с двумерными графиками

Вывод информации в виде трехмерного графика даёт ясный вид и понимание, но двумерные графики дают возможность количественного сравнения данных. Во-первых, данные от различных моделей могут быть начерчены на одном графике. На двумерном графике данные относятся только к отдельной строке данных, названных одиночной серией. Во-вторых, *POSTFEKO* может модифицировать график или копировать значения, когда результирующий файл (*.bof) изменяется.

Новые двумерные графики созданы в двумерной части основной инструментальной панели, показанной на рис. 1.23.



Рис. 1.23 — 2D часть главной инструментальной линейки

На рис. 1.23 иконки позволяют выбрать следующие результаты расчетов: расчет токов на металлических проводниках, входные характеристики, S-параметры, мощность источников, расчет характеристик сетей, диаграмма направленности, ближнее поле.

Аналогично панели управления видимости модели, панель двумерных графиков содержит некоторое число страниц, на которые выводятся последовательно графики характеристик.

На каждой странице результатов находится линейка последовательных данных (рис. 1.24). Эта линейка предназначена для вывода на график нескольких характеристик, в том числе с использованием алгебраических действий между ними.

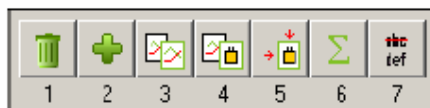


Рис. 1.24 — Инструментальная линейка последовательного управления

Кнопки реализуют следующие действия:

1. кнопка «*Delete the current series*» удаляет текущую серию из диаграммы;
2. кнопка «*New series*» добавляет новую серию данных на график;
3. кнопка «*Copy series*» копирует текущую серию;
4. кнопка «*Copy to value series*» создает новую серию значения по серии текущих данных;
5. кнопка «*Convert to value series*» преобразует текущую серию к серии значений;
6. кнопка «*Perform calculations on series*» открывает окно, когда можно выполнить дополнительный расчет между сериями данных;
7. кнопка «*Rename series*» открывает окно для изменения имени серии данных.

Настройка двумерных графиков осуществляется с помощью следующих окон.

Страница установки последовательности данных  (рис. 1.25) управляет видом, условными обозначениями и масштабными множителями каждой серии. Основной список позволяет настроить маркер, толщину и тип линии. Доступные цвета могут быть сконфигурированы из меню *Options*.

Если поле в начале строки отмечено, серия чертится на графике. Снятие галочки удаляет его из графика без снятия параметров настройки.



Рис. 1.25 — Окно установки параметров последовательной серии



Страница опций графика управляет глобальными параметрами графика (рис. 1.26). График может быть нанесён в декартовой, полярной системе координат или на диаграмме Смита. Для полярных графиков, перевод графика в *Vertical* сдвигает его положение до 0, а если отметить *Mirror*, то выполняться вращение по часовой стрелке, а не против часовой стрелки. Условные обозначения можно поместить на любую из четырех сторон, выбирая соответствующую опцию в разделе *Legend*. Их можно также скрыть, снимая опцию *Visible*.

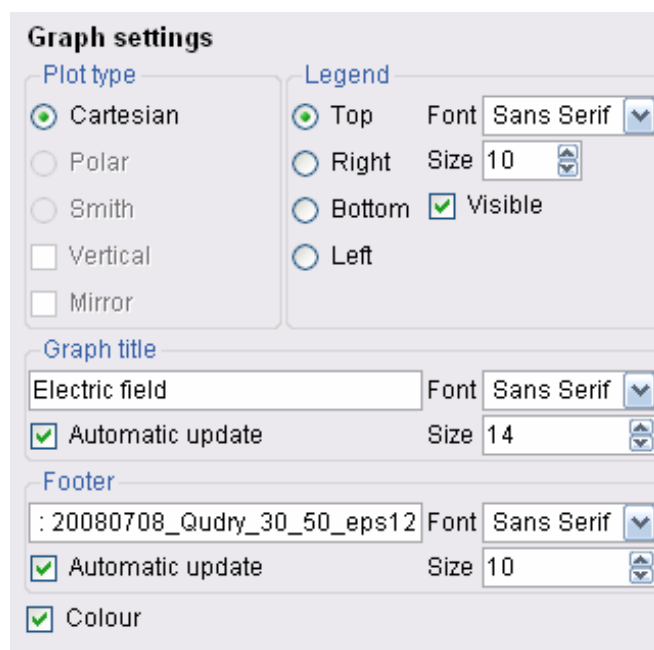


Рис. 1.26 — Окно настройки графика



Страница левой оси управляет пределами, масштабом и надписями на левой оси. Единицы установлены *POSTFEKO* в зависимости от диапазона значения данных, но могут быть изменены. Если *Autoscale* не отмечен, пользователь может вручную установить минимум, максимум, число делений и точность, используемые для оси (поле *Digits* в группе *Value labels*). Данные могут быть начерчены на графике в логарифмическом или dB масштабе и могут быть нормализованы к одному к максимуму максимумов или к максимуму каждого из графиков. Надпись оси может быть автоматически модифицирована или указана вручную.



Страница нижней оси управляет размером, масштабом и надписью на нижней оси, и очень похожа на страницу левой оси, но нижняя ось не может быть нормализована, и невозможно использовать масштаб dB на этой оси. Величины на нижней оси (например, частота) обычно не выражаются в dB. Шкала *Log*, однако, иногда используется для очень широких диапазонов частот.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИММЕТРИЧНОГО И НЕСИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРОВ

2.1. Цель работы

Освоить методику расчета диаграммы направленности и входного сопротивления симметричного вибратора.

Освоить методику проектирования в САПР симметричного и несимметричного вибраторов.

Исследовать влияние геометрических параметров симметричного вибратора на его характеристики.

2.2. Исходные данные

Исходными данными к индивидуальным заданиям для теоретических и экспериментальных исследований являются: рабочая частота f , три значения длин плеч симметричного вибратора l_1, l_2, l_3 , указанные в долях длины волны λ , а также радиус проводников симметричного вибратора R_0 для выполнения предварительных расчётов и моделирования антенн на основе примитива цилиндр (*Cylinder*), R_{line} — радиус проводников симметричного вибратора для моделирования антенн на основе примитива линия (*Line*), d — длина плеч проводников сети несимметричного вибратора (табл. 2.1).

Таблица 2.1 — Исходные данные для теоретических и экспериментальных исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f , МГц	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l_1/λ	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,6
l_2/λ	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,72
l_3/λ	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,05	1,1	1,15	1,2
R_{line} , мм	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
R_0 , мм	3	4	5	6	7	3	4	5	6	7
d , см	7	6	5	4	3	7	6	5	4	3

Примечание: M , N — предпоследняя и последняя цифра зачётной книжки, соответственно.

2.3. Теоретический раздел

2.3.1. Методика расчёта диаграммы направленности симметричного вибратора

Симметричный вибратор (СВ) состоит из двух прямолинейных плеч длиной l , разделенных малым по сравнению с длиной волны зазором (рис. 2.1). Источник сторонней ЭДС $\varepsilon_{\text{ст}}$ для упрощения модели СВ считают подключенным между входными зажимами. За начало отсчета вдоль оси Z принимается середина зазора между входными зажимами. Положение точки наблюдения $M(r, \theta, \varphi)$ в сферической системе координат задается модулем радиус-вектора r , углом θ , отсчитываемым от положительного направления оси Z , и углом φ в поперечной плоскости.

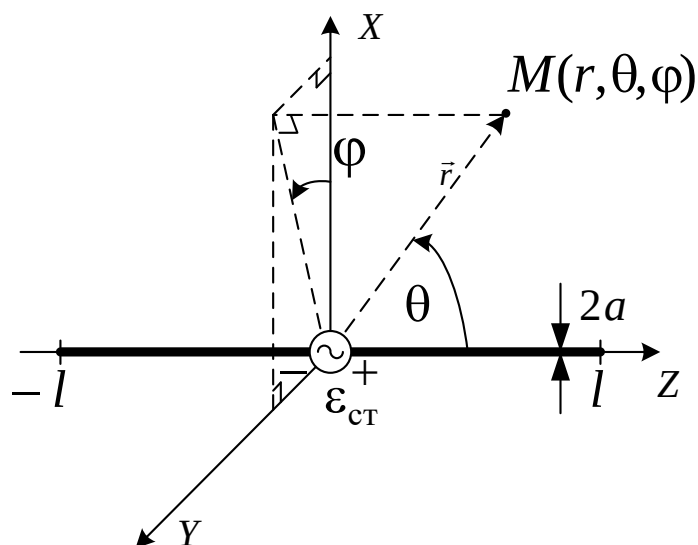


Рис. 2.1 — Схема симметричного вибратора

В первом приближении для описания распределения токов $I(z)$ и потенциалов $U(z)$ вдоль плеч тонкого симметричного вибратора используют модель симметричного вибратора в виде эквивалентной разомкнутой длинной линии (рис. 2.2).

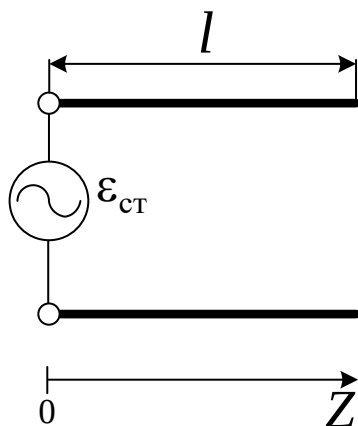


Рис. 2.2 — Эквивалентная схема симметричного вибратора в виде разомкнутой длинной линии

В этом случае $I(z)$ и $U(z)$, как ток и напряжение в разомкнутой линии, задаются выражениями

$$\begin{cases} U(z) = \pm \frac{U_H}{2} \cos[k(l - |z|)] \\ I(z) = j \frac{U_H}{2\rho_B} \sin[k(l - |z|)] \end{cases}, \quad (2.1)$$

где U_H — напряжение на конце эквивалентной длинной линии;

$\rho_B = 120(\ln \frac{l}{a} - 1)$ — волновое сопротивление симметричного вибратора.

В соответствии со схемой СВ (см. рис. 2.1), принят знак «+» для правого плеча, знак «-» — для левого.

Для симметричного вибратора с длинами плеч $l = \lambda/2$ и $l = 3\lambda/4$ распределения тока и потенциалов представлены на рис. 2.3 и 2.4, соответственно.

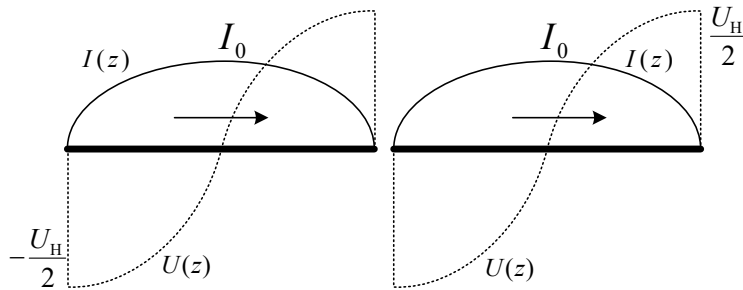


Рис. 2.3 — Распределение тока и потенциалов вдоль плеч симметричного вибратора при длинах плеч $l = \lambda/2$

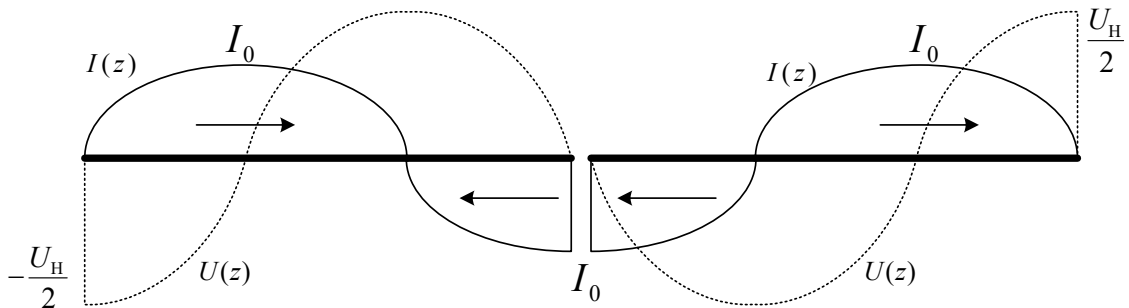


Рис. 2.4 — Распределение тока и потенциалов вдоль плеч симметричного вибратора при длинах плеч $l = 3\lambda/4$

Путем интегрирования распределения тока можно получить выражение для пространственной диаграммы направленности (ДН) по полю $f(\theta, \varphi)$ (2.1)

$$f(\theta, \varphi) = \left| \frac{\cos(kl \cos(\theta)) - \cos(kl)}{\sin(\theta)} \right|, \quad (2.2)$$

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

Принято анализировать ДН антенны в двух основных сечениях: E -плоскости и H -плоскости. Так как $\vec{E}$, порождаемый электрическими токами, параллелен этим токам, то в нашем случае плоскость XOZ на рис. 2.2

($\theta = 0^\circ \dots 360^\circ, \varphi = 0^\circ$) является E -плоскостью, а XOY ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ \dots 360^\circ$) — H -плоскостью. ДН СВ (1.2) в E - и H -плоскостях рассчитываются с учетом указанных пределов изменения углов θ и φ . Поскольку в (2.2) $f(\theta, \varphi)$ не зависит от угла φ , СВ в H -плоскости имеет круговую ДН. Для анализа характеристик поля излучения СВ в дальнейшем будем рассматривать ДН только в E -плоскости: $f(\theta)$.

При построении ДН в ходе теоретических исследований обычно выполняют ее нормировку к максимальному значению. Направления максимального излучения симметричного вибратора при $l \leq 0,625\lambda$ соответствуют углам $\theta_{\max 1,2} = \pm 90^\circ$, для которых

$$f(\pm 90^\circ) = 1 - \cos kl.$$

Следовательно, нормированную ДН по полю СВ $f^{\text{норм}}(\theta)$ при $l \leq 0,625\lambda$ можно выразить формулой

$$f^{\text{норм}}(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta (1 - \cos kl)} \right|. \quad (2.3)$$

При анализе формы ДН СВ выполняют следующее:

— определяют направления нулей ДН θ_{0n} из условия

$$\cos \theta_{0n} = \pm 1 \pm n \cdot \frac{\lambda}{l}, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots; \quad (2.4)$$

— предварительно оценивают направления максимумов ДН $\theta_{\max m}$ ($m = 1, 2, \dots$) как биссектрисы углов между двумя соседними направлениями нулевого излучения;

— определяют уровни ДН в максимумах $f(\theta_{\max m})$.

За направление главных максимумов ДН симметричного вибратора принимают углы $\theta_{\max 1,2} = \pm 90^\circ$. Если дополнительные (побочные) максимумы в ДН СВ $f(\theta_{\max m})$ будут больше уровня излучения в главном направлении, то нормировку ДН необходимо производить к этим максимальным значениям.

Принято строить ДН СВ в полярной системе координат в нормированном виде (рис. 2.5).

На рис. 2.5 видно, что при $l > \lambda/2$ на плечах симметричного вибратора появляются противофазные участки тока, которые неблагоприятно сказываются на характеристиках излучения антенны:

- уменьшается интенсивность излучения в главном направлении ДН;
- уменьшается ширина главного лепестка ДН;
- увеличивается относительный уровень бокового излучения.

Для случаев, когда наибольший уровень излучения наблюдается при $\theta = \pm 90^\circ$, ширину главного лепестка нормированной ДН, представленной по полю, будем определять по уровню 0,707 от максимума, как показано на рис. 2.5 на примере ДН симметричного вибратора при $l = 0,5\lambda$.

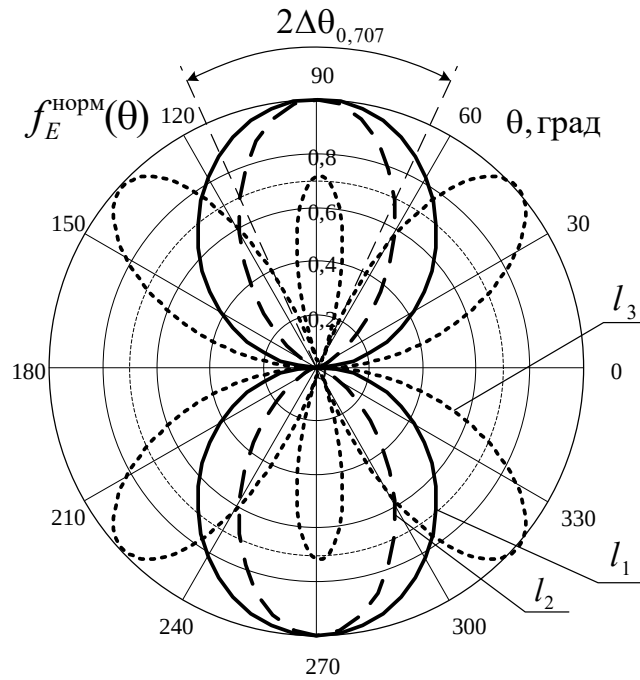


Рис. 2.5 — Нормированные диаграммы направленности СВ в E -плоскости при $l_1 = 0,25\lambda$, $l_2 = 0,5\lambda$, $l_3 = 0,75\lambda$

Диаграмма направленности антенны по мощности $F(\theta)$ связана с ДН антенны по полю $f(\theta)$ соотношением

$$F(\theta) = f^2(\theta).$$

Для ДН по мощности $F(\theta)$ ширину главного лепестка определяют по уровню 0,5 («половинной мощности»).

На практике часто используют нормированные ДН, выраженные в децибелах. Нормированные диаграммы направленности по полю пересчитывают по формулам

$$f_{\text{дб}}(\theta) = 20 \lg f^{\text{норм}}(\theta). \quad (2.5)$$

Для пересчета нормированной диаграммы направленности по мощности используют выражение

$$f_{\text{дб}}(\theta) = 10 \lg F^{\text{норм}}(\theta).$$

Таким образом, ДН в децибелах становится единственной, ширину ее главного лепестка определяют по уровню -3 дБ.

2.3.2. Методика расчета входного сопротивления симметричного вибратора

Входное сопротивление симметричного вибратора произвольной длины является комплексным, то есть состоит из активной и реактивной составляющих

$$Z_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} + j X_{\text{ВХ}}.$$

Величины этих составляющих зависят от электрической длины и радиуса поперечного сечения плеч симметричного вибратора.

Идеальная двухпроводная линия передачи не излучает электромагнитного поля в пространство, поэтому представленная на рис. 2.2 модель симметричного вибратора в виде эквивалентной длинной линии требует уточнения.

Введем понятие сопротивления излучения R_{Σ} , как величины, имеющей размерность сопротивления и связывающей излучаемую антенной мощность P_{Σ} с током I_0 в пучности его распределения вдоль плеч СВ

$$R_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{I_0^2}.$$

Величину P_{Σ} найдем путем интегрирования потока мощности излучения по сфере произвольного радиуса r

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{120\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} E_m^2(\theta) r^2 \sin \theta d\theta,$$

где r, θ, φ — координаты точки наблюдения;

$E_m(\theta) = \frac{60I_0}{r} \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta}$ — амплитуда напряженности электрического поля, создаваемого СВ в точке наблюдения.

Тогда для сопротивления излучения СВ можно получить формулу

$$R_{\Sigma} = 60 \int_0^{\pi} \frac{(\cos(kl \cos \theta) - \cos kl)^2}{\sin \theta} d\theta.$$

Обозначим через $R_{\Sigma l}$ сопротивление излучения, отнесенное к входным зажимам симметричного вибратора. При синусоидальном распределении токов

$$R_{\Sigma l} = R_{\Sigma} / \sin^2(kl).$$

Теперь можем уточнить модель эквивалентной длинной линии. Для «коротких» СВ ($l/\lambda \leq 0,25$) в каждый проводник введем половину $R_{\Sigma l}$ у входных зажимов (рис. 2.6, а), а для «длинных» СВ ($l/\lambda > 0,25$) — половину R_{Σ} в точках, отстоящих на $\lambda/4$ от концов плеч (рис. 2.6, б).

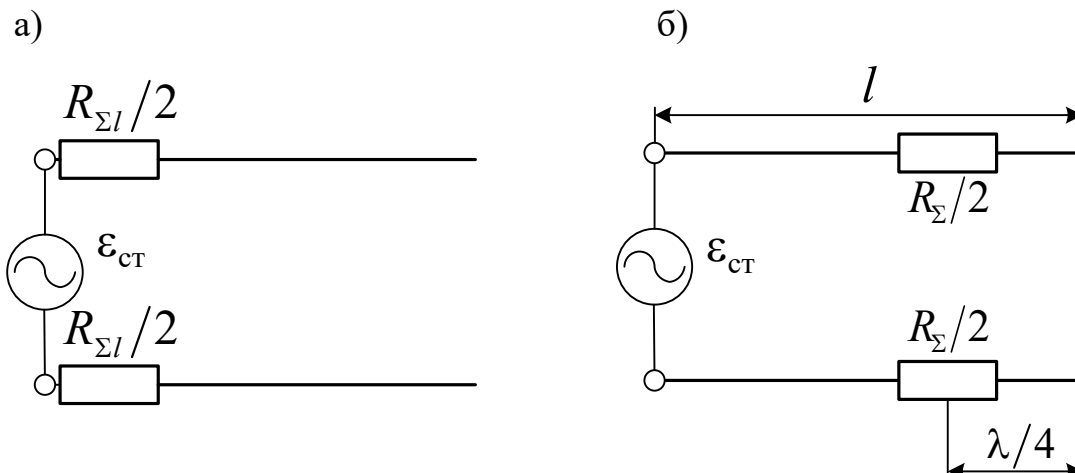


Рис. 2.6 — Уточненная модель эквивалентной длинной линии

для $l/\lambda \leq 0,25$ (а) и $l/\lambda > 0,25$ (б)

Для входного сопротивления СВ получим формулы:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{\text{вх}} = R_{\Sigma l} - j\rho_{\text{в}} \operatorname{ctg}(kl), \text{ при } l \leq \lambda/4; \\ Z_{\text{вх}} = \frac{R_{\Sigma} - j0,5\rho_{\text{в}} \left(1 - \left(\frac{R_{\Sigma}}{\rho_{\text{в}}} \right)^2 \right) \sin(2kl)}{\sin^2(kl) + \left(\frac{R_{\Sigma}}{\rho_{\text{в}}} \right)^2 \cos^2(kl)}, \text{ при } l > \lambda/4. \end{array} \right. \quad (2.6)$$

Для оценки характеристик вибраторных антенн часто вводят расчётный параметр, называемый **действующей длиной антенны** — это длина воображаемого СВ с равномерным распределением тока, создающего в направлении максимального излучения (при $\theta = \pm 90^\circ$) поле, равное по уровню полю данной антенны в направлении её максимального излучения.

При этом токи в точках питания обеих антенн считаются равными.

Используя выражение (2.3) для ДН СВ, для действующей длины $l_{\text{д}}$ можно получить выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{\text{д}} = \frac{2}{k} \frac{(1 - \cos kl)}{\sin kl}, \text{ при } l \leq \frac{\lambda}{4}; \\ l_{\text{д}} = \frac{2}{k} (1 - \cos kl), \text{ при } \frac{\lambda}{2} > l > \frac{\lambda}{4}. \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Направленные свойства антенн часто характеризуют **коэффициентом направленного действия** (КНД), величиной, которая показывает, во сколько раз напряженность поля реальной антенны в направлении максимума излучения больше напряженности поля эквивалентной ненаправленной антенны при одинаковых мощностях излучения.

Обычно КНД СВ определяют в направлениях $\theta = \pm 90^\circ$ по формуле

$$D = \frac{2(1 - \cos kl)^2}{\int_0^\pi \frac{[\cos(kl \cos \theta) - \cos kl]^2}{\sin \theta} d\theta}. \quad (2.8)$$

Если требуется определить КНД в произвольном направлении θ' , то в формулу (2.8) в числителе вместо множителя $1 - \cos kl$ вводят значение $f(\theta')$.

Для инженерных расчетов КНД при длине плеч симметричного вибратора $l \leq 0,5\lambda$ можно пользоваться приближенной формулой

$$D \approx \frac{30k^2 l_{\text{д}}^2}{R_{\Sigma}}. \quad (2.9)$$

2.3.3. Моделирование характеристик симметричного и несимметричного вибраторов в САПР FEKO

Рассмотрим построение двух моделей симметричного вибратора: с использованием примитива линия *Line* (проволочного симметричного вибратора) и примитива цилиндр *Cylinder* (трубчатого симметричного вибратора) (рис. 2.7).

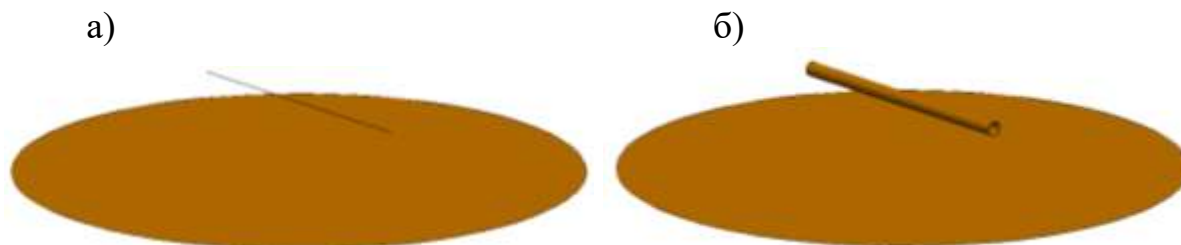


Рис. 2.7 — Модели симметричного вибратора с использованием примитива линия *Line* (а) и примитива цилиндр *Cylinder* (б)

2.3.3.1. Построение модели симметричного вибратора на основе примитива *Line*

Для построения симметричного вибратора с использованием примитива *Line* необходимо выполнить следующие действия:

- в разделе переменных создать переменную fr , которая будет соответствовать средней частоте рабочего диапазона, установить значение переменной соответственно заданию;

- в разделе переменных создать переменную lam , которая будет соответствовать рабочей длине волны, и ввести формулу для её расчёта исходя из известных значений средней частоты и скорости света;

- в разделе переменных создать переменную L , которая будет соответствовать полной длине вибратора, установить значение переменной соответственно заданию;

- в разделе переменных создать переменную R , которая будет соответствовать радиусу плеч вибратора, установить значение переменной соответственно заданию (R_{line});

- в разделе переменных создать переменную h , которая будет соответствовать расстоянию от симметричного вибратора до экрана, установить значение переменной равным $lam/4$;

- вызвать окно создания примитива *Line* (рис. 2.8);

- установить начальные и конечные координаты точек соответственно $(-L/2, 0, 0)$ и $(L/2, 0, 0)$ и нажать кнопку «Create»;

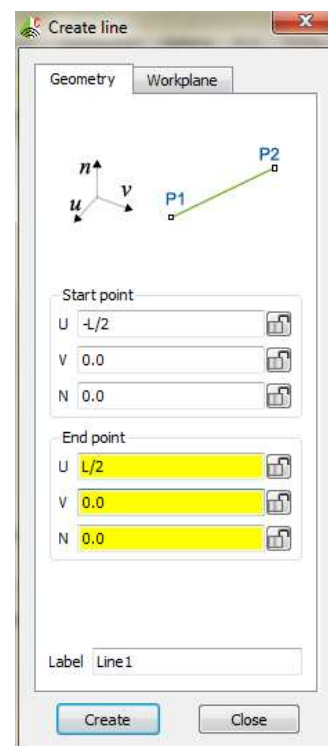


Рис. 2.8 — Окно создания примитива *Line*

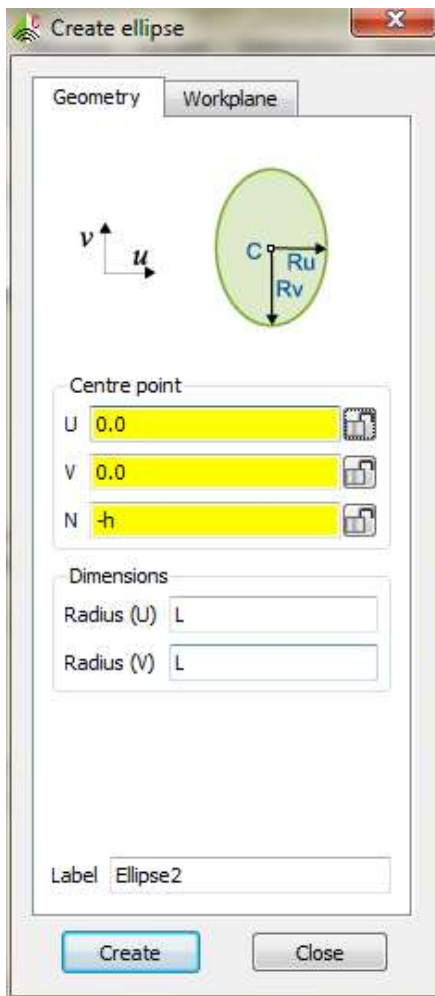


Рис. 2.9 — Окно создания примитива *Ellipse*

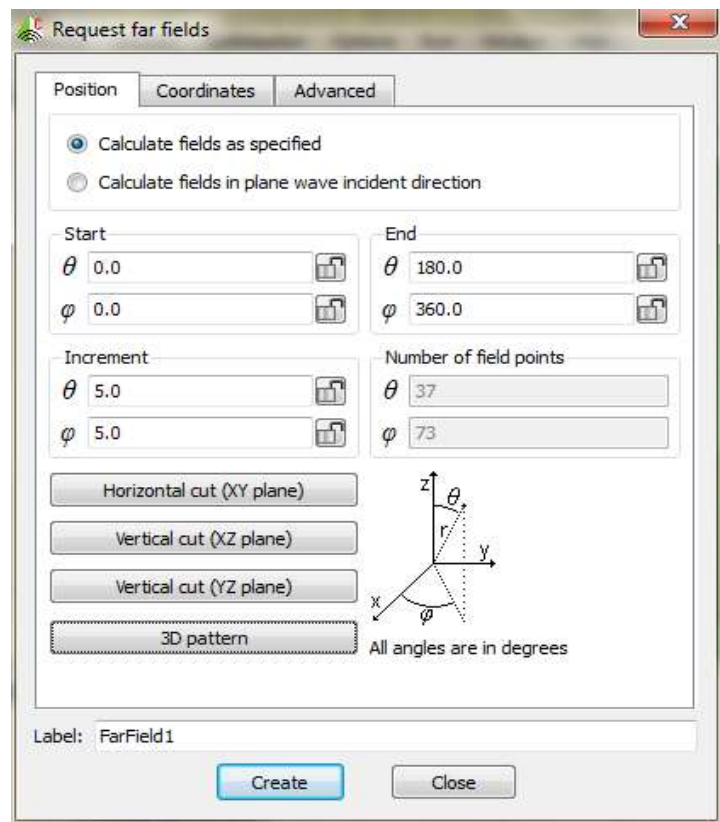


Рис. 2.10 — Окно задания на расчёт диаграммы направленности

- добавить порт *Wire port* на середину созданного проводника;
- добавить источник напряжения в созданный порт;
- создать экран с помощью примитива *Ellipse*, для этого вызвать окно создания примитива *Ellipse* (рис. 2.9), ввести величину радиуса L для каждой из осей и опустить экран на величину $-h$ по оси Z (в окне программы обозначена как N);
- в разделе *Solution* установить значение диапазона частот — используя переменную fr , указать диапазон частот от $0,7\ fr$ до $1,3\ fr$, количество точек расчёта — 20;
- создать сетку разбиения используя рекомендуемые программой размеры разбиения;
- задать для расчёта объёмную диаграмму направленности вызвав окно расчёта дальнего поля в разделе *Calculation* дерева модели (рис. 2.10) (необходимо выбрать *3D Pattern*).

2.3.3.2. Построение модели симметричного вибратора на основе примитива *Cylinder*

Для построения симметричного вибратора с использованием примитива *Cylinder* необходимо выполнить следующие действия:

- в разделе переменных создать переменную fr , которая будет соответствовать средней частоте рабочего диапазона, установить значение переменной соответственно заданию;

- в разделе переменных создать переменную lam , которая будет соответствовать рабочей длине волны, и ввести формулу для её расчёта исходя из известных значений средней частоты и скорости света;

- в разделе переменных создать переменную L , которая будет соответствовать полной длине вибратора, установить значение переменной соответственно заданию;

- в разделе переменных создать переменную Rc , которая будет соответствовать радиусу сечения плеча вибратора, установить значение переменной соответственно заданию (R_0);

- в разделе переменных создать переменную h , которая будет соответствовать расстоянию от симметричного вибратора до экрана, установить значение переменной $lam/4$;

- вызвать окно создания примитива *Cylinder* (рис. 2.11);

- установить значение длины цилиндра (значение H) равное L и радиуса цилиндра (значение R) равное Rc , в разделе *Definition methods* выбрать *Base centre, radius, height* и нажать кнопку «Create»;

- в дереве составляющих для цилиндра в разделе *Regions* установить в качестве заполняющего материала прямоугольника *Free space*;

- в дереве составляющих для цилиндра в разделе *Faces* выбрать и удалить торцевые стенки цилиндра;

- выбрать в разделе *Geometry* дерева модели созданный цилиндр, развернуть его на 90° относительно оси X командой *Rotate* (указать в разделе *Axis direction* $U=1, V=0, N=0$);

- выбрать в разделе *Geometry* дерева модели созданный цилиндр и разрезать его поперёк пополам с помощью команды *Split* (выбрать *Plane UN*) так, чтобы образовалось два плеча симметричного вибратора;

- выбрать в разделе *Geometry* дерева модели оба плеча вибратора и объединить их с помощью команды *Union parts*;

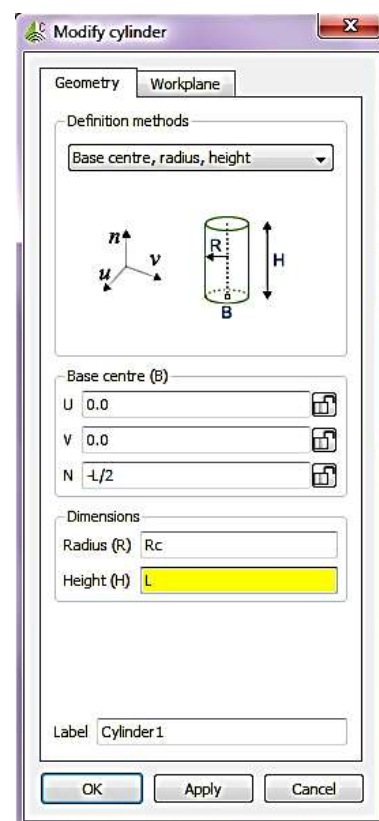


Рис. 2.11 — Окно создания примитива *Cylinder*

- добавить порт *Edge port* на границу между двумя плечами вибратора;
- добавить источник напряжения в созданный порт;
- создать экран с помощью примитива *Ellipse*, для этого вызвать окно создания примитива *Ellipse* (см. рис. 2.3), ввести величину радиуса L для каждой из осей и опустить экран на величину $-h$ по оси Z (в окне обозначена как N);
- в разделе *Solution* установить значение диапазона частот — используя переменную fr , указать диапазон частот от $0,7\ fr$ до $1,3\ fr$, количество точек расчёта — 20;
- создать сетку разбиения используя рекомендуемые программой размеры разбиения;
- задать для расчёта объёмную диаграмму направленности вызвав окно расчёта дальнего поля в разделе *Calculation* дерева модели (см. рис. 2.4) (необходимо выбрать *3D Pattern*).

2.3.3.3. Построение модели несимметричного вибратора

Несимметричный вибратор строится с использованием примитива *Cylinder* (рис. 2.12).



Рис. 2.12 — Модель несимметричного вибратора с использованием примитива *Cylinder*

Для построения несимметричного вибратора с использованием примитива *Cylinder* необходимо выполнить следующие действия:

- в разделе переменных создать переменную fr , которая будет соответствовать средней частоте рабочего диапазона, установить значение переменной соответственно заданию;
- в разделе переменных создать переменную lam , которая будет соответствовать рабочей длине волны, и ввести формулу для ее расчета исходя из известных значений средней частоты и скорости света;
- в разделе переменных создать переменную L , которая будет соответствовать полной длине несимметричного вибратора, установить значение переменной соответственно заданию;

— в разделе переменных создать переменную R_c , которая будет соответствовать радиусу вибратора, установить значение переменной соответственно заданию (R_0);

— в разделе переменных создать переменную d , которая будет соответствовать длине элемента сети несимметричного вибратора, установить значение переменной соответственно заданию;

— вызвать окно создания примитива *Cylinder* (см. рис. 2.11);

— установить значение длины цилиндра (значение H) равное $L/4$ и радиуса цилиндра (значение R) равное 5 мм, в разделе *Definition methods* выбрать *Base centre, radius, height* и нажать кнопку «Create»;

— в дереве составляющих для цилиндра в разделе *Regions* установить в качестве заполняющего материала прямоугольника *Free space*;

— в дереве составляющих для цилиндра в разделе *Faces* выбрать и удалить торцевые стенки цилиндра;

— создать экран с помощью примитива *Ellipse*, для этого вызвать окно создания примитива *Ellipse* (см. рис. 2.9), ввести величину радиуса $L/4$ для каждой из осей;

— выбрать в разделе *Geometry* дерева модели цилиндр и разрезать его поперёк на расстоянии 0,02 м от экрана с помощью команды *Split* (выбрать *Plane UV* и установить параметр N равным 0,02 м) так, чтобы образовалось две части цилиндра;

— выбрать в разделе *Geometry* дерева модели обе части цилиндра и объединить их с помощью команды *Union parts*;

— добавить порт *Edge port* на границу между двумя частями цилиндра;

— добавить источник напряжения в созданный порт;

— вызвать окно создания примитива *Rectangle* (рис. 2.13);

— установить значение ширины четырёхугольника (значение D) равное 10 мм и длины (значение W) равное d ;

— с помощью команды *Translate* (рис. 2.14) сместить созданный четырёхугольник вдоль оси N на величину $L/4$ и вдоль оси U на величину $0.5d$;

— скопировать четырёхугольник три раза;

— с помощью команды *Rotate* (рис. 2.15) развернуть второй, третий и четвёртый четырёхугольники вокруг оси Z (параметр N в разделе *Axis direction*) на угол 90° , 180° и 270° соответственно (задаётся значение *Angle*);

— выбрать в разделе *Geometry* дерева модели несимметричный вибратор, экран и четыре элемента сети и объединить их с помощью команды *Union parts*;

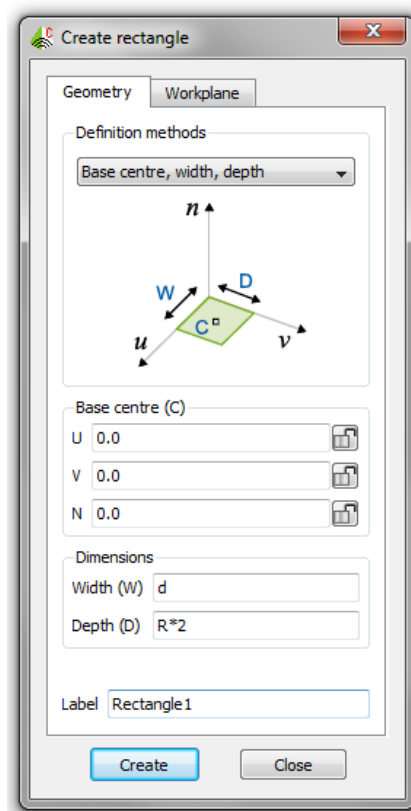


Рис. 2.13 — Окно создания примитива *Rectangle*

— в разделе *Solution* установить значение диапазона частот — используя переменную fr , указать диапазон частот от $0,7\ fr$ до $1,3\ fr$, количество точек расчёта — 20;

— создать сетку разбиения используя рекомендуемые программой размеры разбиения;

— задать для расчёта объёмную диаграмму направленности вызвав окно расчёта дальнего поля в разделе *Calculation* дерева модели (см. рис. 2.10) (необходимо выбрать *3D Pattern*).

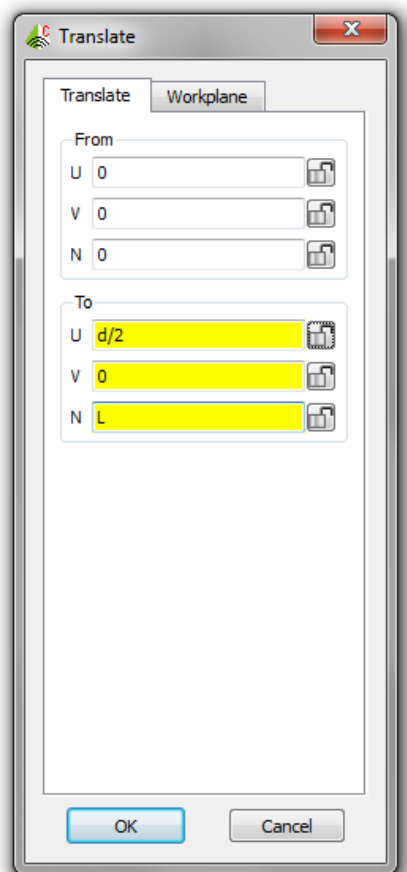


Рис. 2.14 — Окно выполнения команды *Translate*

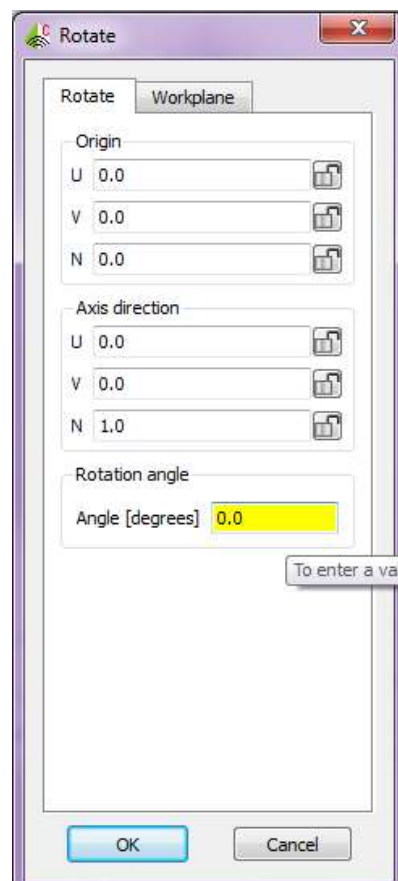


Рис. 2.15 — Окно выполнения команды *Rotate*

2.4. Порядок выполнения работы

2.4.1. Предварительные расчёты

Для симметричных вибраторов с длинами плеч $l_1 - l_3$ для заданной рабочей частоты f необходимо выполнить следующее:

а) рассчитать по формулам (2.2), (2.3) и построить **нормированные** амплитудные ДН антенны в E -плоскости, проанализировав при этом местоположение максимумов ДН;

б) рассчитать входное сопротивление симметричного вибратора (2.6); построить графики зависимостей $R_{вх}$ и $X_{вх}$ симметричного вибратора в

зависимости от длины его плеч в диапазоне значений от l_1 до l_3 с шагом $\Delta l = 0,05(l_3 - l_1)$;

в) определить КНД (2.8) симметричного вибратора.

2.4.2. Моделирование характеристик симметричного вибратора

2.4.2.1. Построить модель проволочного симметричного вибратора без экрана, радиус проводника симметричного вибратора — 0,5 мм. Для этой модели при разных длинах плеч (l_1, l_2, l_3):

а) построить для заданной частоты f объёмные диаграммы направленности;

б) построить для заданной частоты f диаграммы направленности в плоскостях XOZ и YOZ ;

в) построить в диапазоне частот $0,7f — 1,3f$ зависимости от частоты для:

— величины входного сопротивления (активная и реактивная составляющие строятся на одном графике) (Ом);

— величины коэффициента усиления (дБ).

2.4.2.2. Добавить в модель проволочного симметричного вибратора экран радиусом $1,5 \cdot l_3$. Для этой модели при разных длинах плеч (l_1, l_2, l_3):

а) построить для заданной частоты f объёмные диаграммы направленности;

б) построить для заданной частоты f диаграммы направленности в плоскостях XOZ и YOZ ;

в) построить в диапазоне частот $0,7f — 1,3f$ зависимости от частоты для:

— величины входного сопротивления (активная и реактивная составляющие строятся на одном графике) (Ом);

— величины коэффициента усиления (дБ).

2.4.2.3. Построить модель трубчатого симметричного вибратора без экрана, радиус проводника симметричного вибратора — 5 мм. Для этой модели при разных длинах плеч (l_1, l_2, l_3):

а) построить для заданной частоты f диаграммы направленности в E -плоскости;

б) построить в диапазоне частот $0,7f — 1,3f$ зависимости от частоты для:

— величины входного сопротивления (активная и реактивная составляющие строятся на одном графике) (Ом);

— величины коэффициента усиления (дБ).

2.4.2.4. Добавить в модель трубчатого симметричного вибратора радиусом $1,5 \cdot l_3$. Для этой модели при разных длинах плеч (l_1, l_2, l_3):

а) построить для заданной частоты f диаграммы направленности в E -плоскости;

б) построить в диапазоне частот $0,7f — 1,3f$ зависимости от частоты для:

— величины входного сопротивления (активная и реактивная составляющие строятся на одном графике) (Ом);

— величины коэффициента усиления (дБ).

2.4.2.4. Проанализировать полученные результаты моделирования. Сделать выводы.

2.4.3. Моделирование характеристик несимметричного вибратора

Построить модель несимметричного вибратора с длиной излучающего проводника l_1 . Далее следует выполнить следующее:

а) изменяя длину сети d в пределах от $0,5d$ до $2d$, найти в ходе моделирования в диапазоне частот $0,7f$ — $1,3f$ такое значение d , при котором входное сопротивление несимметричного вибратора будет на одной из частот (f_0) максимально близким к значению $Z_{вх}=50+j0$ Ом или будет характеризоваться наименьшим значением реактивной составляющей;

б) для средней частоты f_0 :

- построить объёмную диаграмму направленности;
- построить диаграммы направленности в плоскостях XOZ и YOZ ;
- определить значение коэффициента усиления (дБ).

2.5. Вопросы для защиты лабораторной работы

2.5.1. Дать определение диаграммы направленности антенны по полю.

2.5.2. Дать определение коэффициента направленного действия.

2.5.3. Дать определение сопротивления излучения симметричного вибратора.

2.5.4. Построить диаграмму направленности полуволнового симметричного вибратора в E - и H -плоскостях. Пояснить, как определяется ширина главного лепестка ДН антенны.

2.5.5. Дать определение действующей длине симметричного вибратора.

2.5.6. Какие требования предъявляются к полигону для измерения ДН антенны?

2.5.7. Как изменится диаграмма направленности симметричного вибратора, если длину его плеч увеличивать от $0,1\lambda$ до $0,5\lambda$?

2.5.8. Как изменится диаграмма направленности симметричного вибратора, если длину его плеч увеличивать от $0,5\lambda$ до λ ?

2.5.9. Как связаны между собой диаграммы направленности, выраженные по полю и по мощности?

2.5.10. При каких длинах плеч симметричного вибратора на них будут отсутствовать противофазные участки тока?

2.5.11. Как изменятся характеристики поля излучения симметричного вибратора, если на его плечах появятся противофазные участки тока?

2.5.12. Как изменяется КНД симметричного вибратора с увеличением длины его плеч?

2.5.13. При каких длинах плеч симметричный вибратор будет обладать чисто активным входным сопротивлением?

2.5.14. Опишите характеристики смоделированных симметричных вибраторов без экрана.

2.5.15. Опишите характеристики смоделированных симметричных вибраторов с экраном.

2.5.16. Пояснить, как влияет наличие экрана на характеристики ленточного симметричного вибратора.

2.5.17. Пояснить, как влияет наличие экрана на характеристики проволочного симметричного вибратора.

2.5.18. Сравнить характеристики ленточного и проволочного симметричных вибраторов без экрана.

2.5.19. Сравнить характеристики ленточного и проволочного симметричных вибраторов с экраном.

2.5.20. Как изменяется диаграмма направленности и коэффициент направленного действия симметричных вибраторов после установки экрана.

2.5.21. Поясните, что представляет собой конструкция несимметричного вибратора.

2.5.22. Как зависит диаграмма направленности несимметричного вибратора от положения точки питания?

2.5.23. Как зависит входное сопротивление несимметричного вибратора от положения точки питания?

2.5.24. Как зависит форма диаграммы направленности несимметричного вибратора от размеров экрана?

2.5.25. Как зависит входное сопротивление несимметричного вибратора от размеров экрана?

2.5.26. Поясните, при каком положении точки питания и размерах экрана получены лучшие характеристики антенны.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПИРАЛЬНЫХ АНТЕНН

3.1. Цель работы

Изучить принцип действия цилиндрических спиральных антенн (ЦСА). Освоить методику расчёта и моделирования характеристик ЦСА.

3.2. Исходные данные

Исходными данными для теоретических и экспериментальных исследований являются: номер исследуемого макета, диаметр витка спирали D , шаг намотки витков спирали d , угол намотки витков спирали α , количество витков n , радиус проводника спирали R , диапазон рабочих частот $f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$.

Исходные данные приведены в табл. 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 — Исходные данные индивидуальных заданий

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип антенны	ЦСА 1	ЦСА 2	ЦСА 1	ЦСА 2	ЦСА 1	ЦСА 2	ЦСА 1	ЦСА 2	ЦСА 1	ЦСА 2
R , мм	0,1	0,5	1	1,5	2	0,1	0,5	1	1,5	2
M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Рабочая частота f_0 , ГГц	2,3	2,4	2,3	2,4	2,5	2	2,1	2	2,1	2,15
Диапазон частот Δf , МГц	200	200	100	100	100	200	200	100	100	100

Таблица 3.2 — Геометрические параметры антенн

№ Антенны	Радиус витка, a , см	Шаг спирали, d , см	Угол намотки, α , град	Количество витков, n
ЦСА 1	2	4,3	19	9
ЦСА 2	2,25	3,6	14	7

3.3. Теоретический раздел

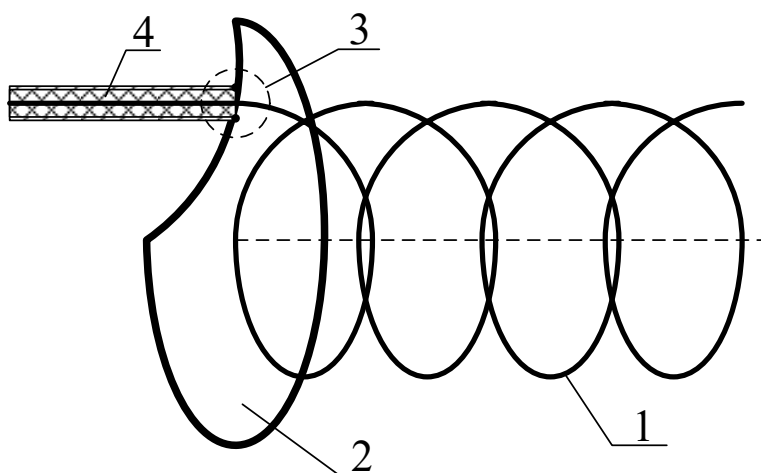
3.3.1. Методика расчёта характеристик цилиндрических спиральных антенн

3.3.1.1. Конструктивное исполнение и достоинства спиральных антенн

Исследуемая цилиндрическая спиральная антенна (рис. 3.1) представляет собой намотанную из провода спираль 1, один конец которой свободен, а другой соединяется в точке 3 с внутренним проводником коаксиальной линии 4, внешний проводник которой присоединяется к металлическому экрану 2, служащему для ослабления обратного излучения антенны.

Главными достоинствами спиральных антенн являются:

- возможность создания поля излучения с поляризацией от линейной до круговой;
- возможность подбирать требуемые характеристики излучения и входными характеристиками антенны за счёт изменения геометрических параметров спирали (габаритной окружности, угла наклона витков, количества витков, количества заходов спиральных проводников, режима возбуждения заходов (синфазного, квадратурного), возможности сжатия цилиндрической спирали до эллипса);
- простота и надёжность конструкции;



1 — спираль; 2 — экран; 3 — точка подключения к питающей линии; 4 — коаксиал

Рис. 3.1 — Модель цилиндрической спиральной антенны

- малые поперечные (продольные) габаритные размеры антенны;
- на основе цилиндрических, конических, полусферических спиральных антенн могут быть выполнены комбинированные структуры (сфероцилиндрические, цилиндроконические и т.п.);
- возможность без использования больших экранов обеспечить относительно низкий уровень бокового и заднего излучения (менее -15 — -10 дБ в рабочем диапазоне частот);
- возможность хорошего согласования с питающим фидером в широкой полосе частот;

3.3.1.2. Поляризационная структура поля излучения спиральных антенн

Спиральные антенны формируют поле излучения с эллиптической (или круговой) поляризацией. В отличие от поля линейно поляризованной волны (рис. 3.2, а), для которой вектор напряжённости электрического поля располагается в некоторой плоскости ZOY ($\vec{E}_Z$), в случае поля с вращающейся поляризацией при распространении электромагнитной волны вдоль оси OY вектор $\vec{E}$ вращается вокруг неё с некоторой угловой частотой ω (рис. 3.2, б). Если при наблюдении от входных зажимов спиральной антенны вектор $\vec{E}$ вращается по часовой стрелке, то поле считается с правосторонним вращением, иначе — с левосторонним.

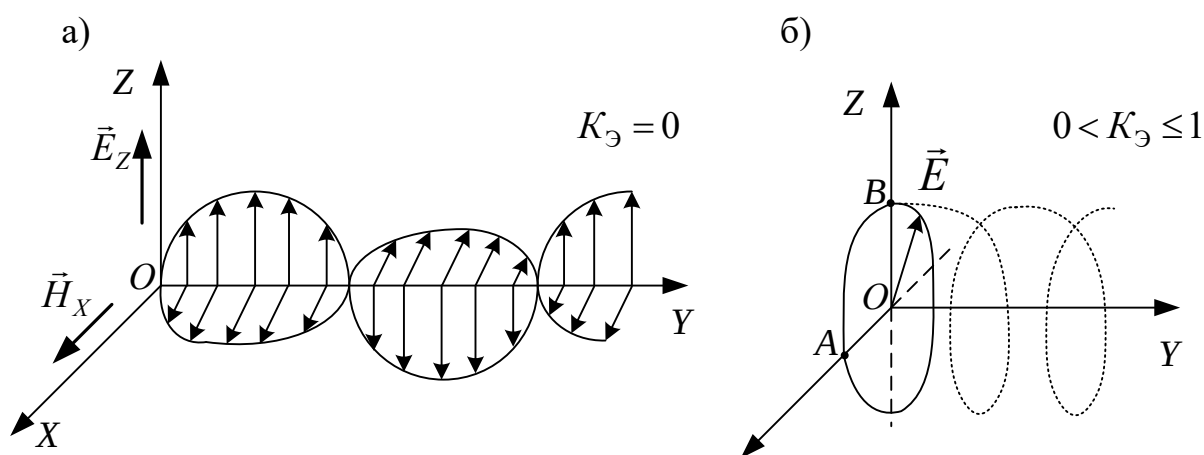


Рис. 3.2 — Поляризационная структура электромагнитного поля

Одной из основных характеристик поля излучения, описывающей его поляризационную структуру является коэффициент эллиптичности, определяемый как отношение малой OA и OB большой полуосей эллипса поляризации (см. рис. 3.2, б)

$$K_{\Theta} = \frac{OA}{OB},$$

который изменяется от 0 до 1.

Наиболее общим является случай эллиптически поляризованной волны, которую можно рассматривать как результат суперпозиции двух ортогональных линейно поляризованных волн одинаковой частоты и сдвинутых по фазе в направлении распространения волны на величину δ . Другой вариант представления волны с эллиптической поляризацией — это результат суперпозиции двух полей круговой поляризации одинаковой частоты, но противоположного направления вращения.

Таким образом, согласно первого подхода, поляризационная структура поля зависит от соотношения между двумя линейными составляющими $\vec{E}_X$ и $\vec{E}_Z$ (см. рис. 3.2) волны, распространяющейся вдоль оси OY .

Линейно поляризованные составляющие поля $\vec{E}_X$ и $\vec{E}_Z$ описываются выражениями:

$$\begin{aligned} E_X &= E_{mx} \cos \omega t ; \\ E_Z &= E_{mz} \cos(\omega t - \delta), \end{aligned}$$

где δ — сдвиг фаз между $\vec{E}_X$ и $\vec{E}_Z$, E_{mx}, E_{mz} — амплитуды напряжённости поля линейно поляризованных волн, на которые раскладывается вектор $\vec{E}$ (рис. 3.3).

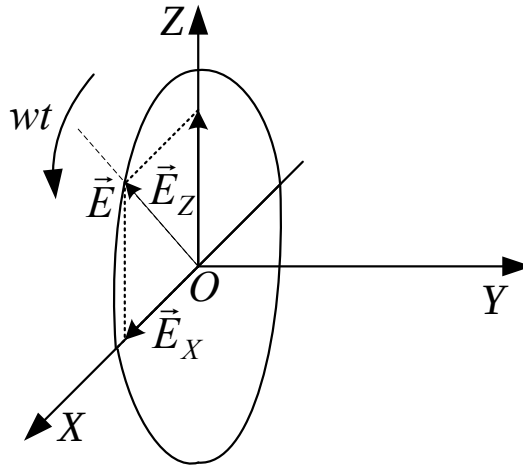


Рис. 3.3 — Формирование эллиптически поляризованной волны

Согласно принятой модели поле эллиптической поляризации можно описать с помощью уравнения эллипса

$$\frac{E_X^2}{E_{mx}^2} - 2 \frac{E_X E_Z}{E_{mx} E_{mz}} \cos \delta + \frac{E_Z^2}{E_{mz}^2} = \sin^2 \delta. \quad (3.1)$$

В случае, когда $\delta = 0$, поле излучения антенны имеет чисто линейную поляризацию, которое согласно (3.1) определяется следующим соотношением

$$E_X = \frac{E_{mx}}{E_{mz}} E_Z.$$

Если $\delta = \frac{(2n+1)\pi}{2}$ ($n=0, 1, 2, 3, \dots$), то поле приобретает эллиптическую поляризацию

$$\frac{E_X^2}{E_{mx}^2} + \frac{E_Z^2}{E_{mz}^2} = 1,$$

при этом оси эллипса OA и OB (см. рис. 3.2,б) совпадают с координатными осями OX и OZ , как показано на рис. 3.3.

В том случае, когда амплитуды $E_{mx} = E_{mz} = E_m$ поле излучения антенны будет иметь круговую поляризацию.

В случае, при котором сдвиг фаз $0 < \delta < \frac{\pi}{2}$, оси эллипса OA и OB , изображённого на рис. 3.2,б, не будут совпадать с координатными осями.

3.3.1.3. Расчёт характеристик поля излучения однозаходной цилиндрической спиральной антенны

Рассмотрим характеристики поля излучения однозаходной цилиндрической спиральной антенны, упрощённая модель которой показана на рис. 3.4, где введены обозначения: $2a$ — диаметр цилиндра, на котором расположен спиральный проводник, a — радиус спирали; d — шаг намотки витков спирали; n — число витков; $L = \sqrt{(2\pi a)^2 + d^2}$ (рис. 3.4, б) — длина витка между точками «1» и «2» на рис. 3.4, а; $\alpha = \arcsin \frac{d}{L}$ — угол наклона витков относительно плоскости XOZ .

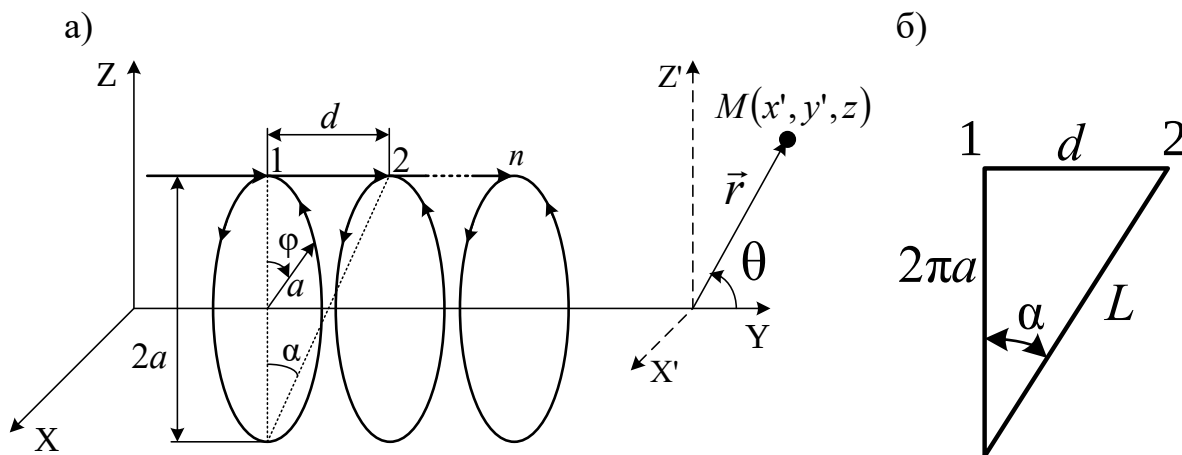


Рис. 3.4 — Модель представления однозаходной цилиндрической спиральной антенны: при ортогональном расположении витков спирали относительно плоскости XY (а); к определению угла наклона витков спирали (б)

Поляризация структура поля антенны и режим излучения зависят от соотношения геометрических параметров a , d и длины волны λ . На практике используются спиральные антенны для двух режимов работы (рис. 3.5):

- режим ненаправленного излучения («малых рамок»);
- режим осевого излучения.

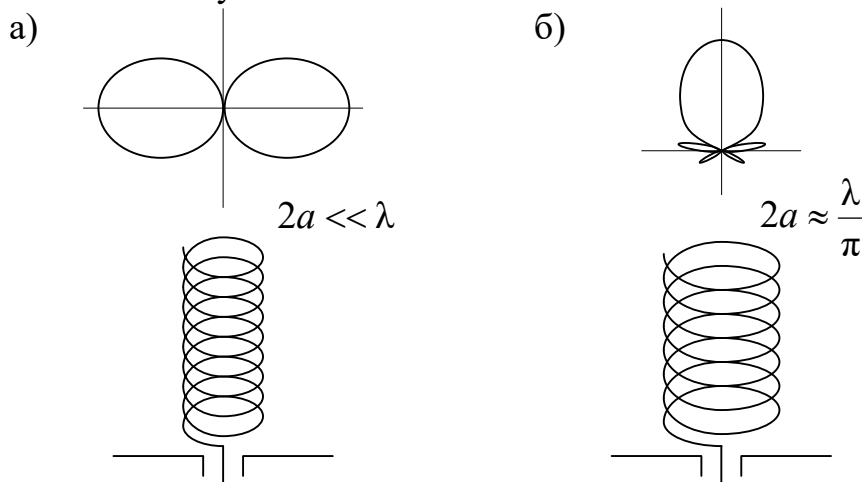


Рис. 3.5 — Основные режимы излучения цилиндрической спиральной антенны: а) режим малых рамок; б) режим осевого излучения

В случае режима ненаправленного излучения длина витка спирали меньше длины волны λ . Антенну можно представить в виде системы из аксиальных кольцевых рамок и диполей с длиной, равной $d \ll \lambda$. ЦСА работает в режиме малых рамок, поэтому суммарное поле, создаваемое антенной, имеет максимальное значение при $\theta = \frac{\pi}{2}$ (см. рис. 3.5, а). При малых по сравнению с λ поперечных размерах антенны количество витков n не влияет на форму диаграммы направленности (ДН) и поляризационную структуру поля. Поэтому достаточно рассмотреть поле двух элементов: диполя и одного витка спирали. Так для диполя можем записать соотношение [3]

$$E_d = -j \frac{30 I_l k d}{r} \sin \theta e^{-jkr} = -j \frac{60 I_l \pi d}{r \lambda} \sin \theta e^{-jkr}, \quad (3.2)$$

где I_l — амплитуда тока на входных зажимах диполя; r — расстояние до точки наблюдения; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Для рамочного излучателя действующая длина рамки

$$l_{др} = kS,$$

где S — площадь рамки. Следовательно, из (3.2) получим соотношение для поля рамки E_p в виде

$$E_p = -j \frac{120 I_d \pi^2 S}{\lambda^2 r} \sin \theta e^{-jkr}, \quad (3.3)$$

где I_d — ток на действующей длине рамки.

Результирующее поле состоит из двух ортогональных компонент $\vec{E}_d$ (поле диполя длиной d) и $\vec{E}_p$ (поле рамки с периметром $2\pi a$). В том случае, если компоненты поля будут сдвинуты по фазе на $\frac{\pi}{2}$, а токи на рамке и диполе одинаковой амплитуды ($I_d = I_l$), то коэффициент эллиптичности равен

$$K_{\Theta} = \frac{|E_d|}{|E_p|} = \frac{d\lambda}{2\pi S} = \frac{d}{l_{др}}. \quad (3.4)$$

Так из (3.4) следует, что если бы выполнялось условие $d = l_{др}$, то поле излучения в плоскости XOZ имело бы круговую поляризацию, однако на практике шаг спирали d оказывается намного меньше действующей длины рамки ($d \ll l_{др}$), поэтому поле характеризуется как линейно поляризованное.

Рассмотрим режим осевого излучения (см. рис. 3.5, б), при котором длина витка спирали выбирается близкой к длине волны. При этом происходит синфазное или близкое к нему сложение полей витков в осевом направлении. ДН в этом случае приближается к ДН линейки излучателей, возбуждаемых в режиме бегущей волны при выполнении условия $L \approx \lambda$. Таким образом, в режиме бегущей волны, который совпадает с режимом осевого излучения, создаётся поле круговой поляризации.

В данном случае результирующая амплитудная ДН $F(\theta)$ будет определяться как для решётки излучателей, возбуждённых в режиме бегущей волны

$$F(\theta) = f_{\text{эл}}(\theta) f_{\text{реш}}(\theta), \quad (3.5)$$

где $f_{\text{реш}}(\theta)$ — множитель решётки, состоящей из n рамочных излучателей (см. рис. 3.4, а); $f_{\text{эл}}(\theta)$ — ДН витка спирали, которую можно определять соотношением [3]

$$f_{\text{эл}}(\theta) = \cos \theta. \quad (3.6)$$

Для определения $f_{\text{реш}}(\theta)$ необходимо проанализировать разность фаз токов между витками «1» и «2» $\Delta\psi_{1-2}$ (см. рис. 3.4, а). Для $\Delta\psi_{1-2}$ можем записать

$$\Delta\psi_{1-2} = k_{\phi} L,$$

где $k_{\phi} = \frac{2\pi}{\lambda_{\phi}} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{c}{v_{\phi}}$; v_{ϕ} — фазовая скорость волны в витке; c — скорость света в свободном пространстве.

С учётом этого

$$\Delta\psi_{1-2} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{c}{v_{\phi}} L. \quad (3.7)$$

Для того чтобы излучение от всех n витков в осевом направлении складывалось, набег фазы на витке должен составлять 2π , поэтому должно выполняться условие

$$\Delta\psi_{1-2} = \frac{2\pi}{\lambda} (l + d) = 2\pi + kd, \quad (3.8)$$

где l — периметр рамки, который должен быть близок к длине волны, kd — набег фазы на диполе (см. рис. 3.4, а).

Сравнивая (3.7) и (3.8) получим

$$\frac{v_{\phi}}{c} = \frac{L}{l + d}.$$

Зная, что $\Delta\psi_{1-2} = k(l + d)$ для $f_{\text{реш}}(\theta)$ можем записать [3]

$$f_{\text{реш}}(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{n}{2} (kd \cos \theta - k(l + d)) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta - k(l + d)) \right]}. \quad (3.9)$$

Исследуемая антенна располагается над экраном, поэтому можно воспользоваться методом зеркальных изображений. В соответствии с этим методом при определении поля, создаваемого антенной, полагают, что она размещается над идеально проводящей поверхностью с размерами много больше длины волны. Наводимые на поверхности плоского экрана вторичные токи исключаются из рассмотрения введением фиктивного излучателя, являющегося зеркальным изображением действительной антенны. Зеркальный

излучатель располагается на продолжении нормали, соединяющей ось симметрии реальной антенны с проводящим экраном. В любой точке полупространства (где расположена исследуемая антенна) зеркальный излучатель создаёт точно такое же поле, как и реальная антенна.

С учётом сказанного при расчёте ДН антенны необходимо учитывать влияние экрана, воспользовавшись множителем экрана

$$f_{\text{экp}}(\theta) = \cos(kd \sin \theta). \quad (3.10)$$

Тогда результирующая амплитудная ДН антенны по полю с учетом (3.5), (3.6) и (3.9), (3.10) будет определяться выражением:

$$F(\theta) = f_{\text{эл}}(\theta) f_{\text{реш}}(\theta) f_{\text{экp}}(\theta). \quad (3.11)$$

Пример расчёта нормированных ДН ЦСА в диапазоне частот показан на рис. 3.6.

Для приближенного расчёта характеристик цилиндрических спиральных антенн можно воспользоваться эмпирическими формулами:

— ширина ДН по уровню половинной мощности

$$\Delta\theta \approx \frac{52^\circ}{\frac{L}{\lambda} \sqrt{\frac{nd}{\lambda}}}, \text{ град}; \quad (3.12)$$

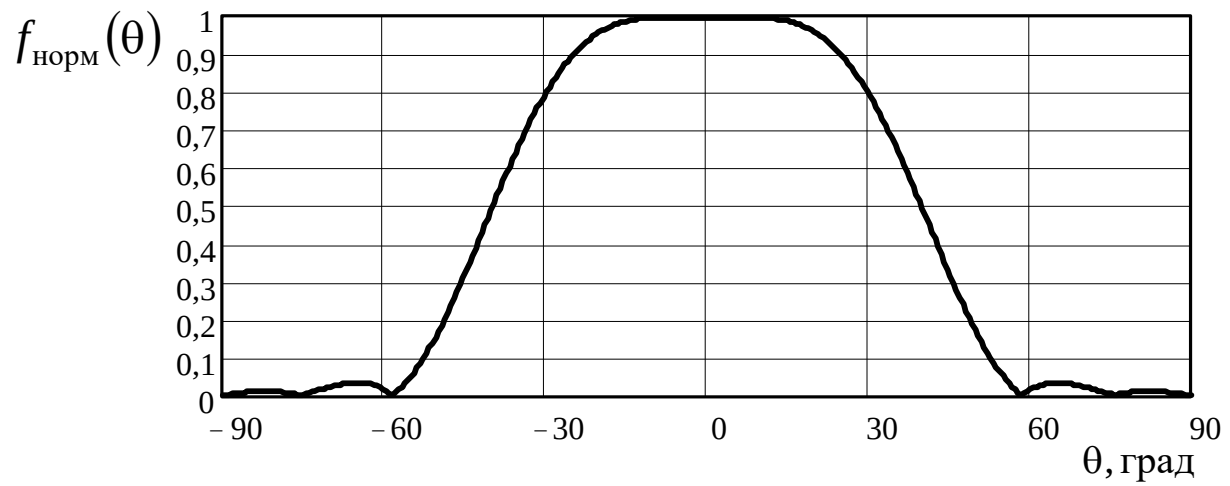
— коэффициент направленного действия (КНД) в направлении оси спирали

$$D \approx 10 \lg \left(15 \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2 n \frac{d}{\lambda} \right), \text{ дБ}; \quad (3.13)$$

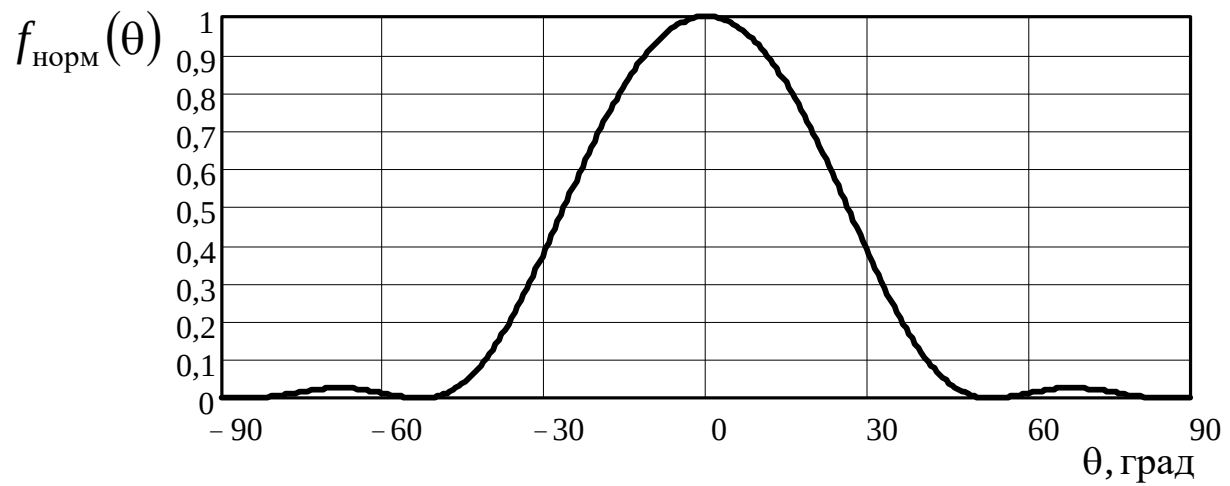
— входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} \approx 140 \frac{L}{\lambda}, \text{ Ом}. \quad (3.14)$$

а)



б)



в)

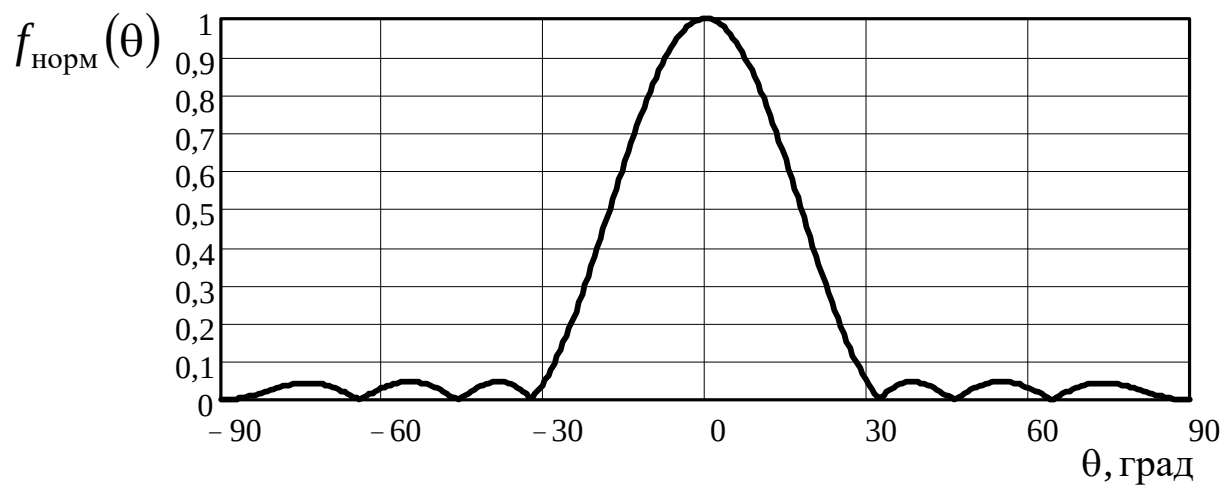


Рис. 3.6 — Результаты расчётов диаграмм направленности ЦСА на частотах $f_{\min}$ (а); f_0 (б); $f_{\max}$ (в)

3.3.2. Построение модели четырёхзаходной спиральной антенны в САПР FEKO

Модель четырёхзаходной спиральной антенны строится в САПР FEKO с использованием примитива спираль *Helix* (рис. 3.7).

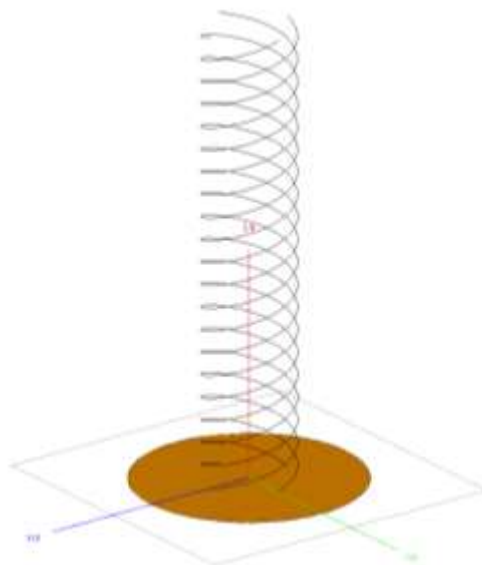


Рис. 3.7 — Модель четырёхзаходной спиральной антенны с использованием примитива спираль *Helix*

Для построения четырёхзаходной спиральной антенны с использованием примитива *Helix* необходимо выполнить следующие действия:

- в разделе переменных создать переменную fr , которая будет соответствовать средней частоте рабочего диапазона, установить значение переменной соответственно заданию;

- в разделе переменных создать переменную lam , которая будет соответствовать рабочей длине волны, и ввести формулу для её расчёта исходя из известных значений средней частоты и скорости света;

- в разделе переменных создать переменную a , которая будет соответствовать радиусу спирального излучателя, ввести формулу для расчёта переменной a исходя из того, что периметр одного витка спирали должен быть равен переменной lam ;

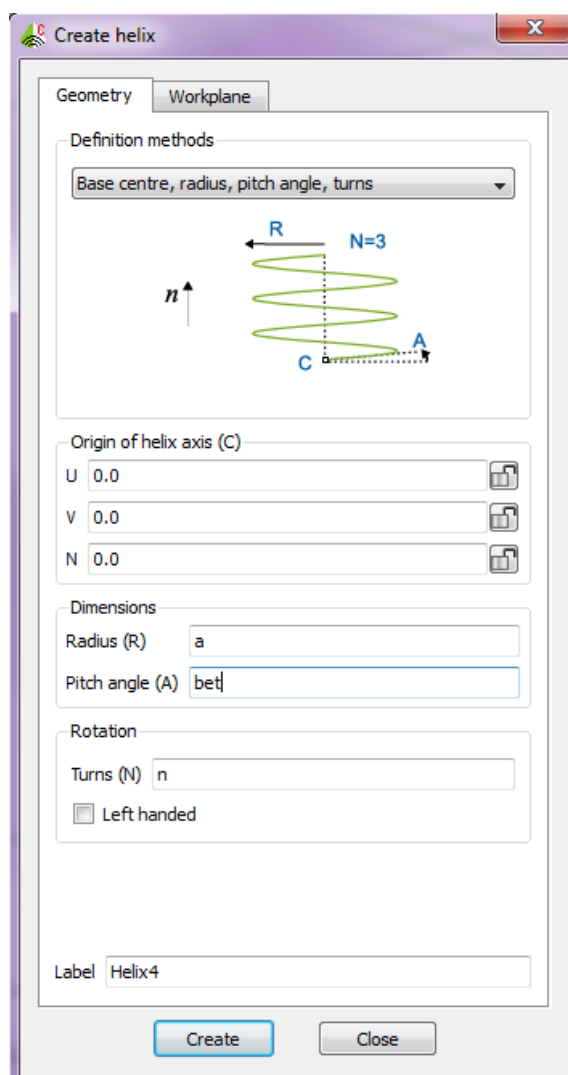
- в разделе переменных создать переменную bet , которая будет соответствовать углу подъёма витков спирали, установить значение переменной соответственно заданию;

- в разделе переменных создать переменную n , которая будет соответствовать числу витков спирали, установить значение переменной соответственно заданию;

- в разделе переменных создать переменную R , которая будет соответствовать радиусу проводника спирального излучателя, установить значение переменной соответственно заданию;

- вызвать окно создания примитива *Helix* (рис. 3.8);

- в разделе *Definition methods* выбрать *Base centre, radius, pitch angle, turns*;

Рис. 3.8 — Окно создания примитива *Helix*

— в окне создания примитива *Helix* ввести величины радиуса спирали a , угла подъёма витков bet и число витков n ;

— выбрать в разделе *Geometry* дерева модели созданную спираль и скопировать её четыре раза;

— развернуть первую копию спирали на 90° относительно оси Z командой *Rotate* (см. рис. 2.15), для этого в разделе *Axis direction* «1» должна стоять только в графе N , значение *Angle* устанавливается 90 ;

— с помощью команды *Rotate* (см. рис. 2.15) развернуть вторую копию спирали на 180° и третью копию на 270° ;

— создать экран с помощью примитива *Ellipse*, для этого вызвать окно создания примитива *Ellipse* (см. рис. 2.9), ввести величину радиуса $1,5a$ для каждой из осей;

— выбрать в разделе *Geometry* дерева модели четыре спирали и экран и объединить их с помощью команды *Union parts*;

— добавить порт *Wire port* на каждый из четырёх спиральных излучателей, разместив их у места соединения экрана с излучателями, при этом первый порт должен быть установлен на исходную спираль, второй порт — на спираль,

развёрнутую на 90° , третий — на спираль, развёрнутую на 180° , четвёртый — на спираль, развёрнутую на 270° ;

— последовательно добавить по одному источнику напряжения в каждый из созданных портов с напряжением 1 В, при этом фаза напряжения в первом порту равна 0° , во втором — 90° , в третьем — 180° , в четвёртом — 270° ;

— в разделе *Solution* установить значение диапазона частот — используя переменную fr , указать диапазон частот от $0,7\ fr$ до $1,3\ fr$, количество точек расчёта — 20;

— создать сетку разбиения используя рекомендуемые программой размеры разбиения, а в качестве радиуса проводника задать переменную R ;

— задать для расчёта объёмную диаграмму направленности вызвав окно расчета дальнего поля в разделе *Calculation* дерева модели (см. рис. 2.10) (необходимо выбрать *3D Pattern*).

3.4. Порядок выполнения работы

3.4.1. Предварительные расчёты

а) Выбрать тип исследуемой антенны и определить центральную частоту и граничные частоты рабочего диапазона $f = f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$ по табл. 3.1. Геометрические параметры антенны приведены в табл. 3.2.

б) По формулам (3.13), (3.14) на центральной частоте f_0 и на крайних частотах диапазона $f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$ для исследуемой антенны с заданными значениями a , d и n рассчитать КНД и входное сопротивление.

в) Рассчитать ДН исследуемой антенны на частоте $f = f_0$, используя формулы (3.6), (3.9), (3.10), (3.11).

г) Рассчитать ДН исследуемой антенны на границах диапазона частот $f = f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$. Расчеты выполнить аналогично п. в).

д) Осуществить нормировку ДН ЦСА. Построить ДН антенны в декартовой системе координат.

е) По рассчитанным ДН определить ширину главного лепестка $2\Delta\theta_{0,707}$ и уровень бокового излучения.

ж) Результаты расчетов в п. б) и п. е) представить в виде таблиц 3.3.

Таблица 3.3. — Результаты расчетов характеристик ЦСА

	$f_0 - \frac{\Delta f}{2}$	f_0	$f_0 + \frac{\Delta f}{2}$
D , дБ			
$R_{вх}$, Ом			
$2\Delta\theta_{0,707}$, град			
УБЛ			

3.4.2. Моделирование характеристик четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо выполнить следующие действия:

- построить модель четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны с исходными параметрами и «базовым» способом возбуждения отдельных спиральных заходов, описанным в пп. 3.3.2;

- построить объёмную диаграмму направленности четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны с исходными параметрами;

- построить диаграмму направленности в плоскости XOZ и YOZ четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны с исходными параметрами;

- построить зависимость осевого коэффициента эллиптичности четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны с исходными параметрами от частоты;

- построить зависимость величины входного сопротивления каждого захода четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны с исходными параметрами от частоты;

- поменять фазировку заходов на «обратную», то есть поменять для второго захода начальную фазу со значения 90° на 270° , а для четвёртого захода с 270° на 90° ;

- построить объёмную диаграмму направленности четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны с обратной фазировкой;

- построить диаграмму направленности в плоскости XOZ и YOZ четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны с обратной фазировкой;

- построить зависимость осевого коэффициента эллиптичности четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны с обратной фазировкой от частоты;

- построить зависимость величины входного сопротивления каждого захода четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны с обратной фазировкой от частоты;

- сравнить полученные результаты моделирования.

3.5. Контрольные вопросы и задания

3.5.1. Вопросы для защиты лабораторной работы

а) Как выбирается вспомогательная антенна и как выбирается расстояние на измерительном полигоне между антеннами?

б) Опишите структуру поля с эллиптической или круговой поляризацией.

в) Какие существуют режимы излучения спиральных антенн? Для каких целей могут использоваться антенны, работающие в этих режимах?

г) Как количество витков спирального излучателя влияет на диаграмму направленности антенны?

д) Как влияет периметр одного витка цилиндрической спиральной антенны на её диаграмму направленности?

е) Поясните, для каких практических задач может быть использована цилиндрическая спиральная антенна?

ж) Поясните, от чего зависит значение диапазона рабочих частот спиральной антенны и чем он ограничен?

з) Как можно повысить направленность излучения ЦСА?

и) Опишите модель многозаходной цилиндрической спиральной антенны.

к) Как осуществляется возбуждение излучателей в четырёхзаходной ЦСА?

л) Сравнить характеристики диаграмм направленности исследованной ЦСА при двух различных способах возбуждения спиральных заходов: базовом и обратном.

м) Сравнить коэффициент эллиптичности исследованной ЦСА при двух различных способах возбуждения спиральных заходов: базовом и обратном.

н) Сравнить входные характеристики исследованной ЦСА при двух различных способах возбуждения спиральных излучателей: базовом и обратном.

о) Сравнить входные характеристики отдельных спиральных заходов при базовом способе их возбуждения.

п) Сравнить входные характеристики отдельных спиральных заходов при обратном способе их возбуждения.

3.5.2. Задачи для защиты лабораторной работы

а) Определить параметры диаграммы направленности ЦСА, работающей в режиме осевого излучения поля с круговой поляризацией, если длина одного витка $L=20$ см, число витков $n=8$ и шаг намотки $d=2$ см.

б) Ширина главного луча диаграммы направленности ЦСА по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}=38^\circ$. Определить рабочую частоту антенны, если радиус намотки антенны $a=14$ см, шаг намотки $d=10$ см, число витков $n=10$. Определить КНД антенны на данной частоте.

в) Определить, при каком числе витков ЦСА, имеющая длину одного витка $L=19$ см и шаг намотки $d=3$ см, обеспечивает на волне $\lambda=18$ см ширину главного луча диаграммы направленности по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}=42^\circ$.

г) ЦСА подключена к передатчику, работающему на частоте $f=3,3$ ГГц. Антенна характеризуется следующими геометрическими параметрами: полная длина спиральной антенны $l_a=13$ см, радиус намотки спирали $a=1,5$ см, количество витков $n=9$. Определить характеристики диаграммы направленности: ширину главного лепестка, уровень бокового излучения.

д) ЦСА характеризуется геометрическими размерами: радиус намотки спирали $a=10$ см, количество витков $n=8$, шаг намотки $d=8$ см. Определить, на какой центральной частоте работает данная антенна и как измениться ширина ее ДН, если количество витков увеличить или уменьшить на 3 витка.

е) Определить входное сопротивление и КНД спиральной антенны, имеющей ширину луча по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5} = 42^\circ$ при относительной длине витка $\frac{L}{\lambda} = 1,1$.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН

4.1. Цель работы

Изучить принципы построения волноводно-щелевых антенн. Выполнить теоретические расчёты характеристик излучения в соответствии с индивидуальным заданием. Провести моделирование характеристик волноводно-щелевых антенн.

4.2. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются (табл. 4.1):

— для **резонансной** волноводно-щелевой антенны: поперечное сечение прямоугольного волновода $0,023 \times 0,01$ м; расстояние между центрами соседних щелей $d = 0,02$ м; длина щелевых излучателей $l = 0,015$ м; два варианта количества щелей в решетке — n_1, n_2 ; рабочая частота $f_1 = 9,5$ ГГц;

— для **нерезонансной** волноводно-щелевой антенны: поперечное сечение прямоугольного волновода $0,023 \times 0,01$ м; длина щелевых излучателей $l = 0,015$ м; расстояние между центрами соседних щелей $d = 0,02$ м; количество щелей в решетке $n_3 = 25$; рабочая частота f_2 ; верхняя $f_3 = f_2 + \Delta f$ и нижняя $f_4 = f_2 - \Delta f$ частоты диапазона при $\Delta f = 0,5$ ГГц.

Таблица 4.1 — Исходные данные для выполнения теоретических и экспериментальных исследований

Резонансная волноводно-щелевая антенна											
M_3		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кол-во щелей	n_1	6	4	7	8	9	6	5	7	9	8
	n_2	12	10	14	18	16	11	15	17	16	13
Нерезонансная волноводно-щелевая антенна											
N_3		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_2 , ГГц		9,5	9	8,5	9,5	9	8,5	9,5	9	8,5	9,5

Примечание: M_3 и N_3 — предпоследняя и последняя цифры зачетный книжки, соответственно.

4.3. Теоретический раздел

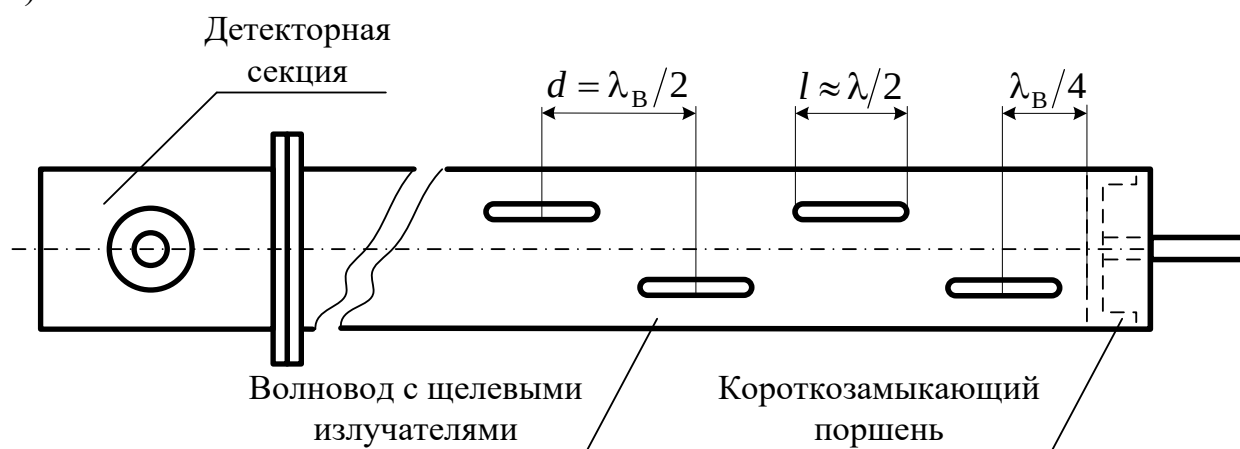
4.3.1. Методика расчета характеристик волноводно-щелевых антенн

4.3.1.1. Особенности построения волноводно-щелевых антенн

Обобщенные модели резонансной (РВЩА) и нерезонансной (НВЩА) волноводно-щелевых антенн показаны на рис. 4.1.

Задача об излучении щелевой антенны характеризуется рядом особенностей, отличающих ее от аналогичных задач для других типов СВЧ антенн, где амплитудно-фазовые распределения поля в апертуре мы получали, используя электромагнитное поле внутри антенны. Сложность состоит в том, что закон изменения амплитуд и фаз поля в щели не зависит от внутреннего поля в волноводе, на стенке которого вырезана щель.

а)



б)

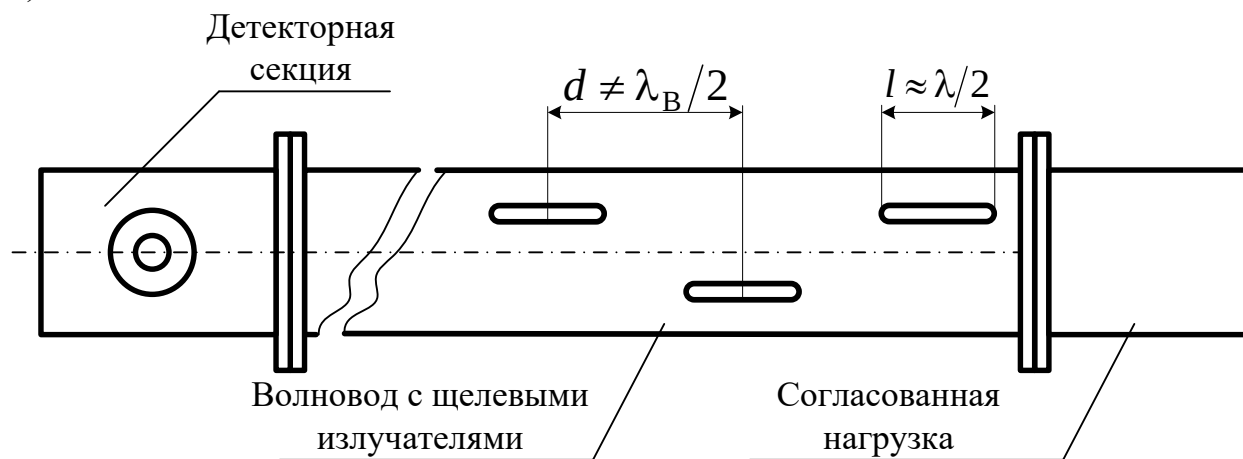


Рис. 4.1 — Модели резонансной (а) и нерезонансной (б) волноводно-щелевых антенн

У резонансных антенн щели располагаются вдоль волновода на расстояниях $\lambda_B/2$ и вследствие этого возбуждаются синфазно стоячей волной поля в волноводе (рис. 4.1, а), создающей соответственное распределение тока на широкой стенке волновода. Режим стоячей волны обеспечивается

установкой на конце волновода перестраиваемого короткозамыкающего поршня.

У нерезонансных антенн щели располагаются вдоль волновода на расстояниях отличных от $\lambda_v/2$ и вследствие этого возбуждаются несинфазно бегущей волной поля в волноводе (рис. 4.1, б), создающей соответственное распределение тока на широкой стенке волновода. Режим бегущей волны обеспечивается согласованием антенны с конечной нагрузкой, для чего в конце волновода ставится поглотитель. Поэтому КПД нерезонансных антенн меньше, чем у резонансных. Нерезонансные антенны являются более широкодиапазонными, чем резонансные. Это положительное качество нерезонансных щелевых антенн обусловлено хорошим согласованием в полосе частот.

4.3.1.2. Методика расчета характеристик волноводно-щелевых антенн

К исследованию щелевых антенн может быть применен принцип поляризационной двойственности Бабинэ, который значительно облегчает получение требуемых расчетных формул. Этот принцип является вполне точным для идеальной щелевой антенны, т.е. для щели на неограниченной идеально-проводящей бесконечно тонкой плоскости. Однако этим методом можно пользоваться и в большинстве практических случаев.

Содержание принципа двойственности сводится к следующему. Если к идеальной щелевой антенне приложить от какого-либо источника электродвижущую силу частоты f , то векторы электромагнитного поля $\vec{E}_1$ и $\vec{H}_1$ в щели и в окружающем щель пространстве будут иметь такое же направление и являться такими же функциями пространственных координат, какое направление и какими функциями являются соответственно векторы $\vec{E}_2$ и $\vec{H}_2$ ($\vec{E}_1 = \vec{H}_2$, $\vec{H}_1 = -\vec{E}_2$) электромагнитного поля вибратора в виде идеально проводящей бесконечно тонкой пластинки, находящейся в свободном пространстве и имеющей такую же форму и размеры, как щель, при приложении к пластинке электродвижущей силы той же частоты в аналогичных точках.

Идентичность электромагнитных полей идеальной щелевой антенны и пластинчатого вибратора относится не только к дальней зоне излучения, но также к зоне непосредственно примыкающей к щели и соответственно вибратору, как и к другим зонам. А поскольку электрический и магнитный векторы связаны с током и напряжением идентичными интегральными соотношениями, из этого следует, что определение напряжения вдоль щели такое же, как распределение тока по вибратору (близкое к синусоидальному). И распределение тока по кромке щели такое же, как распределение напряжения по вибратору (близко к косинусоидальному). Отсюда следует, что входная проводимость щелевой антенны с точностью до постоянного множителя определяется входным сопротивлением $Z_{\text{ВХ.СВ}}$ симметричного вибратора

$$Y_{\text{ВХ.щ.}} = \frac{Z_{\text{ВХ.СВ}}}{(60\pi)^2} = \frac{Z_{\Sigma\text{СВ}} - j\rho_{\text{СВ}}\text{ctg}(kl)}{(60\pi)^2}, \quad (4.1)$$

где $Z_{\Sigma CB}$ — сопротивление излучения симметричного вибратора с длиной плеч l ;

$$\rho_{CB} = 120 \left(\ln \left(\frac{1}{r_0} \right) - 1 \right) \quad \text{— волновое сопротивление эквивалентного}$$

вибратора с радиусом проводников $r_0 = \frac{d_0}{4}$;

$$d_0 \text{ — ширина щели; } k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Из (4.1) следует, что при длине щели $l_{\text{щели}} = 2l = \frac{\lambda}{2}$ (полуволновая щель), она является резонансной, однако для получения резонанса реальную щель приходится «укорачивать» аналогично укорочению вибратора. Величина укорочения Δl может быть определена по формуле

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,225}{\ln \left(\frac{4l}{d_0} \right)}. \quad (4.2)$$

Для того чтобы щель максимально излучала, она должна располагаться перпендикулярно линиям тока на поверхности волновода, либо, что тоже самое, — параллельно магнитным силовым линиям (последнее более наглядно).

Полагая, что взаимное влияние щелей пренебрежимо мало, а размеры и интенсивность их возбуждения одинакова, можно рассчитать диаграмму направленности волноводно-щелевой антенны (ВЩА) в H -плоскости по обобщенной формуле

$$F(\theta) = 20 \lg \left\{ F_1(\theta) \frac{\sin(0,5N(kd \sin \theta - \psi_0))}{N \sin(0,5(kd \sin \theta - \psi_0))} \right\}, \quad (4.3)$$

где N — число щелей; d — расстояние между щелями;

ψ_0 — разность фаз токов возбуждения соседних щелевых излучателей;

θ — пространственный угол, отсчитываемый в H -плоскости от нормали к плоскости антенны;

$F_1(\theta)$ — функция направленности одиночного излучателя.

ДН щели длиной $l_{\text{щели}} = 2l$ в H -плоскости рассчитывается по формуле

$$F_1(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos(kl)}{\cos \theta [1 - \cos(kl)]} \right|. \quad (4.4)$$

В плоскости E продольный волноводу щелевой излучатель в отличие от электрического вибратора не является всенаправленным вследствие влияния ограниченных размеров стенок волновода. Расчет функции направленности в этом случае сложен и в лабораторной работе не рассматривается.

Так как в резонансной ВЩА щели возбуждаются синфазно, то

$$\psi_{0 \text{ ВЩА}} = 0.$$

При синфазном возбуждении щелевых излучателей главный максимум ДН резонансной ВЩА направлен вдоль нормали к полотну антенной решетки.

Так как в нерезонансной ВЩА щели, расположенные в шахматном порядке (см. рис. 4.1) и возбуждаются не синфазно, то

$$\psi_{0\text{НВЩА}} = d \frac{2\pi}{\lambda_B} + \pi, \quad (4.5)$$

где $\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$ — длина волны в волноводе;

a — размер широкой стенки поперечного сечения волновода.

Линейное изменение фазы токов возбуждения вдоль полотна антенны приводит к отклонению главного максимума ДН нерезонансной ВЩА на некоторый угол. Направление максимального излучения нерезонансной ВЩА образует с нормалью к плоскости расположения щелей угол

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{\psi_0 \lambda}{2\pi d}. \quad (4.6)$$

Нули функции диаграммы направленности в общем случае определяются по формуле

$$\sin \theta_{0i} = i \frac{\lambda}{Nd} + \frac{\psi_0 \lambda}{2\pi d},$$

где $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Ширина главного лепестка диаграммы направленности ВЩА по нулевому уровню рассчитывается по формуле

$$2\Delta\theta_0 = 2 \arcsin \frac{\lambda}{Nd}. \quad (4.7)$$

Ширина главного лепестка диаграммы направленности ВЩА на уровне половинной мощности рассчитывается по формуле

$$2\Delta\theta_{0,5} = 0,88 \frac{\lambda}{Nd}, [\text{рад}] \text{ или } 2\Delta\theta_{0,5} = 51 \frac{\lambda}{Nd}, [\text{град}]. \quad (4.8)$$

При заданном значении угла $\theta_{\max}$ можно определить требуемое значение d для нерезонансной ВЩА по формуле

$$d = \frac{\lambda \lambda_B}{2(\lambda_B \sin \theta_{\max} - \lambda)}. \quad (4.9)$$

При оценке расстояния d между щелями необходимо также обратить внимание на ограничения этой величины в решетке из ненаправленных излучателей. Для того, чтобы антенна имела один главный максимум и чтобы боковые максимумы убывали с увеличением их номера, должно выполняться условие

$$d < \frac{\lambda}{2(1 + \sin \theta_{\max})}. \quad (4.10)$$

Направленные свойства щели позволяют увеличивать d , по сравнению с условием (4.10), чем и объясняется допустимость выбора d даже равного длине волны в волноводе.

Определение проводимостей и сопротивлений щелей для многоэлементной антенны производится в пренебрежении взаимным влиянием соседних щелей, что оказывается возможным, так как в большинстве случаев щели располагаются на расстоянии, приблизительно равном $\lambda_B/2$.

Нормированная (к волновому сопротивлению волновода) проводимость одиночной щели длиной $\lambda/2$, расположенной вдоль широкой стенки волновода, определяется по формуле

$$G = 2,09 \frac{a}{b} \frac{\lambda_B}{\lambda} \sin^2 \frac{\pi x_1}{a} \cos^2 \frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B}. \quad (4.11)$$

где $a = 0,023$ м и $b = 0,01$ м — размеры широкой и узкой стенок поперечного сечения волновода, соответственно, x_1 — смещение щели относительно средней линии широкой стенки волновода.

Если в резонансной щелевой антенне расстояние между соседними щелями равно $\Lambda/2$, а в конце на расстоянии $\Lambda/4$ от последней N -й щели установлен короткозамыкающий поршень, то входная нормированная проводимость такой антенны определяется выражением

$$G_{\text{вх}} = \sum_{v=1}^N G_v, \quad (4.12)$$

где N — число излучающих элементов; G_v — нормированная проводимость v -й щели.

3.3.2. Построение модели резонансной волноводно-щелевой антенны в САПР FEKO

Модель резонансной волноводно-щелевой антенны строится с использованием примитивов *Cuboid* и *Rectangle* (рис. 4.2). Волноводно-щелевая антенна состоит из отрезка закороченного волновода и прорезанных в нем шести щелей.

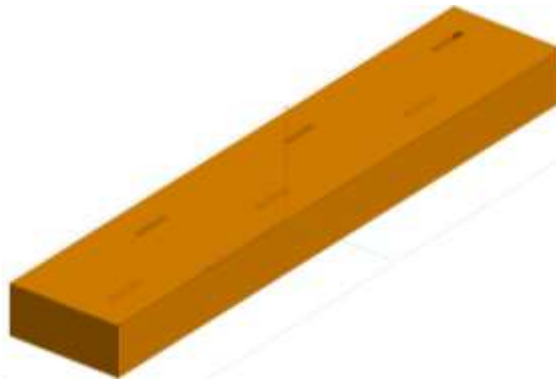


Рис. 4.2 — Модель резонансной волноводно-щелевой антенны с использованием примитивов *Cuboid* и *Rectangle*

Для построения волноводно-щелевой антенны с использованием примитивов *Cuboid* и *Rectangle* необходимо выполнить следующие действия:

— в разделе переменных создать переменную a , которая будет соответствовать размеру широкой стенки волновода, установить значение переменной соответственно заданию;

— в разделе переменных создать переменную b , которая будет соответствовать размеру узкой стенки волновода, установить значение переменной соответственно заданию;

— в разделе переменных создать переменную fr , которая будет соответствовать рабочей частоте, установить значение переменной соответственно заданию;

— в разделе переменных создать переменную lam , которая будет соответствовать рабочей длине волны, и ввести формулу для ее расчета исходя из известных значений частоты и скорости света;

— в разделе переменных создать переменную $lamv$, которая будет соответствовать рабочей длине волны в волноводе, и ввести следующую формулу для ее расчета

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}};$$

— в разделе переменных создать переменную L , которая будет соответствовать полной длине волновода, установить значение переменной равное $3lamv$ (расстояние между щелями в антенне составляет $lamv/2$, расстояние от начала волновода до первой щели и от последней щели до короткозамыкателя соответственно равны по $lamv/4$);

— в разделе переменных создать переменную R , которая будет соответствовать ширине щели, установить значение переменной соответственно заданию;

— в разделе переменных создать переменную D , которая будет соответствовать расстоянию между соседними щелями, установить значение переменной $lamv/2$;

— в разделе переменных создать переменную $x1$, которая будет соответствовать смещению щели от центра волновода

— решить следующее уравнение относительно x_1 и присвоить это значение переменной $x1$

$$2,09 \frac{a}{b} \frac{\lambda_B}{\lambda_0} \sin^2 \frac{\pi x_1}{a} \cos^2 \frac{\pi \lambda_0}{2 \lambda_B} = \frac{1}{6};$$

— вызвать окно создания примитива *Cuboid* (рис. 4.3);

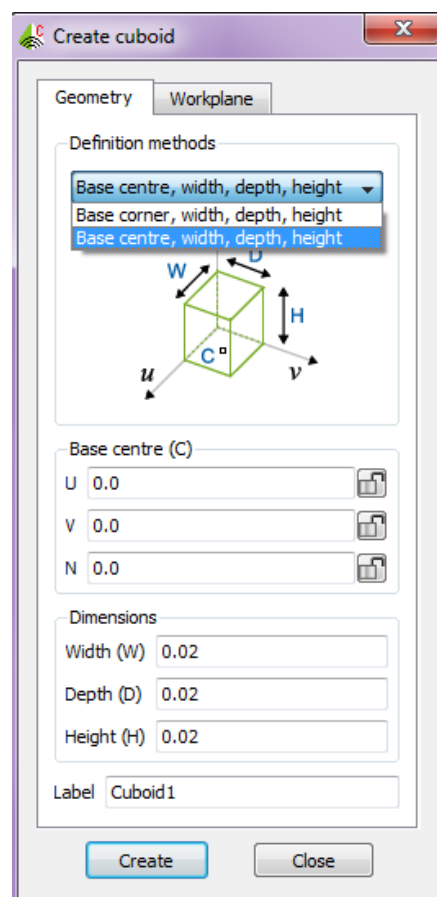


Рис. 4.3 — Окно создания примитива *Cuboid*

- в разделе *Definition methods* выбрать *Base centre, width, depth, height*;
- установить размер W равный переменной L , размер D равный переменной a , размер H равный переменной b и нажать кнопку «Create»;
- в дереве составляющих для волновода в разделе *Regions* установить в качестве заполняющего материала прямоугольника *Free space*;
- вызвать окно создания примитива *Rectangle* (см. рис. 2.13);
- установить значение длины прямоугольника (значение W) равное $lam/2$ и ширины прямоугольника (значение D) равное R , в разделе *Definition methods* выбрать *Base centre, width, depth*, координату X (значение U) необходимо установить равным $L/2 - lamv/4$ (что соответствует смещению щели на величину $lamv/4$ от начала волновода), координату Y (значение V) необходимо установить равной переменной $x1$, координату Z (значение N) необходимо установить равной переменной b , далее нажать кнопку «Create»;
- сделать пять копий созданного в предыдущем пункте прямоугольника;
- с помощью команды *Translate* (см. рис. 2.14) сместить первую копию прямоугольника на величину $lamv/2$ вдоль оси X/U по направлению к концу волновода и на величину $2 \cdot x1$ вдоль оси Y/V в противоположную относительно исходного прямоугольника сторону;
- с помощью команды *Translate* сместить вторую копию прямоугольника на величину $lamv$ вдоль оси X/U по направлению к концу волновода;
- с помощью команды *Translate* сместить третью копию прямоугольника на величину $1,5lamv$ вдоль оси X/U по направлению к концу волновода и на величину $2 \cdot x1$ вдоль оси Y/V в противоположную относительно исходного прямоугольника сторону;
- с помощью команды *Translate* сместить четвертую копию прямоугольника на величину $2 \cdot lamv$ вдоль оси X/U по направлению к концу волновода;
- с помощью команды *Translate* сместить пятую копию прямоугольника на величину $2,5 \cdot lamv$ вдоль оси X/U по направлению к концу волновода и на величину $2x1$ вдоль оси Y/V в противоположную относительно исходного прямоугольника сторону;
- выбрать в дереве модели все шесть созданных прямоугольников и объединить их с помощью команды *Union parts*;
- далее необходимо вырезать с помощью команды *Subtract from* из волновода созданные прямоугольники, образовав тем самым шесть щелей, для этого необходимо в дереве модели выбрать объединенные прямоугольники, затем нажать на иконку команды *Subtract from*, затем выбрать волновод;
- добавить порт *Waveguide port* на одну из торцевых стенок волновода;
- добавить источник *Waveguide excitation* в созданный порт;
- в разделе *Solution* установить значение рабочей частоты, используя переменную fr ;
- создать сетку разбиения используя рекомендуемые программой размеры разбиения;
- задать для расчета объемную диаграмму направленности вызвав окно расчета дальнего поля в разделе *Calculation* дерева модели (см. рис. 2.10)

(необходимо выбрать *3D Pattern*), при этом необходимо задать шаг *increment* для углов θ и φ в $0,5^\circ$.

4.4. Порядок выполнения работы

4.4.1. Предварительные расчёты

а) Рассчитать и построить в прямоугольной системе координат нормированные ДН **резонансной** волноводно-щелевой антенны в H -плоскости в пределах сектора углов $\theta \in [-50^\circ, 50^\circ]$ для двух заданных значений числа щелей в антенне на частоте f_1 , используя формулы (4.3), (4.4) при $\psi_0 = 0^\circ$.

б) Рассчитать и построить в прямоугольной системе координат нормированную ДН **нерезонансной** волноводно-щелевой антенны в H -плоскости в пределах сектора углов $\theta \in [-50^\circ, 50^\circ]$ для заданного значения частоты f_2 , используя формулы (4.3), (4.4) и (4.5).

в) Рассчитать положение главного максимума и ширину главного лепестка ДН **нерезонансной** волноводно-щелевой антенны в диапазоне частот ($f_3 — f_4$) по формулам (4.6) и (4.8), соответственно. Построить графики рассчитанных зависимостей.

г) Рассчитать резонансное укорочение щелей Δl для частоты f_2 **нерезонансной** ВЩА по формуле (4.2), полагая, что ширина щелевых излучателей составляет 0,5 мм. Длина неукороченной щели $l_{\text{щели}} = \lambda/2$. Параметры поперечного сечения волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м.

д) С помощью формул (4.11) и (4.12) для **резонансной** волноводно-щелевой антенны определить x_1 , при котором на частоте f_1 входная нормированная проводимость антенны будет близка к единице.

4.4.2. Моделирование характеристик резонансной волноводно-щелевой антенны

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо выполнить следующие действия:

а) построить модель резонансной волноводно-щелевой антенны (РВЩА) с исходными параметрами и выполнить моделирование;

б) построить объемную диаграмму направленности РВЩА;

в) построить в декартовой системе координат диаграммы направленности в плоскости XOZ и YOZ РВЩА;

г) сместить первую и шестую щель РВЩА ближе к оси волновода дополнительно на величину $x_1 / 2$ и выполнить моделирование;

д) построить объемную диаграмму направленности РВЩА со смещенными крайними щелями;

е) построить в декартовой системе координат диаграммы направленности в плоскости XOZ и YOZ РВЩА со смещенными крайними щелями;

ж) восстановить положение крайних щелей РВЩА;

з) скопировать построенную по исходным параметрам модель РВЩА и расположить ее копию вплотную с исходной так, чтобы у них была одна общая

узкая стенка, добавить во вторую РВЩА порт с источником питания, синфазным относительно первого порта;

и) выполнить моделирование антенной решетки, образованной двумя РВЩА;

к) построить объемную диаграмму направленности антенной решетки РВЩА;

л) построить в декартовой системе координат диаграммы направленности в плоскости XOZ и YOZ антенной решетки РВЩА;

м) сравнить полученные результаты.

4.5. Контрольные вопросы и задания

4.5.1. Вопросы для защиты лабораторной работы

а) Чем отличаются режимы возбуждения резонансной и нерезонансной ВЩА?

б) Чем отличаются характеристики резонансной и нерезонансной волноводно-щелевых антенн с одинаковыми параметрами волновода и количеством щелевых излучателей?

в) Как выбирается расстояние между щелевыми излучателями в резонансной ВЩА?

г) Как выбирается расстояние между щелевыми излучателями в нерезонансной ВЩА?

д) Как изменится диаграмма направленности резонансной ВЩА при увеличении количества щелевых излучателей?

е) Как изменится диаграмма направленности нерезонансной ВЩА при изменении рабочей частоты?

ж) Как выбирается длина щелевых излучателей?

з) Для чего требуется резонансное укорочение щелевых излучателей?

и) Поясните, на что повлияет смещение щелевых излучателей относительно середины широкой стенки волновода?

к) Как определяется длина волны в волноводе?

л) Опишите модель исследуемой волноводно-щелевой антенны.

м) Поясните, как выбираются значения геометрических параметров щелевых излучателей.

н) На что влияет смещение щелевых излучателей относительно центра широкой стенки волновода?

о) Сравните характеристики диаграмм направленности волноводно-щелевых антенн с различным положением крайних излучателей.

п) Сравните характеристики диаграмм направленности волноводно-щелевых антенн с одним и двумя волноводами.

р) Поясните причины изменения характеристик антенны при установке второго волноводно-щелевого излучателя.

3.5.2. Задачи для защиты лабораторной работы

а) Для резонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных

координатах нормированную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=8$, сечение волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м, рабочая длина волны $\lambda=0,037$ м.

б) Для резонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N = 22$, сечение волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м, рабочая длина волны $\lambda=0,029$ м.

в) Резонансная ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода с сечением $a \times b = 0,072 \times 0,034$ м, состоит из $N = 10$ щелей и работает на длине волны $\lambda = 0,1$ м. На какое расстояние следует сместить щели относительно середины широкой стенки волновода, чтобы в возбуждающей антенне волноводе установился режим бегущих волн, для которого должно выполняться условие $GN = 1$ (G — проводимость щелевого излучателя).

г) Резонансная ВЩА, имеющая $N=20$ продольных полуволновых щелей, работает на длине волны $\lambda=0,08$ м. На какое расстояние следует сместить щели относительно середины широкой стенки волновода, чтобы в возбуждающей антенне волноводе установился режим бегущих волн, для которого должно выполняться условие $GN = 1$ (G — проводимость щелевого излучателя)? Сечение волновода $a \times b = 0,061 \times 0,01$ м.

д) Нерезонансная ВЩА, выполненная на волноводе сечением $a \times b = 0,0285 \times 0,0126$ м, работает на длине волны $\lambda=0,038$ см. Определить, на какой угол смещается главный максимум нормированной ДН антенны относительно нормали к широкой стенке волновода, при сдвиге фаз между токами двух соседних щелевых излучателей $\psi_{0\text{нввщ}} = 3,9$ рад.

е) Для нерезонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=8$, сечение волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м, рабочая длина волны $\lambda=0,03$ м. Требуется обеспечить $\theta_{\max} = 20^\circ$.

ж) Для нерезонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=25$, сечение волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м, рабочая длина волны $\lambda=0,038$ м. Требуется обеспечить $\theta_{\max} = 10^\circ$.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕНН

5.1. Цель работы

Изучить принцип действия, методику расчета диаграмм направленности параболических антенн. Выполнить моделирование параболических антенн в САПР FEKO.

5.2. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются: номера двух параболических антенн, габариты апертур $d_{31} \times d_{32}$ и глубина зеркал L_3 (рис. 5.1), рабочие частоты f_1 и f_2 (табл. 5.1).

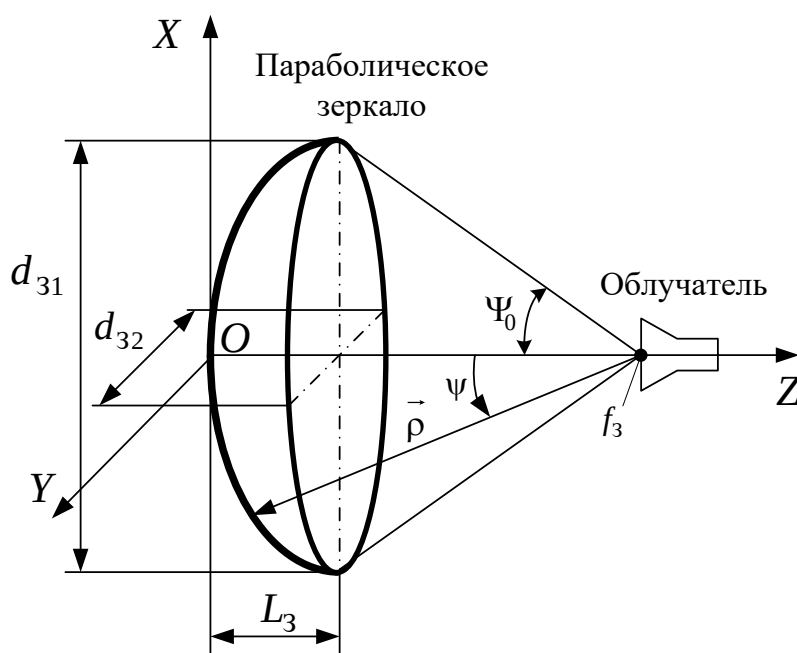


Рис. 5.1 — Схема параболической зеркальной антенны

Таблица 5.1 — Исходные данные для выполнения теоретических и экспериментальных исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип антенны	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
f_1 , ГГц	9,0	8,6	9,4	8,7	9,6	8,9	9,2	9,1	9,6	9,3
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип антенны	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1
f_2 , ГГц	9,5	9,5	9,7	9,2	8,6	9,4	8,8	9,5	9,0	9,1

Примечание. Типы зеркальных антенн:

A1 — параболоид вращения ($d_{31} = d_{32} = 0,3$ м, $L_3 = 0,046$ м);

A2 — усеченный параболоид ($d_{31} \times d_{32} = 0,41 \times 0,275$ м, $L_3 = 0,085$ м).

5.3. Теоретический раздел

5.3.1. Методика расчета характеристик параболических зеркальных антенн

5.3.1.1. Особенности построения параболических зеркальных антенн

Параболические антенны используются в радиотехнических системах различного назначения (радиорелейные системы связи, радиолокационные станции, спутниковые системы связи и телевидение, системы радиоуправления и т. д.). Наибольшее распространение получили антенны с зеркалами в виде параболоида вращения, параболического цилиндра и вырезки из параболоида вращения. Широкое распространение этих антенн объясняется возможностью формирования самых разнообразных диаграмм направленности при относительной простоте конструкции, достаточно высоком КПД и малой шумовой температуре.

Параболическая антенна конструктивно состоит из двух элементов — зеркала и облучателя (рис. 5.1). Геометрические параметры зеркала (рефлектора):

- габариты раскрыва (апертуры) $d_{31} \times d_{32}$;
- фокусное расстояние параболоида f_3 ;
- угол раскрыва зеркала Ψ_0 ;
- глубина зеркала L_3 .

Если $\Psi_0 < 90^\circ$ ($d_3 < 4f_3$), то параболоид называют длиннофокусным, тогда как при $\Psi_0 > 90^\circ$ ($d_3 > 4f_3$) — короткофокусным.

Симметричный параболический профиль зеркала описывается:

- в прямоугольной системе координат уравнением

$$y^2 = x^2 = 4f_3z; \quad (5.1)$$

- в полярной системе координат (рис. 3.2) соотношением

$$\rho(\psi) = \frac{2f_3}{1 + \cos \psi}. \quad (5.2)$$

Геометрические параметры параболического отражателя связаны между собой соотношениями:

$$\Psi_0 = 2 \arccotg \left(\frac{4f_3}{d_3} \right); \quad L_3 = f_3 \operatorname{tg}^2 \frac{\Psi_0}{2}. \quad (5.3)$$

Как правило, соотношение между фокусным расстоянием и диаметром раскрыва (апертуры) параболического зеркала выбирается исходя из типа облучателя согласно значений, приведенных в табл. 5.2.

Таблица 5.2 — Рекомендуемое соотношение для выбора значений f_3 и d_3

Тип облучателя	f_3/d_3
Полуволновый вибратор с рефлектором в виде стержня	0,34 — 0,4
Полуволновый вибратор с рефлектором в виде сплошного экрана	0,4 — 0,5
Рупорный или щелевой облучатель	0,5 — 0,625

Облучатель является важным элементом параболической зеркальной антенны, в значительной степени определяющим ее характеристики. В качестве облучателей используются слабонаправленные антенны, удовлетворяющие следующим основным требованиям:

- диаграмма направленности облучателя должна обеспечивать необходимое амплитудное распределение поля на излучающем раскрыве зеркала (в апертуре);

- фазовый центр облучателя необходимо совместить с точкой фокуса зеркала;

- рабочая полоса частот облучателя должна соответствовать системным требованиям;

- электрическая прочность облучателя должна быть достаточной для излучения без пробоя заданной мощности;

- поперечные размеры облучателя должны быть относительно небольшими для снижения затенения зеркала;

- облучатель должен обеспечивать требуемую поляризацию поля излучения;

- конструкция облучателя должна быть механически прочной.

Наибольшее применение на практике нашли облучатели следующих типов:

- вибраторные с рефлектором;

- волноводно-рупорные;

- щелевые.

Рассмотрим параболическую зеркальную антенну с двухщелевым облучателем Катлера, конструкция которого показана на рис. 5.2. Щели закрывают пластинками из высокочастотного диэлектрика, что обеспечивает герметизацию облучателя. Для согласования питающего волновода его суживают вблизи плоскости сопряжения с резонатором и используют реактивный настроенный штырь на закорачивающей стенке резонатора, в котором прорезаны щелевые излучатели. Двухщелевой облучатель имеет сферическую фазовую характеристику и отличается низким уровнем заднего излучения. Поперечные размеры облучателя малы, что обеспечивает малое затенение.

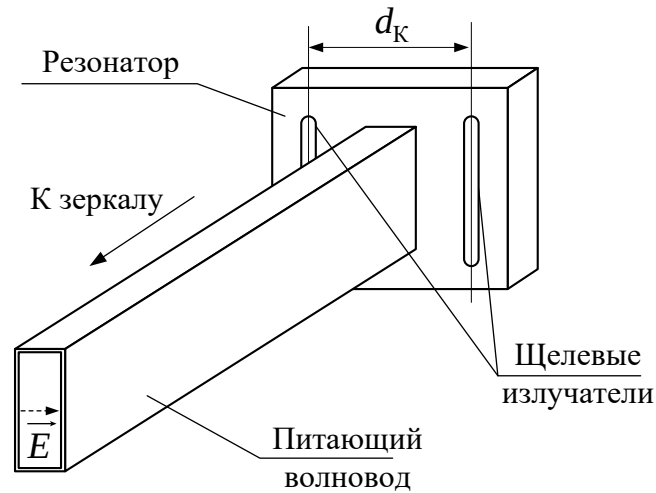


Рис. 5.2 — Модель облучателя Катлера

Диаграмма направленности двухщелевого облучателя рассчитывается по формуле:

$$f_{\text{обл}}(\psi, \alpha) = \sqrt{\cos^2\left(\frac{kd_K}{2} \sin \psi\right) \sin^2(\alpha) + \left(\frac{\cos\left(k \frac{l_K}{2} \sin \psi\right) - \cos\left(k \frac{l_K}{2}\right)}{\cos \psi}\right)^2 \cos^2(\alpha)}. \quad (5.4)$$

Тогда, в основных плоскостях ДН облучателя определяется выражениями:

— в E -плоскости

$$f_E(\psi) = \cos\left(\frac{kd_K}{2} \sin \psi\right); \quad (5.5)$$

где d_K — расстояние между щелевыми излучателями;

— в H -плоскости

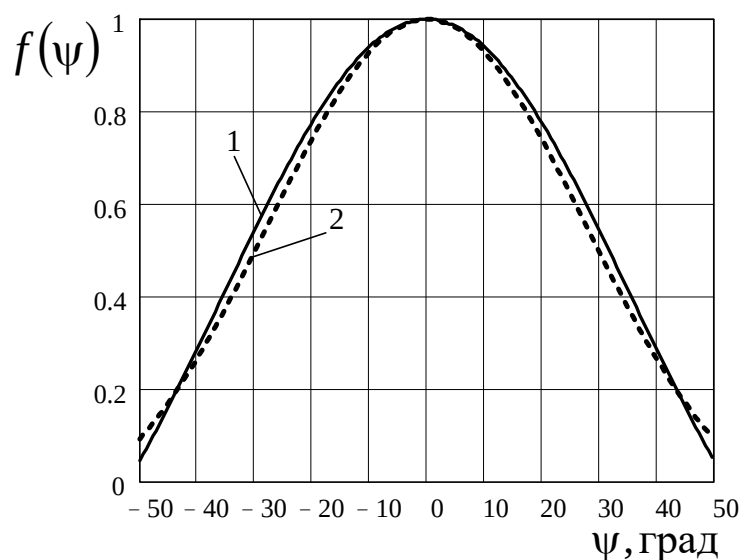
$$f_H(\psi) = \frac{\cos\left(k \frac{l_K}{2} \sin \psi\right) - \cos\left(k \frac{l_K}{2}\right)}{\cos \psi}. \quad (5.6)$$

Необходимые для расчета ДН облучателя геометрические параметры облучателей исследуемых параболических антенн приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 — Геометрические параметры облучателей исследуемых параболических антенн

Тип антенны	Длина щелевых излучателей l_K , м	Расстояние между щелевыми излучателями d_K , м
A1	0,02	0,015
A2	0,03	0,015

На рис. 5.3 показан пример расчета диаграмм направленности облучателя зеркальной антенны A1 в E - и H -плоскостях на частоте 9,5 ГГц.



1 — ДН облучателя в E -плоскости; 2 — ДН облучателя в H -плоскости

Рис. 5.3 — Диаграммы направленности облучателя одной из зеркальных антенн на частоте 9,5 ГГц

5.3.1.2. Методика расчета диаграмм направленности параболической антенны

На рис. 5.4 показана модель параболической антенны с указанием систем отсчета, используемых для расчета амплитудного распределения поля в апертуре и в дальней зоне антенны.

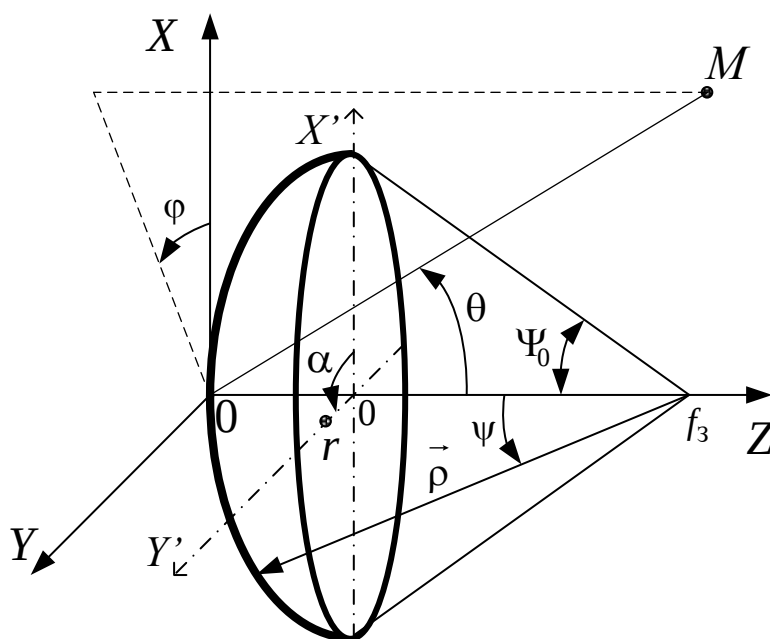


Рис. 5.4 — Описание систем отсчета, используемых для расчета амплитудного распределения поля в апертуре и в дальней зоне антенны

Направленные свойства антенны определяются размерами зеркала и амплитудно-фазовым распределением поля в апертуре (раскрытии) антенны. Фазовое распределение поля на апертуре при выполнении требований к установке облучателя можно считать равномерным (то есть близким к

синфазному). Амплитудное распределение поля на раскрыве зеркала зависит, главным образом, от формы диаграммы направленности облучателя. В большинстве случаев амплитуда поля на раскрыве спадает от максимального значения в центре до некоторого значения на краю раскрыва зеркала (рис. 5.5).

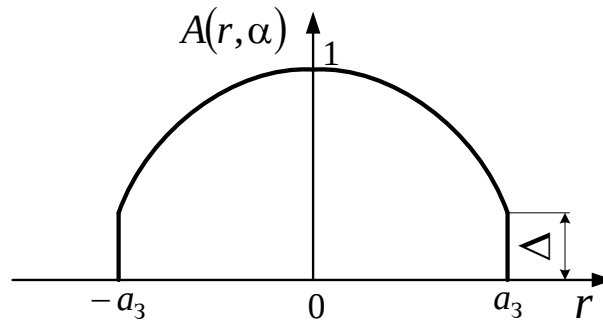


Рис. 5.5 — Нормированное распределение амплитуды напряженности электрического поля в сечении раскрыва зеркала

Осесимметричное распределение амплитуды поля на поверхности апертуры зеркала $A(r, \alpha)$ можно аппроксимировать функцией вида:

$$A(r, \alpha) = 1 - (1 - \Delta) \cdot \left(\frac{r}{a_3} \right)^2, \quad (5.9)$$

где r, α — координаты точки в раскрыве параболического отражателя (рис. 5.4); Δ — относительная амплитуда напряженности электрического поля по краю раскрыва; $a_3 = \frac{d_3}{2}$ — радиус раскрыва зеркала.

Для расчета диаграммы направленности (ДН) параболической антенны используется система отсчета углов θ и φ , показанная для произвольной точки наблюдения M на рис. 5.4.

Перед расчетом ДН параболической антенны необходимо производить приближенную оценку некоторых важных параметров ДН, таких как:

- ширина главного лепестка ДН на уровне половинной мощности — $2\theta_{0,5}^E$ (в E -плоскости при $\varphi = 90^\circ$) и $2\theta_{0,5}^H$ (в H -плоскости при $\varphi = 0^\circ$);
- уровень первого бокового лепестка определяемый по напряженности поля величиной $\gamma_{бок}$ в децибелах принимает значение

$$\gamma_{бок, дБ} = 20 \lg \frac{|E_{бок, дБ}|}{|E_{max}|}.$$

Для распределения $A(r, \alpha)$, определяемого по формуле (3.9), основные характеристики диаграммы направленности параболической антенны можно оценить по данным, приведенным в табл. 5.4.

Таблица 5.4 — Характеристики диаграммы направленности зеркальной антенны со спадающим распределением поля в раскрыве зеркала

Δ	$2\theta_{0,5}^{E,H}$, град	$\gamma_{бок}$, дБ
0,1	$67,4\lambda/(2a)$	-24,3
0,2	$66,4\lambda/(2a)$	-23
0,3	$64,8\lambda/(2a)$	-22
0,4	$63,6\lambda/(2a)$	-21,5
0,5	$62,8\lambda/(2a)$	-20,5
0,6	$61,4\lambda/(2a)$	-19,9
0,7	$60,2\lambda/(2a)$	-19,36
0,8	$59,8\lambda/(2a)$	-18,8
0,9	$59\lambda/(2a)$	-18,0
1,0	$58,5\lambda/(2a)$	-17,6

При синфазном возбуждении апертуры антенны в виде параболоида вращения ее диаграмма направленности рассчитывается по следующему выражению

$$f(\theta, \varphi) = (1 + \cos \theta) \int_0^{2\pi} \int_0^{a_3} A(r, \alpha) \exp[jk r \sin \theta \cos(\varphi - \alpha)] r dr d\alpha. \quad (5.10)$$

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

С учетом реальных диаграмм направленности облучателя в E - и H -плоскостях амплитудное распределение поля на излучающем раскрыве зеркала определяется с помощью соотношения

$$A(r, \alpha) = \frac{f_{обл}(\psi(r), \alpha)}{\rho(\psi(r))}, \quad (5.11)$$

где $f_{обл}(\psi, \alpha)$ — диаграмма направленности облучателя;

r — текущая координата раскрыва зеркала;

ψ — текущий угол раскрыва; $\psi(r) = \arccos \frac{1 - (r/2 f_3)^2}{1 + (r/2 f_3)^2}$.

Коэффициент направленного действия параболической антенны можно определить, воспользовавшись графическим методом.

Для этого по данным, полученным при расчете ДН антенны, строятся графики нормированных диаграмм направленности по мощности

$$F^{норм}(\theta) = [f^{норм}(\theta)]^2$$

в пределах главного лепестка (рис. 5.6).

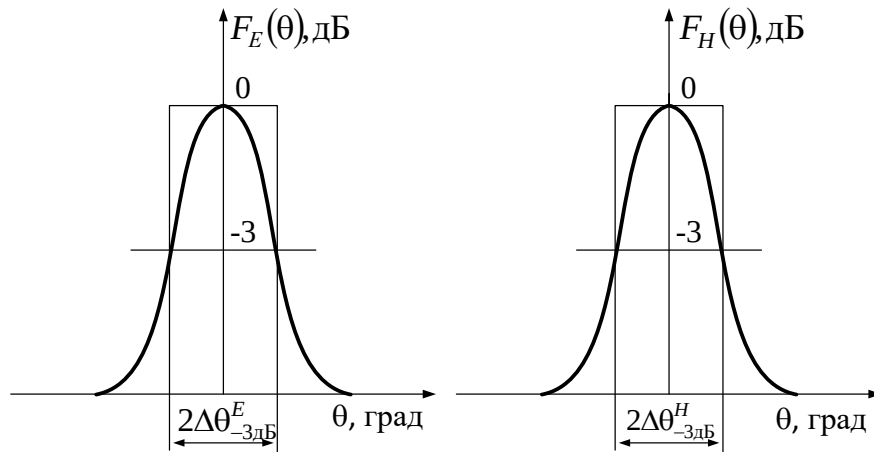


Рис. 5.6 — Определение ширины главного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности

При вычислении КНД значения $2\Delta\theta_{-3дБ}^E$ и $2\Delta\theta_{-3дБ}^H$ в градусах подставляются в формулу

$$D = 10 \lg \left[\frac{41300}{2\Delta\theta_{-3дБ}^E \text{ (град.)} \cdot 2\Delta\theta_{-3дБ}^H \text{ (град.)}} \right]. \quad (5.12)$$

Расчёт технических допусков на отклонение формы отражающей поверхности зеркала от параболической определяется требованием сохранения синфазности возбуждения раскрыва зеркала с точностью до $\pi/2$. Этому условию соответствуют следующие технологические и конструктивные ограничения:

— допустимое отклонение профиля поверхности зеркала

$$\delta_{\text{доп}} \leq \pm \lambda/16. \quad (5.13)$$

— допустимое смещение облучателя вдоль фокальной оси зеркала относительно точки его фокуса определяется по формуле

$$\delta_{11} \leq \frac{\lambda}{4(1 - \cos \Psi_0)}. \quad (5.14)$$

— допустимое смещение облучателя в фокальной плоскости зеркала относительно точки его фокуса определяется по формуле

$$\delta_{\perp} \leq f_3 \sin(\delta\theta_{\text{max}}), \quad (5.15)$$

где $\delta\theta_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4a_3} \left(4 \frac{f_3^2}{a_3^2} - 1 \right)$ — предельно допустимое отклонение максимума главного луча ДН параболической антенны от направления фокальной оси зеркала, вызванное смещением облучателя, при котором расширение главного лепестка пренебрежимо мало.

5.3.2. Построение модели параболической антенны

Модель параболической антенны строится с использованием примитивов *Paraboloid*, *Line* и *Ellipse* (рис. 5.7). Параболическая антенна состоит из параболического зеркала, симметричного вибратора и круглого экрана.

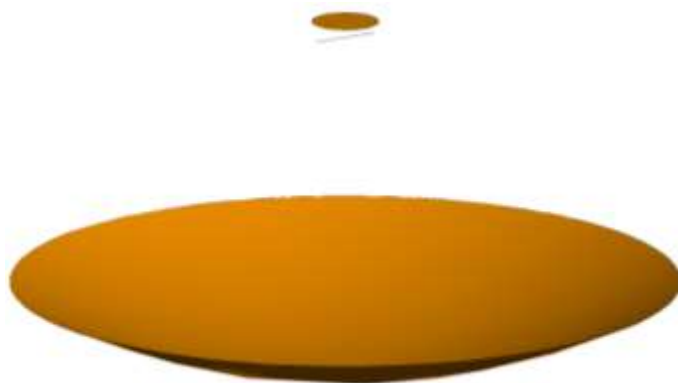


Рис. 5.7 — Модель параболической антенны строится с использованием примитивов *Paraboloid*, *Line* и *Ellipse*

Для построения параболической антенны с использованием примитивов *Paraboloid*, *Line* и *Ellipse* необходимо выполнить следующие действия:

- в разделе переменных создать переменную fr , которая будет соответствовать рабочей частоте, установить значение переменной соответственно заданию;
- в разделе переменных создать переменную lam , которая будет соответствовать рабочей длине волны, и ввести формулу для ее расчета исходя из известных значений частоты и скорости света;
- в разделе переменных создать переменную L , которая будет соответствовать полной длине вибратора, установить значение переменной $lam/2$;
- в разделе переменных создать переменную R , которая будет соответствовать радиусу плеч вибратора, установить значение переменной соответственно заданию;
- в разделе переменных создать переменную h , которая будет соответствовать расстоянию от симметричного вибратора до экрана, установить значение переменной $lam/4$;
- в разделе переменных создать переменную f , которая будет соответствовать фокусному расстоянию параболического зеркала, установить значение переменной соответственно заданию;
- в разделе переменных создать переменную Rp , которая будет соответствовать радиусу апертуры параболического зеркала, установить значение переменной соответственно заданию;
- вызвать окно создания примитива *Line* (см. рис. 2.8);
- установить начальные и конечные координаты точек соответственно $(-L/2, 0, 0)$ и $(L/2, 0, 0)$ и нажать кнопку «Create»;

— добавить порт *Wire port* на середину созданного проводника;

— добавить источник напряжения в созданный порт;

— создать экран с помощью примитива *Ellipse*, для этого вызвать окно создания примитива *Ellipse* (см. рис. 2.9), ввести величину радиуса L для каждой из осей и поднять экран на величину h по оси Z (в окне обозначена как U);

— вызвать окно создания примитива *Paraboloid* (рис. 5.8), ввести в качестве радиуса апертуры зеркала переменную Rp , в качестве фокусного расстояния переменную f , параболоид переместить по оси Z (обозначена как N) на величину $-f$;

— для созданного параболического зеркала необходимо задать для расчета метод физической оптики, для этого необходимо в окне составляющих в разделе *Faces* вызвать свойства параболической поверхности и во вкладке *Solution* выбрать метод *Physical optics (PO)* — *full ray-tracing*;

— в разделе *Solution* дерева проекта установить значение рабочей частоты, используя переменную fr ;

— создать сетку разбиения используя рекомендуемые программой размеры разбиения, а в качестве радиуса проводника задать переменную R ;

— задать для расчета диаграммы направленности в плоскостях XOZ и YOZ вызвав окно расчета дальнего поля в разделе *Calculation* дерева модели (см. рис. 2.10), при этом необходимо задать шаг *increment* для углов θ и φ в $0,25^\circ$.

5.4. Порядок выполнения работы

5.4.1. Предварительные расчёты

а) Используя соотношения (5.1) и (5.3), определить фокусное расстояние f_3 и апертурный угол Ψ_0 раскрыва для двух исследуемых параболических зеркал по известному диаметру раскрыва и глубине зеркала. Принять во внимание, что глубина зеркала $L = z_{\max}$ при $y_{\max} = a_3$.

б) Рассчитать по формулам (5.5) и (5.6) и построить в прямоугольных координатах диаграммы направленности облучателя зеркальных антенн в E - и H -плоскостях на соответствующих индивидуально заданию частотах. Пример оформления проведенных расчетов показан на рис. 5.3.

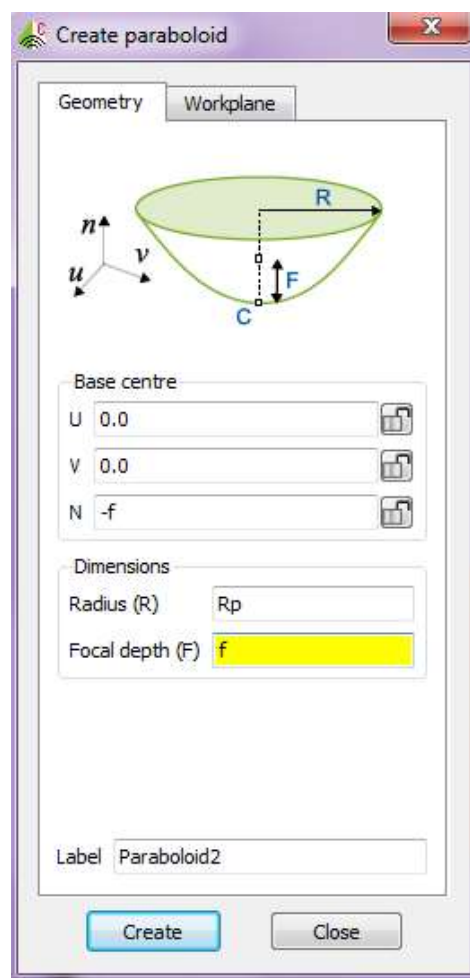


Рис. 5.8 — Окно создания примитива *Paraboloid*

в) На основе выражений (5.2), (5.4), (5.10) и (5.11) рассчитать в E -плоскости ($\varphi = \pi/2$) и H -плоскости ($\varphi = 0$) диаграммы направленности для двух исследуемых параболических антенн на соответствующих индивидуальному заданию частотах. В прямоугольной системе координат построить **нормированные** ДН зеркальных антенн в децибелах, воспользовавшись формулой

$$F(\theta)_{\text{дБ}} = 20 \lg(f^{\text{норм}}(\theta)).$$

Примеры программы для выполнения расчетов диаграмм направленности зеркальной антенны показаны в **Приложении Б**.

г) По построенным в пп. в) графикам ДН зеркальных антенн в E - и H -плоскостях определить ширину главного лепестка ДН по уровню -3 дБ и максимальный уровень бокового излучения. Результаты анализа занести в табл. 5.5.

Таблица 5.5 — Характеристики диаграмм направленности исследуемых зеркальных антенн

Тип антенны	Рабочая частота, ГГц	Ширина главного лепестка ДН, град		Уровень побочного излучения, дБ	
		E -плоскость	H -плоскость	E -плоскость	H -плоскость
A1					
A2					

д) Используя данные заполненной табл. 5.5 и формулу (5.12), рассчитать КНД исследуемых параболических антенн. Результаты расчетов занести в табл. 5.6.

Таблица 5.6 — Коэффициент направленного действия исследуемых зеркальных антенн

Тип антенны	Рабочая частота, ГГц	Коэффициент направленного действия, дБ
A1		
A2		

е) На основе соотношений (5.13) — (5.15) рассчитать технические допуски на отклонение формы отражающей поверхности зеркала и допустимую область установки облучателя на соответствующих индивидуальному заданию частотах. Результаты расчетов занести в табл. 5.7.

Таблица 5.7 — Технологические допуски на изготовление параболической зеркальной антенны

Тип антенны	Рабочая частота, ГГц	$\delta_{\text{доп}}, \text{ м}$	$\delta_{11}, \text{ м}$	$\delta_{\perp}, \text{ м}$
A1				
A2				

5.4.2. Моделирование характеристик параболической антенны

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо выполнить следующие действия:

- а) построить модель параболической антенны А1, для ускорения расчета параболической антенны можно увеличить величину разбиения параболического зеркала в 2,5 — 3 раза;
- б) построить в декартовой системе координат диаграмму направленности в плоскости XOZ и YOZ параболической антенны А1;
- в) сместить облучатель из точки фокуса в сторону зеркала на величину lam ;
- г) построить в декартовой системе координат диаграмму направленности в плоскости XOZ и YOZ параболической антенны А1 со смещенным облучателем;
- д) сместить облучатель из точки фокуса в сторону зеркала на $2lam$;
- е) построить в декартовой системе координат диаграмму направленности в плоскости XOZ и YOZ параболической антенны со смещенным облучателем на величину $2lam$;
- ж) вернуть облучатель в точку фокуса параболического зеркала;
- з) в плоскости YOZ отсечь от параболического зеркала фрагменты на глубину $0,15R$ от краев апертуры со стороны положительной и отрицательной полуосей OY (рис. 5.9);

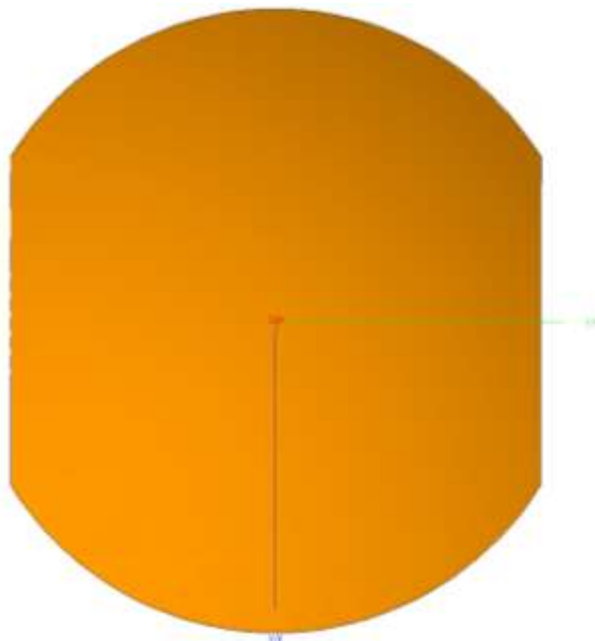


Рис. 5.9 — Модель усеченного параболического зеркала

- и) рассчитать модель параболической антенны с усеченным зеркалом, для ускорения расчета параболической антенны можно увеличить величину разбиения параболического зеркала в 2,5 — 3 раза;
- к) построить в декартовой системе координат диаграмму направленности в плоскости XOZ и YOZ параболической антенны с усеченным зеркалом;
- л) сравнить полученные результаты.

5.5. Контрольные вопросы и задания

5.5.1. Вопросы для защиты лабораторной работы

а) Опишите особенности конструкции классической параболической зеркальной антенны.

б) Опишите конструкцию, принцип действия и характеристики облучателя Катлера, используемого в конструкции исследуемых зеркальных антенн.

в) Какие требования предъявляются к облучателям зеркальных антенн?

г) Перечислите основные внешние характеристики зеркальных антенн.

д) Поясните, на что влияют погрешности при установке облучателя в параболической зеркальной антенне?

е) Поясните, как изменится диаграмма направленности зеркальной антенны, если увеличится площадь апертуры антенны при неизменном распределении поля в раскрыве.

ж) Поясните, как изменится диаграмма направленности зеркальной антенны при неизменных значениях площади и формы раскрыва, если спадающее распределение поля в апертуре будет характеризоваться пьедесталом (относительная амплитуда поля на краю апертуры), изменившимся от 0,5 до 0,1.

з) Сравните диаграммы направленности зеркальных антенн, которые при одинаковых распределениях поля в раскрыве отличаются формой апертуры: одно зеркало имеет круглый раскрыв, второе зеркало — усеченный в E -плоскости раскрыв.

и) Опишите модель исследуемой параболической антенны с исходными геометрическими параметрами.

к) Проанализируйте характеристики параболической антенны с исходными параметрами.

л) Поясните, как влияет смещение облучателя на характеристики диаграммы направленности параболической антенны.

м) Поясните причины изменения характеристик диаграммы направленности параболической антенны при смещении облучателя.

н) Поясните, как влияет усечение параболического зеркала на характеристики диаграммы направленности антенны.

о) Поясните причины изменения характеристик диаграммы направленности параболической антенны при усечении зеркала.

3.5.2. Задачи для защиты лабораторной работы

а) Параболическая антенна с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 4,5$ м возбуждается полуволновым вибратором с дисковым рефлектором и работает на длине волны $\lambda = 0,2$ м. Определить оптимальное фокусное расстояние зеркала, угол его раскрыва и электрические размеры облучателя.

б) Пирамидальный рупор, возбуждаемый волной H_{10} , имеет квадратный раскрыв и используется в качестве облучателя параболической антенны с

осесимметричным зеркалом. В какой из плоскостей (H или E) ширина главного луча ДН антенны на уровне половинной мощности больше и почему?

в) Антенна самолетного радиолокатора, работающего на длине волны $\lambda = 0,03$ м, выполнена в виде усеченного параболоида с размерами $a_3 \times b_3 = 1 \times 1,5$ м. Определить ширину главного луча ДН антенны на уровне половинной мощности в H - и E -плоскостях, если уровень бокового излучения не превышает -22 дБ.

г) Определить размеры раскрыва отражателя параболической антенны в виде усеченного параболоида, при которых ее нормированная амплитудная диаграмма направленности будет иметь ширину главного луча ДН по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}^E = 7^\circ$ и $2\theta_{0,5}^H = 1^\circ$, если длина рабочей волны $\lambda = 0,03$ м и уровень бокового излучения не превышает $-20,5$ дБ.

д) Определить диаметр раскрыва и фокусное расстояние параболической антенны с осесимметричным зеркалом, ширина луча которой на уровне половинной мощности в H -плоскости $2\theta_{0,5}^H = 3^\circ$ и уровень бокового излучения не превышает -23 дБ. Длина волны $\lambda = 0,032$ м, а угол раскрыва параболического зеркала $\Psi_0 = 49^\circ$.

е) Определить допуски на установку облучателя для параболического зеркала со следующими геометрическими параметрами: размер раскрыва $a_3 \times b_3 = 0,5 \times 1$ м, фокусное расстояние $f_3 = 0,5$ м. Рабочая частота 11 ГГц.

ж) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН параболической антенны с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 1,2$ м на частоте 9,8 ГГц. Требуется обеспечить уровень бокового излучения не более -18 дБ.

з) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН параболической антенны с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 1,5$ м на частоте 8,5 ГГц. Требуется обеспечить уровень бокового излучения не более -20 дБ.

и) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН параболической антенны с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 1$ м на частоте 10,5 ГГц. Требуется обеспечить уровень бокового излучения не более -22 дБ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Учебно-методическое пособие по оформлению текстовых работ преподавателей и обучающихся всех форм обучения по всем направлениям и специальностям кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» [Электронный ресурс] / СевГУ; сост. В.Г. Слѣзкин. — Севастополь : СевГУ, 2020. — 26 с. — Режим доступа: Сервер методических указаний кафедры РТ.
2. Банков, С.Е. Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. — М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. — 200 с.
3. Расчет и измерение характеристик устройств СВЧ и антенн : учебное пособие / Ю. Е. Мительман, Р. Р. Абдуллин, С. Г. Сычугов, С. Н. Шабунин ; под редакцией Ю. Е. Мительман. — Екатеринбург : УрФУ, 2016. — 140 с. — ISBN 978-5-7996-1821-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/99085> (дата обращения: 28.02.2023). — Режим доступа: по подписке.
4. Мешков, С. А. Устройства СВЧ и антенны : учебное пособие / С. А. Мешков, В. В. Назаров, Н. В. Федоркова. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. — 71 с. — ISBN 978-5-7038-4457-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/103372> (дата обращения: 28.02.2023). — Режим доступа: по подписке.
5. Типикин, А. А. Моделирование антенных устройств в Matlab с использованием пакета расширения Antenna Toolbox: Практическое пособие / Типикин А. - Москва: СОЛОН-Пр., 2016. - 116 с.: ISBN 978-5-91359-197-5. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/908689> (дата обращения: 28.02.2023). – Режим доступа: по подписке.
6. Семенихин, А. И. Проектирование зеркальных антенн с помощью пакета Mathcad: Учебное пособие / Семенихин А.И., Кошкидько В.Г., Климов А.В. - Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2016. - 80 с.: ISBN 978-5-9275-1918-7. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/989923> (дата обращения: 28.02.2023). – Режим доступа: по подписке.

Примечание:

* — ресурсы электронно-библиотечной системы *Znanium.com*.

Приложение А**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ОТЧЕТА
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт Радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем
Кафедра «Радиоэлектронные системы и технологии»

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
«ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИММЕТРИЧНОГО И
НЕСИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРОВ»
по дисциплине «Основы теории антенн и волоконной оптики»

Выполнил студент _____
фамилия и инициалы

Группа _____

Отчет защищён с оценкой _____

Преподаватель _____

Севастополь
2023

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРИМЕР НАПИСАНИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Длина волны, м	$\lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{\text{freq}} = 0.032$
Волновое число	$k := \frac{2\pi}{\lambda}$
Диаметры апертуры зеркала, м	$dz1 := 0.3 \quad dz2 := 0.3$
Фокусное расстояние зеркала, м	$fz := 0.122$
Параметры облучателя зеркала, м	$dk := 0.015 \quad lk := 0.02$
Связь угловой и декартовой координат	$\psi(r) := \arccos \left[\frac{1 - \left(\frac{r}{2 \cdot fz} \right)^2}{1 + \left(\frac{r}{2 \cdot fz} \right)^2} \right]$

Диаграмма направленности облучателя зеркала

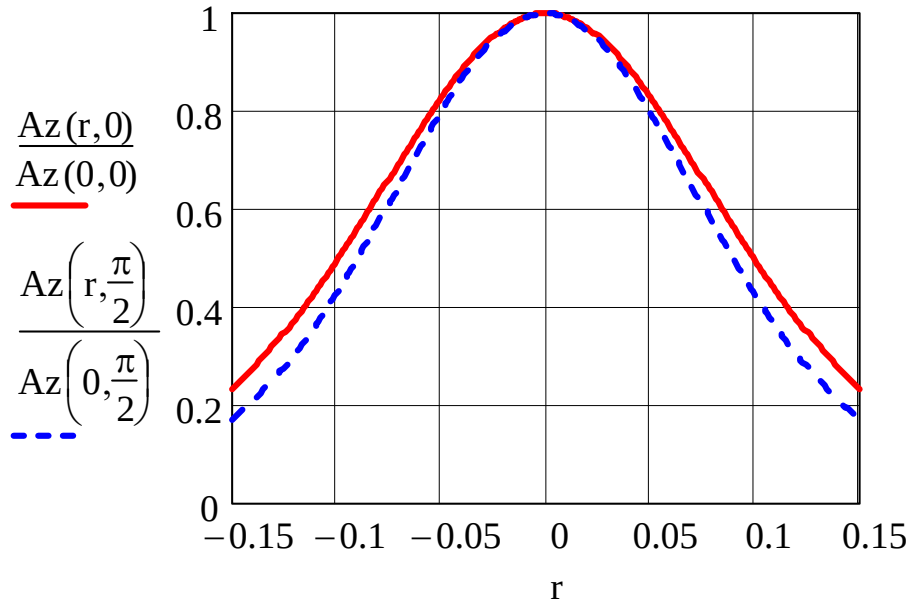
$$ff(r, \alpha) := \sqrt{\cos \left(k \cdot \frac{dk}{2} \cdot \sin(\psi(r)) \right)^2 \cdot \sin(\alpha)^2 + \left(\frac{\cos \left(k \cdot \frac{lk}{2} \cdot \sin(\psi(r)) \right) - \cos \left(k \cdot \frac{lk}{2} \right)}{\cos(\psi(r))} \right)^2 \cdot \cos(\alpha)^2}$$

Распределение поля в раскрыве зеркала

$$Az(r, \alpha) := ff(r, \alpha) \cdot \frac{1 + \cos(\psi(r))}{2 \cdot fz}$$

$$r := -\frac{dz1}{2}, -\frac{dz1}{2} + 0.001.. \frac{dz1}{2}$$

Распределение поля в раскрыве зеркала



Результирующая диаграмма направленности зеркальной антенны

$$f_{\text{ref}}(\theta, \phi) := (1 + \cos(\phi)) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{\left(\frac{dz1}{2}\right)^2 \sin^2(\alpha) + \left(\frac{dz2}{2}\right)^2 \cos^2(\alpha)}} \left[\frac{Az(r, \alpha)}{Az(0, \alpha)} \cdot \exp(1j \cdot k \cdot r \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi - \alpha)) \cdot r \right] dr d\alpha$$

Диаграмма направленности в E -плоскости

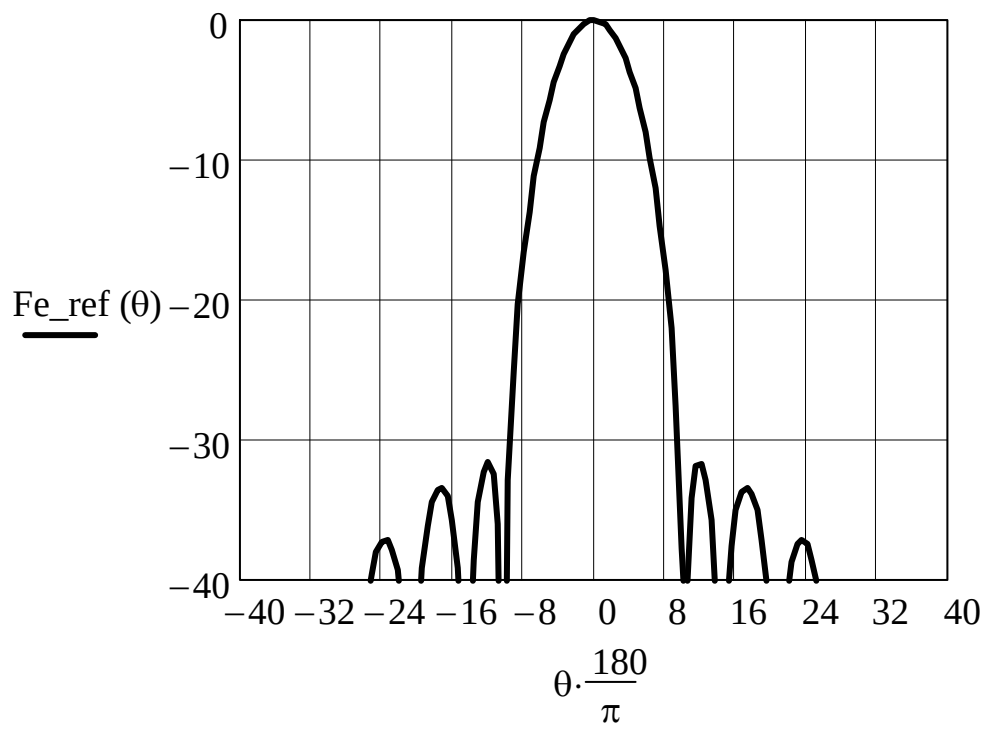
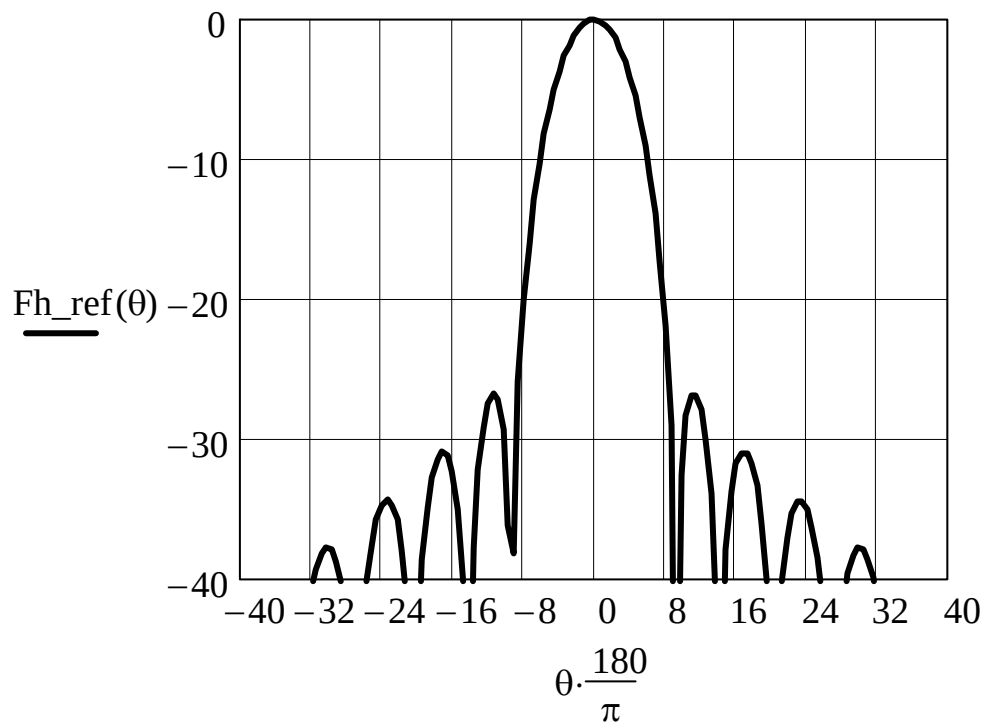
$$Fe_{\text{ref}}(\theta) := 20 \cdot \log \left(\left| \frac{f_{\text{ref}}\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right)}{f_{\text{ref}}\left(0, \frac{\pi}{2}\right)} \right| \right)$$

Диаграмма направленности в H -плоскости

$$Fh_{\text{ref}}(\theta) := 20 \cdot \log \left(\left| \frac{f_{\text{ref}}(\theta, 0)}{f_{\text{ref}}(0, 0)} \right| \right)$$

Диапазон углов для расчета ДН

$$\theta := -40 \cdot \frac{\pi}{180}, -40 \cdot \frac{\pi}{180} + 0.01 \dots 40 \cdot \frac{\pi}{180}$$

Диаграмма направленности зеркальной антенны в E -плоскостиДиаграмма направленности зеркальной антенны в H -плоскости

Учебное издание

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ АНТЕНН
И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ**

Учебно-методическое пособие

В трех частях

Часть 2

Составители: **Головин** Владислав Викторович,
Ткаченко Михаил Олегович

В авторской редакции

Изд. № 211/2023. Объем 5,75 п.л. Усл. печ. л. 5,35. Уч. изд. л. 5,64.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»