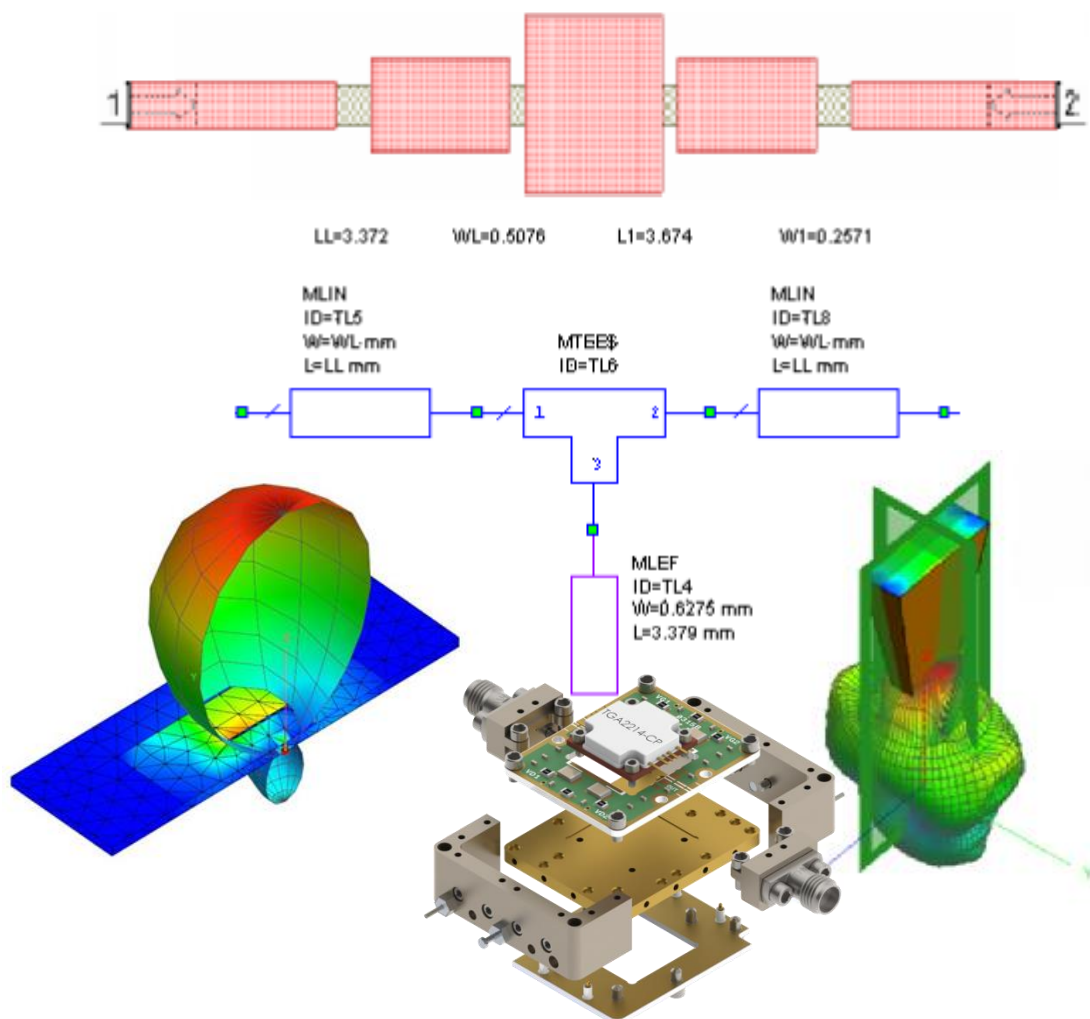


М.С. КОСТИН, А.Д. ЯРЛЫКОВ, Ю.А. ПОЛЕВОДА, Е.А. ЧИСТЯКОВ

РАДИОВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ И УСТРОЙСТВ СВЧ

Методические указания по выполнению лабораторного практикума для
студентов, обучающихся по всем направлениям группы
11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи»



УДК 621.371
ББК 22.336
К72

Костин М.С., Ярлыков А.Д., Полевода Ю.А., Чистяков Е.А.

Радиоволновые технологии автоматизированного расчета и моделирования модулей и устройств СВЧ [Электронный ресурс]: методические указания по выполнению лабораторного практикума / М.С. Костин, А.Д. Ярлыков, Ю.А. Полевода, Е.А. Чистяков – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Методические указания по выполнению лабораторного практикума состоят из двух тематических разделов, составленных в соответствии с программами дисциплин «Радиоволновые процессы и технологии», «Модули и техника сверхвысоких частот», «Волновые процессы в материальных средах», и практических заданий к лабораторным работам. Описание лабораторных работ включает основные теоретические сведения по рассматриваемым разделам, порядок выполнения работ, контрольные вопросы и литературу для подготовки.

Предназначено для студентов, обучающихся по всем направлениям группы 11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи».

Методические указания издаются в авторской редакции.

Авторский коллектив: Костин Михаил Сергеевич, Ярлыков Алексей Дмитриевич, Полевода Юрий Александрович, Чистяков Егор Алексеевич

Рецензент:

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н. проф., проф. кафедры РЭСК, ИРТС РТУ МИРЭА

Минимальные системные требования:

Наличие операционной системы Windows, поддерживаемой производителем.

Наличие свободного места в оперативной памяти не менее 128 Мб.

Наличие свободного места в памяти хранения (на жестком диске) не менее 30 Мб.

Наличие интерфейса ввода информации.

Дополнительные программные средства: программа для чтения pdf-файлов (Adobe Reader).

Подписано к использованию по решению Редакционно-издательского совета

«МИРЭА - Российского технологического университета» от _____ 2021 г.

- © Костин М.С., Ярлыков А.Д.,
Полевода Ю.А., Чистяков Е.А. 2021
- © МИРЭА – Российский технологический
университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЧАСТЬ 1. УСТРОЙСТВА И МОДУЛИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ	4
ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ И УСТРОЙСТВ СВЧ В САПР MICROWAVE OFFICE	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 ОДНОШЛЕЙФНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С НАГРУЗКОЙ	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО АТТЕНЮАТОРА	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРА НА МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ	38
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ И НАСТРОЙКА ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ СВЧ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ	52
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 ВОЛНОВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ФЕРРИТЫ	63
ЧАСТЬ 2. ПРОГРАММНО-ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН В СРЕДЕ ALTAIR HYPERWORKS FEKO	75
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ АНТЕНН В СРЕДЕ ALTAIR HYPERWORKS FEKO	75
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 ИССЛЕДОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ	96
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА	110
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 ИССЛЕДОВАНИЕ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ РАСКРЫВОМ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	136
<i>Приложение 1. Шаблон титульного листа к отчету</i>	<i>138</i>

ЧАСТЬ 1. УСТРОЙСТВА И МОДУЛИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ И УСТРОЙСТВ СВЧ В САПР MICROWAVE OFFICE

Одним из популярных программных продуктов, используемых для проектирования радиочастотных устройств и устройств СВЧ, является AWR DESIGN ENVIRONMENT (AWRDE) компании Applied Wave Research, входящей в состав National Instruments (NI). Он включает в себя три инструментальных средства: Microwave Office (MWO), Visual System Simulator (VSS) и Analog Office (ANO). Эти средства интегрированы в единую среду проектирования и могут использоваться вместе, не выходя из этой среды. В данной работе рассматривается САПР Microwave Office.

Среда проектирования AWR использует единую объектно-ориентированную модель данных, синхронизирующую работу над проектом без использования промежуточных трансляторов. Это обеспечивает доступ ко всем необходимым данным независимо от того, чертите вы схему, выполняете её анализ или формируете топологию.

Microwave Office позволяет создавать схемы, состоящие из элементов схем (сосредоточенных и распределённых) и электромагнитных структур. Схемы могут иметь сложную иерархическую структуру, включающую множество подсхем на различных уровнях иерархии. В качестве подсхем могут использоваться ранее созданные схемы или электромагнитные структуры, а также списки цепей, файлы данных или элементы из библиотек сторонних пользователей. Для создания схем имеется обширная библиотека встроенных схемных элементов.

Для моделирования можно использовать один из методов: линейное моделирование, одночастотный и многочастотный гармонический баланс, ряды Вольтера, электромагнитное моделирование и др. Результаты могут выводиться в различных графических формах или в таблице в зависимости от цели проводимого анализа. Имеется множество измеряемых величин, которые можно отобразить на графиках. Если же нужной величины в этом множестве всё-таки нет, можно составить уравнение для её вычисления, и она будет выведена на график.

Можно настраивать или оптимизировать электрические схемы, созданные в проектах, и все изменения немедленно и автоматически отражаются на графиках и в топологии. Также имеется возможность настраивать и оптимизировать электромагнитные структуры, используя экстракцию, т.е. извлечение электромагнитных структур из элементов схемы или из топологии схемы.

В AWR имеется возможность интеграции программ сторонних производителей. Интерфейс EM Socket (двусторонний канал связи) даёт возможность непосредственно из проекта AWR использовать вычислительные модули различных производителей программного обеспечения для электромагнитного моделирования, поддерживающих этот интерфейс. Анализ топологии устройства,

созданной в Microwave Office, может быть выполнен с помощью вычисляющих блоков программ CST, Sonnet, Zeland и др.

Справочная система Microwave Office обеспечивает информацию обо всех окнах, пунктах меню, и концепциях. К справочной системе можно обратиться выбрав в окне программы кнопку **Help** из выпадающего меню, или нажав клавишу F1.

Программа Microwave Office обладает плохой совместимостью между версиями. Это стоит учитывать при работе в новых версиях Microwave Office.

Компоненты среды проектирования

Главное окно Microwave Office содержит все компоненты, которые составляют среду проектирования. Именно через это окно проектируются линейные и нелинейные схемы, устанавливаются электромагнитные структуры (ЕМ), создаются топологии, выполняется моделирование, и отображаются графики. Основные компоненты среды проектирования описаны в таблице 1.1.

Многие функции и команды, доступные из меню, также доступны через панель инструментов и/или окно просмотра проекта.

Вид и состав меню и панели инструментов динамически изменяются в зависимости от открытого активного окна. Чтобы узнать команду, с которой связан значок на панели инструментов, установите курсор мышки на этот значок и подержите несколько секунд.

Окно просмотра проекта всегда активно после загрузки Microwave Office. Щёлкните правой кнопкой мышки по группе в окне просмотра проекта, чтобы вызвать всплывающее меню с соответствующими этой группе командами.

В пределах рабочего поля вы можете перемещаться, используя вертикальную и горизонтальную полосы скроллинга и изменять размеры внутри окна, используя значки на панели инструментов. Вы можете щёлкать по элементам схемы правой кнопкой мышки, чтобы вызвать всплывающее меню с соответствующими командами. Вы можете также копировать и вставлять элементы, порты и проводники из одной схемы или проекта в другие, используя значки копирования и вставки на панели инструментов.

На вкладке Project левого окна проекта отображается дерево групп и модулей, которые уже используются, а также могут быть использованы в данном проекте. Сюда входят:

- модуль примечаний к проекту (Design Notes);
- модуль задания глобальных опций проекта (Project Options);
- модуль глобальных выражений (Global Equations);
- модуль использования внешних файлов данных (Data Files);
- группа используемых схем системы для VSS, если VSS инсталлировано (System Diagrams);
- группа используемых схематических модулей (Circuit Schematics);
- группа используемых электромагнитных структур (EM Structures);
- модуль выходных уравнений (Output Equations);

Таблица 1.1

Основные компоненты среды проектирования

Компонент	Описание
Меню	Строка выпадающих меню, расположенная в верхней части окна, для выполнения различных задач Microwave Office. В выпадающих меню слева от команды отображается соответствующий этой команде значок на панели инструментов, а справа – горячая клавиша.
Панель инструментов	Строка значков, расположенных ниже выпадающего меню, которые обеспечивают доступ к часто используемым командам типа создания новых схем, выполнения моделирования, или настройки значений параметров или переменных.
Окно просмотра проекта	Древовидная структура групп и модулей, которая определяет активный проект Microwave Office, включая схемы, электромагнитные структуры (ЕМ), частоты моделирования и выходные графики. Это окно активно при загрузке программы или после щелчка по панели Project в нижней части левого окна.
Рабочее поле	Зона, в которой проектируются схемы, электромагнитные структуры (ЕМ), отображаются и редактируются топологии, и выводятся графики. Размер рабочего поля можно изменять, если установить курсор мышки на левую или нижнюю границу поля, и перемещать мышку с нажатой левой кнопкой.
Панели	Строка панелей, расположенная в нижней части левого окна, которая позволяет переключать содержимое этого окна. Project – включает окно просмотра проекта. Elements – включает окно просмотра элементов для формирования схем. Layout – включает окно менеджера топологии, которое позволяет определить параметры для черчения и просмотра топологии.
Окно статуса	В этом окне отображается ход выполнения моделирования и возникающие ошибки.

- группа отображения результатов анализа (Graphs);
- группа целей оптимизации (Optimizer Goals);
- группа целей статистического анализа (Yield Goals);
- список выходных файлов (Output Files);
- группа мастеров (Wizards);

- группа папок, которые может создавать пользователь (User Folders) для группирования и хранения отдельных частей проекта (схемы, графики и т.д.) в сложных проектах.

Чтобы раскрыть группу, содержащую подгруппы, нужно щёлкнуть мышкой по значку “+” слева от группы. У раскрытой группы значок “+” меняется на “–”, щелчок мышкой по которому сворачивает группу.

Щелчок правой кнопкой мышки по любой группе или модулю, а также по любому объекту проекта, открывает контекстные меню, предлагающие на выбор список возможных дальнейших действий.

Контекстное меню, появляющееся при щелчке правой кнопкой мышки по элементу, даёт возможность изменить отображение элементов в окне, а также содержит команду вызова справки об этом элементе.

Группа отображения результатов анализа на вкладке Project предлагает наглядную демонстрацию результатов расчета на диаграммах различного типа в зависимости от выбранного типа анализа.

Здесь возможно простое отображение S-параметров схем на диаграммах Смита, графиках в прямоугольных и полярных координатах, а также более сложная прорисовка форм и спектров сигналов в различных точках схемы или диаграмм направленности антенн, да еще и в диапазоне частот.

Заметим также, что именно эта группа, совместно с используемыми моделями элементов и сигнальных портов, является определяющей при выборе того метода анализа, который будет использоваться в вашем проекте. Кроме того, в одном проекте могут комбинироваться различные методы анализа, а их результаты отражаться на одних и тех же графиках.

Группа оптимизации содержит список назначенных целей оптимизации текущей схемы. Под целью оптимизации здесь подразумевается некоторая граница изменения какой-либо характеристики анализируемой схемы, к которой должен стремиться выбранный метод оптимизации при изменении определенных параметров элементов.

Каждая введенная цель оптимизации сразу же отображается на соответствующем графике, что позволяет в последующем легко проверить ее параметры, а также легко изменить их тут же на графике с помощью мышки.

Заметим, что оптимизация и настройка не работают в электромагнитном моделировании, которое позволяет выполнить анализ созданной топологии на электродинамическом уровне, если только электромагнитная структура создана вручную, а не получена с помощью экстракции (т.е. извлечения) из имеющейся в проекте схемы.

Электромагнитная структура представляет собой набор проводящих и резистивных полигонов, а также межслойных соединений произвольной геометрической формы. Она может анализироваться в решающих устройствах (симуляторах) EMSight, AXIEM или в решающих устройствах сторонних производителей. Если используется EMSight, структура анализируется внутри ограниченной многослойной области прямоугольной формы. Боковые границы этой области всегда идеально проводящие, а верхняя и нижняя границы могут быть зада-

ны тремя различными способами: проводящая поверхность с потерями (или без них), эквивалент открытого пространства и бесконечного волновода. Количество анализируемых слоев, межслойных соединений и внешних портов теоретически неограниченно. В АХИЕМ боковые стенки отсутствуют.

Графические возможности модуля электродинамического анализа позволяют пользователю наблюдать цветное трехмерное анимационное изображение токов высокой частоты, на котором отображается не только амплитуда, но и направление этих токов.

На вкладке Elements отображается дерево используемых библиотек "защитных" моделей элементов построения схематических модулей: портов, источников, сосредоточенных и распределенных, линейных и нелинейных, идеальных и неидеальных элементов, а также внешних импортируемых библиотек моделей и подсхем. Все модели объединены в соответствующие группы, содержание которых отображается в нижней части окна. Добавление того или иного элемента в схему проекта производится привычным методом Drag-and-Drop (возьми-и-брось), а редактирование параметров – или в списке прямо на схеме, или в специальном диалоговом окне, открывающемся при двойном щелчке по элементу.

Панели инструментов можно перемещать на другое место обычным, принятым в Windows способом, установив курсор на начало панели так, чтобы он отображался в виде скрещенных стрелок (рис. 1.3), и нажав левую кнопку

мышки. Если щёлкнуть по значку **Toolbar Options** в конце панели инструментов, то можно добавить новые или удалить имеющиеся значки.

По умолчанию тип открытых панелей инструментов и их содержимое зависит от имеющихся в проекте рабочих окон. Обычно это бывает достаточным для моделирования. Но при необходимости можно добавить или убрать какие-то панели, используя вкладку **Toolbars** окна **Customize** (рис. 1.5). Щёлкнув по кнопке **New**, вы можете создать собственную панель инструментов.

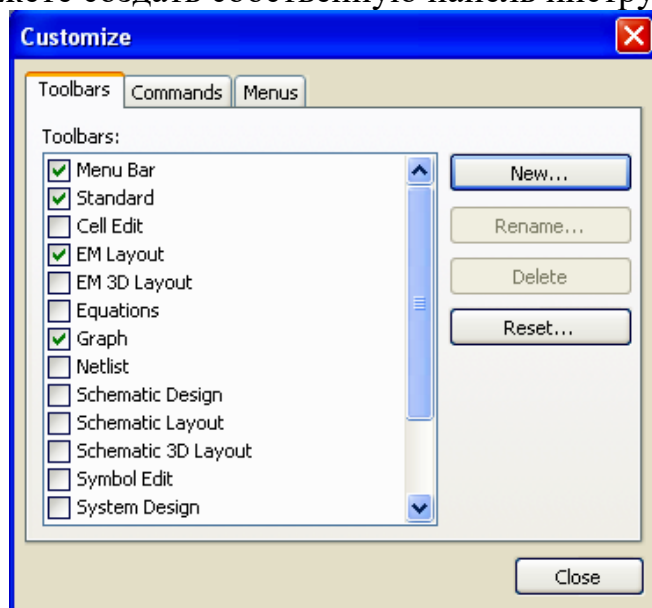


Рис. 1.1 – Использование вкладки **Toolbars** окна **Customize**

В Microwave Office можно создавать копии схемы, электромагнитной структуры или графика. Для этого нужно просто перетащить мышкой имя соответствующего окна на имя соответствующей группы в окне просмотра проекта. Например, чтобы создать копию схемы, нужно перетащить её имя на имя группы **Circuit Schematics**. По умолчанию копии присваивается то же самое имя с добавлением номера копии. Например, копия схемы с именем **Schematic 1** получит имя **Schematic 1_1**. Созданная копия является новым самостоятельным документом проекта. Она появляется в окне просмотра проекта, её можно редактировать независимо от первоисточника, её можно анализировать и её характеристика отображается на графике.

В некоторые диалоговые окна введена фильтрация текста для облегчения поиска. Например, если вы хотите просмотреть какой-то пример, выберите в меню **File>Open Example**. Откроется диалоговое окно со всеми имеющимися примерами (рис. 1.12). Щёлкая мышкой по заголовку столбца **Name**, вы можете сортировать в этом столбце имена примеров в алфавитном или обратном алфавитном порядке. То же самое можно сделать и в столбце ключевых слов **Keyword**. В поле ввода в нижней части окна вы можете ввести текст для фильтрации, например **filter**, если хотите найти пример моделирования фильтров. В списке останутся только примеры фильтров. Или можете ввести ключевое слово, например **MWO**, чтобы оставить в списке только примеры MWO, или ключевое слово **new**, чтобы оставить в списке только новые примеры.

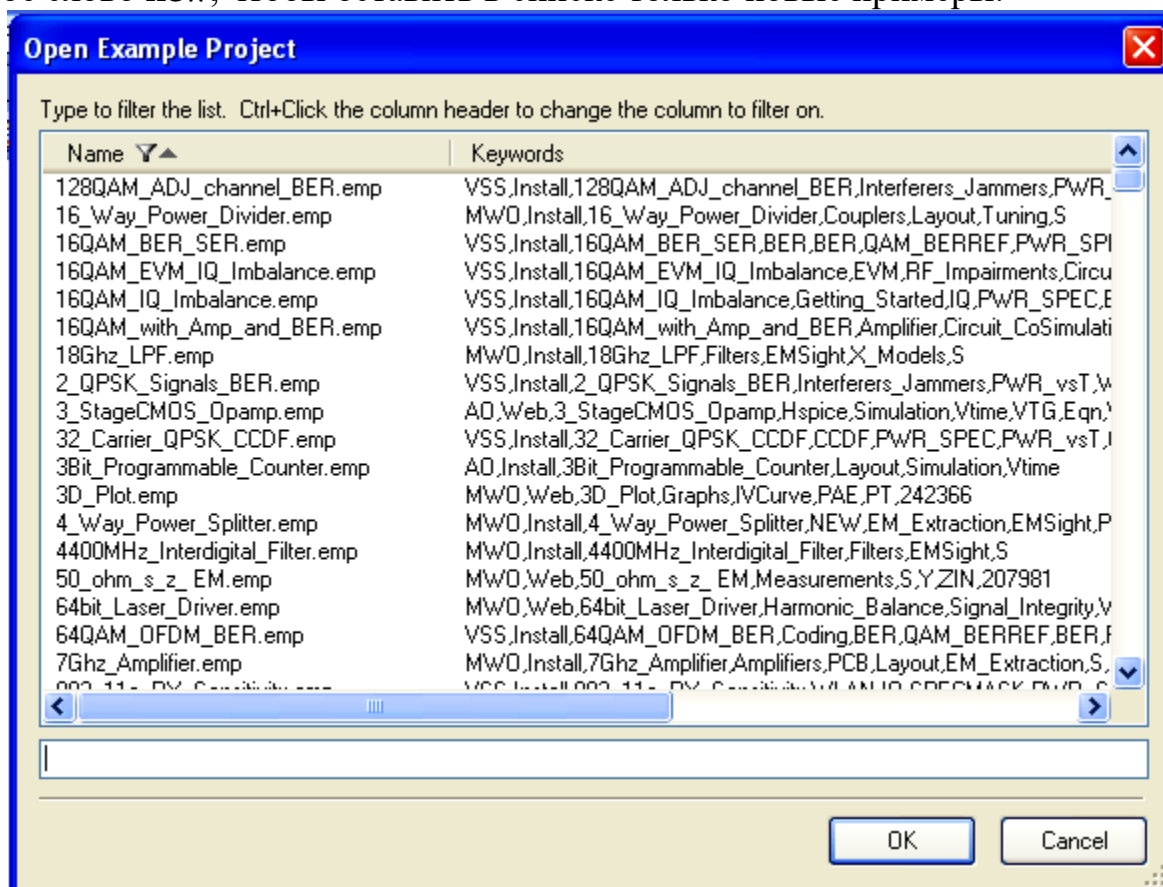


Рис. 1.2 – Окно выбора примеров

В нижней части выпадающего меню File имеется перечень ранее открытых проектов, откуда их можно загрузить. Но количество таких проектов огра-

ничено. Можно открыть один из предыдущих проектов и другим способом, выбрав в меню File>More Projects. Откроется окно со списком предыдущих проектов. Выберите нужный проект и нажмите ОК.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 ОДНОШЛЕЙФНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С НАГРУЗКОЙ

Цель работы: изучение правил работы с диаграммой Вольперта-Смита и метода согласования линии передачи с нагрузкой при помощи параллельного разомкнутого шлейфа.

Краткие теоретические сведения

Процесс настройки линии в режим бегущей волны называют *согласованием*, а линию, в которой установился режим бегущей волны, – *согласованной* (англ. – *matched line*).

На практике используют несколько методов согласования волнового сопротивления линии с сопротивлением нагрузки.

Чтобы достичь согласования между двумя линиями или линией и нагрузкой, необходимо включить *согласующий четырехполюсник*. Назначение этого четырехполюсника – устранение отраженной волны, то есть преобразование нормированного сопротивления нагрузки $\dot{Z}_n / W = \dot{z}_n = r_n + jx_n$ в нормированное сопротивление $\dot{z}_{ex} = 1 + j0$. Такая трансформация может быть осуществлена двумя принципиально разными способами. Согласно одному из них используют четырехполюсник с поглощением. Генератор и нагрузка развязаны, так как КСВ в линии практически не зависит от КСВ нагрузки. Такой четырехполюсник называется развязывающим аттенуатором. Его КПД очень мал. Другой путь связан с использованием реактивного четырехполюсника. С физической точки зрения полезный эффект достигается за счет использования явления интерференции, когда совокупность отраженных волн компенсирует друг друга. Именно такой четырехполюсник получил название *трансформатора сопротивлений* (англ. – *impedance transformer*).

Узкополосное согласование предусматривает достижения режима бегущей волны на одной расчетной частоте. В случае отклонения от расчетной частоты имеет место возрастание КСВ. Полоса частот, для которой КСВ не превышает допустимого значения, называется *полосой частот согласования*. В случае узкополосного согласования полосу частот не контролируют при вычислении номиналов элементов согласующего устройства и определяют расчетным путем или экспериментально только после нахождения номиналов согласующих элементов. Альтернативой узкополосному является *широкополосное согласование*, при котором номиналы согласующих элементов определяют из условия установления максимальной полосы частот согласования. В случае широкополосного согласования требование достижения единичного значения КСВ на расчетной частоте отсутствует и не служит основой для расчета номи-

налов согласующих элементов. При этом относительное значение полосы согласования $\Delta f / f_0$ в случае узкополосного согласования может быть достаточно большим, термин “узкополосный” означает лишь технологию согласования. Исходя из общих принципов, очевидно, что полоса согласования тем уже, чем больший скачок сопротивлений, которые должны быть согласованы, имеет место быть.

Возможность реализации любых значений индуктивности и емкости с помощью короткозамкнутых шлейфов (рис. 1.1) и шлейфов в режиме холостого хода обуславливает их широкое использование для создания согласующих схем. Важное преимущество шлейфов – способность изменения их длины, то есть значения сопротивления. В волноводных линиях передачи реализация реактивного разомкнутого шлейфа невозможна.

Расстояние от нагрузки до точки включения шлейфа l_1 и необходимую его длину l_2 можно легко найти с помощью диаграммы полных сопротивлений или специального программного обеспечения. В согласующей схеме (рис. 1.1) одиночный шлейф, подключенный параллельно основной линии передачи. В связи с этим весь расчет удобно проводить в терминах проводимостей. С помощью шлейфа можно согласовать комплексную нагрузку с линией или генератором. Согласование имеет место, если шлейф подключить на таком расстоянии l_1 от нагрузки, на котором входная нормированная проводимость линии имеет значение $\dot{y}_{ex} = 1 \pm j\hat{b}$.

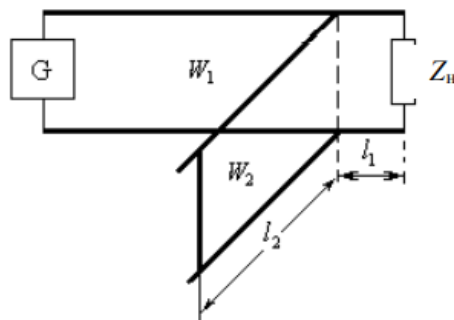


Рис. 1.1 – Схема согласования с помощью параллельного короткозамкнутого шлейфа

Проводимость шлейфа выбирается исходя из условия компенсации реактивной составляющей $\pm jB$ проводимости $\dot{Y}_{ex}$, что достигается подбором длины шлейфа l_2 . Если основная линия и линия, из которой изготовлен шлейф, имеют одинаковые параметры, в том числе волновое сопротивление, то достаточно достигнуть равенства для нормированных значений проводимости. Если шлейф имеет другое волновое сопротивление, то необходимо денормировать $\dot{y}_{ex} = 1 \pm j\hat{b}$, то есть рассчитать значение физической проводимости, провести ее нормировку на волновое сопротивление линии передачи, из которой выполнен шлейф, и найти его необходимую длину для нового значения нормированной проводимости.

Согласования можно достичь одновременным использованием параллельного шлейфа, который компенсирует реактивную компоненту сопротивления, и четвертьволнового трансформатора для согласования активной компоненты сопротивления. Преимущество такого подхода заключается в том, что трансформатор и шлейф будут расположены в фиксированных точках. Поскольку на первом этапе подключают параллельно реактивный шлейф, необходимо перейти к рассмотрению проводимости вместо сопротивления. При этом значение активной составляющей проводимости в общем случае не равно обратному значению активной составляющей сопротивления нагрузки. После чего используют традиционную схему согласования с помощью четвертьволнового трансформатора.

Задание к расчетной части

1. По данным таблицы 1.1 рассчитать по диаграмме Вольперта-Смита сопротивление нагрузки для двух случаев, соответствующих задачам 1 и 2.

Таблица 1.1

Данные для расчета сопротивления нагрузки

Последняя цифра студ. билета	КБВ	Задача №1		Задача №2	
		смещение $\Delta l/\Lambda$	Направление смещения	смещение $\Delta l/\Lambda$	Направление смещения
0	0,7	0,1	К генератору	0,21	К нагрузке
1	0,2	0,08		0,16	
2	0,1	0,12		0,18	
3	0,15	0,16		0,2	
4	0,3	0,18		0,24	
5	0,2	0,2		0,08	
6	0,25	0,24		0,12	
7	0,2	0,04		0,15	
8	0,3	0,02		0,04	
9	0,6	0,13		0,09	

2. Используя данные, полученные в пункте 1, рассчитать нормированное входное сопротивление линии в пределах полуволны с шагом $0,05\Lambda$ от нагрузки в сторону генератора. Заполнить таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Зависимость активной R' и реактивной X' составляющей нормированного входного сопротивления от величины относительного смещения

$\Delta l/\Lambda$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
R'											
X'											

3. По данным таблицы 1.2 построить графики активной и реактивной составляющих нормированного входного сопротивления.

Порядок выполнения работы

1. Выберем в качестве нагрузки RLC-цепь, резонансная частота которой лежит в области 1 ГГц. Параметры RLC-цепи выбираются по указанию преподавателя (последняя цифра студенческого билета) из таблицы 1.3.

Таблица 1.3

Выбор параметров RLC-цепи

Номер варианта	L, нГн	C, пФ	R, Ом
1	4	5	100
2	5	4	200
3	2,5	8	150
4	10	2	100
5	20	1	50
6	8	2,5	200
7	1	20	150
8	7	3	100
9	2	10	150
10	3,3	6	50

Далее открывается программа AWR Design Enviroment и в меню **File** выбираем **New Project**. Выбираем в меню **Project>Add Schematics>New Schematics**. В появившемся окне вводим название схемы – фамилию одного из студентов бригады, например, **Yarlykov**, после чего появляется окно, в котором необходимо построить схему RLC-цепи. Рассмотрим схему цепи (рис. 1.2). Схема строится из элементов, находящихся в закладке **Elements**, доступной в левой нижней части экрана. Все необходимые элементы находятся в категории **Lumped Elements** (сосредоточенные элементы), щелкнув по которой открываем их список. Из списка **Inductor** выбираем элементы **IND**, **Capacitor** – **CAP**, **Resistor** – **RES**. При задании конденсатора потребуется изменить размерность емкости в «пикофарады». Для этого на верхней панели выберите **Options>Project Options**, на вкладке **Global Units** выберите в окошке **Capacitance** – **pF**. В том же окне для удобства отображения выберите **Frequency** – **GHz**. Элементы соединяются с помощью мыши и курсора в виде пружинки. После того как схема собрана, к ней подсоединяется порт, находящийся в категории **Port** (или в виде значка в разделе элементов, наверху справа). Щелкнув по значку порт, выбираем **PORT**. Так же необходимо присоединить значок «земли» – **Ground** (находится рядом со значком порта).

2. Далее необходимо измерить вещественную и мнимую части проводимости порта в диапазоне от 0,8 ГГц до 1,2 ГГц. Для этого в меню **Options>Project Options** в открывшемся окне на закладке **Frequencies** устанавли-

ваем **Start** = 0,8, **Stop** = 1,2, **Step** = 0,01, выбираем пункт **Replace** нажимаем на кнопки **Apply**>**OK**. Далее в меню **Project**>**Add Graph** добавляем первый график **Graph 1**, затем там же: **Add Measurements** и в открывшемся окне указываем **Linear/ Port Parameter**, затем выделяем **Y**, снизу выбираем в выдвигающемся меню **Simulator**>**APLAC Linear**, в окошках справа устанавливаем (сверху вниз) «Имя схемы», **1, 1, Use for x-axes**, ставим точку в кружке **Real** и нажимаем кнопку **Add**. Затем ставим точку в кружке **Imag** и нажимаем кнопку **OK**. Запускаем расчет параметров нажатием на кнопку **Analyze** на верхней панели (с желтой молнией). Нажатием на правую кнопку мыши на графике вызываем маркер (**Add marker**), с помощью которого можно точно измерить проводимости на заданной частоте, щелкая по кривым проводимостей. По указанию преподавателя выбираем частоту (обычно 1 ГГц). В разобранный пример вещественная часть проводимости равна 0,04592 См, а мнимая часть 0,05402 См. Вид графика показан на рис. 1.3.

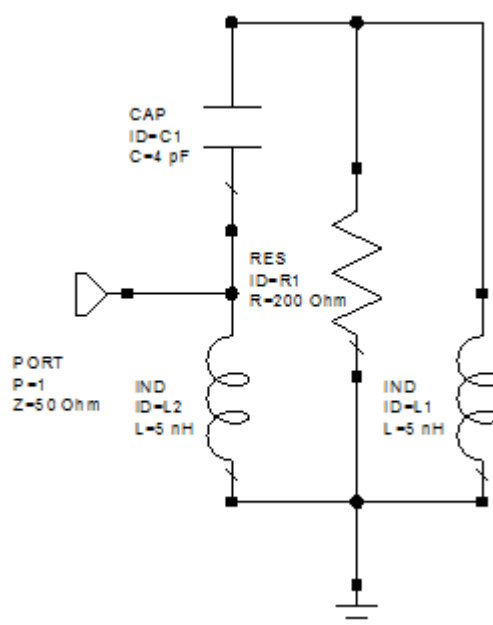


Рис. 1.2 – Схема RLC-цепи

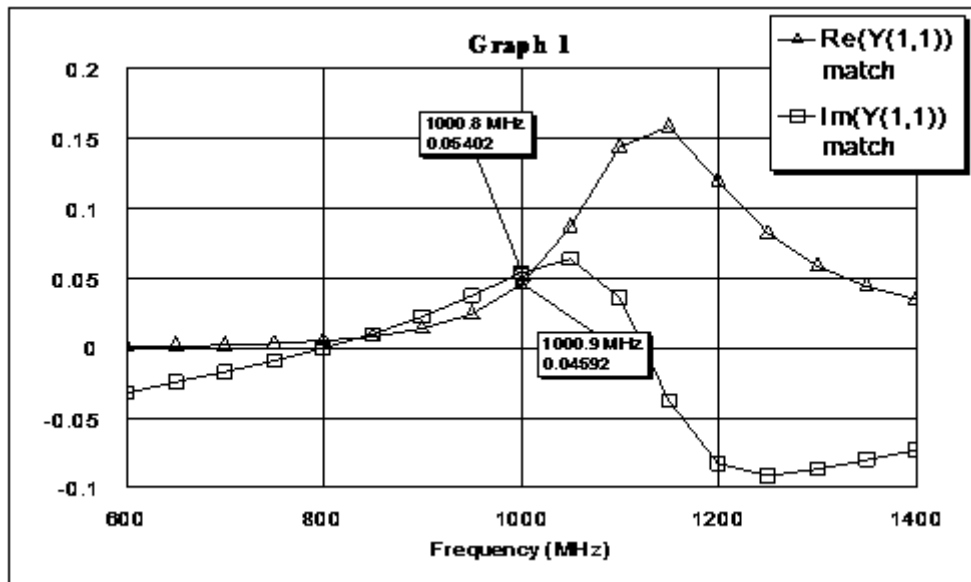


Рис. 1.3 – График активной и реактивной составляющих вблизи 1 ГГц

3. Для использования «бумажной» диаграммы Вольперта-Смита необходимо нормировать эти проводимости. Так как далее будут использоваться для согласования отрезки ЛП с волновым сопротивлением $W = 50$ Ом, нормирование сводится к делению полученных проводимостей на значение $Y_{\text{д}} = 0,02$ См. **Исходная точка** проводимости $y_{\text{н}} = 2,296 + j2,701$. Она располагается в нижней правой половине диаграммы Вольперта-Смита. Проведем из центра диаграммы через эту точку прямую до пересечения с внешней окружностью (шкалой «Длины волн к генератору»). Также проведем через эту точку окружность с центром в точке, соответствующей нормированному сопротивлению нагрузки $z_{\text{н}} = 1 + j0$ (центру окружности). Эта окружность называется окружностью постоянного КБВ. Затем найдем **точку пересечения** данной окружности с единичной окружностью, которая проходит через точку $z_{\text{н}} = 1 + j0$. Таких точек две – выберем ту, которая будет первой при увеличении длины волны в сторону генератора (по часовой стрелке от исходной). Проведем через **исходную точку** и **точку пересечения** из центра прямые до внешней окружности (шкалы «Длины волн к генератору»). Длина дуги Δl (определяется по внешней шкале диаграммы Вольперта-Смита), образованной между двумя точками пересечения определяет расстояние от нагрузки до точки, где необходимо включить шлейф для согласования. Для данного примера она равна 35° и определяется по формуле $360^\circ \Delta l / \lambda$.

4. Теперь включим трансформирующий отрезок линии в данную схему. Для этого щелкнем левой клавишей мыши по проводу, соединяющему порт с RLC-схемой (на проводе появится квадратик), а затем нажмем на клавишу клавиатуры **Delete**. На место исчезнувшего провода вставим отрезок линии, взятый из **Elements>Transmission Lines>Coaxial>Electrical**. Возьмем линию **COAX2** (внешний проводник линии заземлен) и присоединим ее между портом и схемой. Далее щелкнем по линии и в открывшемся окне введем электрическую длину (в данном случае 35°) и частоту (1000 MHz). Волновое сопротивление

ние линии должно равняться волновому сопротивлению порта – 50 Ом. Теперь необходимо проверить величину проводимости на входе линии **CX1**. Щелкнем по желтой молнии и на том же графике получаем кривые проводимостей при наличии трансформирующей линии, приведенные на рис. 1.4.

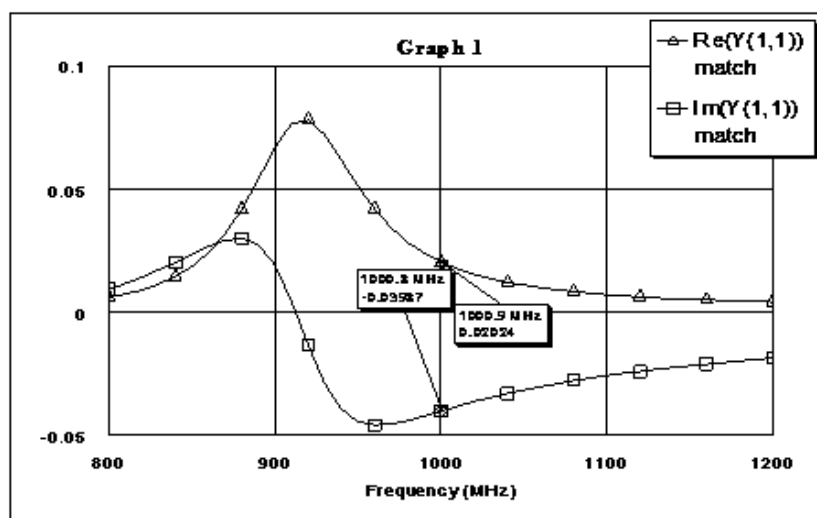


Рис. 1.4 - График активной и реактивной составляющих при наличии шлейфа

На частоте 1 ГГц вещественная часть проводимости равна 0.02024 См, т. е. практически равна волновой проводимости. Таким образом нормированная активная составляющая проводимости нагрузки $g = 1$.

5. Далее необходимо оценить реактивную проводимость в точке согласования по графику. В данном случае (рис. 1.4) она будет отрицательной и ее абсолютное значение около -0.04 См. Рассчитываем нормированное значение так же как в п.3 (нормированное значение равно -2). Так как эта проводимость отрицательна, то она носит индуктивный характер и ее надо **компенсировать** емкостной реактивностью такого же абсолютного значения. Емкостной реактивностью обладает отрезок ЛП длиной менее четверти длины волны, разомкнутый на конце (нагрузкой при холостом ходе будет нулевая проводимость). Для определения длины отрезка необходимо взять точку с **реактивной проводимостью**, обратной по величине проводимости, найденной ранее (нормированная проводимость равна 2) на диаграмме Вольперта-Смита. Для определения длины отрезка необходимо провести из центра диаграммы прямую через полученную точку и определить длину дуги Δl_1 , соответствующую значению по шкале «длины волн к генератору» (в данном случае она равна 63.5°). Затем берем такую же линию **COAX2** и один ее конец присоединяем к проводнику между портом и первой линией (второй конец линии остается свободным), устанавливаем угол для этой линии и частоту (1000 MHz) в ее окне. Схема с установленными линиями показана на рис. 1.5.

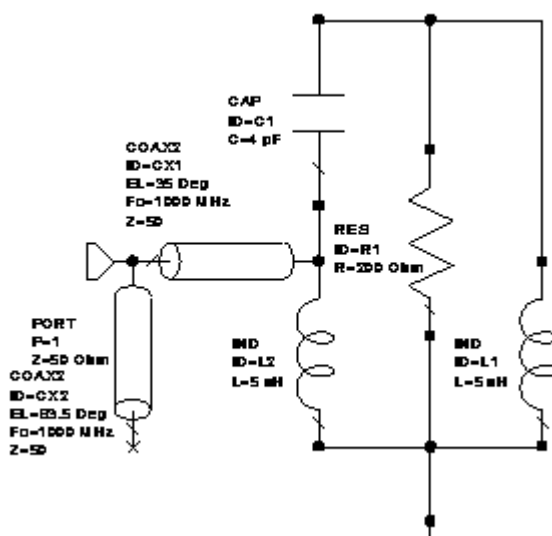


Рис. 1.5 – Схема с подключенным параллельным разомкнутым шлейфом

6. Теперь необходимо проверить наличие согласования на частоте 1 ГГц. Для этого опять щелкнем по желтой молнии и в результате получаем график рис. 1.6.

На частоте 1 ГГц вещественная часть проводимости не изменилась, а мнимая практически равна нулю, а следовательно и нормированная реактивная составляющая также равна нулю. Для оценки полосы согласования создадим график **Graph 2** (п.2) и зададим измерение модуля коэффициента отражения S_{11} . Для этого вызовем окно используя **Add new measurement Measurements** вместо **Y** выберем **S, Mag** и **dB**, нажмем **OK**. Для запуска моделирования нажмем кнопку **Analyze** и получим график рис. 1.7.

С помощью маркеров определим полосу согласования по уровню -20 дБ (при этом на краях полосы отражается одна сотая часть падающей мощности, а в точке 1000 МГц отражается только около одной десятичной ее доли).

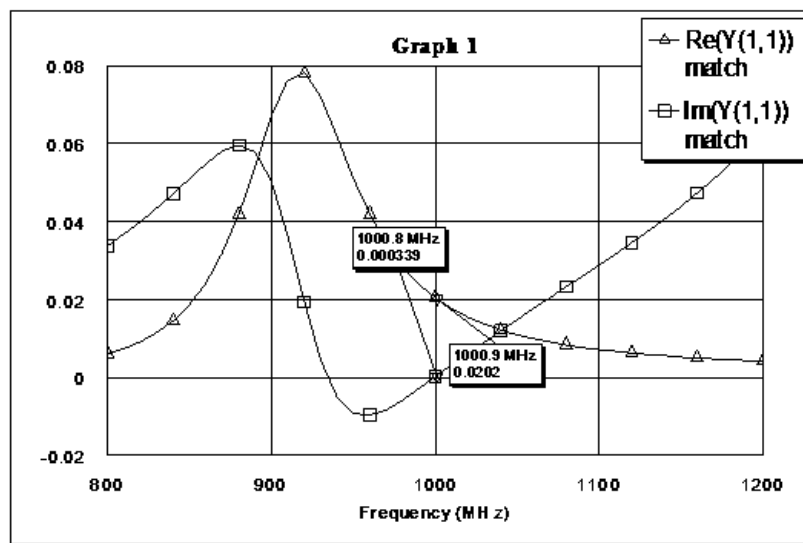


Рис. 1.6 – Графики активной и реактивной составляющих проводимости нагрузки при согласовании параллельным разомкнутым шлейфом

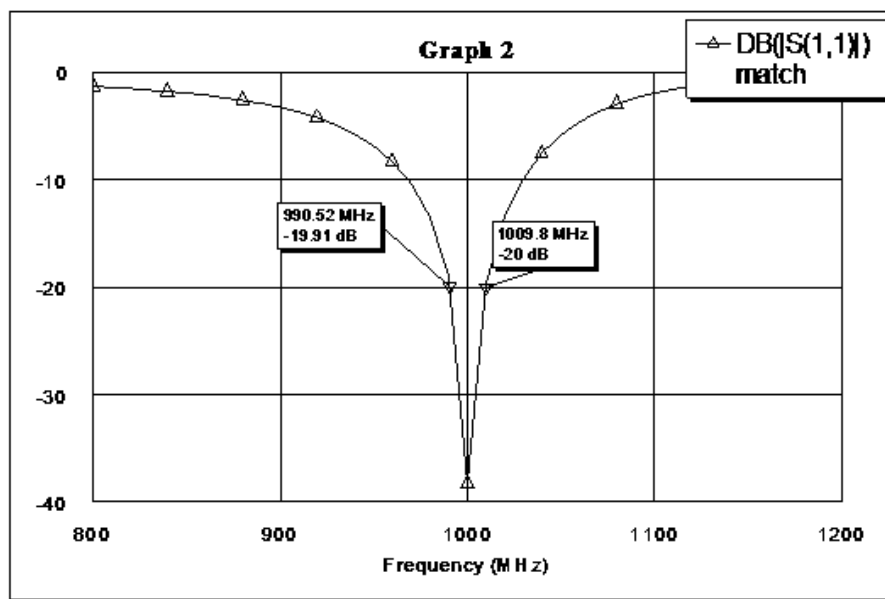


Рис. 1.7 – График зависимости коэффициента отражения от частоты

Требования к отчету

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально.

Структура отчета следующая:

- титульный лист, оформленный в соответствии с приложением 1 данного пособия;
- подробное решение и ответ расчетного задания к лабораторной работе в соответствии с выбранным преподавателем вариантом;
- результаты экспериментальной части, включающие схему нагрузки с согласующим элементом, графики составляющих проводимости до согласования, после выбора положения шлейфа и после согласования, график зависимости коэффициента отражения от частоты, расчет полученной полосы согласования, выводы по каждому графику;
- минимум 6 выводов о полученных результатах лабораторной работы.

Общие требования к отчету: Отчет оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 2.105-2019 «ЕСКД. Общие требования к текстовым документам».

Отчет должна быть выполнен с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги форматом А4 через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, цифр и других знаков - 2,0 мм (шрифт Times New Roman, кегль 14). Выравнивание текста – по ширине страницы.

Текст отчета следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм.

Страницы отчета следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту ПЗ. Номер страницы проставляют в центре нижней части листа без точки.

Титульный лист включают в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляют.

Иллюстрации (чертежи, карты, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать в ПЗ непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице. При этом необходимо соблюдать полное заполнение каждой страницы. В случае автоматического переноса рисунка на следующую страницу, предыдущую необходимо заполнить текстом, следующим за рисунком.

Таблицы применяют для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей. Название таблицы должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другую страницу. При переносе части таблицы на другую страницу слово «Таблица», ее номер и наименование указывают один раз слева над первой частью таблицы, а над другими частями также слева пишут слова «Продолжение таблицы» и указывают номер таблицы. Допускается применять размер шрифта в таблице меньший, чем в тексте.

Все формулы и специальные знаки должны быть набраны в редакторе MathType. Формулы и уравнения рекомендуется выделять из текста в отдельную строку. Выше и ниже каждой формулы или уравнения должно быть оставлено не менее одной свободной строки. Если уравнение не уместится в одну строку, то оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знаков плюс (+), минус (–), умножения ($\times$), деления ($:$) или других математических знаков, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак « $\times$ ».

Пояснение значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они даны в формуле. Для этого в конце формулы ставится запятая, пропускается строка и с новой строки без абзацного отступа пишется слово «где» и идут пояснения всех нововведенных символов в формуле.

Формулы в ПЗ следует нумеровать порядковой нумерацией в пределах всей ПЗ арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке. Сама формула должна располагаться по центру строки.

Для защиты отчет необходимо распечатать каждому студенту индивидуально.

Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент отражения, коэффициент бегущей волны и от чего они зависят?
2. Согласовать нагрузку Z на длине волны Λ с волновым сопротивлением линии W с помощью параллельного короткозамкнутого шлейфа.

3. Согласовать нагрузку Z на длине волны Λ с волновым сопротивлением линии W с помощью параллельного разомкнутого шлейфа.
4. Согласовать нагрузку Z на длине волны Λ с волновым сопротивлением линии W с помощью четвертьволнового трансформатора.
5. От чего зависит длина волны в волноводе?
6. Из каких соображений производится согласование сопротивления нагрузки с волновым сопротивлением линии?
7. В чем состоит метод согласования линии с помощью реактивного штыря?
8. В чем состоит метод согласования линии с помощью четвертьволнового трансформатора?
9. Цели согласования.
10. Назовите известные способы согласования нагрузки с линией.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО АТТЕНЮАТОРА

Цель работы: изучить принципы работы N-полюсных устройств СВЧ на примере линейного и электромагнитного моделирования микрополоскового аттенюатора на резисторах в САПР Microwave Office.

Краткие теоретические сведения

Аттенюатор (англ. – *attenuator*) – это взаимный четырехполюсник, который ослабляет амплитуду электромагнитной волны на некоторую фиксированную или регулируемую величину. Аттенюаторы (ослабители) предназначены для управления (уменьшения) мощности волны, которая проходит вдоль линии передачи. Идеальным аттенюатором является четырехполюсник с нулевым вносимым фазовым сдвигом и механически или электрически регулируемым ослаблением.

Аттенюаторы применяются в схемах СВЧ приемников для установки уровня сигнала в смесителе путем регулирования мощности гетеродина, в измерительной технике их применяют для обеспечения необходимого уровня сигнала в разнообразных измерительных приборах (измерительная линия, волномер, измеритель мощности некоторого высокого уровня и др.). Ослабление сигнала необходимое, в частности, для обеспечения развязки между генератором и нагрузкой, то есть для исключения влияния нагрузки на мощность и частоту колебаний генератора. Аттенюаторы применяются также для согласования СВЧ устройств, уровней сигналов.

Матрица рассеяния идеального фиксированного аттенюатора имеет вид

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-a} \\ e^{-a} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

где $a = 10^{(A/20)}$; $A = -10 \lg(P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}) = -20 \lg |\dot{s}_{21}|$ – ослабление в децибелах.

Нулевое значение диагональных элементов свидетельствует о том, что аттенюатор должен быть согласованным с обоих плеч. Ослабление A в рабочей полосе частот должно оставаться постоянным, а фазовый сдвиг φ – пропорциональным частоте. Для регулируемого аттенюатора φ не должен зависеть от установленного ослабления A .

Основными параметрами переменных аттенюаторов являются диапазон и точность изменения вносимого ослабления, КСВ, рабочая полоса частот, погрешность установки ослабления, допустимая рассеиваемая мощность.

В *предельных* (англ. – *cutoff*) переменных аттенюаторах используется явление экспоненциального ослабления волн в режиме отсечки $|E(l)| = |E_0| \exp(-\alpha l)$. При $\lambda \gg \lambda_{\text{кр}}$ коэффициент затухания $\alpha \approx 2\pi / \lambda_{\text{кр}}$, то есть он практически не зависит от частоты. Это можно доказать следующим образом. Постоянную распространения в линии передачи $\gamma = \alpha + j\beta$ можно представить в виде

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\Lambda} = j \left(\frac{2\pi}{\Lambda} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}, \quad (2.2)$$

где $\Lambda = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{\text{кр}})^2}$ – длина волны в линии передачи.

На частотах таких, что $\lambda > \lambda_{\text{кр}}$, выражение под корнем в (2.2) станет отрицательным, вследствие этого

$$\alpha = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2 - 1} \approx \frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}}; \beta = 0. \quad (2.3)$$

Теперь ослабление можно представить в виде

$$A = -20 \lg \exp(-\alpha L) = 20 \alpha L \lg e \approx 8,68 \alpha L. \quad (2.4)$$

Из (2.4) видно, что вносимое ослабление практически линейно зависит от длины волновода, который работает в режиме отсечки. На рис.2.1 схематически изображены варианты предельных аттенюаторов для коаксиальной линии. Для согласования по входу и выходу аттенюатор с емкостной связью (рис.2.1,а) оснащен диэлектрическими шайбами. В аттенюаторе с индуктивной связью (рис.2.1,б) в разрывы центрального проводника включены резисторы с сопротивлением, равным волновому сопротивлению коаксиальной линии. Регулирование ослабления осуществляют осевым перемещением линий. Главным недостатком предельных аттенюаторов является большое начальное ослабление из-за потерь в согласующих элементах. Кроме того, в случае малого расстояния между элементами связи вносимое ослабление изменяется нелинейно из-за присутствия высших типов колебаний возле возбуждающих элементов. Поэтому начальное расстояние между элементами связи выбирают таким, чтобы со-

ответствующее ослабление составляло 15–30 дБ, а верхнее граничное значение ослабления превышало 100 дБ.

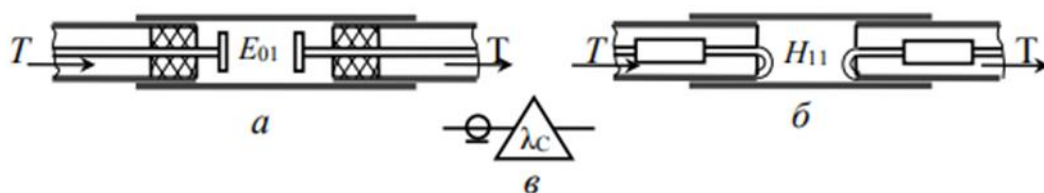


Рис. 2.1 – Коаксиальные аттенюаторы предельного типа: а – с емкостной связью; б – с индуктивной связью; в – обозначение на схемах

Принцип действия аттенюаторов поглощающего (англ. – absorptive) типа основан на внесении в отрезок линии поглощающих тел (пластин). Перемещение этих пластин из области слабого электрического поля в область сильного позволяет изменять затухание. На рис.2.2,а изображен волноводный аттенюатор с поглощающей пластиной. Пластина закреплена на тонком стержне из диэлектрика. Стержень связан с механизмом, который обеспечивает перемещение пластины в поперечном сечении волновода. Ослабление таких аттенюаторов может изменяться от 0,5 до 50 дБ.

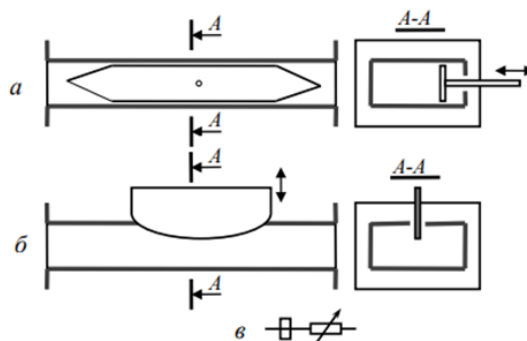


Рис. 2.2 – Аттенюаторы поглощающего типа: а – с поглощающей пластиной; б – ножевого типа; в - обозначение на схемах

На рис.2.2,б изображен аттенюатор ножевого (англ. – fin, flap) типа. В нем поглощающая пластина вводится в волновод через продольную щель в середине широкой стенки прямоугольного волновода. Такая щель не пересекает поперечные токи, которые текут в стенках волновода с волной H_{10} , потому она практически не излучает. Основной недостаток аттенюаторов поглощающего типа состоит в зависимости фазового сдвига от внесенного ослабления.

Аттенюатор *поляризационного* (англ. – *polarization*) типа состоит из трех секций (рис.2.3,а), причем крайние секции I и III являются переходами от прямоугольного волновода к круглому и закреплены неподвижно. Средняя секция II представляет собой отрезок круглого волновода. Она может вращаться вокруг продольной оси. Каждая секция содержит поглощающие пластины с поверхностным сопротивлением в несколько сотен ом на квадратный сантиметр. В крайних секциях пластины размещены параллельно широким стенкам волновода и служат соответственно в качестве фильтра и поляризатора. Волна H_{10}

прямоугольного волновода в секции *I* трансформируется в волну H_{11} круглого волновода. Ее можно разложить на две составляющие, как это показано на рис.2.3,б. Составляющая вектора электрического поля, параллельная поглощающей пластине секции *II*, поглощается. Другая составляющая, которая равна $E_0 \cos \varphi$, перпендикулярна плоскости пластины и проходит секцию *II* с минимальными потерями.

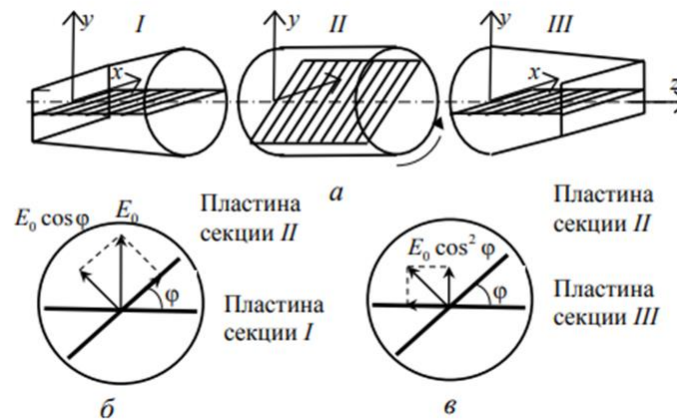


Рис. 2.3 – Атенюатор поляризационного типа: а – конструкция; б – поле на входе; в – поле на выходе

В секции *III* волну с амплитудой $E_0 \cos \varphi$ можно также разложить на две составляющие, одна из которых, равная $E_0 \cos^2 \varphi$, перпендикулярна пластине секции *III* (рис.2.3,в) и проходит без ослабления в секцию *III*, а вторая, параллельная пластине, поглощается. Таким образом, ослабление, которое вносится аттенюатором, можно записать в виде

$$A = A_0 - 20 \lg(\cos^2 \varphi), \quad (2.5)$$

где A_0 – начальное ослабление при $\varphi=0$.

То обстоятельство, что ослабление, вносимое поляризационным аттенюатором, зависит только от угла поворота пластины φ , который может быть установленный довольно точно, позволяет строить на основании рассмотренного принципа *прецизионные* (англ. – *fine*) аттенюаторы. Поляризационные аттенюаторы, например, сантиметрового диапазона, имеют диапазон изменения ослабления от 1 до 60 дБ при погрешности установки для малых значений ослабления, не более 0,5 дБ, КСВ не превышает 1,15.

Задание к расчетной части

1. Согласно последней цифре студенческого билета описать принцип работы одного из N-полюсников СВЧ, представленных в таблице 2.1.

Таблица 2.1

N-полюсники СВЧ

Последняя цифра студ. билета	N-полюсники СВЧ для описания
0	Тройники Y-типа
1	Тройники E- и H-типа

2	Делитель мощности
3	Фазовращатель
4	Направленный ответвитель
5	Кольцевой резонатор бегущей волны
6	Волноводно-щелевой мост
7	Двойной Т-мост
8	Квадратный мост
9	Турникет

2. Привести матрицу рассеяния устройства, выбранного в пункте 1.
3. Описать области применения выбранного в пункте 1 N-полюсника в СВЧ технике.

Порядок выполнения работы

1. Линейное моделирование микрополоскового аттенюатора на резисторах.

1.1. Сначала нужно создать новый проект. Для его создания выбираем в меню **File>New Project**. Затем **File>Save Project As**. Откроется диалоговое окно **Save As**. Наберите имя проекта в соответствии с фамилией студента из бригады, например, **Yarlykov**, и нажмите **Сохранить**.

1.2. Теперь создадим схему нашего проекта. Щелкните по значку **Add New Schematic** на панели инструментов. Наберите имя схемы **Yarlykov01** и нажмите **OK**.

После этого необходимо добавить элементы нашей схемы. Нажмите панель **Elements** в нижней части левого окна. Щелкните по значку + слева от группы **Microstrip** в окне просмотра элементов. Щелкните по подгруппе **Lines** в окне просмотра элементов. Найдите модель **MLIN**, переместите ее в окно схемы и зафиксируйте, щелкнув левой кнопкой мышки. Затем щелкните по подгруппе **Components** в окне просмотра элементов. Найдите модель резистора **TFR2**, переместите ее в окно схемы, отпустите кнопку мыши, подключите модель к правому выводу элемента **MLIN** и зафиксируйте, щелкнув левой кнопкой мыши. Таких пар **MLIN** и **TFR2** должно быть четыре. Следовательно эти элементы необходимо скопировать. Для этого нажмите клавишу **Shift** и, не отпуская её, щёлкните левой кнопкой мышки по элементам **MLIN** и **TFR2**. Далее щелкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Переместите курсор в окно схемы, подключите скопированные элементы к правому выводу элемента **TFR** и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать их. Данные действия необходимо повторять до тех пор, пока на схеме не получится последовательное соединение четырех пар **MLIN** и **TFR2**. Далее необходимо подключить пятый элемент **MLIN**. Для этого щёлкните по подгруппе **Lines** в окне просмотра элементов. Найдите модель **MLIN**, переместите её в окно схемы и подключите ее к правому выводу последнего элемента **TFR2**. Щелкните по значку **View All** на панели инструментов, чтобы видеть всю схему.

1.3. Теперь необходимо к полученной схеме подключить порты. Для этого щёлкните по значку **Port** на панели инструментов, затем поместите порт на левом конце первого элемента **MLIN**. Далее снова щелкните по значку **Port** на панели инструментов и поместите порт на правом конце последнего элемента **MLIN**, предварительно развернув его на 180° , щелкая правой кнопкой мыши.

1.4. Далее перейдем к заданию размеров элементов, которые выбираются по одному из вариантов таблицы 2.2 по указанию преподавателя. Для задания параметров необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по необходимому элементу и задать необходимые размеры.

1.5. Также необходимо определить параметры подложки. Для начала щелкните по группе **Substrates** в окне просмотра элементов. Перетащите элемент **MSUB** в окно схемы, поместите его на свободном месте, например, ниже схемы.

Дважды щёлкните по элементу **MSUB** в окне схемы. Откроется окно редактирования. Введите следующие параметры подложки: относительная диэлектрическая проницаемость **Er**=10.55, толщина подложки **H**=0.5, толщина проводника **T**=0.005, удельное сопротивление металла проводника, нормированное к золоту **Rho**=1, тангенс угла диэлектрических потерь **Tang**=0.0001.

Таблица 2.2

Параметры полосковых линий и резисторов

Номер варианта	ID=TL1 ID=TL9	ID=TL3 ID=TL7	ID=TL5	ID=TL2 ID=TL8	ID=TL4 ID=TL6
1	W=0.456mm L=2.5mm	W=1.009mm L=2.0mm	W=1.883mm L=1.9mm	W=0.4mm L=0.5mm RS=50	W=0.4mm L=0.2mm RS=50
2	W=0.912mm L=2.5mm	W=2.018mm L=2.0mm	W=3.766mm L=3.9mm	W=0.8mm L=1.1mm RS=50	W=0.8mm L=0.4mm RS=50
3	W=0.456mm L=2.5mm	W=1.009mm L=1.0mm	W=1.883mm L=3.9mm	W=0.4mm L=0.2mm RS=50	W=0.4mm L=0.5mm RS=50
4	W=1.883mm L=1.9mm	W=1.009mm L=2.0mm	W=0.456mm L=5.0mm	W=0.4mm L=0.5mm RS=50	W=0.4mm L=0.2mm RS=50
5	W=0.456mm L=2.5mm	W=0.505mm L=1.0mm	W=0.942mm L=1.9mm	W=0.8mm L=0.5mm RS=100	W=0.8mm L=0.2mm RS=100
6	W=0.912mm L=2.5mm	W=2.018mm L=2.0mm	W=3.766mm L=3.9mm	W=0.8mm L=1.1mm RS=100	W=0.8mm L=0.4mm RS=100
7	W=0.456mm L=2.5mm	W=1.009mm L=1.0mm	W=1.883mm L=3.9mm	W=0.4mm L=0.2mm RS=100	W=0.4mm L=0.5mm RS=100
8	W=1.883mm	W=1.009mm	W=0.456mm	W=0.4mm	W=0.4mm

	L=1.9mm	L=2.0mm	L=5mm	L=0.5mm RS=100	L=0.2mm RS=100
9	W=0.456mm L=2.5mm	W=0.505mm L=1.0mm	W=0.942mm L=1.9mm	W=0.8mm L=0.5mm RS=75	W=0.8mm L=0.2mm RS=75
10	W=0.456mm L=5mm	W=1.009mm L=2.0mm	W=1.883mm L=1.9mm	W=0.4mm L=0.5mm RS=75	W=0.4mm L=0.2mm RS=75

Итоговая схема представлена на рис. 2.4.

1.6. Для того, чтобы провести моделирование работы аттенюатора, необходимо указать диапазон частот, в котором будет проводиться моделирование. Нажмите панель **Project** в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра проекта. Дважды щёлкните по группе **Project Options**. Откроется диалоговое окно. Нажмите **Frequencies**. Наберите 4 в поле **Start**, 18 в поле **Stop** и 1 в поле **Step**, отметьте **Replace**, отметьте **Linear**. Нажмите **Apply**. В окне **Current Range** отображается частотный диапазон и шаг по частоте. Нажмите **OK**.

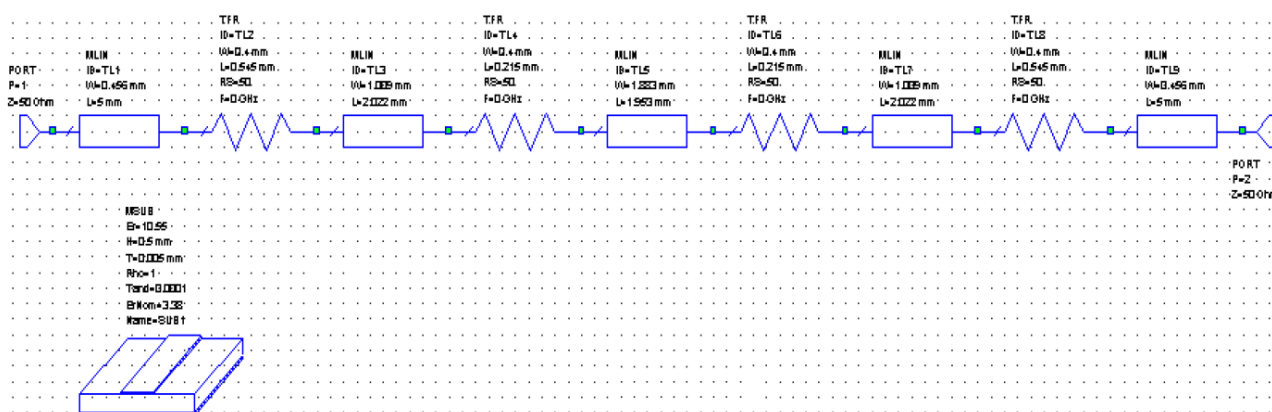


Рис. 2.4 – Итоговая схема микрополоскового аттенюатора с заданными параметрами

1.7. Для визуализации результатов моделирования, которые мы будем получать, необходимо создать график. Для этого щёлкните по значку **Add New Graph** на панели инструментов. Отметьте **Rectangular** и нажмите **OK**.

Теперь необходимо добавить в область графика требуемые измерения. Щёлкните правой кнопкой мышки по подгруппе **Graph 1** в окне просмотра проекта и выберите **Add Measurement**. Выберите **Port Parameter** в списке **Meas. Type**, **S** в списке **Measurement** (будем изменять S-параметры матрицы рассеяния аттенюатора), **Yarlykov01** в поле **Data Source Name**. Введите **1** в полях **To Port Index**, и **From Port Index**. В выдвигном списке **Simulator** выберите **APLAC Linear**. Снизу от этих полей, отметьте **dB** и **Mag** в области **Complex Modifier**, нажмите **OK**.

Теперь у вас имеется измерение параметра $DB|S(1,1)|$. Повторите действия по созданию измерения, введя **2** в поле **To Port Index**, чтобы получить в подгруппе **Graph 1** измерение параметра $DB|S(2,1)|$

Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Analyze** на панели инструментов (желтая молния). Результаты анализа отображаются на графике рис.2.5.

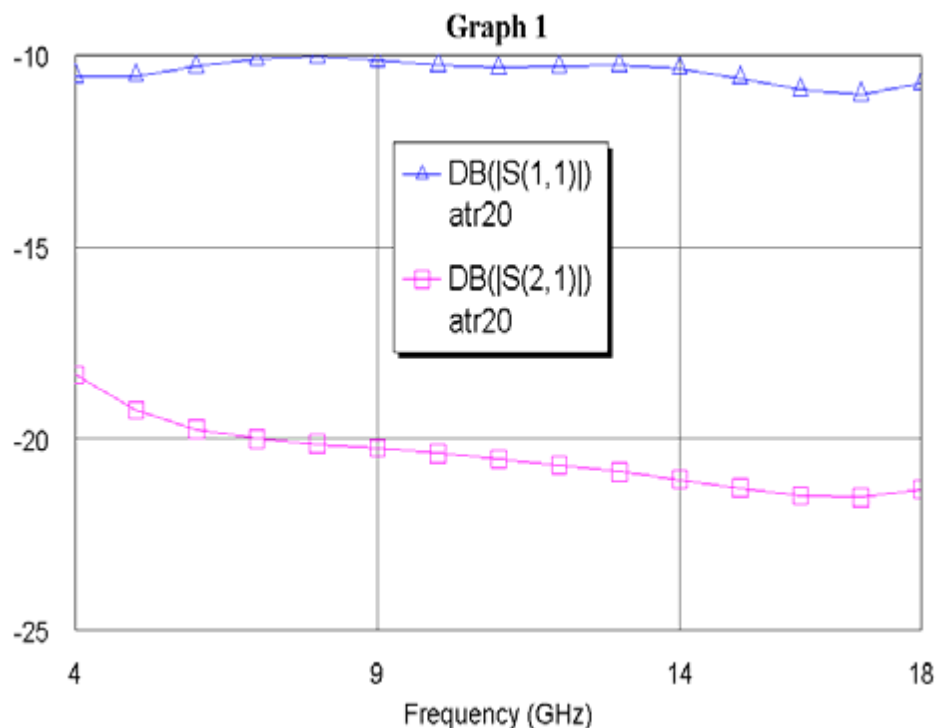


Рис. 2.5. Результаты моделирования

Справка: Список выходных параметров по умолчанию, которые могут быть определены при анализе схемы, перечислены в области **Measurement** в окне **Add Measurement**. Для линейных схем обычно в качестве выходных параметров выбирают S-параметры схемы. Но иногда бывает удобнее определить не элементы матрицы рассеяния, а другие параметры.

В Microwave Office имеется возможность добавить к имеющимся по умолчанию выходным параметрам другие параметры и уравнения для их определения. Делается это следующим образом. Определяется какая-либо переменная и ставится в соответствие одному из выходных параметров схемы, определяемому в процессе анализа, например, какому-либо элементу S-матрицы. Это делается вводом выражения типа:

$$S11=Yarlykov01: |S[1,1]|,$$

где **Yarlykov01** – имя схемы.

Такая запись означает, что переменной **S11** поставлен в соответствие модуль элемента S[1,1] матрицы, т.е. переменной **S11** присваивается значение элемента S[1,1]. При этом может быть присвоено комплексное значение, или только его действительная часть, или только мнимая, или модуль. Определённую новую переменную **S11** уже можно использовать в любом уравнении. Использовать непосредственно значение S[1,1] в уравнениях нельзя, т.к. это значение не связано ни с какой переменной. Например, чтобы определить и построить график КСВ **KstU** при работе схемы на несогласованную нагрузку, нужно определить следующие переменные:

$$S11=Yarlykov01: S[1,1],$$

S12=Yarlykov01: S[1,2],
S21=Yarlykov01: S[2,1],
S22=Yarlykov01: S[2,2].

Заметим, что здесь все переменные являются комплексными числами. Затем необходимо определить коэффициент отражения от нагрузки, т.е. присвоить значение коэффициента отражения некоторой переменной, например:

$$G_n = 0.01 + j \cdot 0.05.$$

Затем записать уравнение для определения коэффициента отражения по входу схемы:

$$G = S_{11} + S_{12} \cdot S_{21} \cdot G_n / (1 - S_{22} \cdot G_n).$$

И, наконец, записать уравнение для определения КСВ **KstU**:

$$KstU = (1 + \text{abs}(G)) / (1 - \text{abs}(G)).$$

Переменную **KstU** можно использовать для построения графика, вывода в виде таблицы или в файл.

1.8. Рассмотрим определение КСВ **KstU** и затухания **Ldb** для схемы аттенюатора Yarlykov01 при работе на эквивалентную согласованную нагрузку. Для этого необходимо задать уравнения, преобразующие известные параметры матрицы рассеяния в КСВ и затухание.

В дереве проекта найдите пункт **Output equation** и нажмите по нему правой кнопкой мыши. Выберите **New output equations...** и в рабочем поле откроется окно уравнений **Output Equations**.

Теперь выберите в меню **Draw>Add Output Equation** или щёлкните по значку **Output Equation**  на панели инструментов. Откроется диалоговое окно **Add Measurement Equation**, показанное на рис. 2.6. В текстовом поле **Variable name** введите **S11**. В области **Measurement Type** отметьте **Port Parameters**, в области **Measurement** отметьте **S**. В поле **Data Source Name** введите **Yarlykov01**. Введите 1 в оба поля **To Port Index** и **From Port Index**, установите “галочку” в **Mag** в области **Complex Modifier**, снимите “галочку” в **dB**, если она установлена, нажмите **OK**. В окне уравнений появится поле ввода. Двигая мышку, установите это поле в верхней части окна уравнений и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы закрепить. Появится выражение

$$S11 = \text{Yarlykov01: } |S[1,1]|.$$

Это означает, что переменной **S11** поставлен в соответствие модуль коэффициента отражения $S[1,1]$ матрицы рассеяния. Щёлкните левой кнопкой мышки в любом месте окна уравнений за пределами выражения для **S11**.

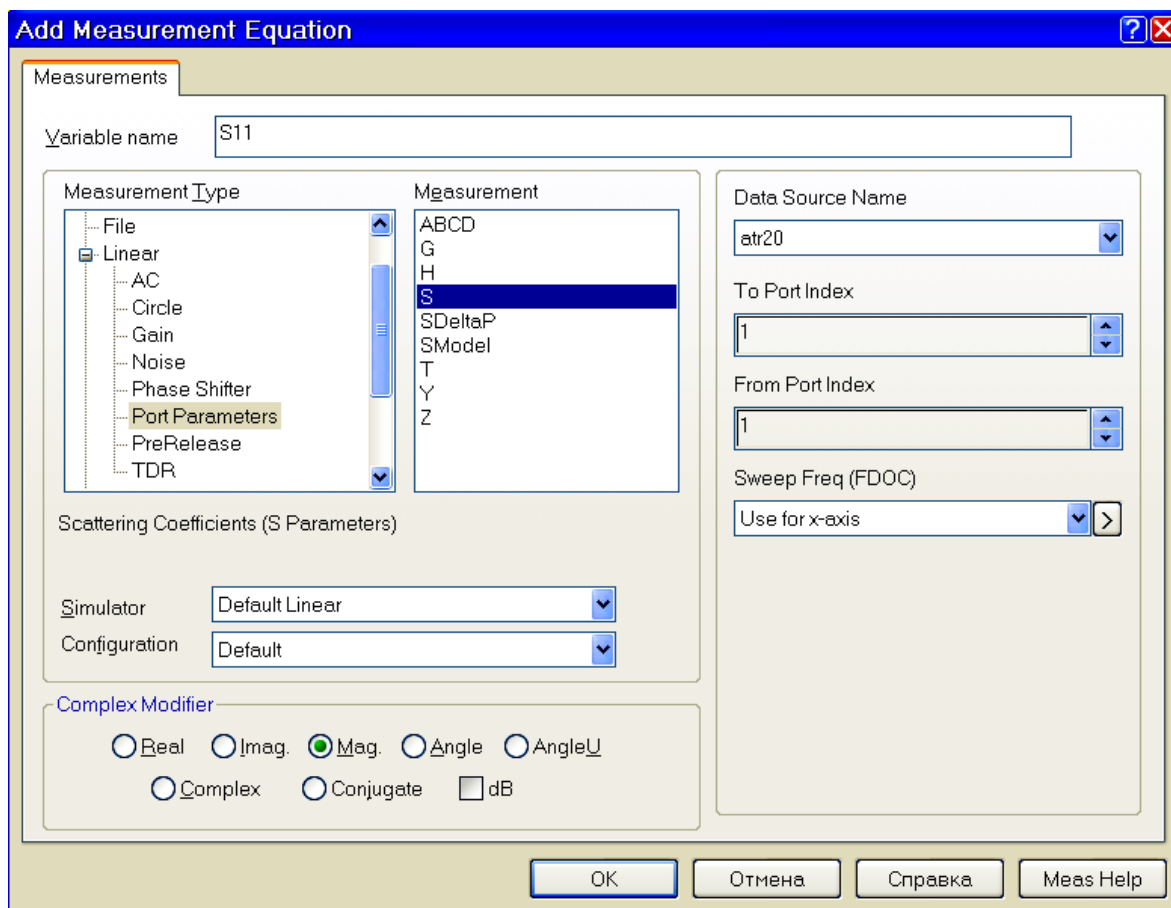


Рис. 2.6 – Диалоговое окно для добавления переменной

Снова выберите в меню **Draw>Add Output Equation**. В открывшемся окне в текстовом поле **Variable name** введите **S21**, в области **Measurement Type** отметьте **Port Parameters**, в области **Measurement** отметьте **S**, в поле **Data Source Name** введите **Yarlykov01**. Введите 2 в поле **To Port Index** и 1 в поле **From Port Index**. Щёлкая по кнопкам справа от этих полей, установите “галочку” в **Mag** в области **Complex Modifier**, снимите “галочку” в **dB**, если она установлена, нажмите **ОК**. В окне уравнений появится поле ввода. Двигая мышку, установите это поле ниже предыдущего уравнения и щёлкните левой кнопкой мышки. Появится выражение

$$S21=Yarlykov01: |S[2,1]|.$$

Щёлкните левой кнопкой мыши в любом месте окна уравнений за пределами выражения для S21.

Выберите в меню **Draw>Add Equation** или щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Equation**  на панели инструментов. Переместите курсор в окно уравнений. В этом окне появится поле ввода. Установите его, двигая мышкой, ниже предыдущего уравнения и щёлкните левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать. Теперь введите в поле ввода уравнение:

$$KstU=(1+S11)/(1-S11)$$

и щёлкните левой кнопкой мыши вне этого поля, а затем нажмите **Enter**.

Снова щёлкните левой кнопкой мыши по значку **Equation** на панели инструментов и поместите новое поле ниже предыдущих уравнений. Введите в поле ввода уравнение:

$$Ldb=20*\log_{10}(1/S21)$$

и щёлкните левой кнопкой мыши вне этого поля, а затем нажмите **Enter**.

Окончательный вид уравнений в окне показан на рис. 2.7.

Output Equations

S11 = atr20:|S(1,1)|

S21 = atr20:|S(2,1)|

KstU=(1+S11)/(1-S11)

LdB=20*log10(1/S21)

Рис. 2.7 – Уравнения для определения КСВ и затухания

1.9. Наконец, перейдем к измерению введенных величин и их анализу. Для этого сначала создадим график. Щёлкните по значку **Add New Graph** на панели инструментов. Введите имя графика **Graph 2**, выберите **Rectangular** и нажмите **OK**. Щёлкните правой кнопкой мышки по подгруппе **Graph 2** в окне просмотра проекта и выберите **Add Measurement**. В открывшемся окне (рис. 2.8) выберите **Output Equations** в области **Measurement Type**. В поле ввода **Equation Name** выберите **KstU**, щёлкнув по кнопке справа. Отметьте переключатель **Mag** в области **Complex Modifier**. Уберите “галочку” в **dB**, если она установлена. Нажмите **OK**.

Повторите пункт создание измерения на **Graph 2**, но в поле ввода **Equation Name** выберите **Ldb**. Затем нажмите **OK**.

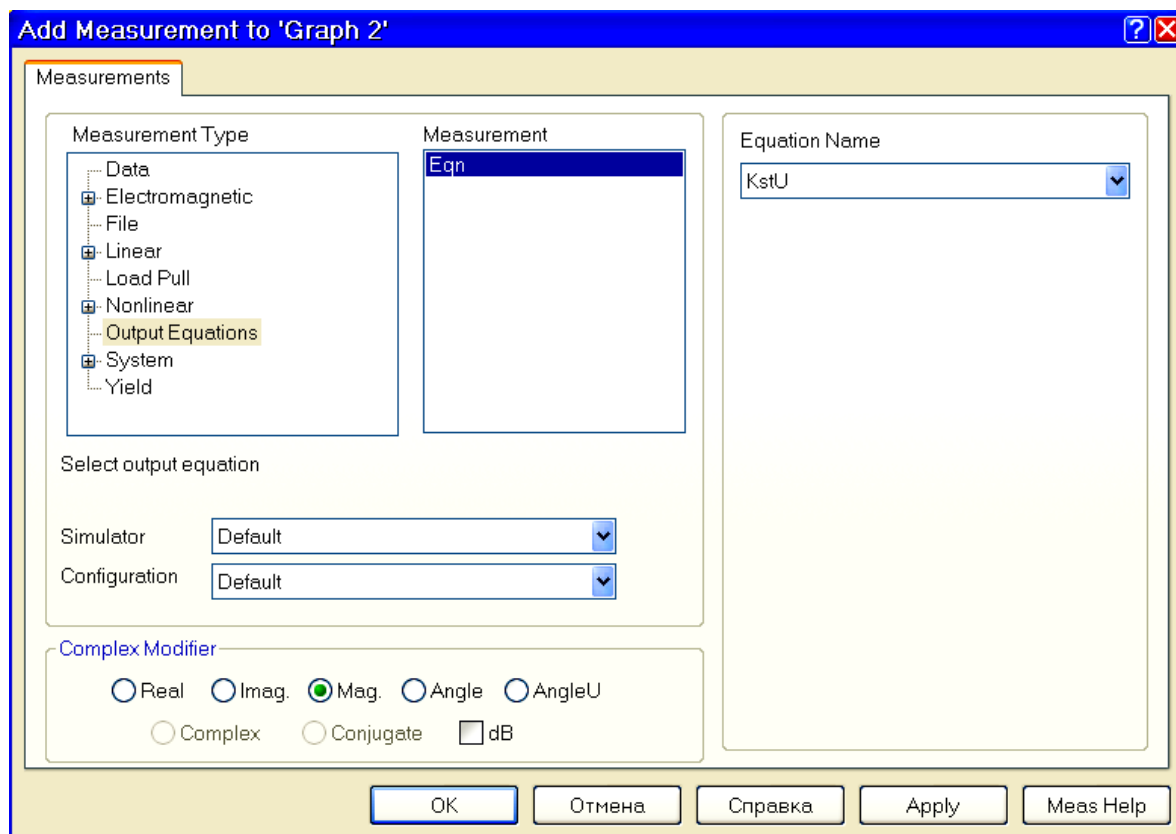


Рис. 2.8 – Добавление переменных на график

Щёлкните левой кнопкой мыши значку **Analyze** на панели инструментов. Результаты анализа отображаются на графике 2.9. По полученным графикам сделайте выводы.

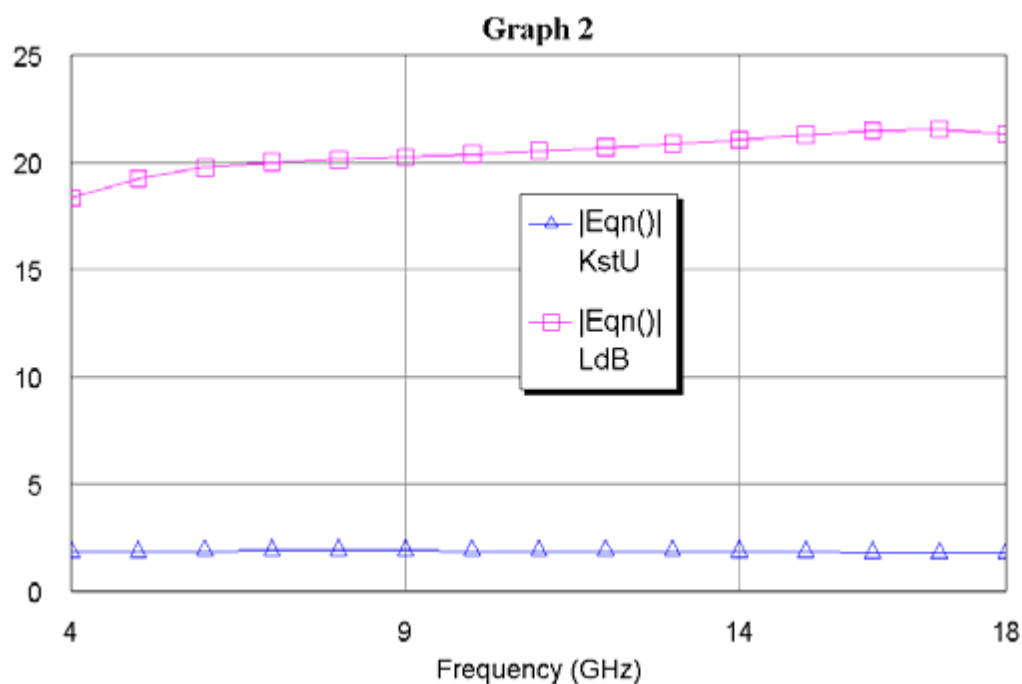


Рис. 2.9 – Графики зависимости КСВ и затухания от частоты

2. Электромагнитное моделирование микрополоскового аттенюатора.

Теперь получим те же самые результаты, но при проведении электромагнитного моделирования. Исходные данные для аттенюатора на резисторах выбираются из таблицы 2.2, но при условии округления размеров для кратных размерам ячеек сетки.

2.1. Начнем мы с создания нового проекта. Для этого выбираем в меню **File>New Project**. Затем **File>Save Project As**. Откроется диалоговое окно **Save As**. Наберите имя проекта в соответствии с фамилией второго студента из бригады, например, **Kostin**, и нажмите **Сохранить**. Теперь выберите в меню **Options>Project Options** или дважды щёлкните мышкой по **Project Options** в левом окне просмотра проекта. Откроется диалоговое окно **Project Options**. На вкладке **Global Units** этого окна в поле **Frequency** введите **GHz**, в поле **Length type** введите **mm** и нажмите **OK**.

2.2. Далее необходимо создать электромагнитную структуру. Щёлкните левой кнопкой мыши по значку **Add New EM Structure**  на панели инструментов. Наберите **Kostin01** в поле **Enter a name for the EM Structure**, отметьте **AWR EMSight Simulator** и нажмите **Create**. На рабочем поле откроется окно электромагнитной структуры. Щёлкните по значку **Substrate Information** на панели инструментов. На вкладке **Enclosure** открывшегося окна в поле **X_Dim** введите 25, в поле **Y_Dim** введите 9, в поле **Grid_X** введите 0.1 и в поле **Grid_Y** введите 0.001. Впоследствии для подсоединения портов необходимо будет изменить параметр $X_Dim = \sum_{i=1}^9 L_{TLi} !!!$

На вкладке **Material Defs** в области **Dielectric Definitions** для диэлектрического слоя **Diel_1** введите **Er=10.55**, **TanD=0.0001**. Для области **Conductor Definitions** щёлкните мышкой по кнопке **Add**, чтобы добавить материал проводника. Откроется дополнительное диалоговое окно **Add Conductor** (рис. 2.10). В поле **Presets** введите **Aluminum**, щёлкнув по кнопке в правом конце этого поля, и нажмите **OK**. Снова щёлкните мышью по кнопке **Add**, в поле **Name** введите **Resist**, в поле **Conductivity (S/m)** введите 67000. Дважды щёлкнув в столбцах **Color**, можно изменить цвет, которым будут отображаться слои металла в топологии. Щёлкнув в этих столбцах еще раз, можно изменить штриховку слоев. Нажмите **OK**. Вкладка **Material Defs** будет выглядеть, как показано на рис. 2.11.

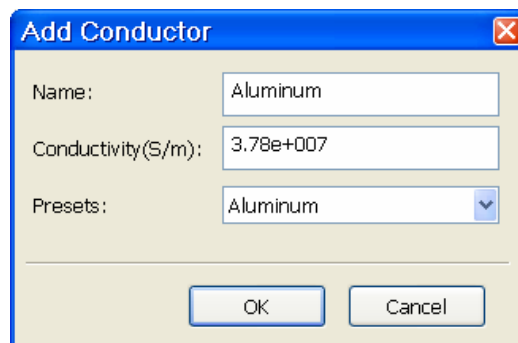


Рис. 2.10 – Добавление слоя проводника

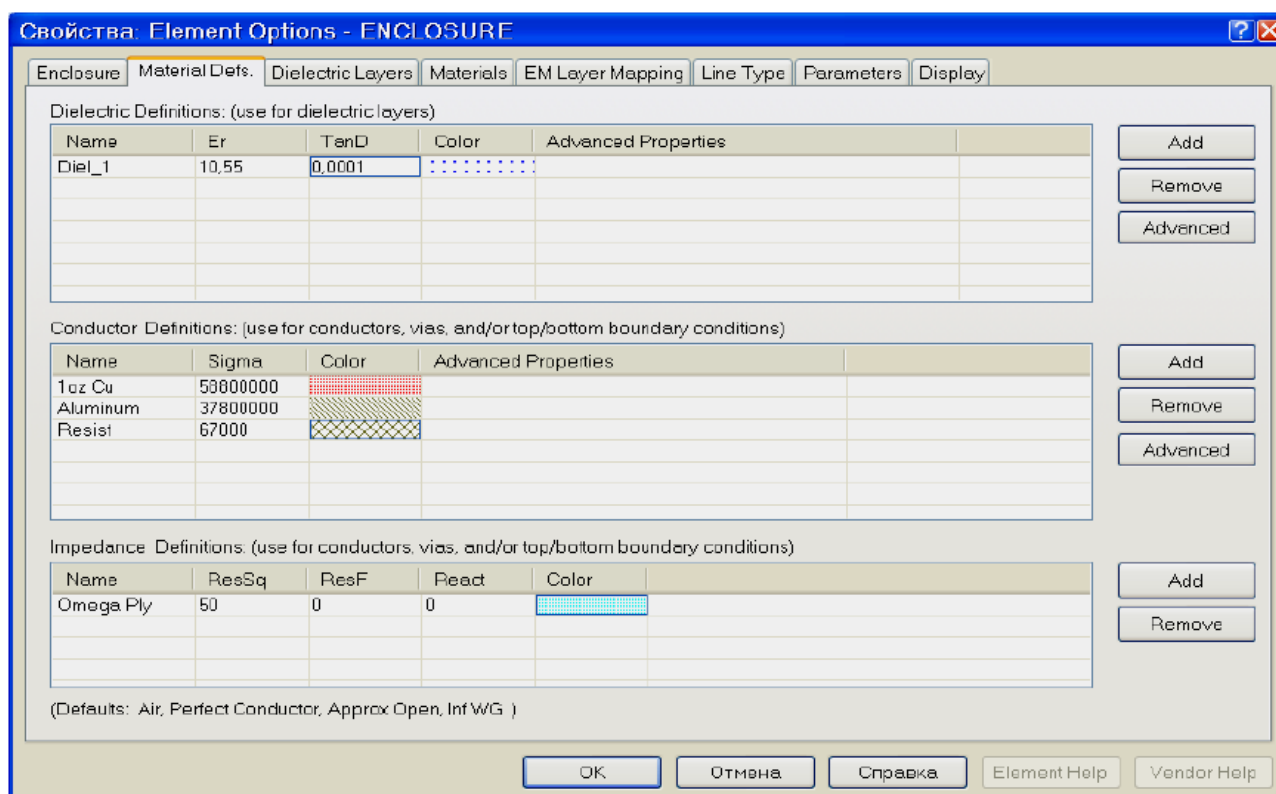


Рис. 2.11 – Свойства слоев

На вкладке **Dielectric Layers** (Диэлектрические слои) для слоя 1 в колонке **Thickness** (Толщина) введите 7, в колонке **Material Definition** введите **Air**, щёлкнув левой кнопкой мышки по этому полю, в колонке **Draw Scale** (Масштаб черчения) введите 1. Для слоя 2 в колонке **Thickness** введите 0.5, в колонке **Material Definition** введите **Diel_1**, щёлкнув левой кнопкой мышки по этому полю, в колонке **Draw Scale** введите 4, чтобы удобнее было просматривать трёхмерное отображение электромагнитной структуры. В поле **Top Boundary** (верхняя граница) введите материал **Aluminum**, в поле **Bottom Boundary** (нижняя граница) введите материал **1oz Cu**.

На вкладке **Materials** щёлкните мышью по кнопке **Insert**. В столбце **Name** замените появившееся имя **Trace1** на **Alum**, в столбце **Thickness** введите 0.02, в столбце **Material Definition** введите **Aluminum**, щёлкнув мышкой по этому полю. Снова щёлкните мышкой по кнопке **Insert**. В столбце **Name** введите имя материала **Res**, в столбце **Thickness** введите 0.0003, в столбце **Material Definition** введите **Resist**, щёлкнув мышкой по этому полю. Вкладка **Materials** будет выглядеть, как показано на рис. 2.12. Нажмите **OK**.

2.3. После задания слоев перейдем непосредственно к вычерчиванию топологии. Щёлкните левой кнопкой мыши по значку **Rectangle**  на панели инструментов или выберите **Draw>Rectangle**. Поместите курсор в окно электромагнитной структуры и нажмите клавишу **Tab** на клавиатуре. Откроется диалоговое окно **Enter Coordinates** для ввода координат. Введите начальные координаты, от которых будут строиться проводники, например, **0** в поле **x** и **3.2** в поле **y**. Нажмите **OK**.

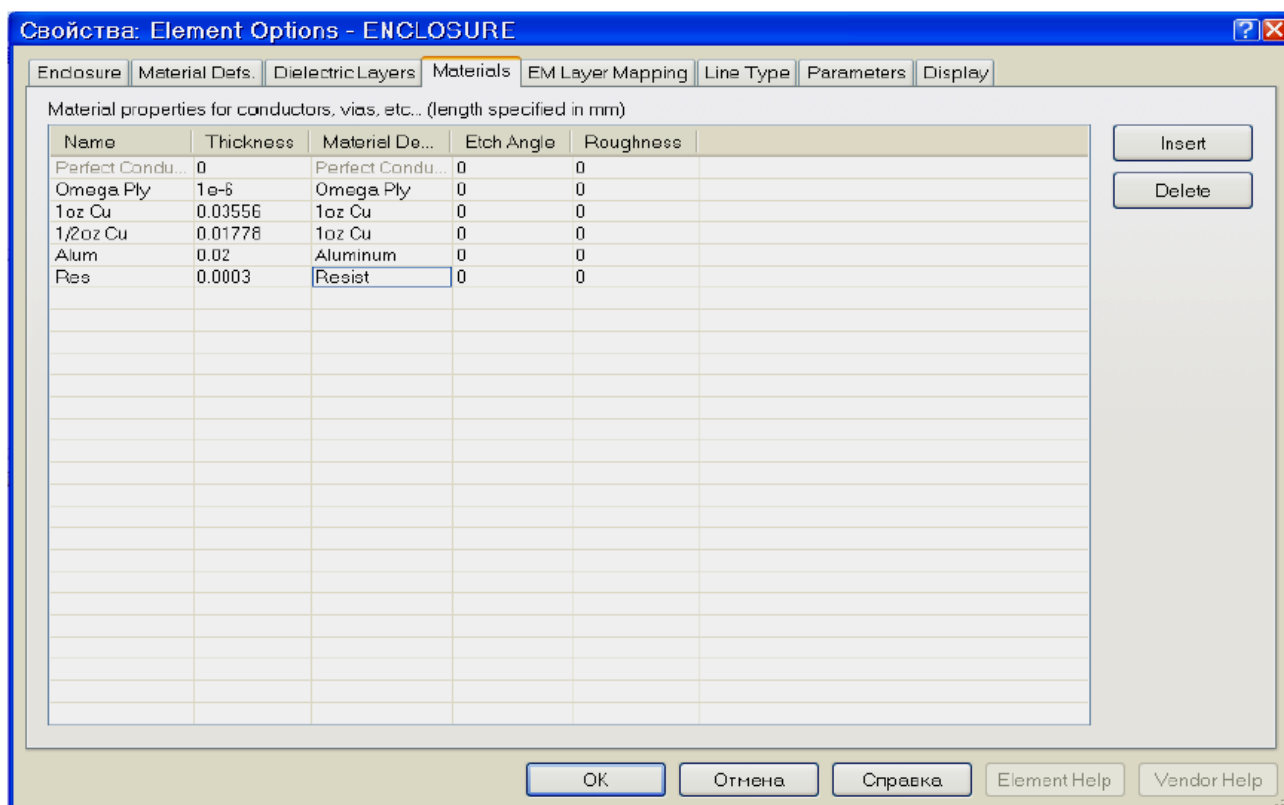


Рис. 2.12 – Вкладка задания материалов слоев

Нажмите клавишу Tab снова, чтобы открыть диалоговое окно Enter Coordinates. Установите флажок в переключателе Rel, чтобы активизировать относительные координаты. Введите длину L_1 первого элемента **ID=TL1** в поле **dx** и его ширину W_1 в поле **dy** и нажмите **ОК**. Проводник прямоугольного сечения отображается в окне электромагнитной структуры. **Не забывайте, что размеры элемента должны быть кратны шагу сетки (т.е. кратно 0,1 по оси x и 0,001 по оси y)!**

2.4. Теперь повторите пункт 2.3 для остальных восьми элементов. Координаты заносятся по следующим правилам.

- Если толщина W_i i -го проводника меньше толщины W_{i-1} $(i-1)$ -го проводника, то в поле **y** заносится координата $y_i = \frac{W_{i-1} - W_i}{2} + y_{i-1}$;
- Если толщина W_i i -го проводника больше толщины W_{i-1} $(i-1)$ -го проводника, то в поле **y** заносится координата $y_i = y_{i-1} - \frac{W_i - W_{i-1}}{2}$;
- В поле **x** вводится координата $x_i = x_{i-1} + L_{i-1}$;
- В поле **dy** вводится величина $dy_i = W_i$;
- В поле **dx** вводится величина $dx_i = L_i$.

Не забудьте в конце изменить размер X_Dim!!! (см. п/п 2.2).

2.5. Далее необходимо к полученной топологии добавить порты. Для этого щёлкните левой кнопкой мыши по входному проводнику, чтобы выделить его. Затем щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Edge Port** на панели

инструментов. Поместите курсор на левый край входного проводника, пока не отобразится квадрат, и щелкните левой кнопкой мыши, чтобы зафиксировать порт.

Дважды щелкните левой кнопкой мыши по порту 1. Откроется окно свойств порта (рис. 2.13). В поле **Ref. Plane Distance** введите расстояние 1mm, на которое нужно сдвинуть референсную плоскость. Нажмите **OK**.

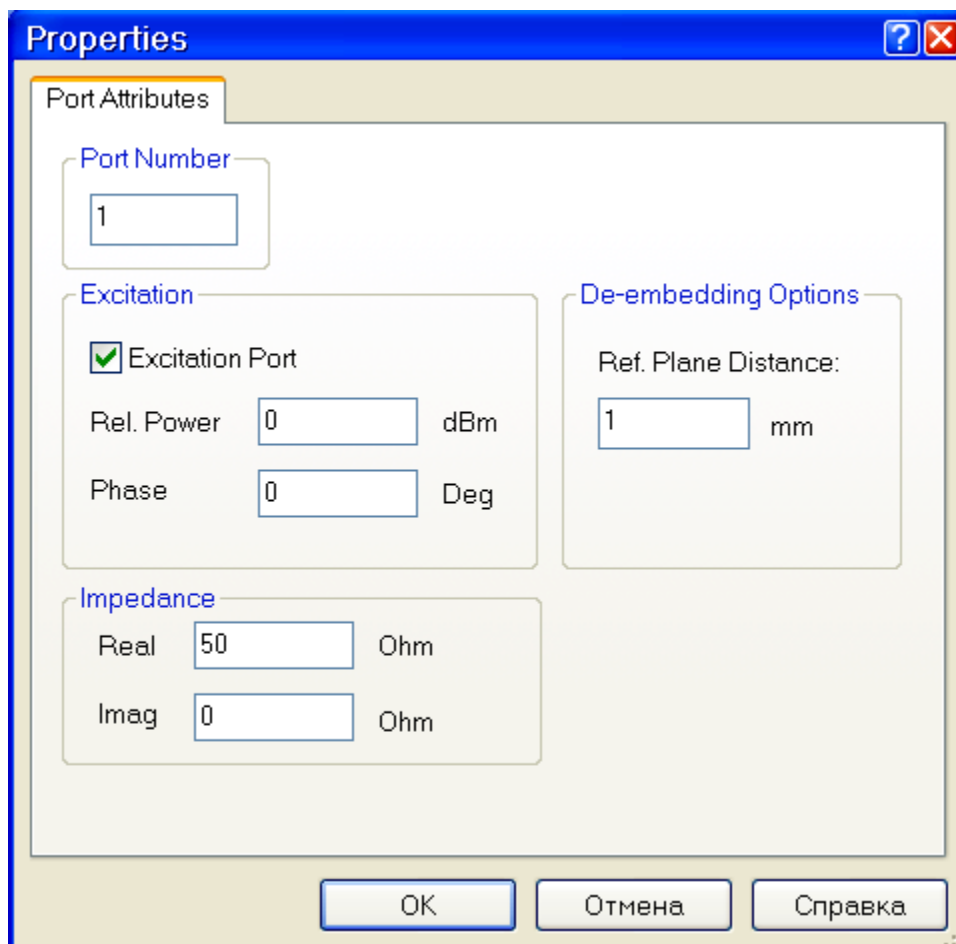


Рис. 2.13 – Окно свойств порта

Снова щелкните левой кнопкой мыши по значку **Edge Port** на панели инструментов и установите порт 2 на выходной проводник. Также подвиньте референсную плоскость на 1 мм.

2.6. Перейдем к назначению материала проводникам. Щелкните левой кнопкой мыши по окну топологии, чтобы сделать его активным. Нажмите клавишу **Shift** и щелкните левой кнопкой мыши поочередно по всем проводникам, кроме резисторов. Затем щелкните по любому выделенному проводнику правой клавишей мыши и выберите **Shape Properties** (рис. 2.14).

В поле **EM Layer** введите 2, в поле **Material** выберите **1/2oz Cu**. Щелкая мышью по кнопке в правом конце этих полей, отметьте **Conductor** и нажмите **OK**.

2.7. Повторите пункт 2.6 для всех резисторов топологии аттенюатора, но в поле **Material** введите **Res**.

Окончательный вид структуры аттенюатора представлен на рис. 2.15.

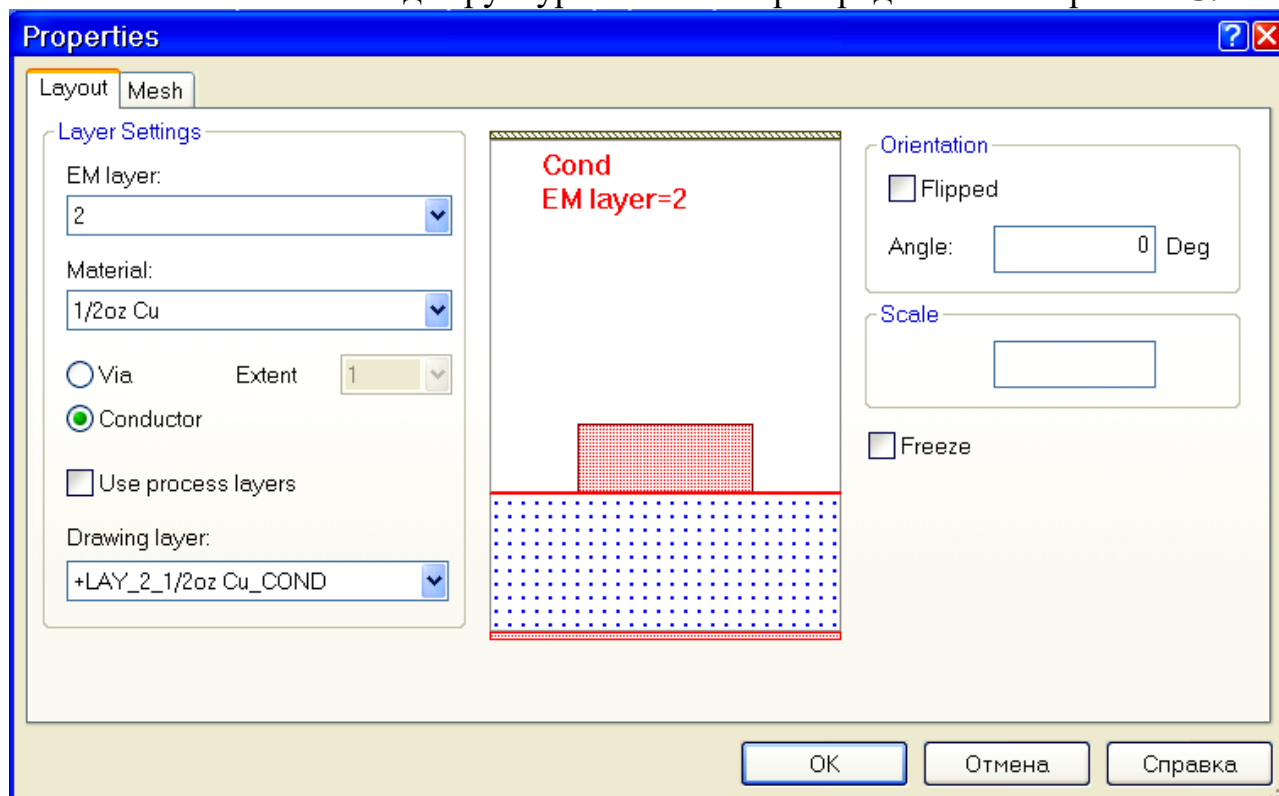


Рис. 2.14 – Окно назначения материалов

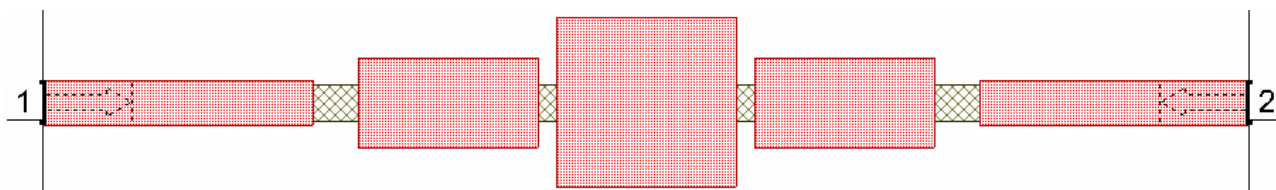


Рис. 2.15 – Итоговая топология микрополоскового аттенюатора

2.8. Повторите пункт 1.8 для задания выходных параметров и уравнений.

2.9. Теперь введем частоты для моделирования. Для этого правой кнопкой мыши щелкните по подгруппе **Kostin01** в группе **EM Structures** и выберите **Options** во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно **Options**. Щелкните панель **Frequencies** в верхней части окна. Снимите галочку (если она стоит) на переключателе **Use Project Frequency**, чтобы локальные частоты имели преимущество перед глобальными частотами проекта. Установите **GHz** в поле **Data Entry Units**, щёлкая по стрелкам справа от этого поля. Введите 4 в поле **Start**, 18 в поле **Stop** и 1 в поле **Step**. Нажмите **Apply** (Применить). В окне списка **Current Range** отображается частотный диапазон и частотные точки с шагом, которые вы только что определили. Нажмите **OK**.

2.10. Повторите пункт 1.9 для создания графиков и начала анализа.

Требования к отчету

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально.

Структура отчета следующая:

- титульный лист, оформленный в соответствии с приложением 1 данного пособия;
- подробное решение и ответ расчетного задания к лабораторной работе в соответствии с выбранным преподавателем вариантом;
- результаты экспериментальной части, включающие собранную схему и топологию в соответствии с вариантом, графики коэффициентов отражения и передачи для линейного и электромагнитного моделирования, выводы по каждому графику;
- вывод о различиях между линейным и электромагнитным моделированием;
- минимум 6 выводов о полученных результатах лабораторной работы.

Общие требования аналогичны требованиям в лабораторной работе №1.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение полосковым линиям передачи. Где они применяются?
2. Дайте определения симметричной и несимметричной полосковым линиям.
3. Что такое микрополосковая линия?
4. Что такое связанные полосковые линии?
5. Что такое щелевая линия передачи?
6. Для чего применяется аттенюатор?
7. Опишите принцип работы предельного аттенюатора.
8. Как определяется матрица рассеяния и затухание идеального аттенюатора?
9. Как можно классифицировать аттенюаторы поглощающего типа? Опишите принцип их работы.
10. Опишите принцип работы аттенюатора поляризационного типа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРА НА МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

Цель работы: изучение правил моделирования режекторного фильтра, спроектированного на микрополосковых линиях, его анализ и оптимизация полученных результатов.

Краткие теоретические сведения

Фильтр нижних частот (ФНЧ) образуется линейным проводником, имеющим конфигурацию, показанную на рис. 3.1, а. На рис. 3.1, б показана эквивалентная электрическая схема этого фильтра. Участок l_1 линии имеет большее волновое сопротивление, относительно сопротивления подводящей линии, а участок l_2 имеет меньшее сопротивление. Если $l_1 < \lambda_1 / 4$ и $l_2 < \lambda_1 / 4$ (λ_1 соответствует граничной частоте ФНЧ), то участок l_1 имеет индуктивное сопротивление, так как является аналогом закороченного отрезка линии передачи длиной меньше $\lambda/4$, а участок l_2 имеет емкостное сопротивление, так как является аналогом разомкнутого отрезка линии передачи с длиной меньше $\lambda/4$.

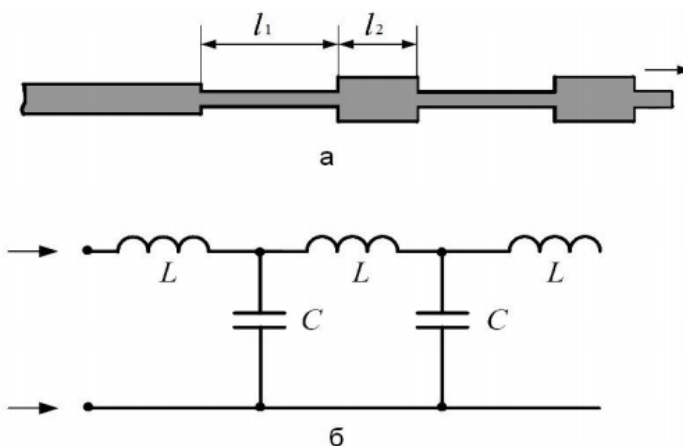


Рис. 3.1 – ФНЧ на МПЛ а – конфигурация, б – эквивалентная схема

Фильтр верхних частот (ФВЧ) образуется с помощью отрезков линий, закороченных на конце и разрывов в основной линии передачи (рис. 3.2, а). Длины закороченных отрезков l_1 , l_2 , l_3 должны удовлетворять условиям, рассмотренным выше для ФНЧ. Разрывы в основной МПЛ образуют последовательные ёмкости. Эквивалентная схема фильтра приведена на рис 3.2, б.

Имеется большое количество конструкций полосно-пропускающих фильтров (ППФ) на МПЛ. На рис. 3.3, а показана конструкция фильтра, образованная системой последовательных резонаторов СВЧ, выполненных в виде разомкнутых отрезков линии передачи длиной $\lambda_0/2$ (λ_0 – длина волны, соответствующая средней частоте), связь между контурами образуется небольшими разрывами в линии передачи S_1 , S_2 и т.д. Эквивалентная схема такого фильтра показана на рис. 3.3, б.

Сравнительно большие габаритные размеры являются основным недостатком данной конструкции ППФ.

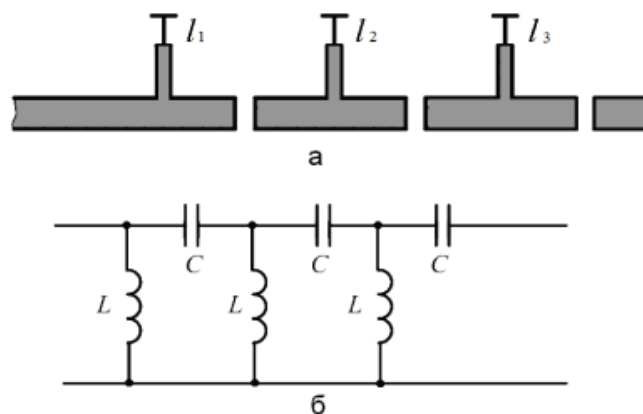


Рис. 3.2 – ФВЧ на МПЛ: а – конструкция; б – эквивалентная схема

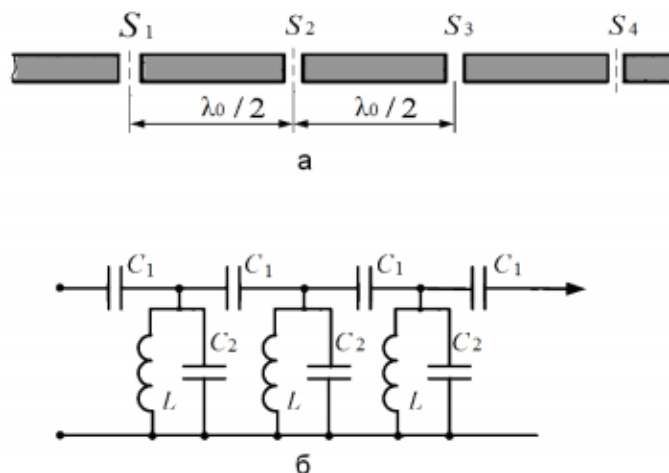


Рис. 3.3. ППФ на МПЛ с торцевой связью резонаторов: а – конструкция; б – эквивалентная схема

Конструкция ППФ на встречных стержнях приведена на рис. 3.4, а. Фильтр определяет систему близкорасположенных резонаторов СВЧ, выполненных на четвертьволновых закороченных отрезках, связанных друг с другом за счет краевых полей. Эквивалентная схема этого фильтра приведена на рис. 3.4, б.

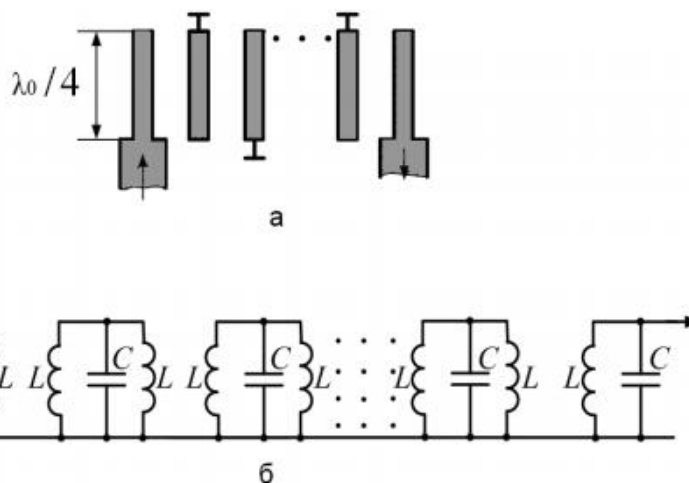


Рис. 3.4. ППФ на встречных стержнях: а – конструкция; б – эквивалентная схема

Конструкция полосно-заграждающего фильтра (ПЗФ), состоящего из подключенных через четверть волны ответвлений линий передачи, включающих узкий l_1 и широкий l_2 проводники, приведена на рис. 3.5, а. Такое ответвление эквивалентно последовательному соединению индуктивности и емкости. Если эквивалентные индуктивность и емкость образуют резонанс на частоте f_0 , то в МПЛ сопротивление в точках подключения отвода оказывается близким к нулю. В этом случае сопротивление участка линии передачи будет очень большим – отрезок длиной $\lambda/4$ закорочен на конце. Эквивалентная схема ПЗФ приведена на рис. 3.5, б.

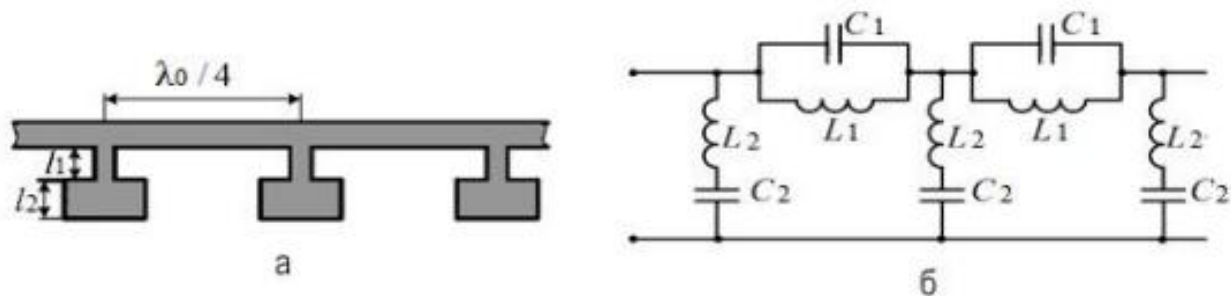


Рис. 3.5. ПЗФ: а – конструкция; б – эквивалентная схема;
 l_1 , l_2 – отрезки линии, создающие последовательный контур

Фильтры, выполненные на МПЛ, обладают рядом преимуществ, основными из которых являются: технологичность – при серийном изготовлении стоимость фильтра резко снижается; малые габариты – их конструкции поддаются точному расчету, что позволяет автоматизировать проектирование с помощью ЭВМ. Недостатком является относительно большая величина потерь, обусловленная свойствами МПЛ.

Одной из серьезных проблем, возникающих при проектировании фильтров, является получение узких полос пропускания. Это вызвано ограниченной добротностью существующих типов линий передачи, применяемых в современной микроэлектронике СВЧ. Для реализации узкополосных фильтров с малыми потерями в полосе пропускания применяют различные высокодобротные резонаторы, например, на акустических линиях, на ферритовых сферах, а также объемные диэлектрические резонаторы.

Значительного уменьшения массогабаритных параметров фильтров можно достичь при использовании объемных многослойных структур, реализующихся в объемных интегральных схемах (ОИС) СВЧ.

Некоторые примеры многослойных фильтров на ОИС СВЧ и КВЧ приведены на рис. 3.6 и 3.7. Так, на рис. 3.6, а, б показаны конструкции избирательных двухзвенных ППФ, а на 3.6, в – ФНЧ, выполненных из симметричных экспоненциальных линий, связанных через диафрагмы.

Достоинством такого фильтра являются увеличенная ширина полосы заграждения, неравномерный (неэквидистантный) спектр резонансных частот и низкий уровень паразитных эффектов, связанный с высшими типами волн и колебаний. Для повышения крутизны скатов характеристики избирательности

следует применять резонаторы, нагруженные определенным образом. В качестве примера на рис. 3.6, б показана схема конструкции полосно-пропускающего фильтра, обеспечивающая полосы затухания высокого порядка. Центральные резонаторы такого фильтра следует нагрузить на разомкнутые отрезки неоднородных линий.

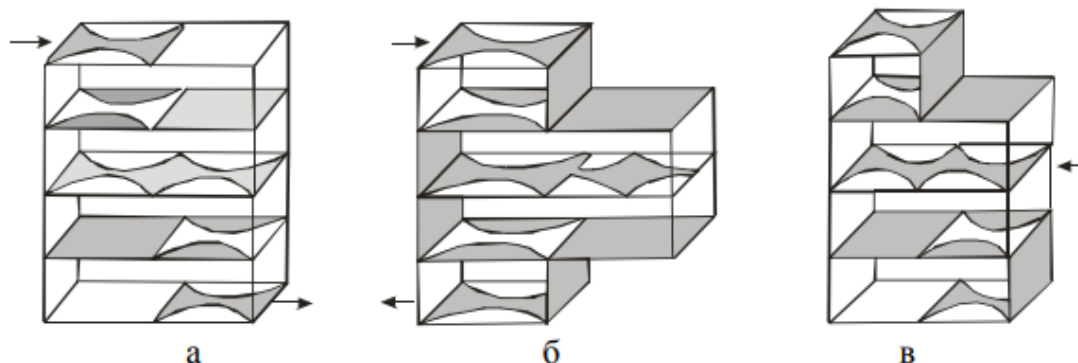


Рис. 3.6. Схема конструкции двухзвенного ППФ и фильтра ФНЧ на симметричных экспоненциальных линиях, связанных через диафрагмы

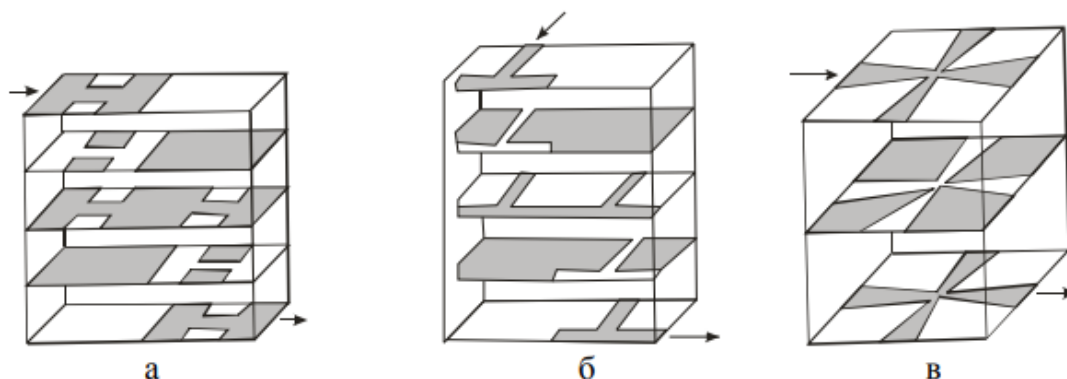


Рис. 3.7. Схемы конструкций двухзвенных ППФ: а – на ступенчатых линиях передачи; б – на Т-образных ячейках; в – на ячейке Вигнера–Зейтца

Наряду с неоднородными ЛП в качестве элементов фильтров применяют структуры в виде наборных ячеек (многокомпонентные элементы). На рис. 3.7, а показана конструкция двухзвенного полосно-пропускающего фильтра на симметричных ступенчатых линиях, связанных через диафрагмы. Аналогично выполняют фильтры на основе Т-образных ячеек (см. рис. 3.7, б). Многокомпонентные элементы могут содержать как отрезки однородных линий, так и неоднородных. На рис. 3.7, в показана схема конструкции фильтра на ячейке Вигнера–Зейтца, состоящей из неоднородных линий.

В упомянутых фильтрах диафрагма сохраняет свойства резонатора в многослойной структуре. Однако возможен и другой метод конструирования, при котором профилированные диафрагмы наделяют избирательную структуру новыми свойствами.

Улучшить характеристику избирательности фильтров можно при использовании многослойных структур, в которых существуют связи между несмежными резонаторами, например, при «сгибании» плоскостной цепи, проходящей через различные слои многослойной структуры.

Задание к расчетной части

По данным таблицы 3.1 построить амплитудно-частотную характеристику заданного типа фильтра с указанной аппроксимацией.

Таблица 3.1

Типы фильтров с указанием аппроксимации

Последняя цифра студ. билета	Фильтр
0	ФНЧ с аппроксимацией Баттерворта. Частота среза $\omega_c = 10\text{ГГц}$.
1	ФВЧ с аппроксимацией Чебышева. Частота среза $\omega_c = 1\text{ГГц}$.
2	ППФ с аппроксимацией Кауэра. Центральная частота $\omega_0 = 2\text{ГГц}$. Ширина полосы пропускания $\Pi \approx 500\text{МГц}$.
3	ПЗФ с аппроксимацией Баттерворта. Центральная частота $\omega_0 = 3\text{ГГц}$. Ширина полосы заграждения $\Pi \approx 1\text{ГГц}$.
4	ФНЧ с аппроксимацией Чебышева. Частота среза $\omega_c = 4\text{ГГц}$.
5	ФВЧ с аппроксимацией Кауэра. Частота среза $\omega_c = 5\text{ГГц}$.
6	ППФ с аппроксимацией Баттерворта. Центральная частота $\omega_0 = 6\text{ГГц}$. Ширина полосы пропускания $\Pi \approx 1\text{ГГц}$.
7	ПЗФ с аппроксимацией Чебышева. Центральная частота $\omega_0 = 7\text{ГГц}$. Ширина полосы заграждения $\Pi \approx 1\text{ГГц}$.
8	ФНЧ с аппроксимацией Кауэра. Частота среза $\omega_c = 8\text{ГГц}$.
9	ФВЧ с аппроксимацией Баттерворта. Частота среза $\omega_c = 9\text{ГГц}$.

Порядок выполнения работы

1. Создание режекторного (полосно-заграждающего) фильтра, как и любого другого устройства СВЧ, начинается с создания проекта. Для этого выбираем в меню **File>New Project**. Затем **File>Save Project As**. Откроется диалоговое окно **Save As**. Наберите имя проекта в соответствии с фамилией студента из бригады, например, **Yarlykov**, и нажмите **Сохранить**.

2. Теперь создадим схему нашего проекта. Щелкните по значку **Add New Schematic** на панели инструментов. Наберите имя схемы **Yarlykov01** и нажмите **OK**.

3. После этого необходимо добавить элементы нашей схемы. Нажмите панель **Elements** в нижней части левого окна. Щелкните по значку + слева от группы **Microstrip** в окне просмотра элементов. Щелкните по подгруппе **Lines** в окне просмотра элементов. Найдите модель **MLIN**, переместите ее в окно схемы и зафиксируйте, щелкнув левой кнопкой мышки. Затем щелкните по подгруппе соединений **Junction** в окне просмотра элементов. Найдите модель **MTEE\$**, переместите ее в окно схемы, отпустите кнопку мыши, подключите модель к правому выводу элемента **MLIN** и зафиксируйте, щелкнув левой кнопкой мыши. Щелкните по подгруппе **Lines** в окне просмотра элементов.

Найдите модель **MLEF**, переместите её окно схемы, щёлкните три раза правой кнопкой мыши, чтобы повернуть элемент, подсоедините его к плечу 3 элемента **MTEE\$** и зафиксируйте, щёлкнув левой кнопкой мыши. Таких подсхем **MLIN**, **MTEE\$** и **MLEF** должно быть три. Следовательно эти элементы необходимо скопировать. Для этого нажмите клавишу **Shift** и, не отпуская её, щёлкните левой кнопкой мыши по очереди по элементам **MLIN**, **MTEE\$** и **MLEF**. Далее щелкните по значку **Copy** и затем по значку **Paste** на панели инструментов. Переместите курсор в окно схемы, подключите скопированные элементы к правому выводу элемента **MTEE\$** и щёлкните левой кнопкой мыши, чтобы зафиксировать их. Данные действия необходимо повторять до тех пор, пока на схеме не получится последовательное соединение трех одинаковых звеньев. Далее необходимо подключить четвертый элемент **MLIN**. Для этого щёлкните по подгруппе **Lines** в окне просмотра элементов. Найдите модель **MLIN**, переместите её в окно схемы и подключите ее к правому выводу последнего элемента **MTEE\$**. Щелкните по значку **View All** на панели инструментов, чтобы видеть всю схему.

4. Теперь необходимо к полученной схеме подключить порты. Для этого щёлкните по значку **Port** на панели инструментов, затем поместите порт на левом конце первого элемента **MLIN**. Далее снова щелкните по значку **Port** на панели инструментов и поместите порт на правом конце последнего элемента **MLIN**, предварительно развернув его на 180° , щелкая правой кнопкой мыши.

5. Далее зададим параметры подложки. Для начала щелкните по группе **Substrates** в окне просмотра элементов. Перетащите элемент **MSUB** в окно схемы, поместите его на свободном месте, например, ниже схемы.

Дважды щёлкните по элементу **MSUB** в окне схемы. Откроется окно редактирования. Введите следующие параметры подложки: относительная диэлектрическая проницаемость **Er**=10.44, толщина подложки **H**=0.5, толщина проводника **T**=0.005, удельное сопротивление металла проводника, нормированное к золоту **Rho**=1, тангенс угла диэлектрических потерь **Tang**=0.0001. Имя подложки зададим **Name**=SUB1.

6. Теперь несколько подробнее остановимся на добавлении переменных. При настройке или оптимизации одинаковым образом должны изменяться параметры второго и третьего элементов **MLIN** (расстояний между шлейфами), а так же параметры первого и третьего элементов **MLEF**. Необходимые параметры задаются преподавателем исходя из таблицы 3.2.

Щёлкните левой кнопкой мыши по значку **Equation**  на панели инструментов. Переместите курсор в окно схемы и щёлкните левой кнопкой мыши на свободном месте выше схемы. В открывшееся поле введите **LL** (длина второго и третьего элементов **MLIN**) и щёлкните левой кнопкой мыши вне этого поля. Аналогично введите переменные **WL** (ширина второго и третьего элементов **MLIN**), **L1** и **W1** (длина и ширина первого и третьего элементов **MLEF**).

Таблица 3.2.

Исходные параметры элементов фильтра

Номер варианта	MLIN2 MLIN3	MLEF1 MLEF3	MLIN1 MLIN4	MLEF2
1	LL=3.5 WL=0.45	L1=3.5 W1=0.45	L=3 mm W=0.45 mm	L=3.5 mm W=0.45 mm
2	LL=5 WL=0.35	L1=5 W1=0.35	L=3 mm W=0.35 mm	L=3.5 mm W=0.35 mm
3	LL=7 WL=0.9	L1=7 W1=0.9	L=3 mm W=0.9 mm	L=3.5 mm W=0.9 mm
4	LL=5 WL=0.35	L1=5 W1=0.35	L=3.5 mm W=0.35 mm	L=3 mm W=0.35 mm
5	LL=3.5 WL=0.45	L1=3.5 W1=0.45	L=3.5 mm W=0.45 mm	L=3 mm W=0.45 mm
6	LL=7 WL=0.9	L1=7 W1=0.9	L=3.5 mm W=0.9 mm	L=3 mm W=0.9 mm
7	LL=3.5 WL=0.35	L1=3.5 W1=0.35	L=5 mm W=0.35 mm	L=5.5 mm W=0.35 mm
8	LL=3.5 WL=0.35	L1=3.5 W1=0.35	L=5.5 mm W=0.35 mm	L=5 mm W=0.35 mm
9	LL=3.5 WL=0.9	L1=3.5 W1=0.9	L=6 mm W=0.9 mm	L=7 mm W=0.9 mm
10	LL=3.5 WL=0.9	L1=3.5 W1=0.9	L=7 mm W=0.9 mm	L=6 mm W=0.9 mm

Дважды щёлкните по первому элементу **MLIN**. В открывшемся окне (рис. 3.8) введите **W** и **L**. Нажмите **OK**. Такие же значения параметров введите для последнего четвёртого элемента **MLIN**. Аналогично введите **W=WL** mm, **L=LL** mm для второго и третьего элементов **MLIN**.

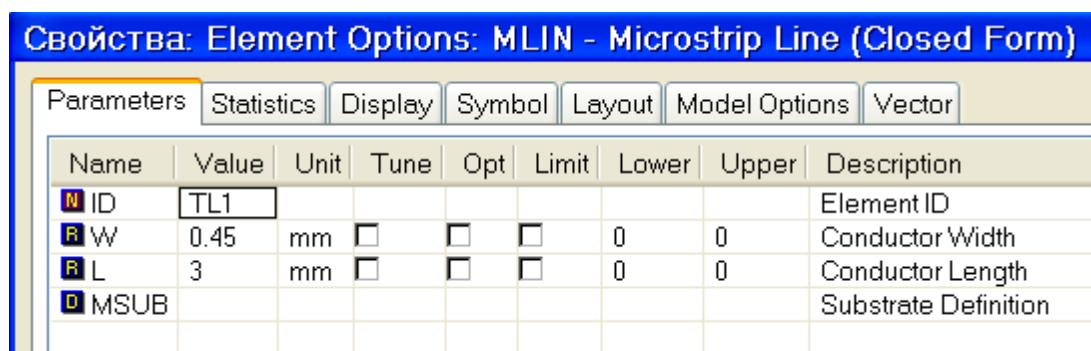


Рис. 3.8 – Задание параметров элементов

Дважды щёлкните по первому элементу **MLEF**. Введите **W=W1** mm, **L=L1** mm. Нажмите **OK**. Такие же значения параметров введите для последнего третьего элемента **MLEF**. Аналогично введите **W** и **L** для второго элемента **MLEF**.

Полученная схема показана на рис. 3.9.

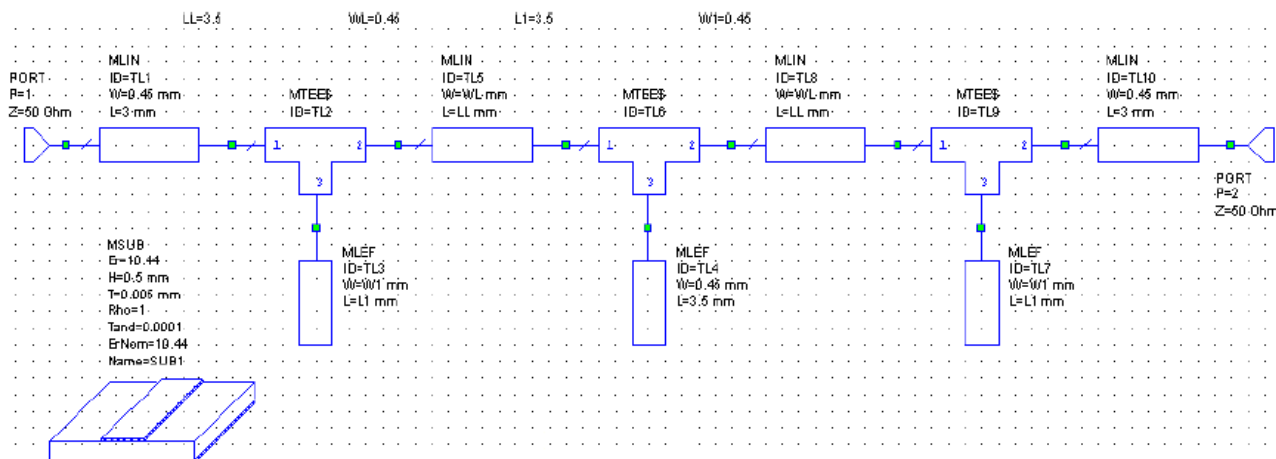


Рис. 3.9 – Итоговая схема резекторного фильтра

7. Для того, чтобы провести моделирование работы фильтра, необходимо указать диапазон частот, в котором будет проводиться моделирование. Нажмите панель **Project** в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра проекта. Дважды щёлкните по группе **Project Options**. Откроется диалоговое окно. Нажмите **Frequencies**. Наберите 4 в поле **Start**, 12 в поле **Stop** и 0.25 в поле **Step**, отметьте **Replace**, отметьте **Linear**. Нажмите **Apply**. В окне **Current Range** отображается частотный диапазон и шаг по частоте. Нажмите **OK**.

8. Теперь создадим график и добавим на него измеряемые величины. Щёлкните по значку **Add New Graph**  на панели инструментов. Введите имя графика, например **Graph 1**, выберите тип графика **Rectangular** (Прямоугольный) и нажмите **OK**. Щёлкните правой кнопкой мышки по подгруппе **Graph 1** в окне просмотра проекта и выберите **Add Measurement**. Выберите **Port Parameter** в списке **Measurement Type**, **S** в списке **Measurement**, **Yarlykov01** в поле **Data Source Name**, **2** в поле **To Port Index**, **1** в поле **From Port Index**, нажимая на стрелки справа от этих полей. В области **Complex Modifier** (Модификатор комплексного числа) отметьте **Mag** и **dB**, нажмите **Apply** и затем **OK**.

9. Наконец, проведем анализ полученной схемы. Щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Analyze**  на панели инструментов. Щёлкните правой кнопкой мышки по полученному графику и выберите **Options**. Откроется диалоговое окно свойств графика (рис. 3.10).

На вкладке **Axes** этого окна в области **Choose axis** (Выбрать ось) отметьте ось **x**. В области **Divisions** (Деления) снимите “галочку” в **Auto divs** и в поле **Step** (Шаг) введите 0.5 ГГц или 500 МГц. Это будет шаг по оси частот. Нажмите **Apply** и **OK**. Результаты анализа отображаются на графике рис. 3.11.

10. Теперь проведем оптимизацию полученного результата, т.е. изменение параметров фильтра для получения необходимого графика. Для начала нужно задать переменные и параметры оптимизации. Откройте окно схемы. Щёлкните правой кнопкой мыши по переменной **LL** и выберите **Properties**. От-

кроется окно редактирования переменной **Edit Equation** (рис. 3.12). В поле **Variable Name** отображается имя переменной, а в поле **Variable Value** отображается значение этой переменной. При желании здесь вы можете изменить имя переменной и её значение. В области **Tuning/Optimization Mode** (режим настройки/оптимизации) отметьте **Optimize**. На вариации значений длины мы не будем накладывать ограничений, поэтому не отмечайте **Constrain** (Ограничить). Нажмите **OK**. Аналогично с такими же параметрами назначьте для оптимизации переменную **L1**.

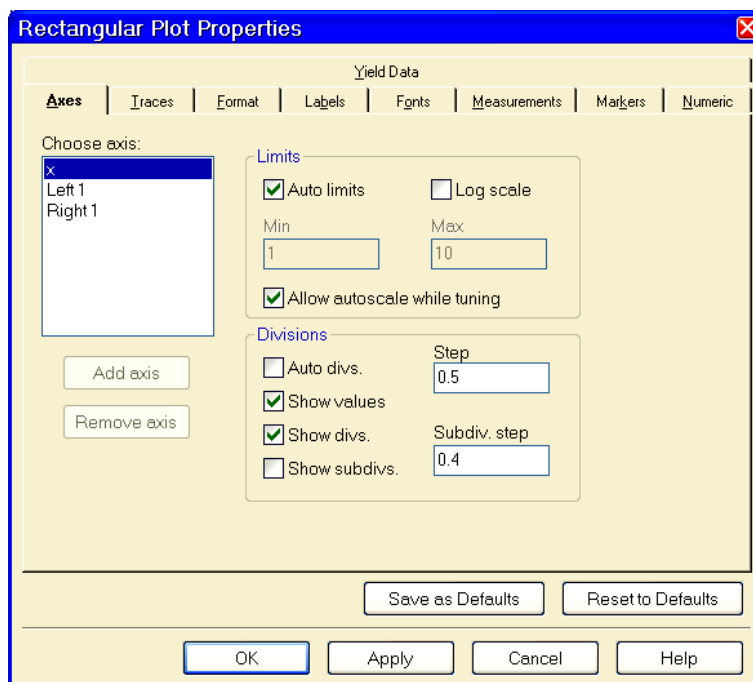


Рис. 3.10 – Диалоговое окно задания параметров анализа

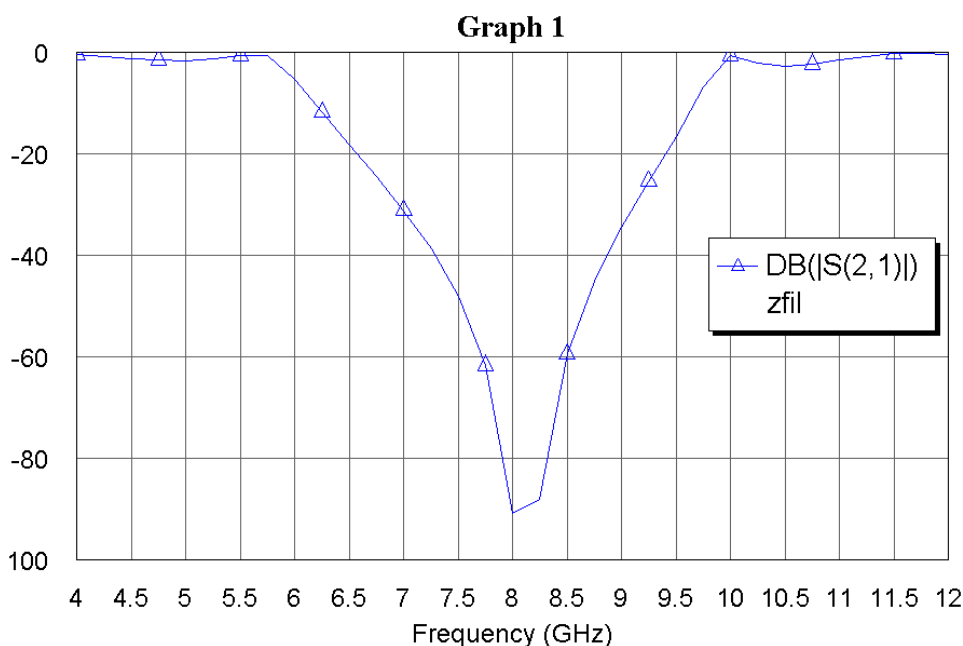


Рис. 3.11 – График частотной зависимости коэффициента передачи

Edit Equation

Variable Name: = Variable Value:

Variable Type

☒ Variable definition
☐ Parameter definition
☐ Display value

Parameter Description

Description:
☐ Does not affect layout

Unit Type: Data Type:

Tuning/Optimization Mode

☐ Tune
☒ Optimize
☐ Constrain

Upper bound:
Lower bound:

Statistics Mode

☐ Use statistics
☐ Optimize yield

Distribution

☐ Uniform
☒ Normal

Variation

☐ In percent
S.D.:

Pass Down Mode

☒ None ☐ Weak ☐ Strong

Рис. 3.12 – Окно редактирования переменной для оптимизации

Щёлкните правой кнопкой мышки по переменной **WL** и выберите **Properties**. В открывшемся окне отметьте **Optimize**. Здесь мы ограничим ширину полоски, поэтому отметьте **Constrain**. В поле **Upper bound** (Верхняя граница) введите 1, а в поле **Lower bound** (Нижняя граница) введите 0.1. Нажмите **ОК**. Аналогично с такими же параметрами назначьте для оптимизации переменную **W1**.

Дважды щёлкните по второму элементу **MLEF**, или щёлкните по нему правой кнопкой мыши и выберите **Properties**. Откроется диалоговое окно свойств элемента (рис. 3.13). Для параметра **W** отметьте столбцы **Optimize** и **Limit**. В столбце **Lower** введите 0.1, а в столбце **Upper** введите 1. Значение длины мы ограничивать не будем, поэтому для параметра **L** отметьте только столбец **Optimize**. Нажмите **ОК**.

Свойства: Element Options: MLEF - Open Microstrip Line with End Effect (Closed Form)

Parameters Statistics Display Symbol Layout Model Options Vector

Name	Value	Unit	Tune	Opt	Limit	Lower	Upper	Description
ID	TL4							Element ID
W	0.45	mm	☐	☒	☒	0.1	1	Conductor Width
L	3.5	mm	☐	☒	☐	0	0	Conductor Length
MSUB								Substrate Definition

Рис. 3.13 – Диалоговое окно свойств элемента

11. Следующим этапом нужно установить цели оптимизации, под которые будут подстраиваться заданные нами параметры. Данные цели устанавливаются преподавателем. Откройте окно графика. Установите цель оптимизации в полосе заграждения. Щёлкните правой кнопкой мышки по **Optimizer Goals** в левом окне проекта и выберите **Add Optimizer Goal**. В открывшемся окне рис. 3.14 в области **Goal Type** отметьте **Meas<Goal**, в области **Range** (диа-

пазон) снимите “галочки” в квадратиках **Min** и **Max**. В поле **Start** введите начальное значение полосы заграждения, а в поле **Stop** – конечное значение полосы заграждения. В поле **Goal start** в нижней части окна введите -50. Нажмите **OK**.

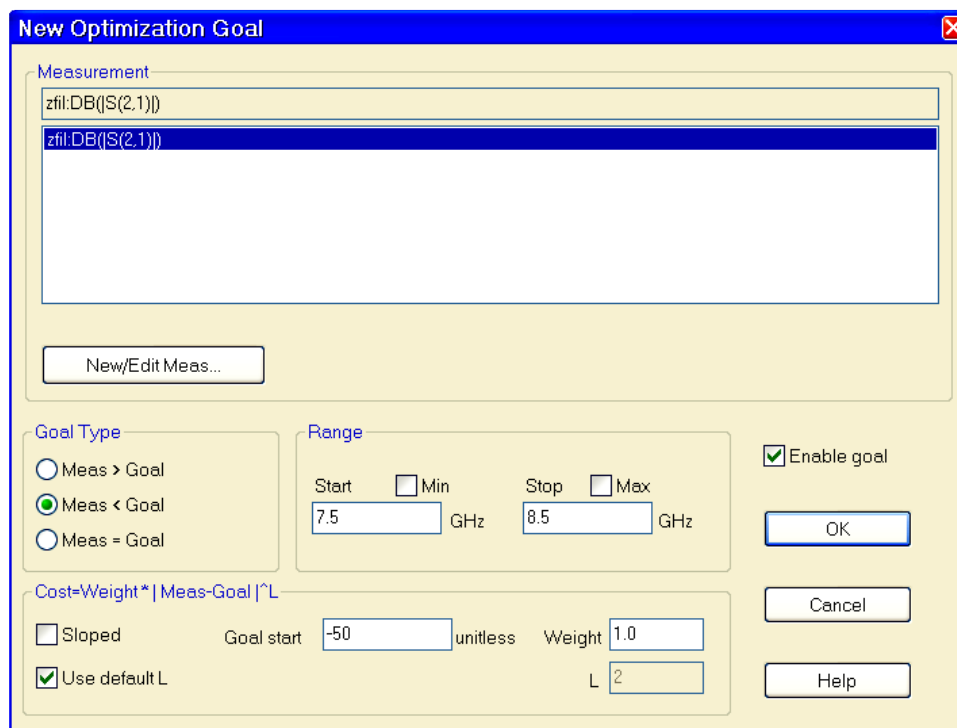


Рис. 3.14 – Ввод целей оптимизации

Установите цель оптимизации в нижней полосе пропускания. Снова щёлкните правой кнопкой мыши по **Optimizer Goals** в левом окне проекта и выберите **Add Optimizer Goal**. В открывшемся окне в области **Goal Type** отметьте **Meas>Goal**, в области **Range** (диапазон) снимите “галочку” в квадратике **Max**. и в поле **Stop** введите конечное значение частоты в нижней полосе пропускания. В поле **Goal start** введите -1. Нажмите **OK**.

Установите цель оптимизации в верхней полосе пропускания. Снова щёлкните правой кнопкой мыши по **Optimizer Goals** в левом окне проекта и выберите **Add Optimizer Goal**. В открывшемся окне в области **Goal Type** отметьте **Meas>Goal**, в области **Range** (диапазон) снимите “галочку” в квадратике **Min**. и в поле **Start** введите начальное значение частоты в верхней полосе пропускания. В поле **Goal start** введите -1. Нажмите **OK**.

Установленные цели будут отображены как подгруппы в группе **Optimizer Goals** в левом окне просмотра проекта и на графике.

12. Теперь перейдем к выполнению оптимизации. Чтобы выполнить оптимизацию выберите в меню **Simulate>Optimize**. Откроется диалоговое окно **Optimizer** (рис. 3.15). В этом окне в области **Optimization Methods** выберите метод оптимизации **Pointer - Robust Optimization**, щёлкая по кнопке в правом конце этого поля ввода. В поле ввода **Maximum Iterations** введите максимальное количество итераций **5000**. В окне **Relative Goal Cost** (Относительная сто-

имость цели) указывается в виде гистограммы относительная значимость цели, т.е. насколько далека поставленная цель от имеющегося значения характеристики. В случае, представленном для примера в данном описании, наибольшую значимость имеет третья цель, т.е. наибольшее отклонение от заданной величины ослабления имеется в верхней полосе пропускания, а наименьшую значимость имеет вторая цель, т.е. ближе всего к заданному значению ослабления характеристика имеет в нижней полосе пропускания. Это можно видеть и на графике фильтра. При желании значимость целей можно уравнивать, щёлкнув левой кнопкой мышки по кнопке **Equalize Goals** (Выровнять цели) в окне, это приведёт к выравниванию столбцов гистограммы и изменению веса каждой цели так, чтобы изменение параметров вносили одинаковый вклад в изменение целевой функции. В процессе оптимизации высота столбцов гистограммы будет изменяться.

В окне **Cost History** (Хронология значимости) отображается график изменения целевой функции в зависимости от выполненного количества итераций.

Ниже указанных областей в процессе оптимизации выводятся выполненное количество итераций анализа (**Simulator Iter**) и оптимизации (**Optimizer Iter**), а так же значение целевой функции (**Cost**), которое при оптимизации должно стремиться к нулю.

Если установить «галочку» в квадратике **Show all iteration** (Показывать все итерации), то на графике будут отображаться (мелькать) характеристики каждой итерации.

Чтобы начать выполнение оптимизации, щёлкните левой кнопкой мышки по кнопке **Start** в окне. График, полученный после оптимизации показан на рис. 3.16, а новые значения переменных и параметров элемента **MLEF** на рис. 3.17.

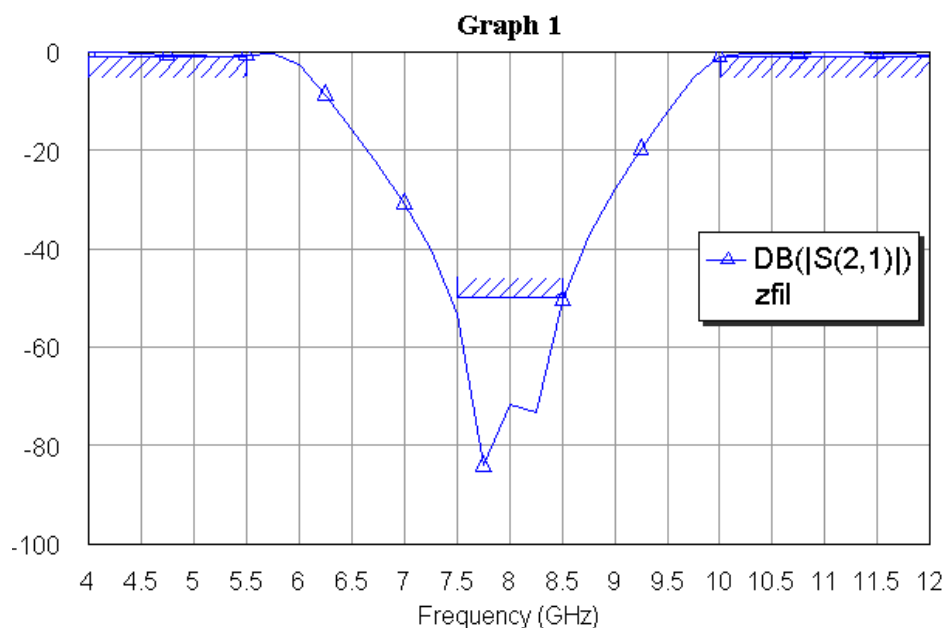


Рис. 3.16 – Характеристика коэффициента передачи после выполнения оптимизации

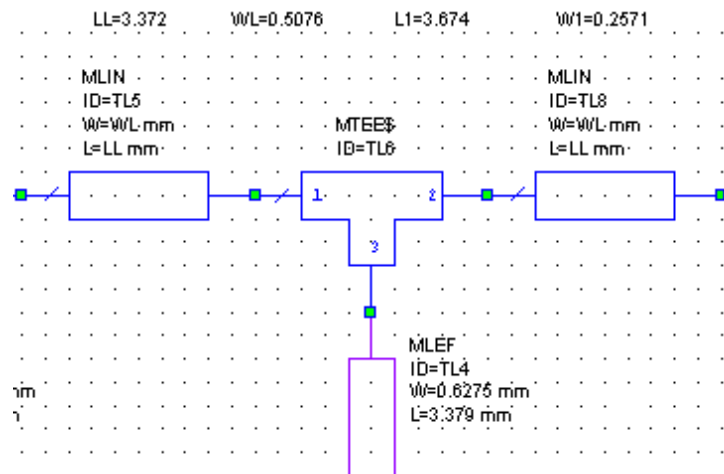


Рис. 3.17 – Параметры элемента MLEF после выполнения оптимизации

13. Завершим моделирование созданием топологии фильтра. Для этого откройте окно схемы. Щёлкните левой кнопкой мыши по значку **View Layout**  на панели инструментов, чтобы открыть окно топологии в рабочей области. В этом окне будут отображены все элементы топологии, соответствующие каждому элементу схемы. Однако расположение топологических элементов может быть беспорядочным, как, например, показано на рис. 3.18. Как правильно должны соединяться элементы топологии на этом рисунке показывают красные линии.

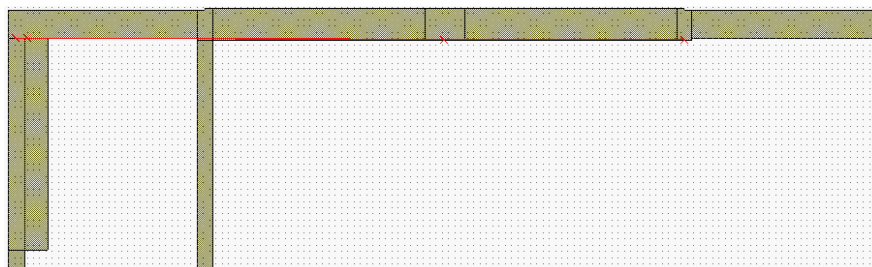


Рис. 3.18 – Первоначально созданная по умолчанию топология

Установите курсор мышки левее и выше топологии, нажмите левую кнопку мышки и, не отпуская кнопки, переместите курсор правее и ниже топологии, чтобы выделить все элементы топологии, отпустите кнопку. Или в меню выберите **Edit>Select All**. Щёлкните по значку **Snap Together** (Привязать вместе) на панели инструментов или выберите в меню **Edit>Snap Together**. Расположение элементов топологии будет упорядочено и топология будет иметь вид, показанный на рис. 3.19.

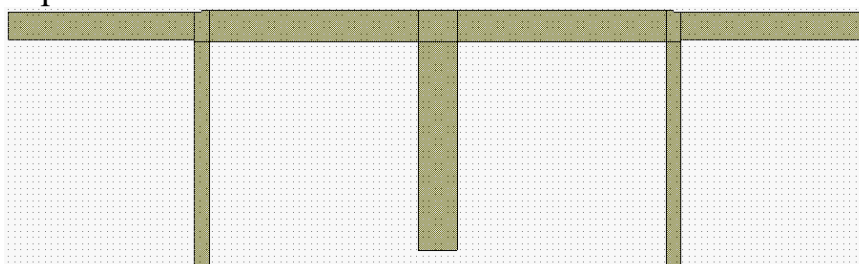


Рис. 3.19 – Итоговая топология фильтра

Требования к отчету

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально.

Структура отчета следующая:

- титульный лист, оформленный в соответствии с приложением 1 данного пособия;
- подробное решение и ответ расчетного задания к лабораторной работе в соответствии с выбранным преподавателем вариантом;
- результаты экспериментальной части, включающие исходную топологию фильтра и графики коэффициента передачи до и после оптимизации, параметры фильтра до и после оптимизации;
- вывод о возможностях оптимизации для разработки СВЧ устройств;
- минимум 6 выводов о полученных результатах лабораторной работы.

Общие требования аналогичны требованиям в лабораторной работе №1.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию фильтров по взаимному расположению полос пропускания и заграждения.
2. Назовите известные виды аппроксимаций фильтров.
3. Как осуществляется расчет фильтров СВЧ с использованием низкочастотного прототипа?
4. Приведите эквивалентные схемы низкочастотных прототипов, применяемых для построения фильтров СВЧ на неоднородных линиях.
5. Поясните принцип построения фильтра с четвертьволновыми связями.
6. Как осуществляется синтез фильтров СВЧ на микрополосковых линиях?
7. Опишите известные многослойные фильтры на объемных интегральных схемах СВЧ.
8. Приведите принципы построения фильтров на микрополосковых резонаторах.
9. Где применяются волноводные фильтры СВЧ?
10. Приведите конструкции различных волноводных фильтров СВЧ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ И НАСТРОЙКА ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ СВЧ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Цель работы: приобретение навыков при использовании диаграммы Вольперта-Смита в практических расчетах, а также изучение методики согласования линии передачи с нагрузкой при помощи сосредоточенной реактивности.

Краткие теоретические сведения

Принцип узкополосного согласования с помощью сосредоточенной реактивности заключается в том, чтобы реактивностью с проводимостью $\dot{Y}_p = jB_p$ (сопротивлением $\dot{Z}_p = jX_p$) включают параллельно (последовательно) по отношению к нагрузке как можно ближе к нагрузке в сечении l_1 , где активная часть нормированной проводимости $\text{Re}(\dot{y}_{ex})=1$ (сопротивления $\text{Re}(\dot{z}_{ex})=1$), причем $\dot{Y}_p = -j\text{Im}(\dot{Y}_{ex})$, $(\dot{Z}_p = -j\text{Im}(\dot{Z}_{ex}))$. Таким образом, мнимая часть входной проводимости (сопротивления) компенсируется включенной реактивностью.

Физика процесса согласования такова. Если линия нагружена на сопротивление, неравное волновому, то возникает отраженная волна. Подключив перед нагрузкой некоторый реактивный элемент, который создает собственную отраженную волну, можно подобрать величину сопротивления (проводимости) реактивной неоднородности и местоположение этого элемента так, чтобы обе отраженные волны имели одинаковые амплитуды и противоположные фазы. Таким образом, отраженные волны погасят друг друга, и в линии от генератора до точки подключения согласующего элемента будет распространяться только бегущая волна, то есть установится режим бегущей волны. Понятно, что на участке между местами подключения нагрузки и неоднородности существуют обе волны, которые формируют стоячую волну: в таком случае имеет место диссипация энергии.

Из приведенного графика (рис. 4.1) можно увидеть, что на расстоянии длиной полволны есть две точки, в которых действительная составляющая нормированной проводимости $\hat{g}$ равна единице, а реактивная составляющая $\hat{b}$ имеет некоторое не равное нулю значение. В одной точке (1) эквивалентное сопротивление имеет емкостный характер, а в другой (2) – индуктивный.

Если подключить в точке 1 параллельную индуктивную проводимость, величина которой равна значению нормированной емкостной проводимости линии в этой точке, то суммарная проводимость в ней будет чисто активной и равняться проводимости $1/W$. Таким образом линия будет согласована на участке от точки подключения реактивной проводимости до генератора. Аналогично можно согласовать линию и в точке 2, если согласующим элементом будет емкостная проводимость.

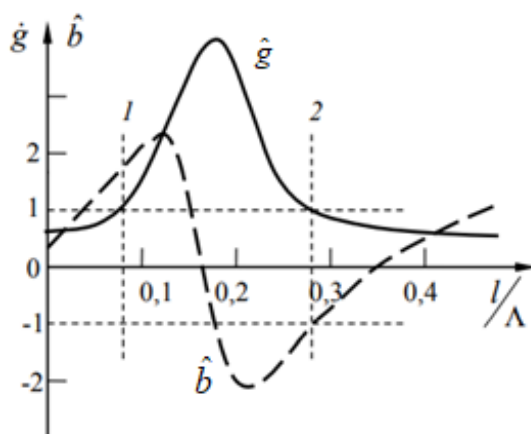


Рис. 4.1. Зависимость нормированных проводимостей от продольной координаты

Координату точки, где необходимо подключать согласующую нагрузку, можно определить следующим образом. Известно, что в узле стоячей волны нормированное сопротивление равно значению коэффициента бегущей волны, то есть проводимость в этой точке равна $1/K_{БВ}$. Полная нормированная проводимость линии в точке, которая находится от узла на расстоянии l в сторону генератора, равняется

$$\dot{y} = \frac{1 + j K_{БВ} \operatorname{tg}(\beta l)}{K_{БВ} + j \operatorname{tg}(\beta l)}, \quad (4.1)$$

где $K_{БВ}$ – коэффициент бегущей волны; $\beta = 2\pi/\Lambda$ – фазовая постоянная; Λ – длина волны в линии; l – расстояние от узла напряжения до точки, в которой определяют эквивалентную проводимость.

Реактивная проводимость может изменять только мнимую часть проводимости. Нормированная проводимость в точке согласования должна быть равной:

$$\dot{y} = 1 \pm j\hat{b}. \quad (4.2)$$

Приравнявая выражения (4.1) и (4.2) и разделив действительную и мнимую части, получим два уравнения:

$$\operatorname{tg}(\beta l) = \pm \sqrt{K_{БВ}}, \quad (4.3)$$

$$\hat{b} = \pm \frac{K_{БВ} - 1}{\sqrt{K_{БВ}}}. \quad (4.4)$$

Из уравнения (4.3) вычисляют расстояние от узла напряжения до точки подключения, из уравнения (4.4) – значения проводимости реактивного согласующего элемента. Если известно расстояние от нагрузки до первого узла напряжения, то можно определить ближайшую до нагрузки точку согласования.

Необходимое реактивное сопротивление, включенное параллельно в волновод, может быть обеспечено с помощью металлического штыря. Если в прямоугольном волноводе распространяется основная волна H_{10} , то короткий металлический штырь, введенный в широкую стенку волновода параллельно вектору напряженности электрического поля $\vec{E}$ (рис. 4.2), увеличивает электриче-

ское поле в точке входа и таким образом вносится преимущественно емкостное сопротивление, если его длина не превышает $\lambda/4$. Нормированное значение проводимости $\hat{b}$ штыря зависит от его длины h , радиуса r и положения d на широкой стенке:

$$\hat{b} = \frac{2\pi d^2 \lambda \Lambda}{a^3 b} \frac{(1 - \cos kh)^2}{\ln(2d/r) \sin 2kh - k(2d - r)(2 + \cos 2kh)}, \quad (4.5)$$

где $k = 2\pi/\lambda$; λ – длина волны в свободном пространстве, которая соответствует рабочей частоте. Величина $b - h$ (b – размер узкой стенки волновода) должна быть значительно больше диаметра штыря $D = 2r$.

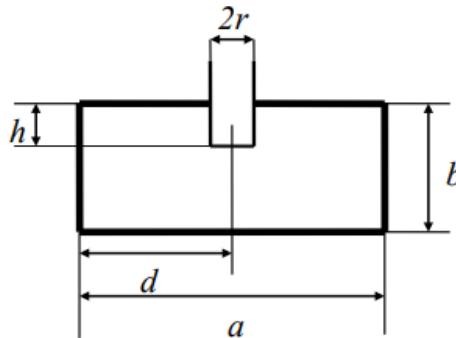


Рис. 4.2. Реактивный штырь в волноводе

При увеличении глубины погружения штыря в волновод начинает проявляться индуктивный характер проводимости штыря и при условии

$$h = h_p \approx \frac{\lambda}{4} - \frac{2d - r}{2 \ln(2d/r)} \quad (4.6)$$

проводимость становится бесконечно большой, что равнозначно параллельному подключению последовательного резонансного контура. Штырь длиной h_p называют резонансным. В случае увеличения длины штыря $h > h_p$ преобладает индуктивная проводимость.

Если штырь полностью перемыкает волновод и соединяет его противоположные стенки, то распределение тока в штыре можно считать равномерным. Ток возбуждает магнитное поле, в котором накапливается энергия. В этом случае эквивалентная проводимость штыря имеет индуктивный характер.

Задание к расчетной части

Определить расстояние от нагрузки до места включения емкостного согласующего штыря и величину вносимой штырем реактивности, необходимой для согласования линии передачи с волновым сопротивлением W с нагрузкой $Z_n = R_n + jX_n$ на частоте f_0 . Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. произвести нормировку сопротивления нагрузки по формуле $z_n = \frac{Z_n}{W}$;
2. отметить на диаграмме Вольперта-Смита точку, соответствующую нормированному сопротивлению нагрузки;

3. через отмеченную точку провести окружность постоянного КБВ и записать в отчет полученные значения КБВ и КСВ;
4. из центра диаграммы через точку, соответствующую нормированному сопротивлению нагрузки, провести прямую и записать значение l'/λ точки пересечения данной прямой со шкалой «Длины волн к генератору»;
5. отметить на диаграмме точку пересечения окружности постоянного КБВ с единичной окружностью. Отмечать необходимо точку, которая будет первой при движении от точки z_n в сторону генератора;
6. в отчет записать значение z' данной точки. Величина вносимой штырем реактивности будет совпадать со значением реактивной составляющей данной точки, но противоположна по знаку. В отчет записать полученную величину вносимой штырем реактивности;
7. через данную точку из центра диаграммы провести прямую и записать значение l''/λ точки пересечения данной прямой со шкалой «Длины волн к генератору». Не забудьте, что при движении в сторону генератора $l''/\lambda > l'/\lambda$, поэтому в случае, если $l''/\lambda < l'/\lambda$, то к значению точки пересечения l''/λ необходимо дополнительно прибавить $0,5\lambda$;
8. относительное расстояние от нагрузки до места включения реактивного штыря определяется по формуле $\Delta l/\lambda = l''/\lambda - l'/\lambda$. Определить абсолютную величину требуемого расстояния Δl . Длину волны λ определить исходя из ее связи с частотой f_0 . Полученное значение длины волны и расстояния от нагрузки до места внесения реактивности вставить в отчет;
9. приложить к отчету диаграмму Вольперта-Смита с проделанными в пунктах 1-8 расчетами.

Исходные данные для решения задачи заданы в табл. 4.1. Задачу необходимо решить для двух вариантов, указанных в двух столбцах таблицы.

Таблица 4.1

Исходные данные к расчетной части

Последняя цифра студ. билета	Вариант №1				Вариант №2			
	$W, \text{Ом}$	$R_n, \text{Ом}$	$X_n, \text{Ом}$	$f_0, \text{МГц}$	$W, \text{Ом}$	$R_n, \text{Ом}$	$X_n, \text{Ом}$	$f_0, \text{МГц}$
0	50	30	-450	100	75	160	150	1000
1	50	70	-300	200	75	135	100	900
2	50	110	-150	300	75	110	50	800
3	50	10	-360	400	75	190	240	700
4	50	45	-240	500	75	160	160	600
5	50	80	-120	600	75	130	80	500
6	50	10	-240	700	75	220	360	400
7	50	40	-160	800	75	185	240	300
8	50	70	-80	900	75	150	120	200
9	50	60	-50	1000	75	270	475	100

Порядок выполнения работы

Структурная схема лабораторной установки представлена на рис. 4.3. Она состоит из векторного генератора сигналов компании Rohde&Schwarz SMBV100B, измерительной линии, милливольтметра ВЗ-38А, согласующей секции и нагрузки.

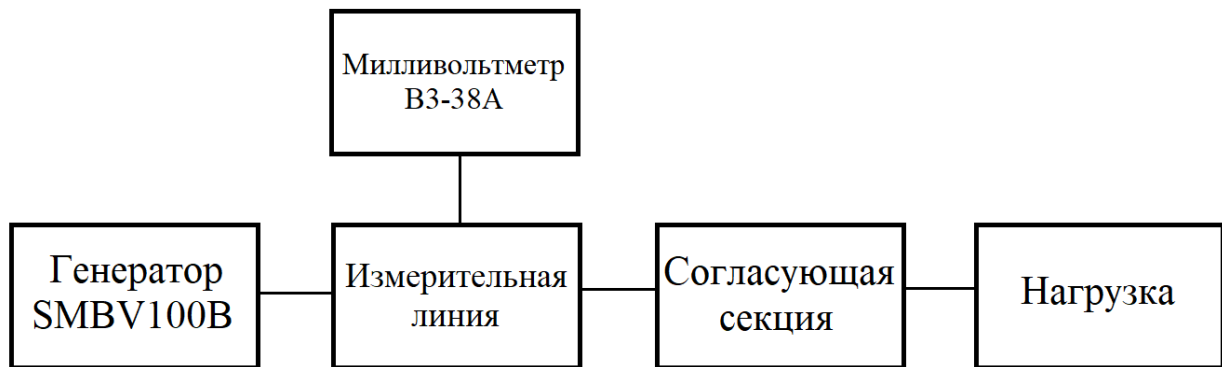


Рис. 4.3. Структурная схема лабораторной установки

1. Запустите векторный генератор сигналов SMBV100B путем нажатия на кнопку, обозначенную под номером 1 на рис. 4.4.

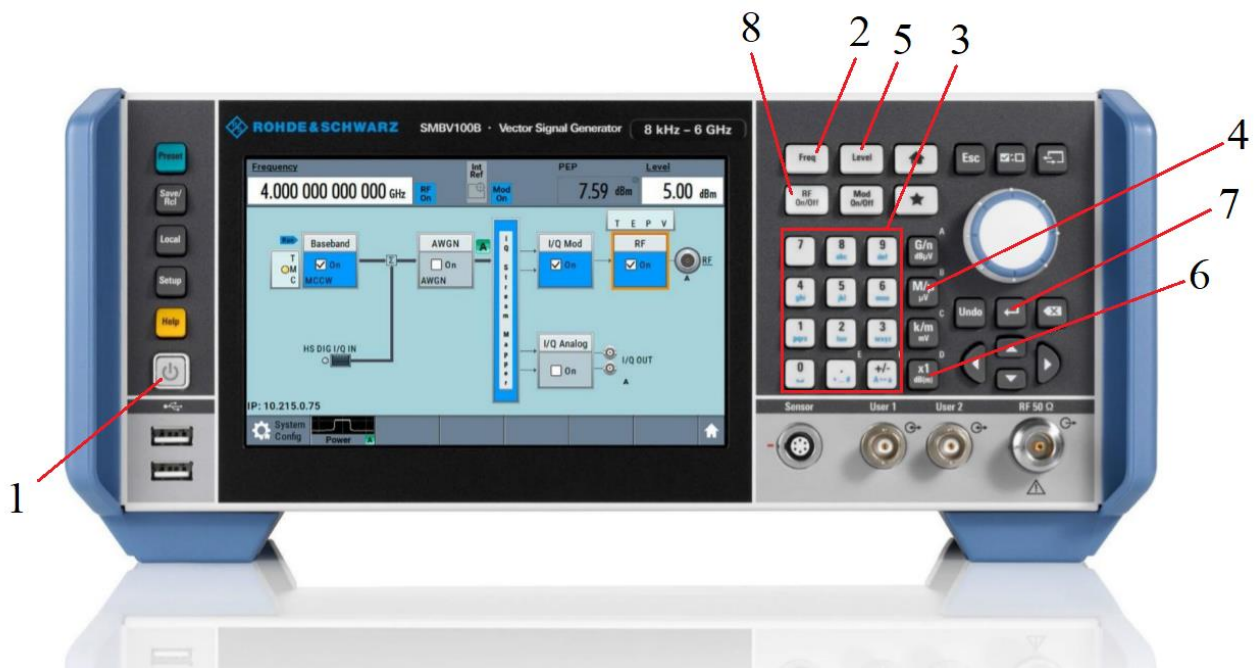


Рис. 4.4. Передняя панель векторного генератора сигналов SMBV100A

2. Запустите милливольтметр ВЗ-38А путем нажатия на кнопку, указанную под номером 1 на рис. 4.5.

3. На векторном генераторе нажмите кнопку **Freq**, обозначенную под номером 2 на рис. 4.4, при помощи клавиатуры, указанной на рис. 4.4 под цифрой 3 введите значение **2910**, а затем нажмите на кнопку **M/μ V**, обозначен-

ную на рис. 4.4 под номером 4. Тем самым Вы зададите значение частоты 2910 МГц на генераторе.



Рис. 4.5. Передняя панель милливольтметра В3-38А

4. Нажмите на генераторе кнопку **Level**, обозначенную цифрой 5 на рис. 4.4. При помощи клавиатуры 3 введите значение **20** и нажмите кнопку **x1 dB(m)**, указанную на рис. 4.4 под номером 6. Таким образом задается амплитуда излучаемого сигнала.

5. На сенсорном экране генератора нажмите на блок **RF** и найдите пункт **Amplitude Modulation**. Нажмите на него, а затем в открывшемся окне выберите строчку **Depth**. При помощи клавиатуры 3 введите значение **30** и нажмите на кнопку **Enter**, указанную под номером 7 на рис. 4.4. Это необходимо выполнить для задания глубины амплитудной модуляции сигнала.

6. В этом же окне запустите амплитудную модуляцию сигнала путем нажатия на ползунок в строчке **State**. При этом ползунок должен стать синим.

7. Нажмите на крестик в правом верхнем углу экрана для выхода из параметров блока RF.

8. Для излучения высокочастотного сигнала нажмите на кнопку **RF On/Off**, указанную на рис. 4.4 под цифрой 8. Кнопка начнет светиться синим цветом.

9. На милливольтметре В3-38А переключите ручку, указанную на рис. 4.5 под номером 2 в такое положение, чтобы белая риска показывала на строчку **20 dB (100 mV)**, указывающую на то, что на самой верхней шкале мил-

ливольтметра крайнее правое значение соответствует напряжению в 100 мВ, то есть для определения величины напряжения необходимо значение, указанное на верхней шкале стрелкой милливольтметра, умножить на 10.

10. В согласующей секции полностью выкрутите реактивный штырь из волновода.

11. Отсоедините нагрузку от согласующей секции и поставьте между ними короткозамыкающую пластину, а затем снова подсоедините нагрузку.

12. При помощи рукоятки переведите детекторную секцию в измерительной линии в крайнее правое положение. Медленно передвигая детекторную секцию влево найдите положение l_1 , при котором милливольтметр будет показывать минимальное значение напряжения. Уточните положение минимума при помощи метода «вилки»: детекторная каретка смещается сначала влево от минимума и на некотором расстоянии от него фиксируется значение амплитуды U_1 и положение детекторной головки z'_a . Затем детекторная каретка смещается вправо от предварительно зафиксированного минимума до тех пор, пока измерительный прибор не покажет то же самое значение амплитуды U_1 . Фиксируется положение детекторной головки z'_b . В результате более точное положение минимума определяется как $l_1 = (z'_a + z'_b)/2$. Полученное значение первого минимума (в миллиметрах) запишите в отчет.

13. Предварительно выставив детекторную секцию в положение первого минимума l_1 , при помощи рукоятки продолжайте передвигать ее влево до тех пор, пока милливольтметр снова не покажет минимальное значение напряжения. Зафиксируйте положение l_2 второго минимума и уточните его при помощи метода «вилки». Уточненное значение l_2 запишите в отчет.

14. Вычислите длину волны в волноводе Λ по формуле $\Lambda = 2 \cdot (l_1 + l_2)$. Запишите полученное значение в отчет и сравните с длиной волны, задаваемой в генераторе. При различных значениях длин волн сделайте вывод о причинах их различия.

15. Поставьте детекторную секцию в положение одного из ранее зафиксированных минимумов, например в положение l_2 .

16. Отсоедините нагрузку от согласующей секции и вместо короткозамыкающей пластины поставьте между ними выданную преподавателем емкостную либо индуктивную пластину, представляющую собой с физической точки зрения скачок волнового сопротивления в линии передач. Снова подсоедините нагрузку к согласующей секции.

17. При помощи перемещения детекторной каретки определите новое положение минимума l'_2 . Если $l'_2 < l_2$, то можно сделать вывод о том, что минимум сместился в сторону нагрузки. В этом случае реактивная составляющая сопротивления носит индуктивный характер и имеет положительный знак. При $l'_2 > l_2$ минимум сместился в сторону генератора и тогда реактивное сопротивление носит емкостной характер и, как следствие, имеет отрицательный знак. В отчете укажите направление смещения минимума, характер реактивного сопротивления и величину смещения $l' = l'_2 - l_2$.

18. Вычислите величину относительного смещения l'/Λ и запишите его в отчет.

19. При помощи детекторной секции и милливольтметра определите минимальное $U_{\min}$ и максимальное $U_{\max}$ значения напряжения. Запишите их в отчет и вычислите величину КБВ по формуле $\text{КБВ} = \sqrt{U_{\min}/U_{\max}}$. Рассчитанное значение КБВ также занесите в отчет.

20. На диаграмме Вольперта-Смита проведите окружность постоянного КБВ.

21. Из центра диаграммы проведите прямую через точку, соответствующую относительному смещению l'/Λ . При индуктивном характере реактивности величина l'/Λ откладывается по шкале «Длины волн к генератору», а при емкостном характере – по шкале «Длины волн к нагрузке».

22. Запишите в отчет значение нормированного сопротивления нагрузки z_n , определяемое как точка пересечения окружности постоянного КБВ и проведенной прямой.

23. Двигаясь по окружности постоянного КБВ от точки z_n на диаграмме Вольперта-Смита по часовой стрелке, найдите точку пересечения окружности постоянного КБВ и единичной окружности (окружности, любая точка которой имеет активную составляющую, равную единице). Величина вносимой штырем реактивности будет совпадать со значением реактивной составляющей данной точки, но противоположна по знаку. В отчете запишите величину вносимой штырем реактивности. Через найденную точку проведите прямую и запишите в отчет значение l''/Λ на шкале «Длины волн к генератору». В случае, если l'/Λ откладывалось по шкале «Длины волн к нагрузке», то к значению l''/Λ необходимо прибавить дополнительно $0,5\Lambda$, а также записать значение l'/Λ на шкале «Длины волн к генератору».

24. Определите расстояние от нагрузки до места включения реактивного штыря по формуле $L = (l'' - l') + 0,5\lambda - 40\text{мм}$.

25. Выставьте каретку с реактивным штырем на рассчитанное расстояние и погрузите штырь на определенную глубину в волновод.

26. При помощи детекторной секции вновь измерьте и запишите в отчет минимальное $U'_{\min}$ и максимальное $U'_{\max}$ значения напряжения, а также значение КБВ. В случае, если полученная величина $\text{КБВ} \geq 0,9$, то линия передачи согласована с нагрузкой. В случае, если полученное значение $\text{КБВ} < 0,9$, то в отчете сделайте вывод о возможных причинах, а затем путем регулировки глубины погружения штыря и места его расположения, добейтесь величины $\text{КБВ} \geq 0,9$ и в отчет запишите новое значение места включения штыря и величины КБВ. К отчету приложите диаграмму Вольперта-смита с расчетами.

27. Сделайте общие выводы по результатам, полученным в лабораторной работе (минимум 6 выводов).

Требования к отчету

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально.

Структура отчета следующая:

- титульный лист, оформленный в соответствии с приложением 1 данного пособия;
- подробное решение и ответ расчетного задания к лабораторной работе в соответствии с выбранным вариантом;
- результаты экспериментальной части, включающие:
 - положения минимумов напряжения при коротком замыкании;
 - значения определенной экспериментально и рассчитанной длины волны, вывод о возможных причинах их несоответствия;
 - положение минимума при включении неоднородности, направление его смещения, вывод о характере реактивности;
 - максимальное и минимальное значения напряжения после включения реактивности и величину КБВ;
 - диаграмму Вольперта-Смита с проделанными для согласования расчетами;
 - место включения и величину реактивности штыря после расчетов;
 - величину КБВ после расчетов;
 - место включения штыря и величину КБВ после корректировки;
- минимум 6 выводов о полученных результатах лабораторной работы.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 2.105-2019 «ЕСКД. Общие требования к текстовым документам».

Отчет должна быть выполнен с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги форматом А4 через полтора интервала.

Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, цифр и других знаков - 2,0 мм (шрифт Times New Roman, кегль 14). Выравнивание текста – по ширине страницы.

Текст отчета следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм.

Страницы отчета следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту ПЗ. Номер страницы проставляют в центре нижней части листа без точки.

Титульный лист включают в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляют.

Иллюстрации (чертежи, карты, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать в ПЗ непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице. При этом необходимо соблюдать полное заполнение каждой страницы. В случае автоматического переноса рисунка на следующую страницу, предыдущую необходимо заполнить текстом, следующим за рисунком.

Таблицы применяют для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей. Название таблицы должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другую страницу. При переносе части таблицы на другую страницу слово «Таблица», ее номер и наименование указывают один раз слева над первой частью таблицы, а над другими частями также слева пишут слова «Продолжение таблицы» и указывают номер таблицы. Допускается применять размер шрифта в таблице меньший, чем в тексте.

Все формулы и специальные знаки должны быть набраны в редакторе MathType. Формулы и уравнения рекомендуется выделять из текста в отдельную строку. Выше и ниже каждой формулы или уравнения должно быть оставлено не менее одной свободной строки. Если уравнение не уместится в одну строку, то оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знаков плюс (+), минус (–), умножения (×), деления (:) или других математических знаков, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак «×».

Пояснение значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они даны в формуле. Для этого в конце формулы ставится запятая, пропускается строка и с новой строки без абзацного отступа пишется слово «где» и идут пояснения всех нововведенных символов в формуле.

Формулы в ПЗ следует нумеровать порядковой нумерацией в пределах всей ПЗ арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке. Сама формула должна располагаться по центру строки.

Для защиты отчет необходимо распечатать каждому студенту индивидуально.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «бегущая волна».
2. При каких условиях в линии передачи устанавливается режим бегущей волны?
3. Что такое коэффициент бегущей волны и коэффициент стоячей волны? Как они связаны между собой?
4. От каких параметров зависит величина реактивности, вносимой штырем в линию передачи?
5. В чем состоит метод согласования при помощи диэлектрического трансформатора?
6. Согласовать линию передачи с нагрузкой с помощью четвертьволнового трансформатора.
7. Согласовать линию передачи с нагрузкой с помощью параллельного шлейфа.
8. Что представляет собой матрица рассеяния многополюсника? Какой физический смысл имеют элементы матрицы рассеяния?
9. В чем заключается преимущество матрицы передачи перед матрицей рассеяния?
10. Выведите выражения для определения элементов матрицы передачи через элементы матрицы рассеяния и наоборот.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ВОЛНОВодНЫЕ УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ФЕРРИТЫ

Цель работы: ознакомление с эффектами, возникающими в намагниченном феррите, и изучение волноводных устройств, использующих эти эффекты.

Краткие теоретические сведения

Феррит (англ. – *ferrite*) – магнитодиэлектрический материал с кристаллической структурой, которому присущи гироманнитные свойства. Относительная диэлектрическая проницаемость ферритов ϵ находится в пределах 8 – 16, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta=10^{-3}-10^{-2}$, магнитная проницаемость при отсутствии подмагничивания близка к единице. При отсутствии внешнего магнитного поля ферриты на всех частотах являются изотропными материалами с взаимными свойствами.

Различают три разновидности кристаллической структуры ферритов: шпинели, граната и гексагональная. Ферриты могут быть поликристаллическими и монокристаллическими. Производство поликристаллических ферритов осуществляется за технологией характерной для керамики – из смеси окислов с пластификатором формируют полуфабрикаты, которые потом спекают при температуре 1000 – 1400°C.

Рассмотрим основные явления в подмагниченных ферритах, на которых основывается работа устройств СВЧ.

Эффект Фарадея состоит в повороте плоскости поляризации электромагнитной волны при ее распространении вдоль поля подмагничивания H_0 . При распространении электромагнитной волны в гиротропной среде из точки A в точку B (рис. 5.1,а) по направлению вектора H_0 электрический вектор E поворачивается по часовой стрелке на угол Δ . При обратном распространении (рис. 5.1,б) вектор $\vec{E}$ поворачивается против часовой стрелки на тот же угол по ходу волны.

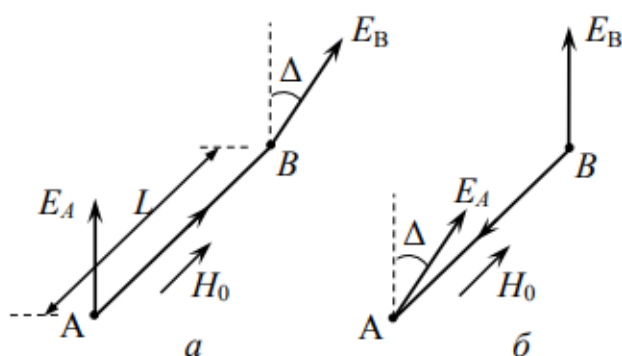


Рис. 5.1. Распространение волн в гиротропной среде: а – по направлению поля подмагничивания, б – в противоположном направлении

Эффект Фарадея в гиротропных средах объясняется тем, что эффективные магнитные проницаемости для волн круговой поляризации имеют разные значения с *правой* (μ_+) и *левой поляризации* (μ_-). Характер зависимостей μ_+ и μ_- для слабого магнитного поля H_0 приведен на рис. 5.2.

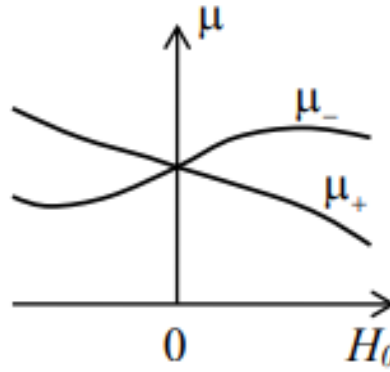


Рис. 5.2. Эффективные магнитные проницаемости феррита для слабого магнитного поля

Линейную поляризацию можно представить, как суперпозицию двух полей круговой поляризации E^+ и E^- (рис. 5.3, а), тогда для их фазовых скоростей (v_ϕ^+ , v_ϕ^-) и соответствующих длин волн этих полей (Λ^+ , Λ^-) можно записать следующие выражения:

$$v_\phi^+ = c / \sqrt{\epsilon \mu_+}; \quad v_\phi^- = c / \sqrt{\epsilon \mu_-}, \quad (5.1)$$

$$\Lambda_\phi^+ = \lambda / \sqrt{\epsilon \mu_+}; \quad \Lambda_\phi^- = \lambda / \sqrt{\epsilon \mu_-}. \quad (5.2)$$

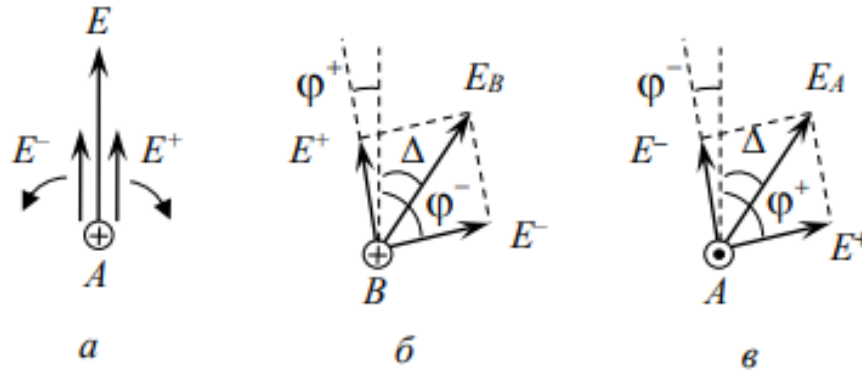


Рис. 5.3. Направления векторов электрического поля: а – в начальной точке А, б – в конечной точке В, в – в конечной точке А

Векторы E^+ и E^- в точке В (рис. 5.3, б) будут отставать по фазе от соответствующих векторов в точке А за счет разности хода на углы

$$\varphi^+ = 2\pi L / \Lambda^+; \quad \varphi^- = 2\pi L / \Lambda^-. \quad (5.3)$$

Поскольку при прямом распространении ($H_0 > 0$) $\mu_+ < \mu_-$ (рис. 5.2), вектор E^+ в точке В отстает на меньший угол, чем E^- . А результирующий вектор E_B поворачивается на угол $\Delta = 0,5(\varphi^- - \varphi^+)$.

При обратном распространении ($H_0 < 0$) $\mu_+ > \mu_-$ (рис. 5.2) вектор E^+ в точке А (рис. 5.3, в) отстает на больший угол, чем E^- . Результирующий вектор E поворачивается на угол $\Delta = 0,5(\varphi^+ - \varphi^-)$.

При слабых полях угол поворота Δ пропорционален напряженности подмагничивания H_0 и расстоянию между точками L . При увеличении H_0 наступает насыщение. Эффект Фарадея является невзаимным, то есть угол поворота плоскости поляризации не зависит от направления распространения волны и

именно этим объясняется невзаимность эффекта Фарадея. Происхождение термина «гиротропия» связано именно с этим эффектом.

В ферритах в относительно сильном продольном или поперечном магнитном поле наблюдается явление *ферромагнитного резонанса*. При продольном подмагничивании резонанс имеет место тогда, когда частота волны круговой поляризации правого вращения приближается к частоте прецессии электронов

$$f_{\parallel} = f_0 \cong 2,84H_0, \quad (5.4)$$

где f – частота в мегагерцах, а H_0 в эрстедах.

Поперечное подмагничивание дает несколько большую резонансную частоту

$$f_{\perp} = f_0 \sqrt{1 + M_0/H_0}, \quad (5.5)$$

где M_0 – намагниченность феррита.

На рис. 5.4 показан характер зависимостей магнитных проницаемостей феррита для правополяризованной волны $\mu_+ = \mu'_+ + j\mu''_+$ и левополяризованной μ_- от величины H_0 . Из графиков видно, что магнитная проницаемость для правополяризованной волны имеет резонансный характер, и мнимая составляющая магнитной проницаемости μ''_+ , учитывающая потери в феррите, максимальна при резонансе. Резонансный характер магнитной проницаемости μ_+ обусловлен тем, что частота и направление возбуждающего поля совпадает с частотой и направлением прецессии электронов. Для левополяризованной волны направление вращения поля и прецессии электронов противоположны, резонанс невозможен, и магнитная проницаемость μ_- изменяется плавно.

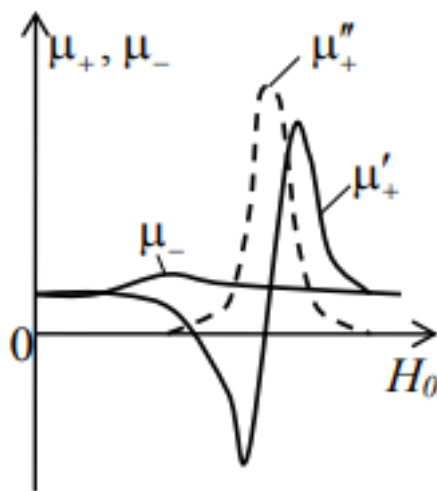


Рис. 5.4. Компоненты магнитных проницаемостей феррита в сильном магнитном поле

Частоту резонанса f_0 путем изменения напряженности поля подмагничивания H_0 можно подобрать равной рабочей частоте колебаний.

Правополяризованные волны при распространении в направлении H_0 испытывают затухание, а волны, распространяющиеся против вектора H_0 , практически не испытывают затухания.

В тонких ферритовых пластинах в прямоугольном волноводе с волной типа H_{10} при поперечном подмагничивании наблюдается невзаимный фазовый сдвиг. Ферритовая пластина располагается между серединой волновода и одной из узких стенок, пластина подмагничивается слабым полем H_0 перпендикулярно. При этом структура поля волны H_{10} почти не нарушается.

Невзаимный фазовый сдвиг обусловлен следующим. Компоненты магнитного поля основной волны в прямоугольном волноводе H_{10} определяются следующим образом:

$$H_x = \pm A^\pm \frac{\pi}{a} \sin \frac{\pi x}{a} \exp \left[j(\omega t \mp \beta z + \varphi^\pm) \right], \quad (5.6)$$

$$H_z = -jA^\pm \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \frac{1}{\gamma} \cos \frac{\pi x}{a} \exp \left[j(\omega t \mp \beta z + \varphi^\pm) \right], \quad (5.7)$$

где A – амплитуда волны; β – постоянная распространения; φ – начальная фаза; верхний и нижний индексы относятся соответственно к волнам, которые распространяются в направлении увеличения и уменьшения координаты z .

Если амплитуду составляющей H_z принять равной единице, тогда

$$H_x = \pm j \frac{2a}{\Lambda} \sin \frac{\pi x}{a} \exp \left[j(\omega t \mp \beta z + \varphi^\pm) \right], \quad (5.8)$$

$$H_z = \cos \frac{\pi x}{a} \exp \left[j(\omega t \mp \beta z + \varphi^\pm) \right], \quad (5.9)$$

где Λ – длина волны в волноводе.

Наличие множителя $\pm j$ в уравнении (5.8) указывает на то, что компоненты поля H_z и H_x сдвинуты по фазе относительно друг друга соответственно на $\pm 90^\circ$. Таким образом, существуют две симметричные плоскости x_1 и x_2 (рис. 5.5), в которых амплитуды компонент одинаковы $|H_z| = |H_x|$ и поле H имеет круговую поляризацию. Положения этих плоскостей можно определить, приравняв амплитуды компонент (5.8) и (5.9):

$$\frac{2\pi}{\Lambda} \sin \frac{\pi x}{a} = \cos \frac{\pi x}{a}, \quad (5.10)$$

и находя корни этого уравнения

$$x_1 = \frac{a}{\pi} \arctg \frac{\Lambda}{2a}; \quad x_2 = a - x_1. \quad (5.11)$$

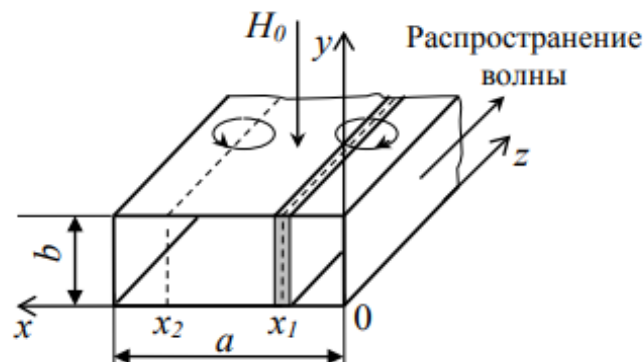


Рис. 5.5. Положения плоскостей круговой поляризации в прямоугольном волноводе

В плоскостях x_1 и x_2 каждому направлению распространения волны соответствует определенное направление круговой поляризации. При таком размещении ферритовой пластины и таком направлении распространения волны, как это указано на рис. 5.5, в феррите будет правополяризованное поле и фазовая скорость будет определяться μ_+ . Для волны, которая будет распространяться в обратном направлении, поле в феррите будет левополяризованным, и фазовая скорость будет определяться μ_- . Поскольку μ_+ и μ_- имеют разные значения, то и фазовый сдвиг на единицу длины ферритовой пластины при прямом и обратном направлениях распространения волны будет разным, то есть не взаимным.

Ферритовые пластины ограниченной длины характеризуются дифференциальным (разностным) фазовым сдвигом $\Delta\varphi$. С увеличением толщины пластины для максимизации $\Delta\varphi$ пластину размещают ближе к стенке волновода. При заданных значениях подмагничивающего поля H_0 и характеристиках феррита можно найти такую толщину пластины возле самой стенки волновода, которая обеспечивает максимальную величину $\Delta\varphi$. Это очень важно для эффективного теплоотвода.

В прямоугольном волноводе со сравнительно толстой ферритовой пластиной при сильном поперечном поле подмагничивания наблюдается явление «смещения поля». Суть этого явления состоит в том, что для одного направления распространения волны феррит имеет магнитную проницаемость, которая существенно превышает единицу и поле концентрируется вблизи пластины (рис. 5.6,а). То есть пластина работает как диэлектрический волновод, в котором распространяется поверхностная волна. Для обратного распространения волны $\mu \approx 1$ и феррит мало влияет на структуру поля (рис. 5.6,б). В этом случае волна «вытесняется» из пластины. Поле подмагничивания в несколько раз меньше резонансного.

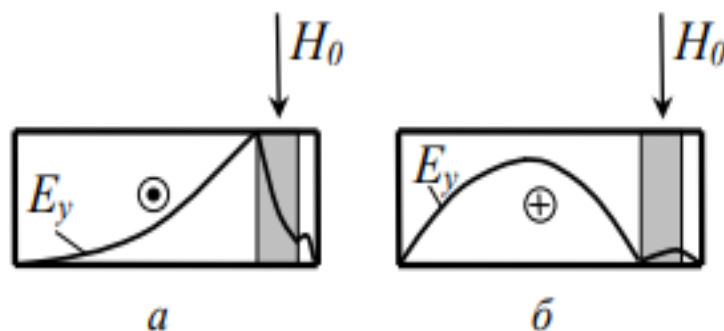


Рис. 5.6. Явление «смещения поля»: а – распределение вектора E для падающей волны, б – для отраженной волны

Задание к расчетной части

1. Подробно ознакомиться и дать краткое описание работы одного из предложенных в табл. 5.1 устройств и эффектов. Номер задания, которое должен выполнять студент при подготовке к лабораторной работе, определяется последней цифрой шифра его студенческого билета
2. Дать описание матрицы рассеяния заданного устройства.

Таблица 5.1

Ферритовые устройства СВЧ и эффекты в ферритовой среде

Последняя цифра студенческого билета	Название ферритового устройства СВЧ	Название ферромагнитного свойства или явления
0	Вентиль Фарадея	Эффекты, наблюдаемые и используемые при распространении электромагнитных волн в поперечно-намагниченной ферритовой среде
1	Поляризационный циркулятор	Эффекты, наблюдаемые и используемые при распространении электромагнитных волн в продольно-намагниченной ферритовой среде
2	Ферритовый переключатель	Эффект «смещения поля»
3	Резонансный вентиль на прямоугольном волноводе	
4	Резонансный вентиль на коаксиальном волноводе	Невзаимный фазовый сдвиг в прямоугольном волноводе с ферритовой пластиной
5	Вентиль со смещением поля	
6	Фазовый циркулятор на двух щелевых мостах	Ферромагнитный резонанс
7	Фазовый циркулятор на основе щелевого моста и двойного волноводного тройника	
8	Y-циркулятор	Эффект Фарадея
9	Вентиль на круглом волноводе	

Порядок выполнения работы

Структурная схема лабораторной установки для измерения прямых и обратных потерь вентиль представлена на рис. 5.7. Она состоит из генератора сигналов компании Rohde&Schwarz SMB100A, аттенюатора ДЗ-33А, исследуемого вентиль и осциллографа компании Rohde&Schwarz RTO2032.

1. Запустите генератор сигналов SMB100A, нажав на кнопку, обозначенную под номером 1 на рис. 5.8.

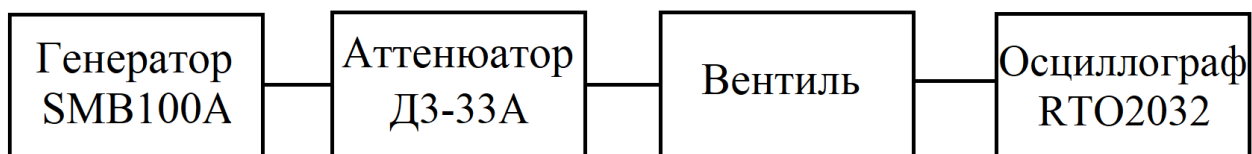


Рис. 5.7. Структурная схема лабораторной установки для измерения прямых и обратных потерь вентиля

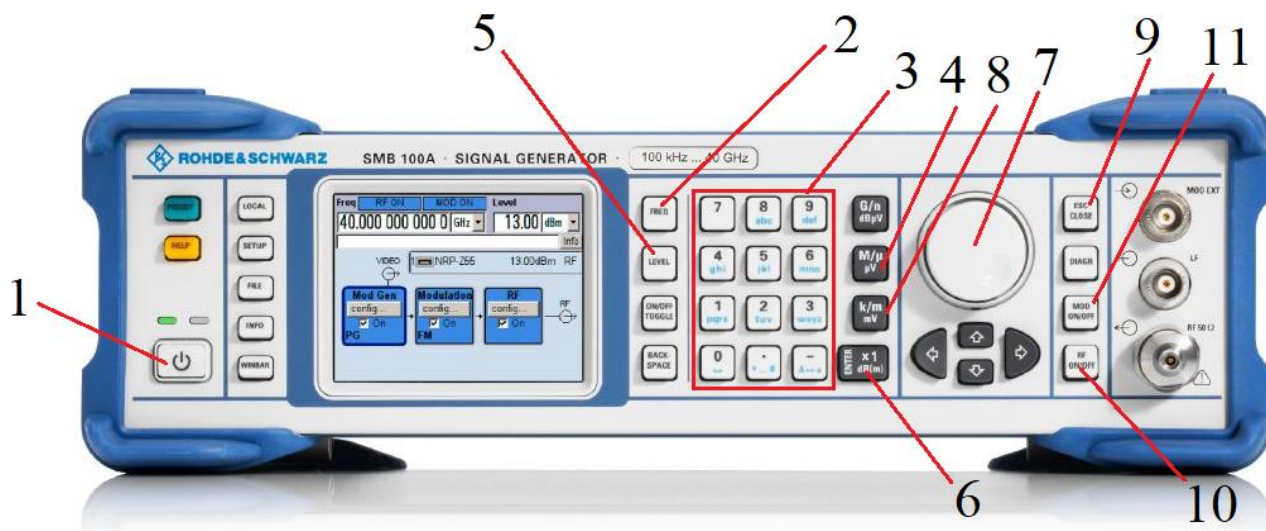


Рис. 5.8. Передняя панель генератора сигналов SMB100A

2. Включить аттенюатор ДЗ-33А, переместив переключатель «СЕТЬ» в положение **I**.
3. Выкрутить ручку на аттенюаторе таким образом, чтобы на его экране было выставлено значение затухания 0 дБ.
4. Нажмите на кнопку **Freq**, указанную под цифрой 2 на рис. 5.8. Эта кнопка предназначена для задания частоты. С помощью клавиатуры, обозначенной цифрой 3 на рис. 5.8 введите значение **9953.5** и нажмите кнопку **M/μ μV**, обозначенную на рис. 5.8 цифрой 4. Введенное значение соответствует частоте 9953,5 МГц.
5. Теперь установите требуемую амплитуду сигнала. Для этого нажмите кнопку **Level**, указанную под номером 5 на рис. 5.8. С помощью клавиатуры введите значение 17 и нажмите кнопку **Enter x1 dB(m)**, показанную на рис. 5.8 под номером 6. Введенное значение амплитуды соответствует уровню 17 dBm.
6. Нажмите на колесико, обозначенное цифрой 7 на рис. 5.8, чтобы выйти из режима редактирования значения уровня сигнала. В результате окошко со значением 17.00 dBm должно стать белым.

7. Вращая колесико 7, выберите на экране генератора блок **Modulation**. При наведении колесика на данный блок, он будет обведен в черную рамочку.

8. Нажав на этот блок колесиком 7, в выпадающем списке выберите **Amplitude Modulation** для задания модуляции сигнала и снова нажмите на колесико 7.

9. В открывшемся окне, вращая колесико 7, выберите строку **AM Depth** для задания значения глубины модуляции, нажмите на нее колесиком 7 и с помощью клавиатуры 3 введите значение глубины модуляции, равное **50%**. После этого снова нажмите на колесико.

10. В этом же окне при помощи колесика 7 выберите строку **LF Gen Freq** и задайте частоту модулируемого колебания **5 кГц**. Для этого после выбора строки нажмите на нее колесиком 7, введите с помощью клавиатуры 3 значение **5** и нажмите на кнопку **k/m mV**, обозначенную на рис. 5.8 под номером 8.

11. Нажмите на клавишу **Esc Close** под номером 9 на рис. 5.8 для выхода из окна задания модуляции.

12. Запустите высокочастотный выход генератора путем нажатия кнопки **RF On/Off**, указанной под номером 10 на рис. 5.8.

13. Запустите модуляцию сигнала путем нажатия кнопки **Mod On/Off**, указанную под номером 11 на рис. 5.8.

14. Запустите осциллограф RTO2032 путем нажатия на кнопку, обозначенную под цифрой 1 на рис. 5.9.



Рис. 5.9 – Внешний вид передней панели осциллографа RTO2032

15. В случае если после запуска осциллографа вместо окна интерфейса открывается рабочий стол с ярлыками, то необходимо нажать на сенсорном экране на ярлык **RSx** для запуска программы работы с осциллограммами.

16. Подсоедините детекторную секцию от осциллографа к аттенюатору.

17. Ручное масштабирование осуществляется при помощи ручек **Scale** в областях **Horizontal** и **Vertical**, обозначенных на рис. 5.9 цифрами 2 и 3 соответственно. Отрегулируйте масштаб на осциллографе таким образом, чтобы прямоугольные импульсы полностью уместались на экране осциллографа.

18. Выкрутите ручку на аттенюаторе до тех пор, пока амплитуда прямоугольных импульсов не достигнет величины в 2 мВ. Запишите в отчет значение затухания L_1 .

19. Между детекторной секцией и аттенюатором поставьте выданный преподавателем вентиль на прямое прохождение. При прямом прохождении стрелочка на вентиле должна быть направлена на детекторную секцию.

20. Снова выкрутите ручку на аттенюаторе до тех пор, пока амплитуда прямоугольных импульсов не достигнет величины в 2 мВ. Запишите в отчет значение затухания L'_2 .

21. Вычислите и вставьте в отчет прямые потери в вентиле по формуле $L' = L_1 - L'_2$.

22. Выставьте на аттенюаторе значение затухания L_1 .

23. Поставьте вентиль на обратное прохождение. При этом случае стрелочка на вентиле должна быть направлена на аттенюатор.

24. Крутя ручку на осциллографе добейтесь значения амплитуды прямоугольных импульсов в 2 мВ и запишите в отчет значение затухания L''_2 . В случае, если значение затухания на экране аттенюатора равно нулю, а амплитуда импульсов все еще не достигает значения в 2 мВ, то примите величину затухания $L''_2 = 0$ дБ.

25. Вычислите и вставьте в отчет обратные потери в вентиле по формуле $L'' = L_1 - L''_2$.

26. Отсоедините вентиль от аттенюатора и детекторной секции и переходите к исследованию Y-циркулятора.

Структурная схема лабораторной установки для измерения прямых и обратных потерь Y-циркулятора представлена на рис. 5.10. Она состоит из генератора сигналов компании Rohde&Schwarz SMB100A, аттенюатора ДЗ-33А,

исследуемого Y-циркулятора, согласованной нагрузки и осциллографа компании Rohde&Schwarz RTO2032.

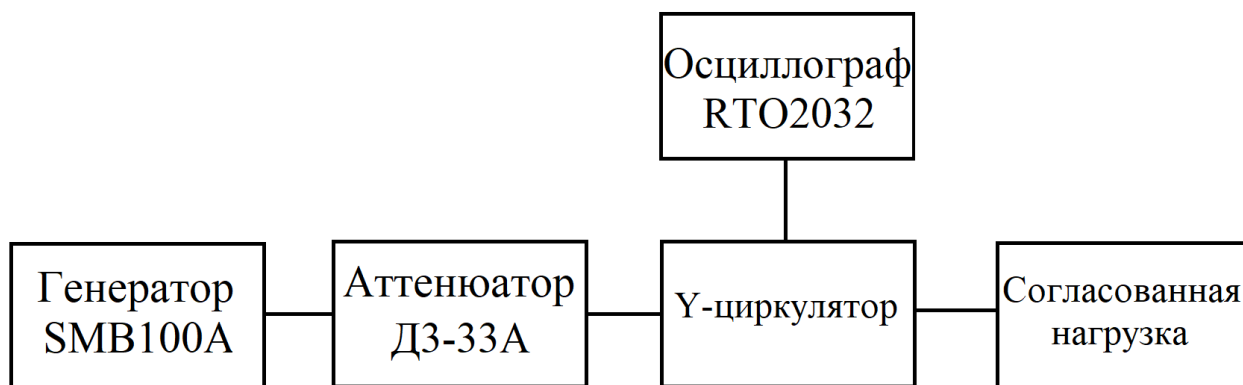


Рис. 5.10. Структурная схема лабораторной установки для измерения прямых и обратных потерь Y-циркулятора

27. Подключите детекторную секцию от осциллографа напрямую к аттенюатору и, крутя на нем ручку, добейтесь значения амплитуды прямоугольных импульсов в 1 мВ. Запишите и вставьте в отчет значение затухания L_3 .

28. Подключите к аттенюатору плечо 1 Y-циркулятора. К плечу 2 подсоедините согласованную нагрузку, а к плечу 3 – детекторную секцию от осциллографа. При помощи ручки аттенюатора добейтесь амплитуды прямоугольных импульсов в 1 мВ и запишите значение затухания L'_4 .

29. Вычислите и вставьте в отчет прямые потери в Y-циркуляторе по формуле $L' = L_3 - L'_4$.

30. На аттенюаторе выставьте значение затухания L_3 .

31. К плечу 3 Y-циркулятора подсоедините согласованную нагрузку, а к плечу 2 – детекторную секцию от осциллографа. При помощи ручки аттенюатора добейтесь амплитуды прямоугольных импульсов в 1 мВ и запишите значение затухания L''_4 .

32. Вычислите и вставьте в отчет прямые потери в Y-циркуляторе по формуле $L'' = L_3 - L''_4$.

33. Сделайте общие выводы по результатам, полученным в лабораторной работе (минимум 6 выводов).

Требования к отчету

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально.

Структура отчета следующая:

- титульный лист, оформленный в соответствии с приложением 1 данного пособия;

- подробный ответ к расчетному заданию по лабораторной работе в соответствии с выбранным вариантом;
- результаты экспериментальной части, включающие величину затухания, вносимого аттенуатором при исследовании вентиля и Y-циркулятора, а также величины прямых и обратных потерь в Y-циркуляторе.
- минимум 6 выводов о полученных результатах лабораторной работы.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 2.105-2019 «ЕСКД. Общие требования к текстовым документам».

Отчет должна быть выполнен с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги форматом А4 через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, цифр и других знаков - 2,0 мм (шрифт Times New Roman, кегль 14). Выравнивание текста – по ширине страницы.

Текст отчета следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм.

Страницы отчета следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту ПЗ. Номер страницы проставляют в центре нижней части листа без точки.

Титульный лист включают в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляют.

Иллюстрации (чертежи, карты, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать в ПЗ непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице. При этом необходимо соблюдать полное заполнение каждой страницы. В случае автоматического переноса рисунка на следующую страницу, предыдущую необходимо заполнить текстом, следующим за рисунком.

Таблицы применяют для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей. Название таблицы должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другую страницу. При переносе части таблицы на другую страницу слово «Таблица», ее номер и наименование указывают один раз слева над первой частью таблицы, а над другими частями также слева пишут слова «Продолжение таблицы» и указывают номер таблицы. Допускается применять размер шрифта в таблице меньший, чем в тексте.

Все формулы и специальные знаки должны быть набраны в редакторе MathType. Формулы и уравнения рекомендуется выделять из текста в отдельную строку. Выше и ниже каждой формулы или уравнения должно быть оставлено не менее одной свободной строки. Если уравнение не уместится в одну строку, то оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знаков плюс (+), минус (–), умножения (×), деления (:) или других математических знаков, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак «×».

Пояснение значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они даны в формуле. Для этого в конце формулы ставится запятая, пропускается строка и с новой строки без абзачного отступа пишется слово «где» и идут пояснения всех нововведенных символов в формуле.

Формулы в ПЗ следует нумеровать порядковой нумерацией в пределах всей ПЗ арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке. Сама формула должна располагаться по центру строки.

Для защиты отчет необходимо распечатать каждому студенту индивидуально.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Фарадея?
2. На чем основан эффект «смещения поля»?
3. Какое устройство называется вентилем? Какие параметры вентили известны?
4. Каков принцип работы фарадеевского вентили?
5. Какое устройство называется циркулятором?
6. Опишите принцип работы фазового циркулятора на двух щелевых мостах.
7. В чем заключается принцип работы фазового циркулятора на щелевом мосте и двойном волноводном тройнике?
8. Какое устройство называется Y-циркулятором? В чем заключается его принцип работы?
9. Опишите принцип работы поляризационного циркулятора.
10. Что такое ферритовый переключатель?

ЧАСТЬ 2. ПРОГРАММНО-ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН В СРЕДЕ ALTAIR HYPERWORKS FEKO

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ АН- ТЕНН В СРЕДЕ ALTAIR HYPERWORKS FEKO

Цель работы: изучение интерфейса программной среды Altair FEKO, областей ее применения, правил построения антенны в CADFEKO и ее анализ в POSTFEKO.

Краткие теоретические сведения

Altair FEKO – это программный комплекс для численного электромагнитного анализа, основанный на передовых методах вычислительной электродинамики. Altair FEKO позволяет решать широкий круг исследовательских и прикладных задач в различных отраслях – от проектирования антенн и функциональных узлов бытовых и носимых радиотехнических устройств до оценки характеристик радиотелескопов и влияния объектов размещения антенн на итоговые параметры диаграммы направленности.

Возможности использования различных методов электромагнитного моделирования, реализованные в FEKO, делают этот программный продукт применимым для решения разнообразных задач во многих отраслях промышленности. В рамках единой системы лицензирования, Altair FEKO предоставляет разработчикам возможность проведения электродинамического анализа с использованием различных методов как в частотной, так и во временной области. Возможна также и работа с гибридными моделями, сочетающими различные строгие и приближённые алгоритмы.

Altair FEKO применяется в следующих областях науки и техники:

- антенная техника: анализ и оптимизация характеристик излучающих структур различного назначения и принципа действия (от электрически малых антенн со сложной геометрией – до крупноапертурных квазиоптических конструкций; от резонансных – до сверхширокополосных), доступны также специализированные инструменты;
- элементы СВЧ- и радиотракта: анализ и оптимизация характеристик функциональных узлов (переходы между трактами разного типа, делители, резонаторы, фильтры и т.д.) на основе круглых, прямоугольных и коаксиальных волноводов, полосковых и проволочных структур;
- специальные материалы и периодические структуры: при создании моделей возможна работа с анизотропными материалами (включая проводники), слоистыми композитами, анализ электрических характеристик частотно-селективных поверхностей и метаматериалов;
- антенные решётки: анализ электрических характеристик антенных решёток, включая разреженные и непериодические;
- электромагнитная совместимость (ЭМС): анализ эффективности экранирования, паразитного взаимовлияния радиотехнических систем через ка-

бельные сборки (коаксиальных или многожильных со сложной структурой) с учётом укладки на объекте-носителе, формирование требований к защитным зонам;

- взаимодействие электромагнитных полей и биологических объектов: анализ однородных и неоднородных тел, расчет удельной поглощённой мощности (SAR), анатомические модели для исследований в области биомедицинской техника;
- рассеяние электромагнитных волн (ЭМВ): исследование рассеяния ЭМВ структурами с произвольным электрическими размерами и геометрией, анализ моностатической и бистатической диаграммы эффективной площади рассеяния (ЭПР) объектов возможна как строгими, так и приближёнными вычислительными методами.

Порядок выполнения работы

Пакет электродинамического моделирования FEKO содержит ряд модулей, каждый из которых выполняет свою функцию:

Модуль *CADFEKO* – компонент для создания геометрии, «меширования» (создания сетки разбиения для численного дальнейшего расчета модели, например методом моментов или конечных элементов), установки параметров модели (напряжения, токов, импедансов, мощностей, частоты, магнитодиэлектрических параметров модели и окружающего пространства, свойств симметрии, и т.д.), целей моделирования (ДН, импеданс и т.д.), параметров оптимизации. Важно отметить, что геометрия электродинамической модели СВЧ устройства или системы может быть исполнена в любом из САПРов, поддерживающих импортируемые форматы *CADFEKO*, в том числе с расширением *.parasolid.

Дополнительные электромагнитные параметры и требования могут быть установлены также в компоненте *EDITFEKO*, который представляет собой редактор скриптов. Данный инструмент очень гибок и позволяет создавать геометрию и установки «с нуля» (без использования *CADFEKO*), имеет все возможности, которые доступны в *CADFEKO*, а также другие, использование которых в последнем не предусмотрено.

Модуль *POSTFEKO* используется для предпросмотра установок созданной модели и для просмотра результатов моделирования.

PREFEKO – модуль, отвечающий за создания сетки и подготовки геометрии и установок модели для вычислительного ядра FEKO.

ADAPTFEKO – модуль, позволяющий более тщательно моделировать частотные зависимости параметров вблизи резонансов путем адаптации шага сетки частоты и методов интерполяции.

ОРТФЕКО – компонент, служащий для оптимизации модели по заданным критериям.

TIMEFEKO – инструмент, позволяющий решать задачи электродинамики во временной области.

Однако для решения задач лабораторных исследований в среде FEKO задействуются три основных модуля: CADFEKO – для создания геометрии электродинамической модели, PREFEKO – для автоматической подготовки модели к вычислению ее радиотехнических параметров и POSTFEKO – для графической визуализации результатов программного моделирования. Подробное описание графического интерфейса FEKO приведено на сайте <http://www.feko.info/>.

С целью быстрого ознакомления с параметрическим моделированием в среде FEKO и ее графическим интерфейсом приведем пример реализации практической задачи исследования радиотехнических характеристик РСВ-антенны с П-образным микрополосковым резонатором на диэлектрическом основании FR-4 (рис. 5.1).

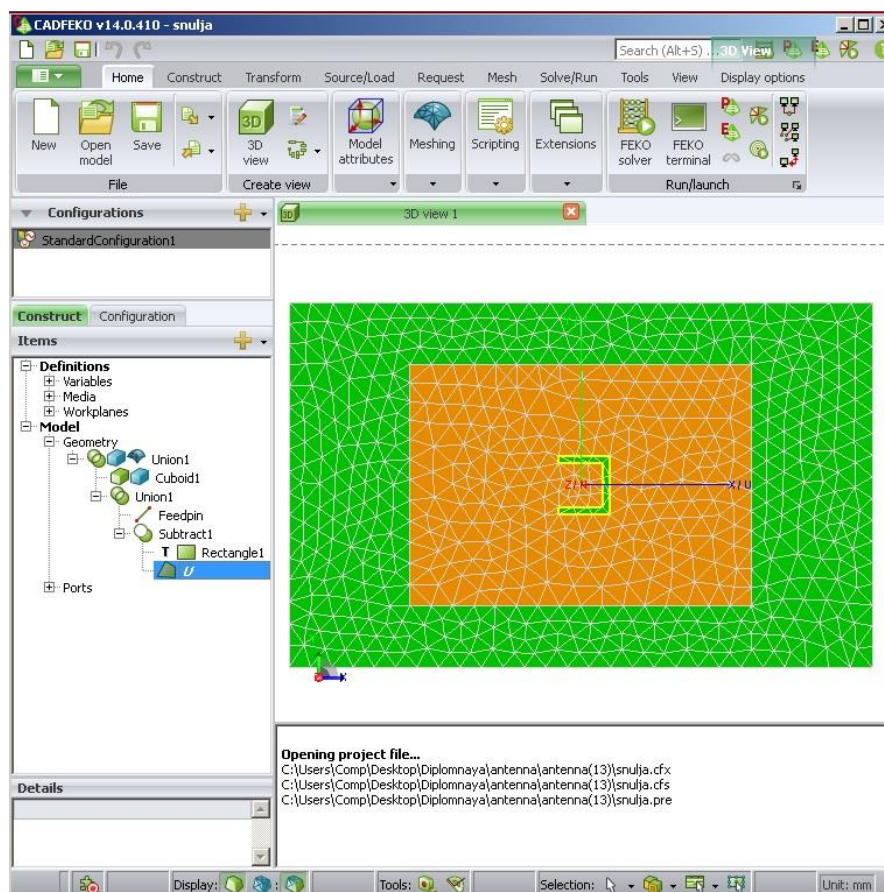


Рис. 5.1 – РСВ-антенна с П-образным МПЛ излучателем

Приведем алгоритм построения антенны в CADFEKO:

1. Запускаем программу **CADFEKO** (рис. 5.2).

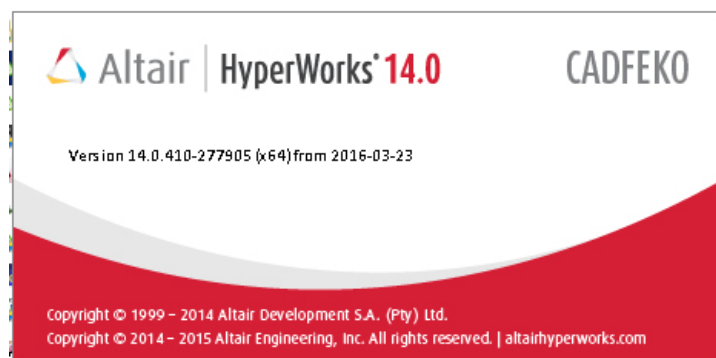


Рис. 5.2 – Запуск программы CADFEKO

2. Нажимаем **Create a new model** (рис. 5.3).

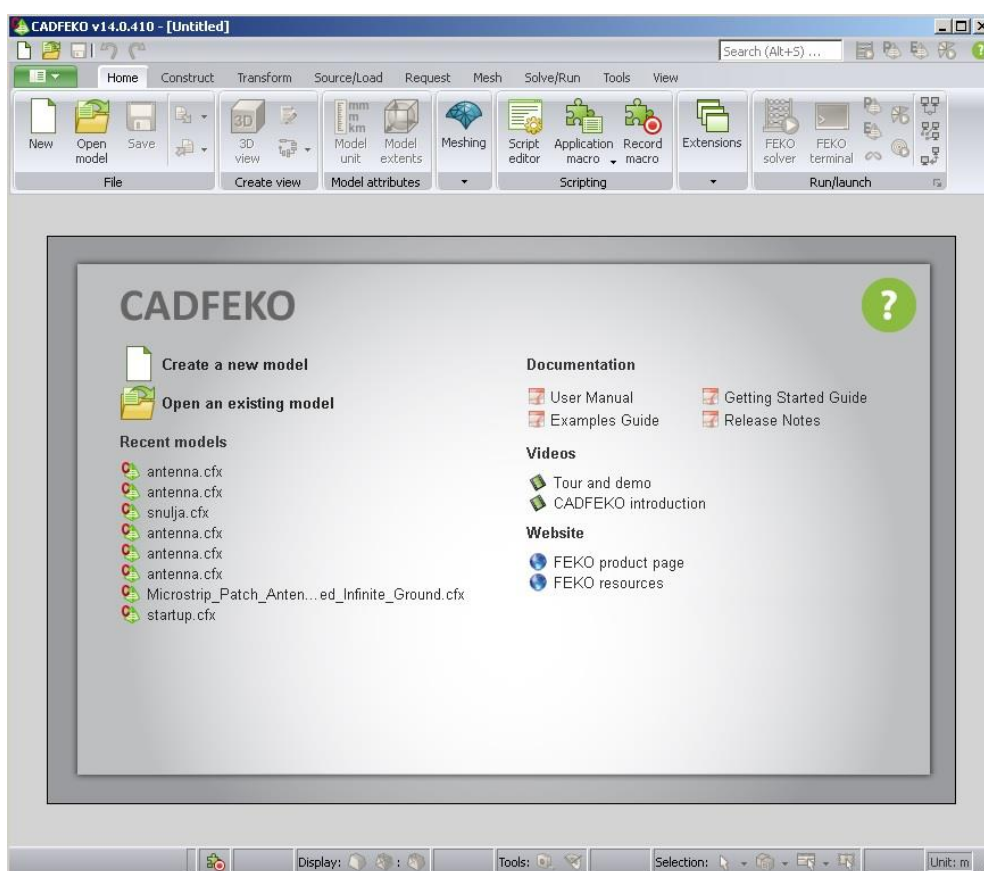


Рис. 5.3 – Стартовый графический интерфейс CADFEKO

3. Сверху, во вкладке **Home**, в **Model attributes**, в **Model unit** выбираем **Millimetres** и нажимаем **OK** (рис. 5.4).

4. Слева, в панели **Construct**, в **Definitions**, открываем **Variables** путем нажатия на «+», а затем двойным кликом мыши по **Variables** создаем переменные как показано на рис. 5.5. и нажимаем **Create** после создания каждой переменной.

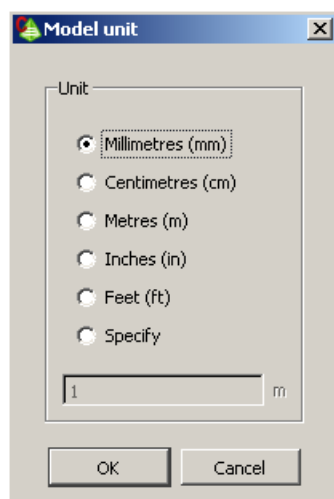


Рис. 5.4 – Окно единиц измерения CADFEKO

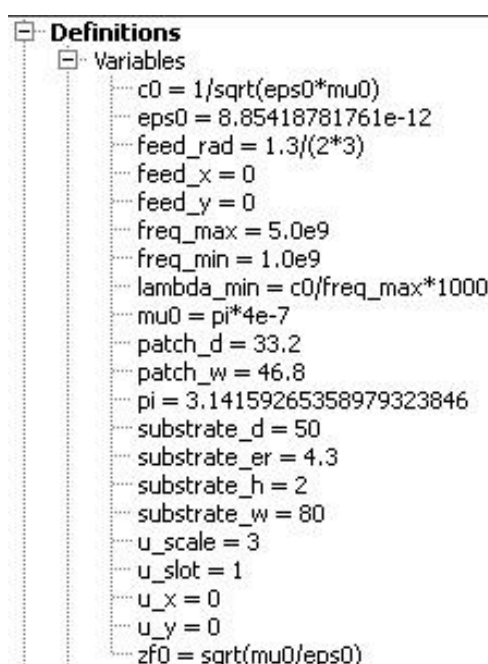


Рис. 5.5 – Значения параметров в дереве построения

5. Слева, в панели **Construct**, в **Definitions**, двойным кликом по **Media** вызываем окно **Create dielectric medium** (рис. 5.6).

6. В окне меняем **Relative permittivity** на значение 4.3, что соответствует значению диэлектрической проницаемости материала FR-4, меняем параметр **Label** на **substrate** и нажимаем **Create**. Чтобы поменять цвет, нажимаем на **substrate** правой кнопки мыши, нажимаем **Change display colour** и выбираем любой цвет, например, зеленый.

7. Сверху, во вкладке **Construct**, в **Create surface** нажимаем **Rectangle** (рис. 5.7).

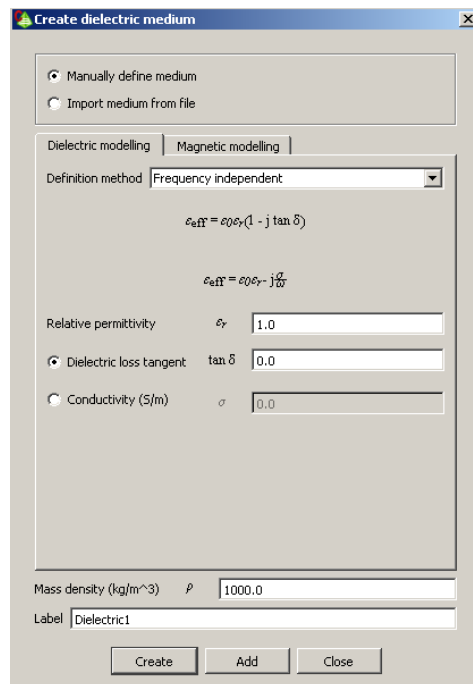


Рис. 5.6 – Окно создания подложки

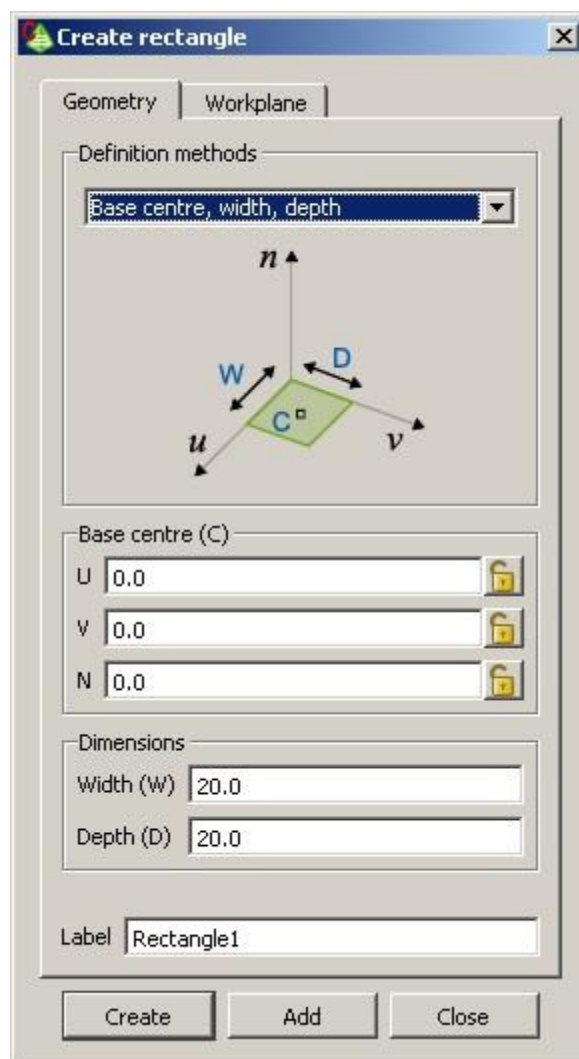


Рис. 5.7 – Окно создания прямоугольника

8. В открывшемся окне, в **Definition methods** выбираем **Base centre**, **width**, **depth**. Ниже **Base centre** оставляем **(0, 0, 0)**, потом задаем ширину **width patch_w**, длину **depth patch_d**, название оставим по умолчанию **Rectangle1** и нажимаем **Create**. Слева выделяем **Rectangle1** в **Model** и ниже в **Details** нажимаем **Face1** правой кнопки мыши, выбираем **Properties** (рис. 5.8).

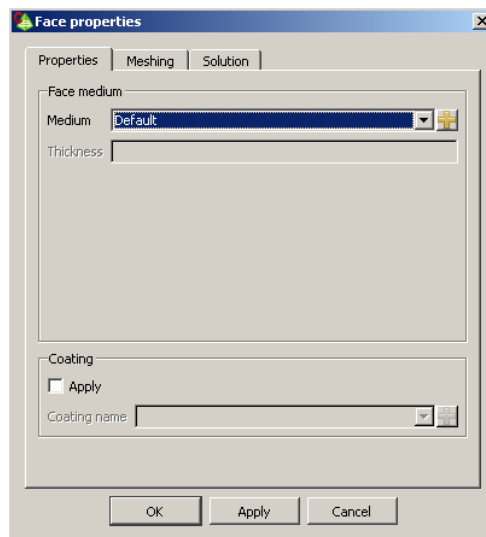


Рис. 5.8 – Окно свойств стороны прямоугольника

9. В **Face properties**, в **Medium** выбираем **Perfect electric conductor** и нажимаем **OK**.

10. Во вкладке **Construct**, в **Create surface** нажимаем **Polygon** (рис. 5.9), задаем точки по порядку **(-u_scale+u_x-u_slot, u_scale+u_y, 0)**, **(-u_scale+u_x, u_scale+u_y, 0)**, **(-u_scale+u_x, -u_scale+u_y, 0)**, **(u_scale+u_x, -u_scale+u_y, 0)**, **(u_scale+u_x, u_scale+u_y, 0)**, **(u_scale+u_x+u_slot, u_scale+u_y, 0)**, **(u_scale+u_x+u_slot, -u_scale+u_y-u_slot, 0)**, **(-u_scale+u_x-u_slot, -u_scale+u_y-u_slot, 0)** и в названии пишем **U**. Если во вкладке не хватает точек для задания, то их можно добавить нажав кнопку **Add**.

11. Потом переходим в этом окне на вкладку **Workplane**, нажатием на кнопку с изображением осей с буквой **n** поворачиваем **U** вокруг оси **z** и нажимаем **OK**.

12. Во вкладке **Construct**, в **Create curve**, нажимаем **Line**, задаем начальную точку **(feed_x, feed_y, -substrate_h)**, задаем конечную точку **(feed_x, feed_y, 0)**, и называем линию **Feedpin**. Нажимаем **Create**. Выделяем ее в **Model** и в **Details** нажимаем **Wire13** правой кнопки мыши, наводим мышкой на **Create Port** и выбираем **Wire port**, нажимаем **Create**.

13. Слева, в панели **Configuration**, в **Global** дважды кликаем по **Sources** и нажимаем **Create** (рис. 5.10).

14. Во вкладке **Construct** наверху, смотрим в **Create solid**, нажимаем **Cuboid**, задаем базовую точку ($-\text{substrate_w}/2$, $-\text{substrate_d}/2$, $-\text{substrate_h}$), задаем размеры Dimensions (**substrate_w**, **substrate_d**, **substrate_h**), название оставим по умолчанию **Cuboid1** и нажимаем **Create**. В **3D view 1** нажимаем на нижнюю плоскость куба и в **Details** нажимаем выделившийся **Face7** правой кнопки мыши, выбираем **Properties**. В **Face medium**, в **Medium** выбираем **Perfect electric conductor** и нажимаем **OK**. Затем там же слева в **Details** нажимаем на «+» рядом с **Region** и дважды щелкаем левой кнопкой по **Region1**. Выбираем в Medium **substrate** и нажимаем **OK**.

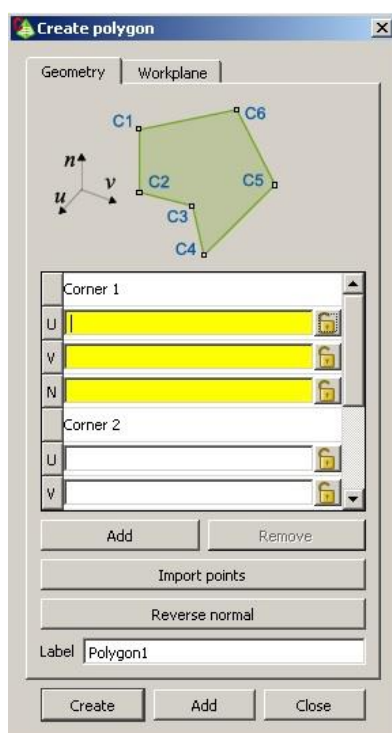


Рис. 5.9 – Окно создания многоугольника

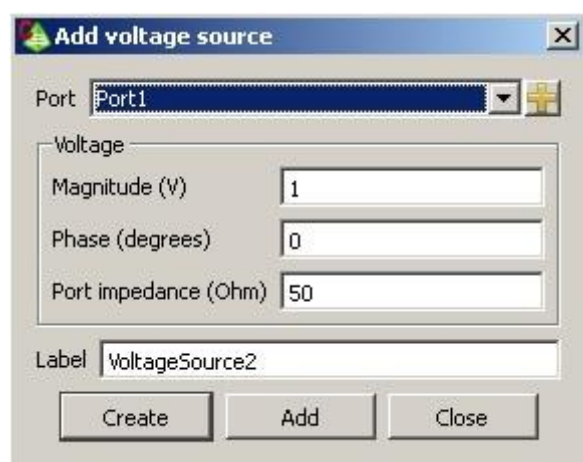


Рис. 5.10 – Окно параметров источника питания

15. Слева, в панели **Construct**, в **Model**, в **Geometry** нажимаем на **U** правой кнопкой мыши, наводим на **Apply** и выбираем **Subtract from**, затем нажимаем на **Rectangle1** и получится **Subtract1**.

16. В панели **Construct**, в **Model**, в **Geometry** выделяем при помощи клавиши shift **Feedpin** и **Subtract1**, нажимаем на них правой кнопкой мыши, наводим на **Apply** и выбираем **Union**, получится **Union1**.

17. Там же выделяем **Cuboid1** и **Union1** нажимаем на них правой кнопкой мыши, наводим на **Apply** и выбираем **Union**, получится **Union1**.

18. Слева, в панели **Configuration**, в **Global** дважды кликаем по **Frequency**, в выпадающем меню выбираем **Linearly spaced discrete points**, в полях пишем **freq_min**, **freq_max**, **20** (рис. 5.11). Нажимаем **OK**.

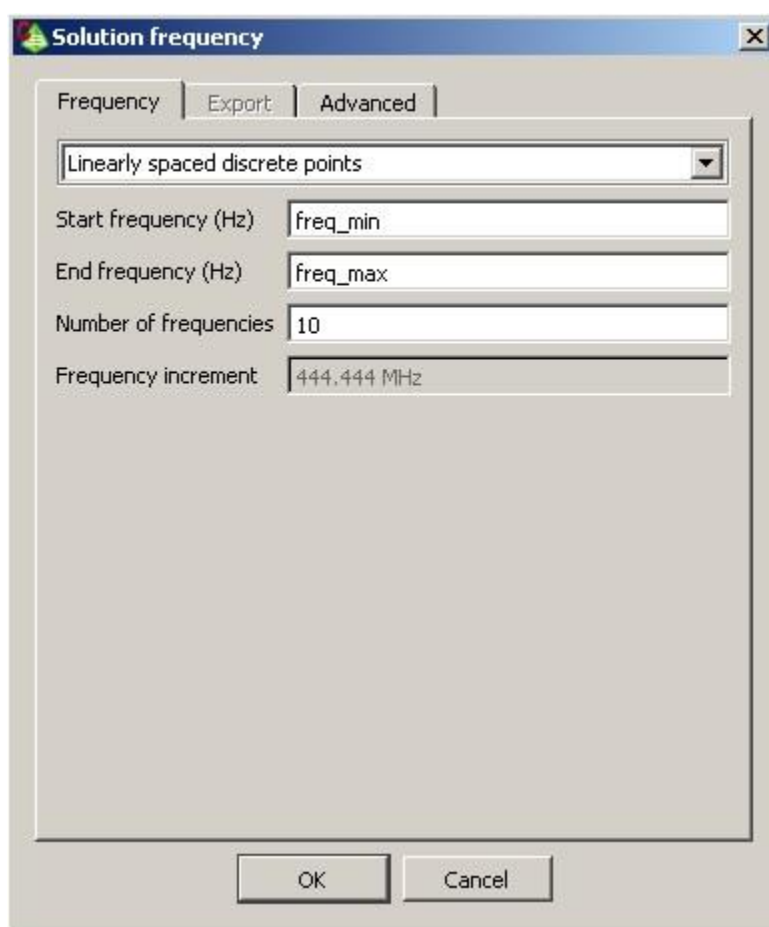


Рис. 5.11 – Окно задания исследуемых частот

19. Слева, в панели **Configuration**, в **Configuration specific** нажимаем правой клавишей мыши на **Requests** и выбираем **Far fields**. Заполняем поля **Start** значениями **-180, -180**, поля **End** значениями **180, 180** и **Increment** значениями **10, 20** (рис. 5.12). Нажимаем **Create**.

20. Нажимаем на **Requests**, щелкаем правой кнопкой мыши и выбираем **Currents**, убеждаемся, что в выпадающем списке выбрано **All currents** и нажимаем **Create**.

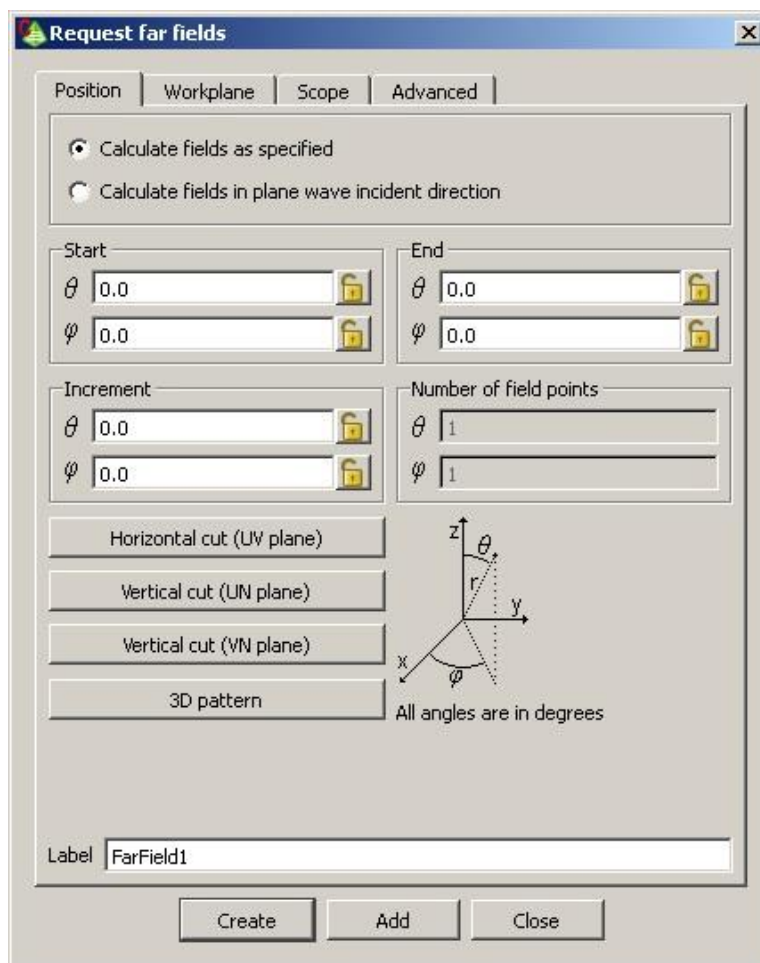


Рис. 5.12 – Окно создания far fields

21. Сверху, во вкладке **Mesh** нажимаем **Create mesh**, далее в **Mesh size** выбираем **Custom**, задаем **Triangle edge length** равным $\lambda_{\min}/10$, **Wire segment length** равным $\text{feed_rad} \cdot 5$, **Wire segment radius** равным feed_rad и нажимаем кнопку **Mesh**.

22. Во вкладке **Solve/Run** наверху, в **Solution settings** нажимаем **Symmetry** и в выпадающем списке **Y=0 plane** выбираем **Magnetic symmetry**. После этого нажимаем **OK**.

23. Теперь можно запустить расчет характеристик антенны. Запускаем во вкладке **Solve/Run**, в **Run/launch** программу **FEKO solver** и по окончании расчета там же находим и запускаем программу **POSTFEKO**. В случае возникновения ошибки повторно откройте окно **Create Mesh** и снова нажмите **Mesh**.

POSTFEKO, как уже было отмечено ранее, используется для двух целей: для проверки геометрии сетки и анализа результатов моделирования. Проверка геометрии делается для того, чтобы пользователь мог подтвердить правиль-

ность модели до начала расчета. Анализ результатов является второй основной функцией POSTFEKO.

После моделирования, POSTFEKO может быть использована для отображения и анализа результатов. Для визуализации результатов доступны разные инструменты. В одной сессии могут быть отображены несколько моделей с различной геометрией. Дисплей обновляется автоматически при изменении результатов или модели.

При запуске POSTFEKO мы видим начальную страницу (рис. 5.13). Для быстрого доступа доступны кнопки **Open a session**, **Open a model**, **Recent projects**, **Recent models**.

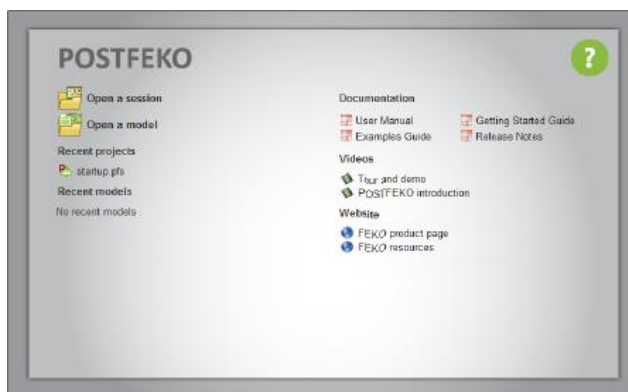


Рис. 5.13 – Стартовая страница POSTFEKO

Теперь перейдем к описанию различных элементов и терминологии в POSTFEKO (рис. 5.14).

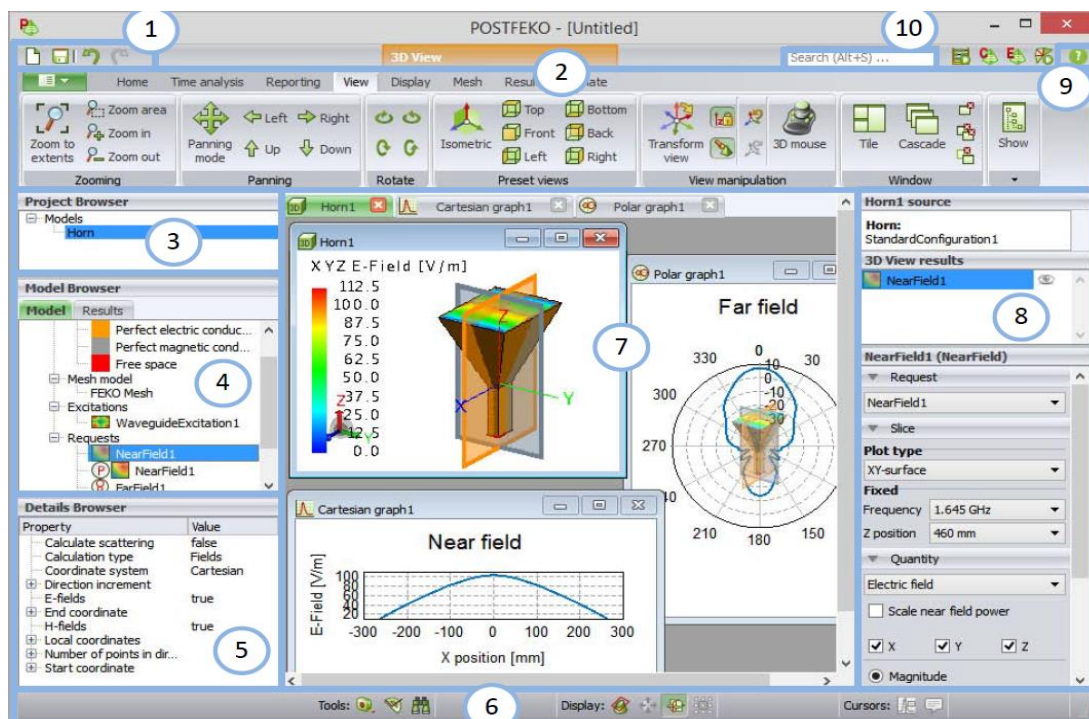


Рис. 5.14 – Стандартный графический интерфейс POSTFEKO

Под позицией **1** представлена панель быстрого доступа. Эти элементы дают пользователю быстрый доступ к элементам управления, таким как **Save model**, **Undo**, **Redo**, а так же **FEKO solver**.

Под позицией **2** представлена лента. Она содержит меню приложения, вкладки по умолчанию, контекстные вкладки и контекстные команды.

Под позицией **3** находится история проекта, тут содержится список всех моделей, которые загружаются в текущем проекте.

Под позицией **4** мы видим дерево модели, в нем отображается информация, относящаяся к выбранной модели в истории проекта. Информация включает в себя оптимизацию, сетку, запросы и т.д.

Под позицией **5** отображаются детали истории, а именно любой компонент, выбранный в **4**.

Под позицией **6** скрывается строка активного состояния, которая дает пользователю быстрый доступ к общим настройкам дисплея.

Окно под позицией **7** позволяет визуализировать геометрию, сетку и решения как в 3D, так и в 2D.

Используя окно под позицией **8** мы можем применить пользовательские настройки визуализации, настраивая содержимое графа.

Кнопка под позицией **9** – справка – дает быстрый доступ к руководству FEKO. Контекстная помощь доступна во всех компонентах пользовательского интерфейса POSTFEKO.

В окне под позицией **10** отображается панель поиска, что позволяет выполнять поиск конкретного действия / ключевого слова в POSTFEKO.

Теперь рассмотрим графическую панель визуализации решений. Этот объект состоит из нескольких элементов, на которые мы обратим внимание (рисунок 5.15).

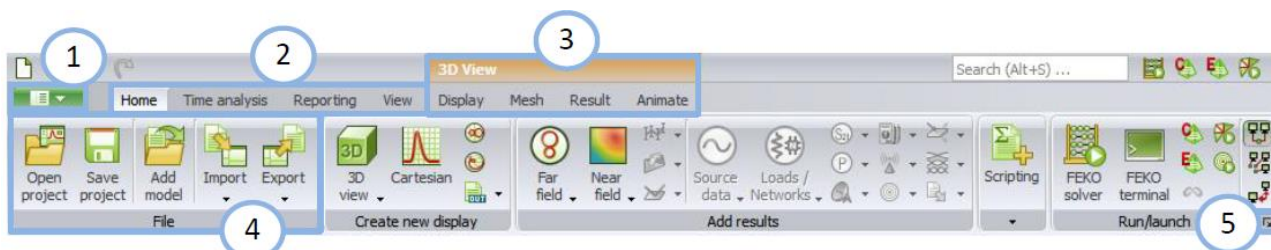


Рис. 5.15 – Графическая панель (лента) визуализации решений в POSTFEKO

Позиция **1** – меню приложения. Оно обеспечивает контроль над управлением сеансами проекта, а именно создание, открытие новых и существующих

проектов, сохранение моделей и добавление моделей к действующей сессии.

Позиция **2** – вкладки по умолчанию. Всегда видны и содержат общие команды, а именно **Home, Time analysis, Reporting** и **View**.

Позиция **3** – контекстные вкладки. Отображаются вкладки для соответствующего вида (3D или схематический).

Позиция **4** – группы команд. Аналогичны командам из меню приложения. Наиболее часто используемые группы команд это **Create new display** и **Add results**. В **Create new display** можно выбрать тип графика, например, **3D view, Polar, Cartesian**. А затем из **Add results** вставить в график данные, например, **Far field, Currents, Gain, Reflection coefficient**.

Позиция **5** – диалог запуска, тут содержатся дополнительные настройки.

Помимо основных инструментов, POSTFEKO предоставляет так же набор инструментов, работающих на уровне приложений (рис. 5.16 и 5.17). Они включают в себя сохранение и загрузку проектов, импорт и экспорт данных и т.д.

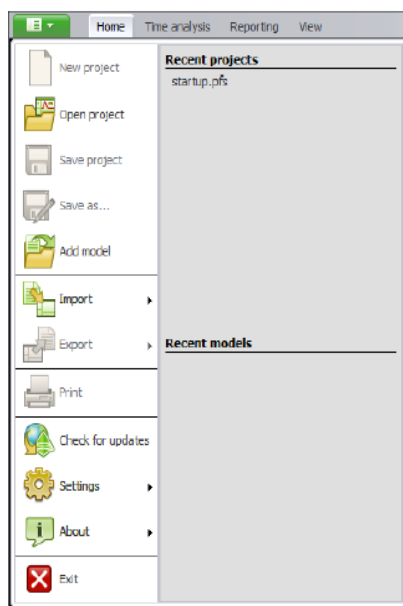


Рис. 5.16 – Меню приложений

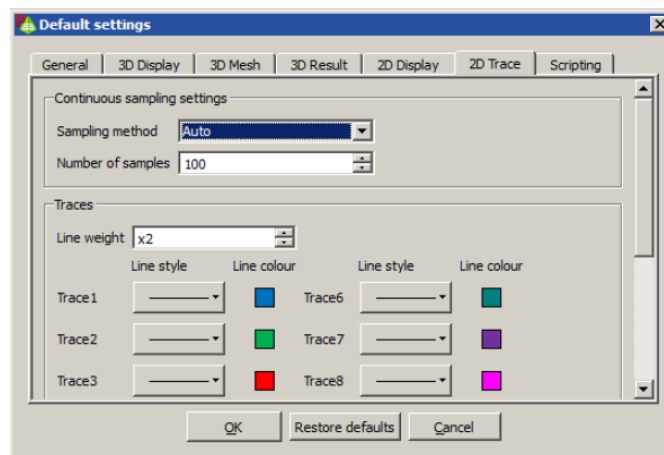


Рис. 5.17 – Параметры по умолчанию из меню приложений

Необходимо только включить кнопки для тех результатов, которые присутствуют в модели. При нажатии на кнопку результат будет представлен в виде списка параметров, которые могут быть добавлены к текущему представлению. Обратим внимание, что 3D изображение всегда связано с конкретной конфигурацией для одной модели. Для графиков же могут быть добавлены любые достоверные данные.

В качестве примера оценки возможностей модуля POSTFEKO исследуем электродинамические характеристики РСВ-антенны: S_{11} , коэффициент усиления, диаграмму направленности, а также распределение токов в ближней зоне. Для этого будем менять размеры слота (Π-образного МПЛ излучателя). На рис. 5.18 изображена геометрия исходной РСВ-антенны.

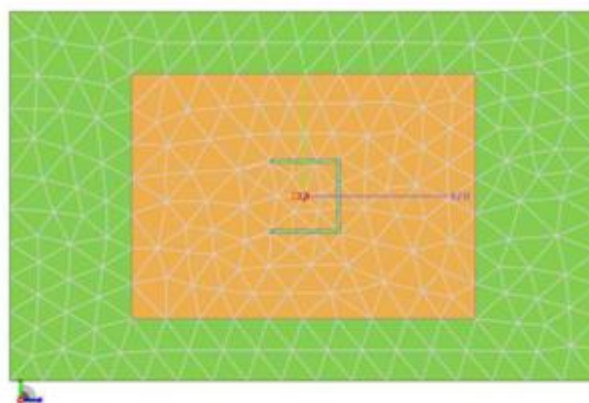


Рис. 5.18 – Исходная РСВ-антенна

Результаты исследований приведены на рис. 5.19 – 5.33.

Следующие графики расположены в порядке увеличения размера (см): 7x7, 11x11, 13x13.

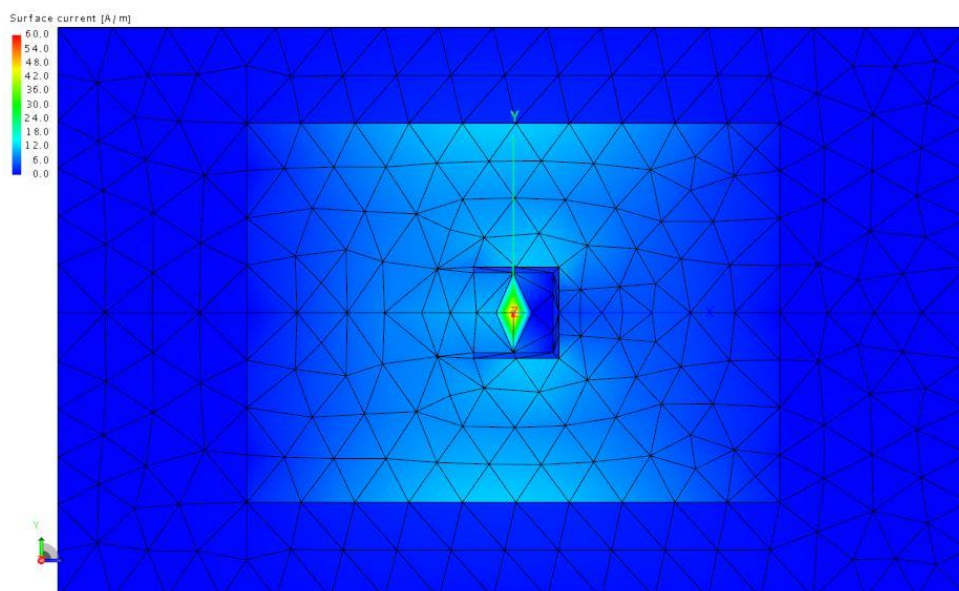


Рис. 5.19 – Токи на металле для слота размера 7x7

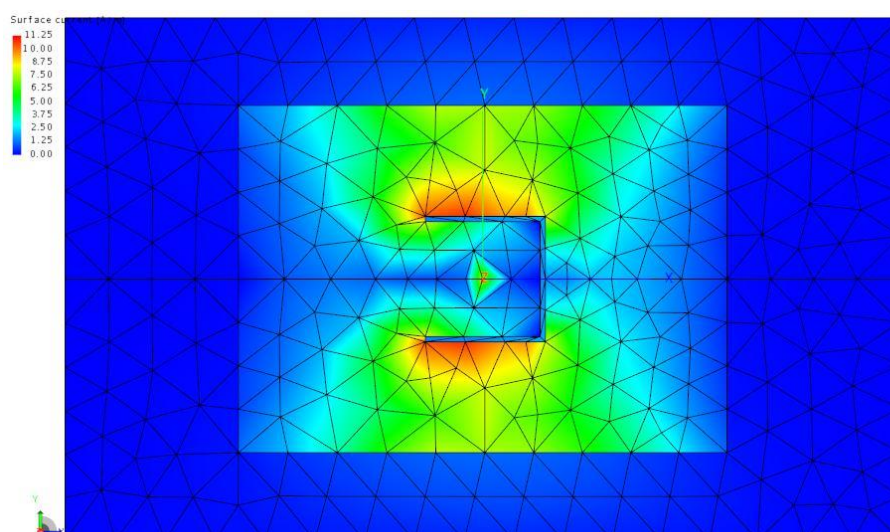


Рис. 5.20 – Токи на металле для слота размера 11x11

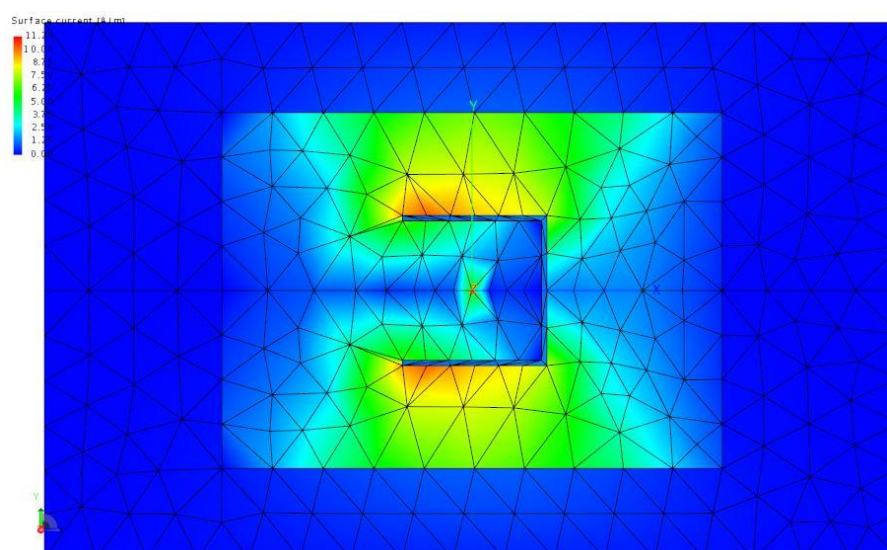


Рис. 5.21 – Токи на металле для слота размера 13x13

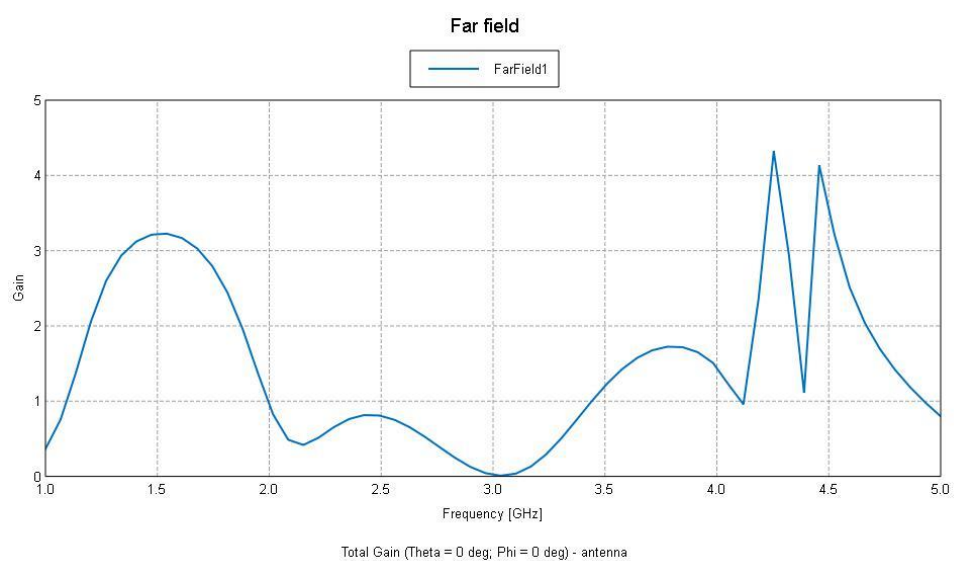


Рис. 5.22 – Коэффициент усиления антенны со слотом размера 7x7

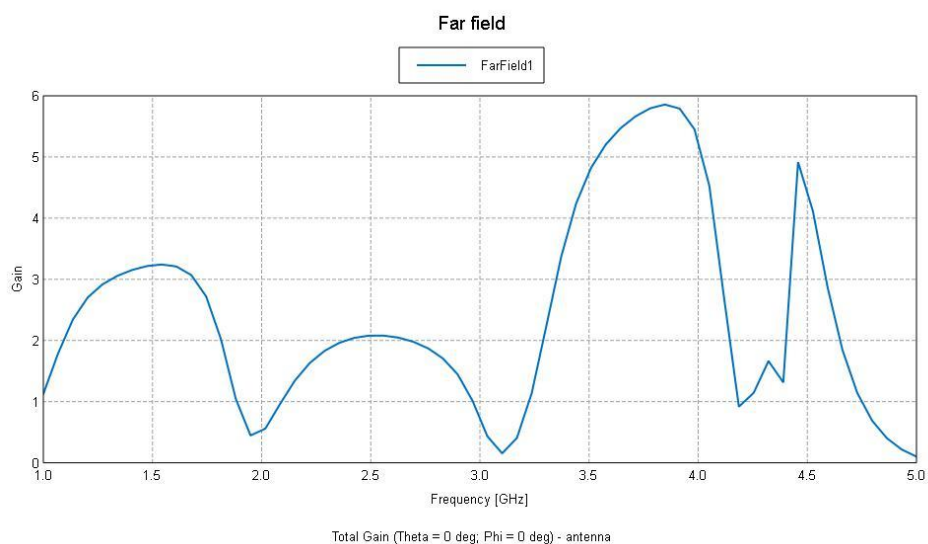


Рис.5.23 – Коэффициент усиления антенны со слотом размера 11x11

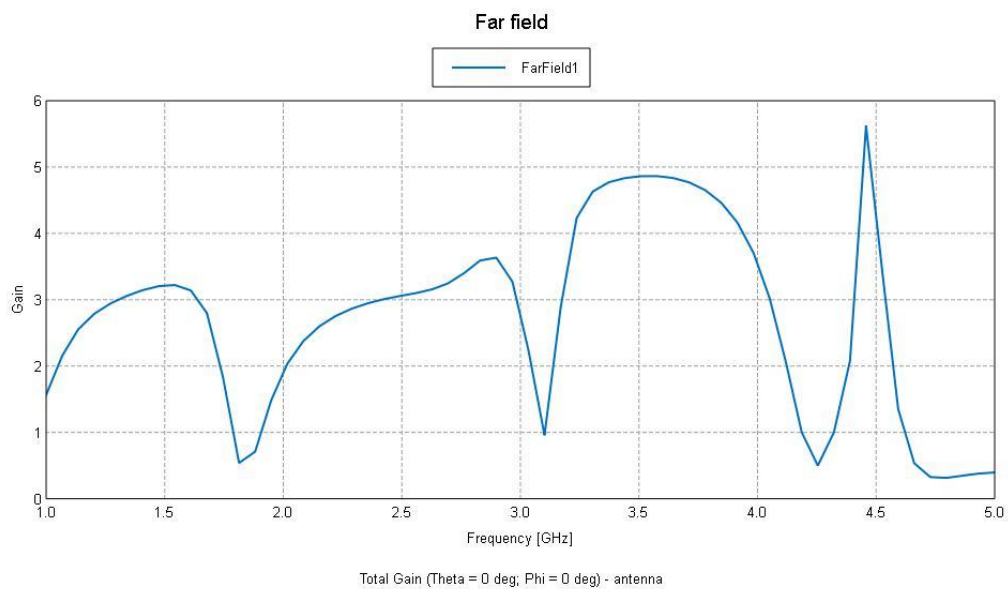


Рис. 5.24 – Коэффициент усиления антенны со слотом размера 13x13

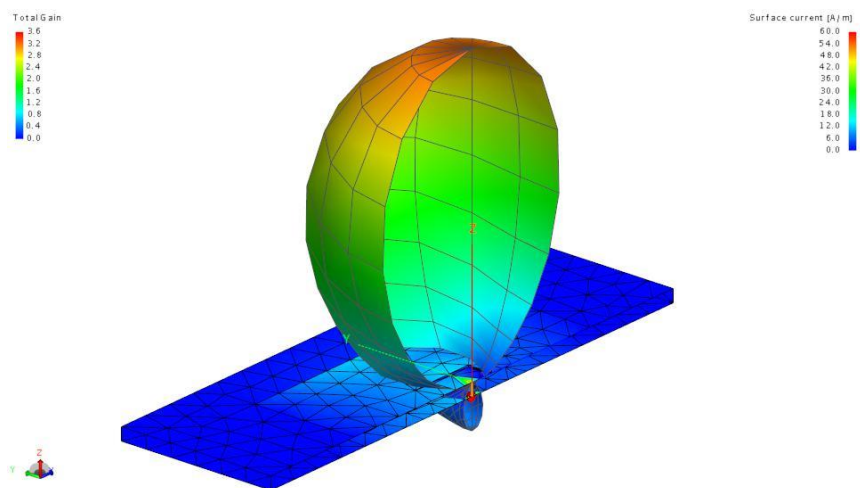


Рис. 5.25 – 3D ДН для слота размера 7x7 (1,47 ГГц)

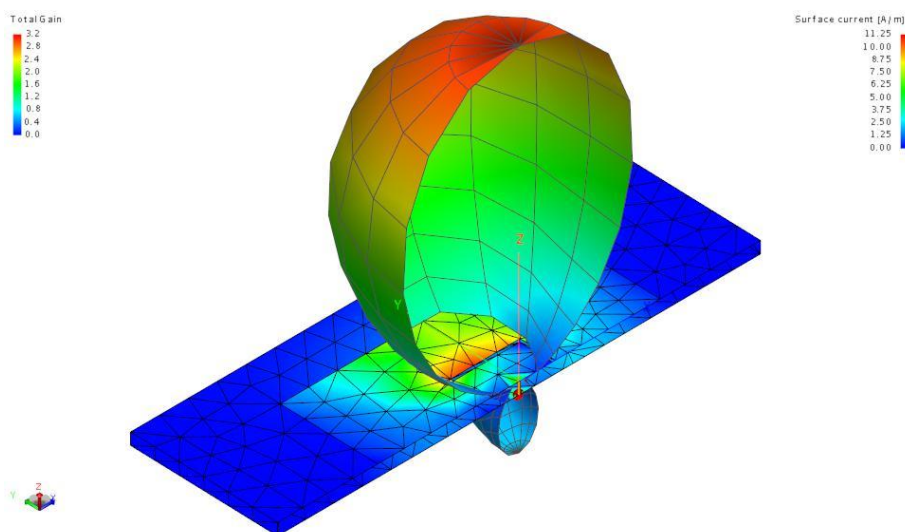


Рис. 5.26 – 3D ДН для слота размера 11x11(1,47 ГГц)

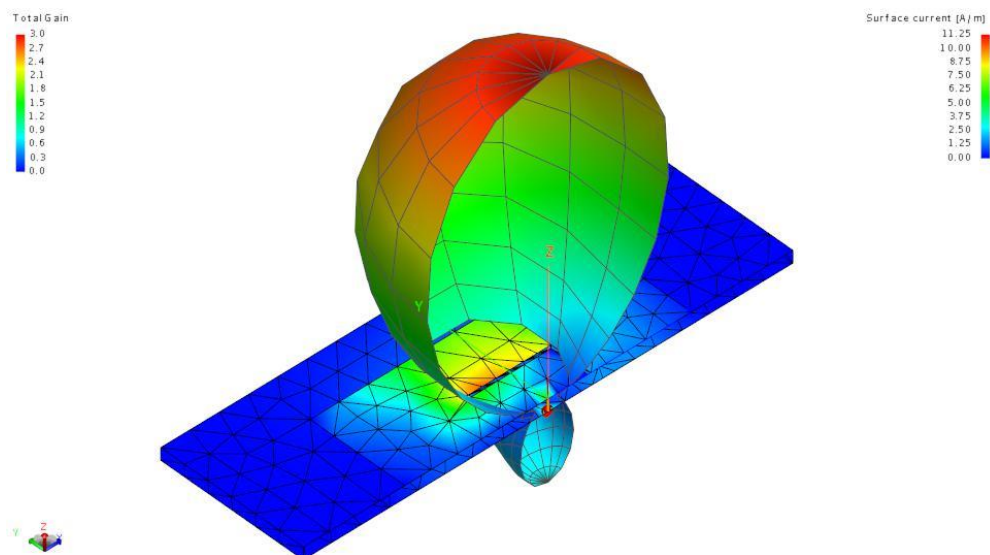


Рис. 5.27 – 3D ДН для слота размера 13х13 (1,47 ГГц)

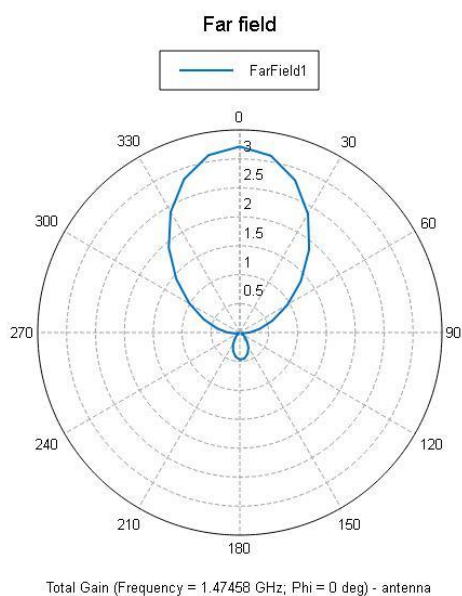


Рис. 5.28 – Полярная ДН для слота размера 7х7 (1,47 ГГц)

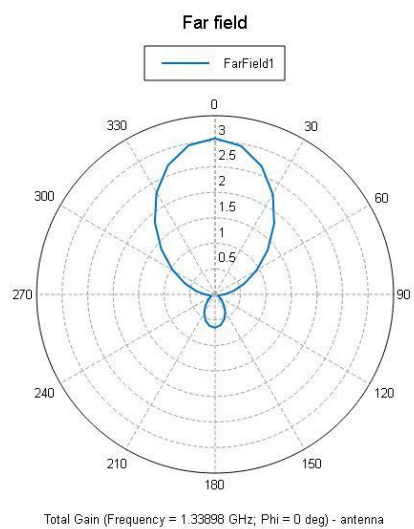


Рис. 5.29 – Полярная ДН для слота размера 11х11(1,47 ГГц)

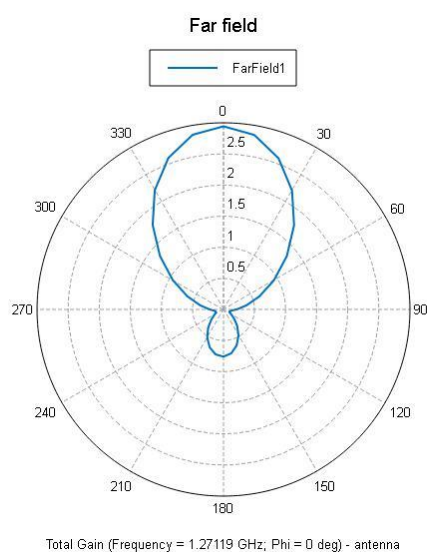


Рис. 5.30 – Полярная ДН для слота размера 13х13 (1,47 ГГц)

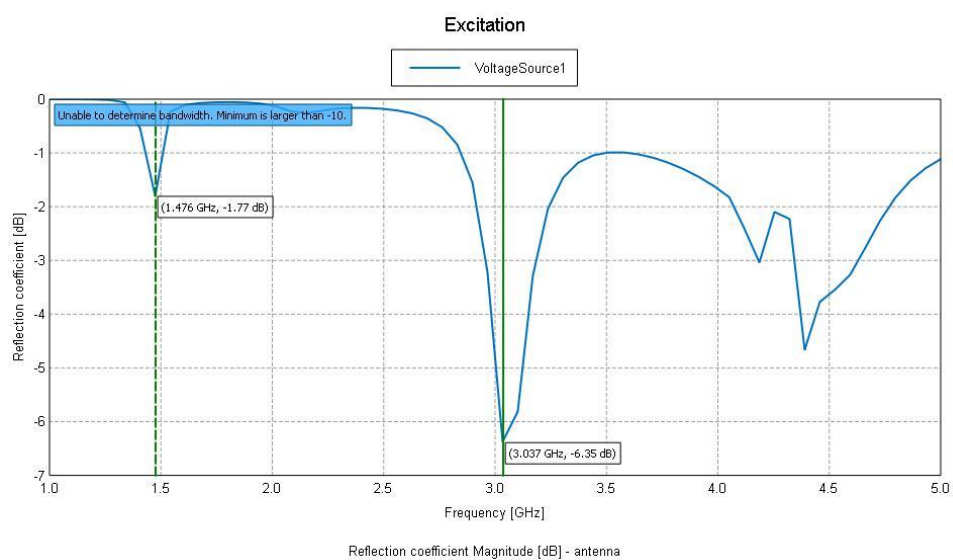


Рис. 5.31 – S11 для слота размера 7х7

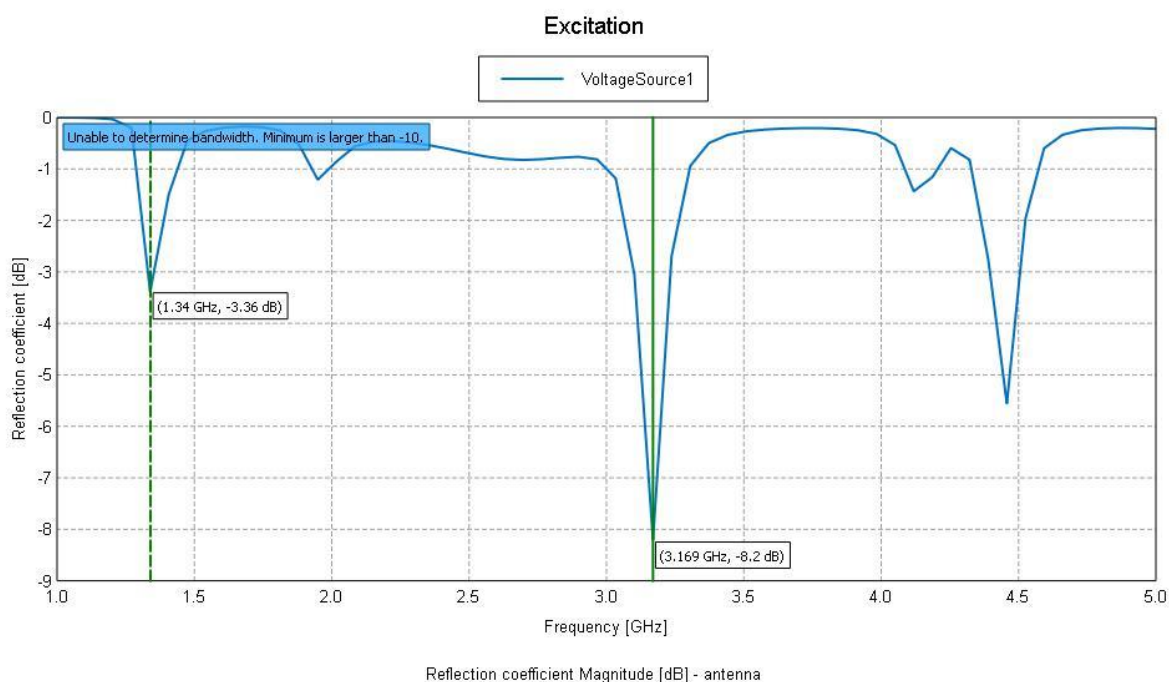


Рис. 5.32 – S11 для слота размера 11x11

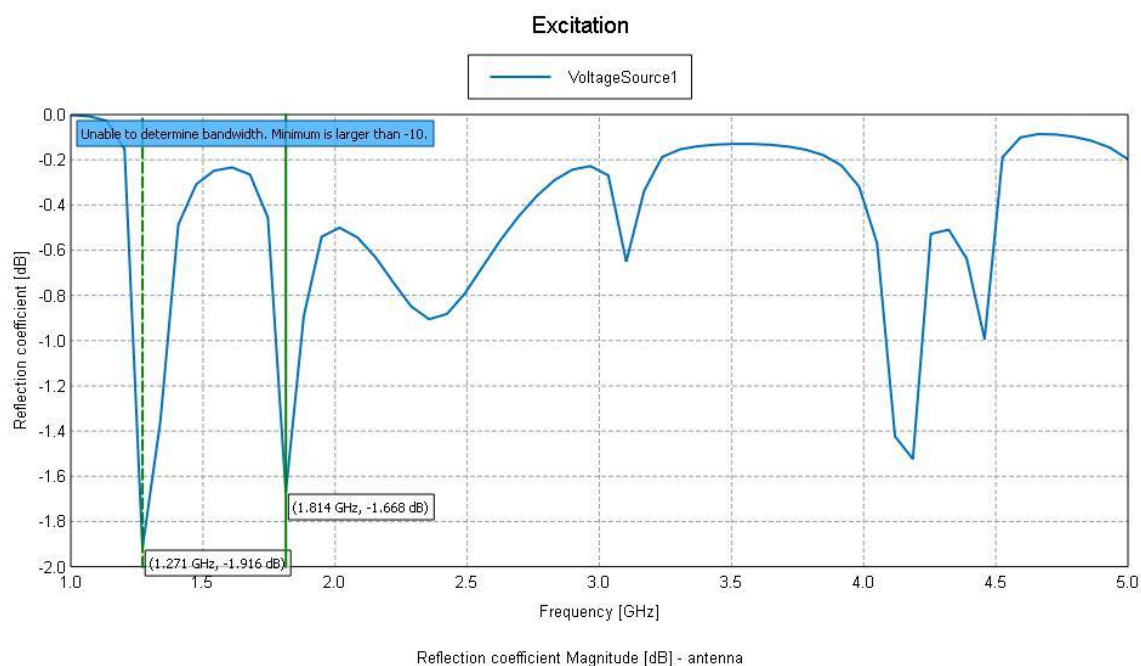


Рис. 5.33 – S11 для слота размера 13x13

По полученным графикам необходимо сделать выводы по поводу влияния увеличения размеров слота на характеристики антенны

Требования к отчету

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально. Он должен содержать краткое описание виртуального эксперимента, результаты измерений в виде таблиц и графиков, анализ результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные области применения Altair FEKO?
2. Продемонстрировать запуск программы CADFEKO и дать описание основных компонентов рабочей области.
3. Что такое PCB-антенна?
4. Описать алгоритм построения PCB-антенны при использовании CADFEKO.
5. Продемонстрировать запуск программы POSTFEKO и дать описание основных компонентов рабочей области.
6. Для каких целей используется POSTFEKO?
7. Дайте описание основных элементов графической панели визуализации решений POSTFEKO.
8. В чем заключается физический смысл элементов матрицы рассеяния?
9. Что такое коэффициент усиления антенны?
10. Что такое диаграмма направленности антенны? Какая существует классификация диаграмм направленности?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 ИССЛЕДОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Цель работы: изучение правил моделирования антенной решетки с элементами в виде планарных антенн в программной среде Altair FEKO.

Краткие теоретические сведения

Антенная решётка (АР) представляет собой совокупность идентичных излучающих элементов, расположенных в определённом порядке и возбуждаемых одним или совокупностью когерентных источников.

По сравнению с одиночными антеннами, АР позволяет получить узкую ДН. Поля излучения отдельных элементов решётки интерферируют в пространстве: в одних направлениях результирующее поле усиливается благодаря синфазному сложению полей от источников, в других, наоборот, ослабляется. Расположение излучателей в АР может быть различным.

Классификация АР.

1. По способу размещения излучателей: одномерные (линейные), двумерные (плоскостные) и трёхмерные (поверхностные) АР.

Среди них наибольшее распространение получили:

- из линейных – прямолинейные, дуговые, кольцевые;
- из плоскостных – АР с прямоугольной сеткой и АР с треугольной сеткой;
- из поверхностных – цилиндрические, конические, сферические.

Поверхностные АР называются конформными.

2. По расстоянию между элементами: эквидистантные и неэквидистантные.

Если расстояние между соседними элементами в АР остаётся неизменным вдоль всей решётки, то такая решётка называется эквидистантной. В неэквидистантной линейной решётке расстояние между элементами изменяется по определённому закону или же случайным образом.

3. По виду возбуждения (запитки) излучателей: равноамплитудные АР (амплитуды токов в элементах одинаковы); неравноамплитудные АР (амплитуда токов в элементах АР изменяется по выбранному закону); линейно-фазные АР (фазы токов в излучателях изменяются по линейному закону); синфазные АР (фазы токов в излучателях одинаковы).

4. По направлению максимума излучения (приёма) в пространстве: поперечного излучения или приёма (главный лепесток ДН ориентирован перпендикулярно линии расположения элементов); осевого излучения или приёма (главный лепесток ДН направлен вдоль линии расположения излучателей); АР наклонного излучения или приёма.

Преимущества АР перед другими типами антенн:

- удобное управление формой ДН и направлением главного лепестка за счёт изменения амплитуды и фазы поля, излучаемого каждым излучателем АР;
- увеличение мощности излучения АР за счёт пространственного сложения полей отдельных излучателей;

– исполнение оптимальной конструкции антенной системы в целом, располагая при этом излучатели АР определённым образом.

Множитель прямолинейной, эквидистантной, равноамплитудной, линейно-фазной антенной решетки определяется выражением:

$$f_c(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(kd \cos\theta - \alpha)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(kd \cos\theta - \alpha)\right]}, \quad (6.1)$$

где N – число элементов АР; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; d – расстояние между элементами антенной решетки; α – разность фаз токов двух соседних излучателей.

Формула (6.1) является по существу ненормированной ДН антенной решётки с изотропными излучателями. Это выражение называют множителем решётки. Часто пользуются нормированным множителем:

$$F_c(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(kd \cos\theta - \alpha)\right]}{N \sin\left[\frac{1}{2}(kd \cos\theta - \alpha)\right]}. \quad (6.2)$$

Целью анализа множителя АР является:

- определение количества и направлений главных лепестков;
- определение условий существования одного главного лепестка;
- определение количества и направлений боковых лепестков;
- определение количества и направлений нулевых значений функции.

Направления главных лепестков множителя АР зависят от фазового сдвига между токами в соседних элементах АР и расстояния между элементами в длинах волн. Число m определяет порядок главного лепестка.

$$\cos(\theta_{\text{гл.}}) = \frac{2m\pi}{kd} + \frac{\alpha}{kd}. \quad (6.3)$$

Количество главных лепестков. АР будет иметь в области реальных углов столько главных лепестков, скольким значениям m удовлетворяет неравенство

$$\left| \frac{2m\pi}{kd} + \frac{\alpha}{kd} \right| \leq 1. \quad (6.4)$$

Условие существования одного главного лепестка. Антенные решётки, применяемые на практике, обычно должны иметь только один главный лепесток.

сток нулевого порядка ($m = 0$), остальные должны отсутствовать, т.е. находиться в области мнимых углов. Для того, чтобы в множителе АР существовал только один главный лепесток, расстояние между элементами должно лежать в пределах:

$$\lambda/2 < d < \lambda. \quad (6.5)$$

Направления боковых лепестков и их количество определяются во формуле:

$$\cos(\theta_{\text{б.л.}}) = \frac{2(m+1)\pi}{Nkd} + \frac{\alpha}{kd}. \quad (6.6)$$

Направления и количество нулей множителя определяются исходя из соотношения:

$$\cos(\theta_0) = \frac{2m\pi}{Nkd} + \frac{\alpha}{kd}. \quad (6.7)$$

Задание к расчетной части

По данным таблицы 6.1 провести анализ множителя антенной решетки согласно приведенному в теории описанию.

Таблица 6.1

Параметры антенной решетки

Посл. цифра студ. билета	Длина волны λ , см	Количество элементов АР N	Расстояние между соседними элементами АР d , см	Разность фаз токов двух соседних излучателей α , рад
0	10	5	8	0
1	9	8	8	$\pi/3$
2	8	10	5	$\pi/4$
3	7	5	5	$\pi/6$
4	6	8	5	0
5	5	10	4	$\pi/3$
6	4	5	2,5	$\pi/4$
7	3	8	2,5	$\pi/6$
8	2	10	1,5	0
9	1,5	5	1	$\pi/4$

По полученным из анализа данным построить множитель антенной решетки $F_c(\theta)$.

Порядок выполнения работы

Для расчета диаграммы направленности и других характеристик решетки большого размера используются периодические граничные условия. В этом случае достаточно выполнить анализ одного элемента антенны, и при расчете ДН всей решетки, учесть ее параметры.

Рассмотрим пример антенной решетки, в качестве элемента которой используется планарная антенна (рис. 6.1), запитанная в точке, смещенной от центра на расстояние **pin_pos**. Частота выбирается исходя из длины волны, заданной в таблице 6.1.

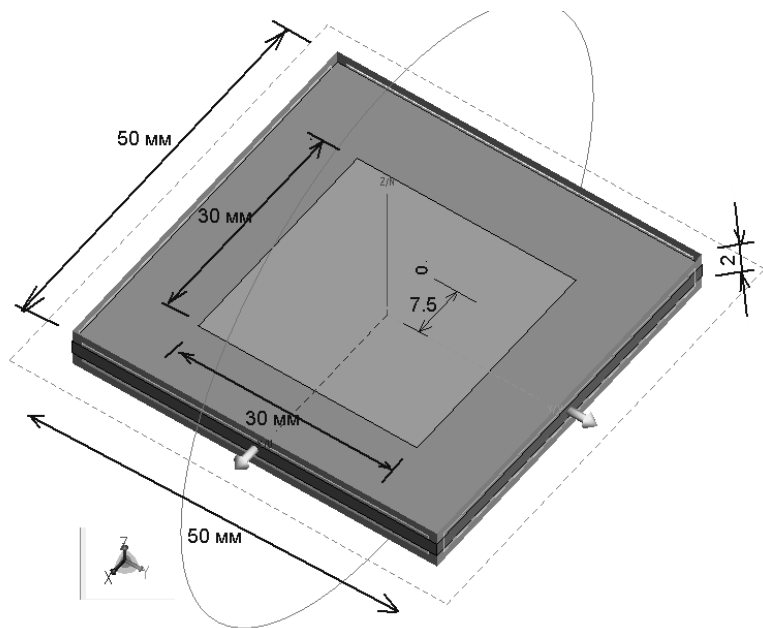


Рис. 6.1 – Пример структуры и размеров одного элемента антенной решетки (пач-антенны)

1. Откроем программу CADFEKO. В проекте используются переменные из таблицы 6.2, которые введем, нажимая правой кнопкой на **Variables** в дереве проекта слева, и выбирая команду **Add Variable** (размеры в метрах).

2. Слева правой кнопкой мыши нажимаем на **Definitions**, выбираем **Media** -> **Dielectric Medium** и создадим материал с именем **substrate** (задается в **label**), с относительной диэлектрической проницаемостью **er** и без потерь (**tanδ=0**).

3. Наверху в **Construct** в меню **Create solid** выбираем **Cuboid** и начертим подложку, используя примитив параллелепипед. В **Definition methods** выбираем **Base corner, width, depth, height**. Координаты угловой точки равны **(-base_length/2, -base_width/2, 0)**. Размер сторон выбираем равными **base_width** и **base_length**, а толщину равной **base_height** (рис. 6.2).

4. Теперь наверху в **Construct** в меню **Create Surface** выбираем **Rectangle** и чертим на поверхности подложки форму пач-антенны как прямоугольник с длиной **patch_length** и шириной **patch_width** (рис. 6.3). Толщина поверх-

ности равна 0. Координаты точки отсчета равны (-patch_length/2,-patch_width/2,base_height).

Таблица 6.2

Задание переменных для моделирования антенной решетки

$\lambda = \dots$	Длина волны, равная шагу
$f_{\text{req}} = c_0/\lambda$	Рабочая частота антенны
$\epsilon_r = 2.55$	Относительная диэлектрическая проницаемость подложки
$\text{base_width} = 0.5*\lambda$	Ширина подложки
$\text{base_length} = 0.5*\lambda$	Длина подложки
$\text{base_height} = 0.02*\lambda$	Высота подложки
$\text{patch_width} = 0.3*\lambda$	Ширина пач-антенны
$\text{patch_length} = 0.3*\lambda$	Длина прямоугольника пач-антенны
$\text{pin_pos} = \text{patch_length}/4$	Смещение точки питания от центра пача

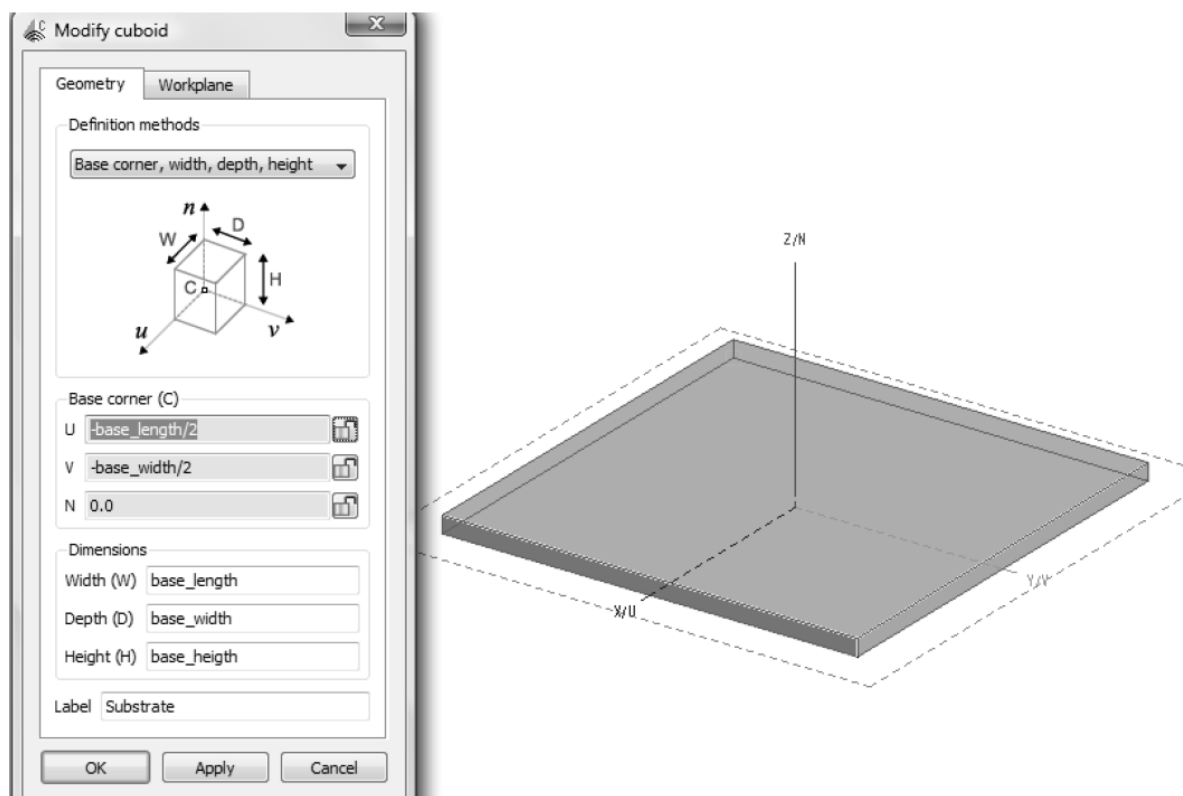


Рис. 6.2 – Диалог подложки пач-антенны

5. Далее выполним объединение подложки и прямоугольника. Для этого нажмите клавишу **Shift** и щелкните левой кнопкой мыши по **Cuboid1** и **Rectangle1**. Далее щелкаем по ним правой кнопкой мыши и выбираем **Apply->Union**. Это нужно сделать для верного разбиения поверхности на сетку.

6. Для того, чтобы возбудить антенну дискретным портом, наверху в **Construct** в меню **Create curve** выбираем **Line** и начертим провод между пач-антенной и низом подложки. В диалоге линии (рис. 6.4) установим начальную точку на **(pin_pos, 0, 0)**, а конечную точку **(pin_pos, 0, base_height)**.

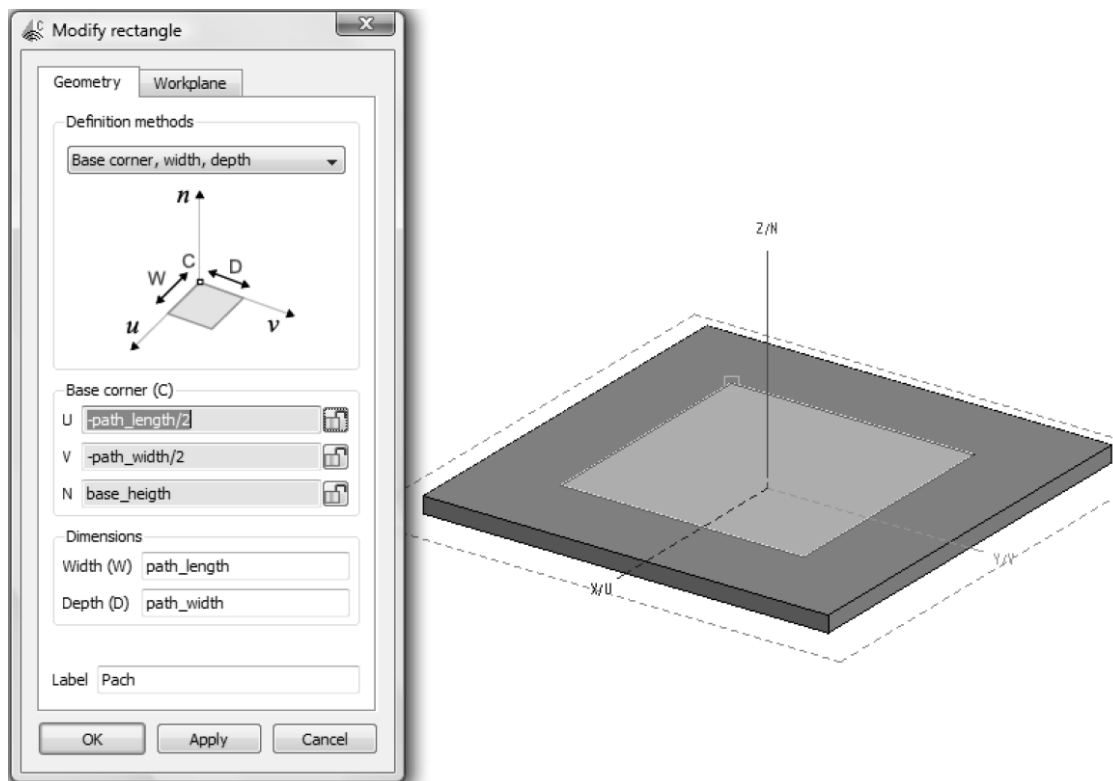


Рис. 6.3 – Черчение металлической поверхности пач-антенны

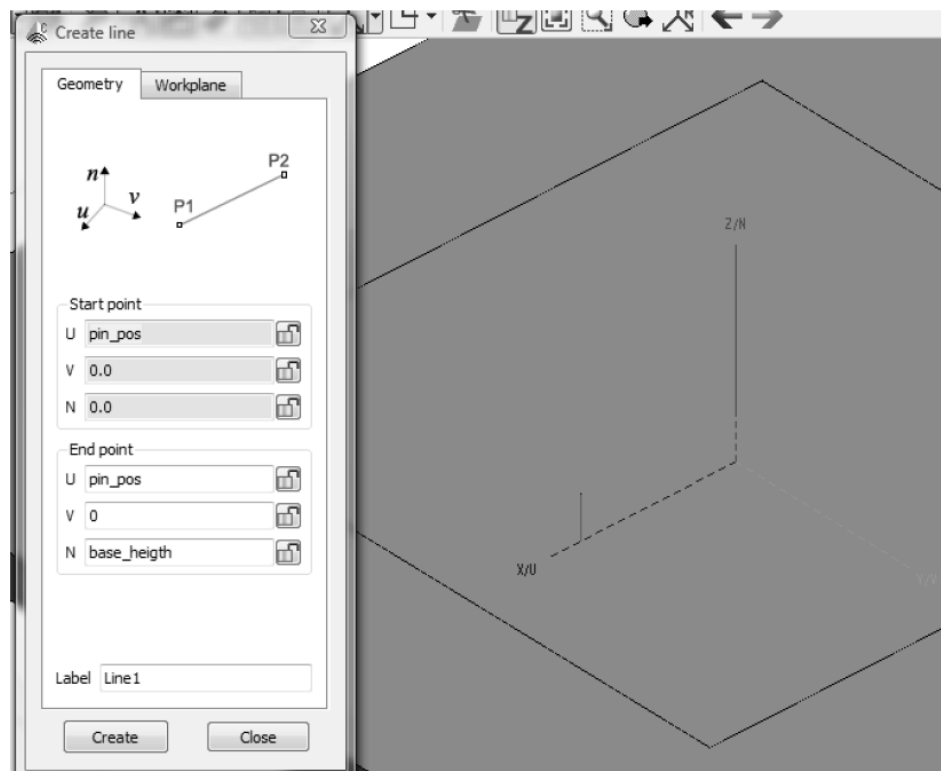


Рис. 6.4 – Черчение линии для создания проводного порта

7. Далее объединим все начерченные элементы пач-антенны зажав клавишу **Shift** и щелкнув левой кнопкой мыши по **Union1** и **Line1**. Далее щелкаем по ним правой кнопкой мыши и выберите **Apply -> Union** и дадим конструкции название в соответствии с фамилией одного из студентов бригады, например, **Kostin**. Для этого нужно нажать правой кнопкой мыши на название конструкции и выбрать **Rename**. Эта общая структура может включать несколько объемов. Слева в области **Details** откройте вкладку **Regions** и щелкните правой кнопкой мыши по **Region1**. В открывшемся окне установите в поле **Medium** значение подложки **substrate** (рис. 6.5).

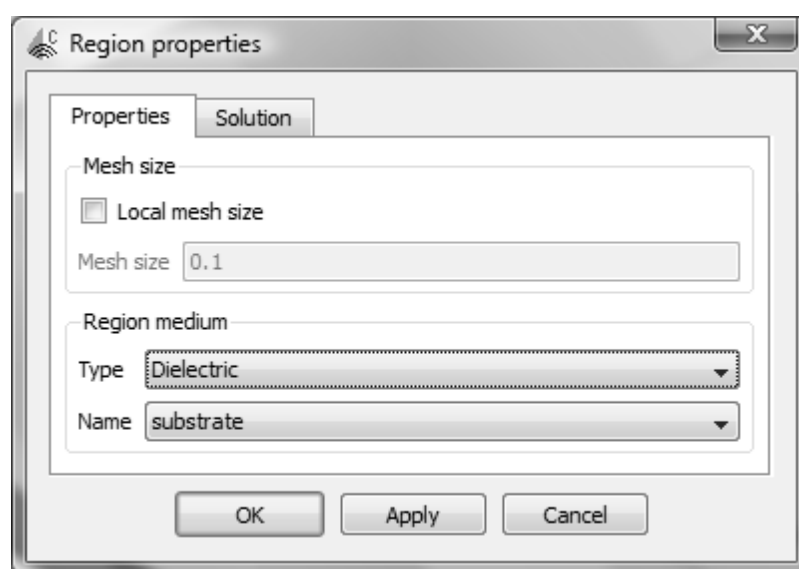


Рис. 6.5 – Установка области подложки материалом **substrate**

8. Кроме этого, в области **Details** установим для пач-антенны и нижней (земляной) стороны подложки свойства идеальной проводящей поверхности. Для этого в области для 3D просмотра нажимаем правой кнопкой мыши по необходимой поверхности, выбираем **Properties** и в открывшемся окне в поле **Medium** выбираем **perfect electric conductor** (рис. 6.6). В этом случае потери в металле будут отсутствовать.

9. Добавляем проводной порт командой **Wire Port**, расположенной во вкладке **Source/Load** наверху. В открывшемся окне выбираем для **Location on wire** значение **Middle** (рис. 6.7). Для заполнения строки **Edge** необходимо раскрыть меню **Wires** во вкладке **Details** слева и щелкнуть по единственной открывшейся линии. К созданному порту необходимо также подключить источник напряжения командой **Voltage Source**, расположенной на вкладке

Source/Load сверху. В открывшемся окошке оставляем все без изменений и нажимаем **Create**.

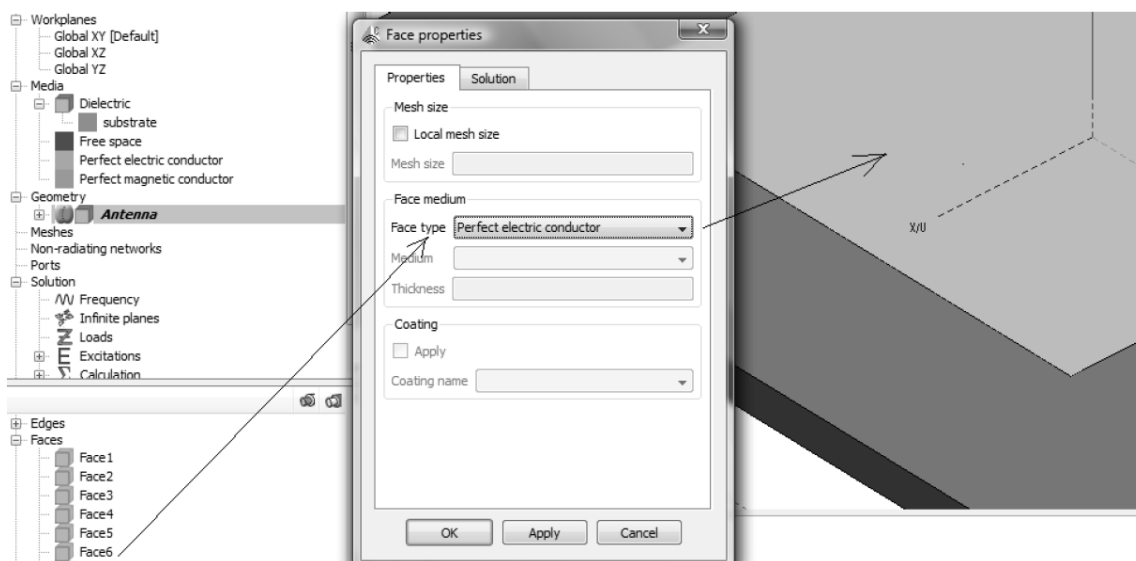


Рис. 6.6 – Задание свойств поверхности пач-антенны

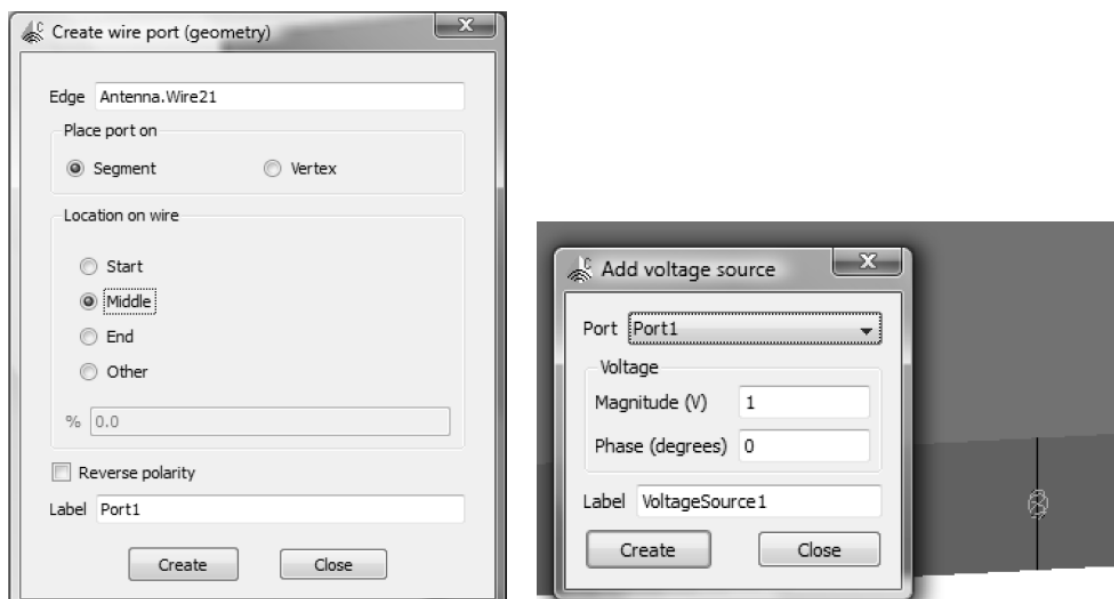


Рис. 6.7 – Создание порта и установка источника напряжения

10. Во вкладке **Configuration** слева щелкните правой кнопкой мыши по **Frequency** и выберите пункт **Frequency**. В открывшемся окне (рис. 6.8) выберите в выпадающем меню пункт **Linearly spaced discrete points** и введите диапазон частот для анализа. В качестве начальной частоты выберите $\text{freq}-0.3*\text{freq}$, а в качестве конечной – $\text{freq}+0.3*\text{freq}$. Число частот **Number of frequencies** установите равным 7.

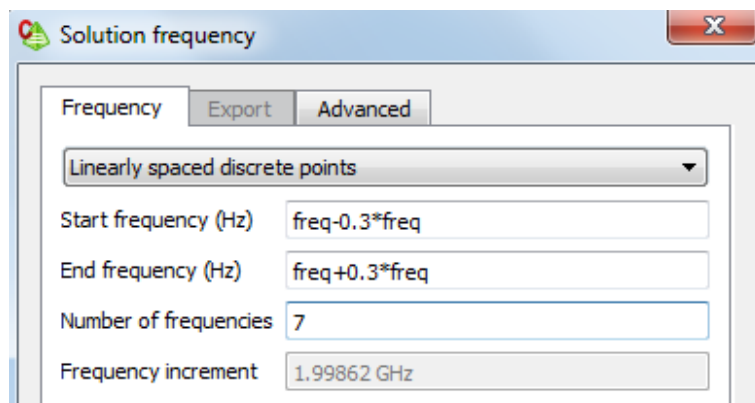


Рис. 6.8 – Задание частоты расчета

11. Слева, в панели **Configuration**, в **Configuration specific** нажимаем правой клавишей мыши на **Requests** и выбираем **Far fields**. Заполняем поля **Start** значениями **-180, -180**, поля **End** значениями **180, 180** и **Increment** значениями **10, 10** (рис. 6.9). Нажимаем **Create**.

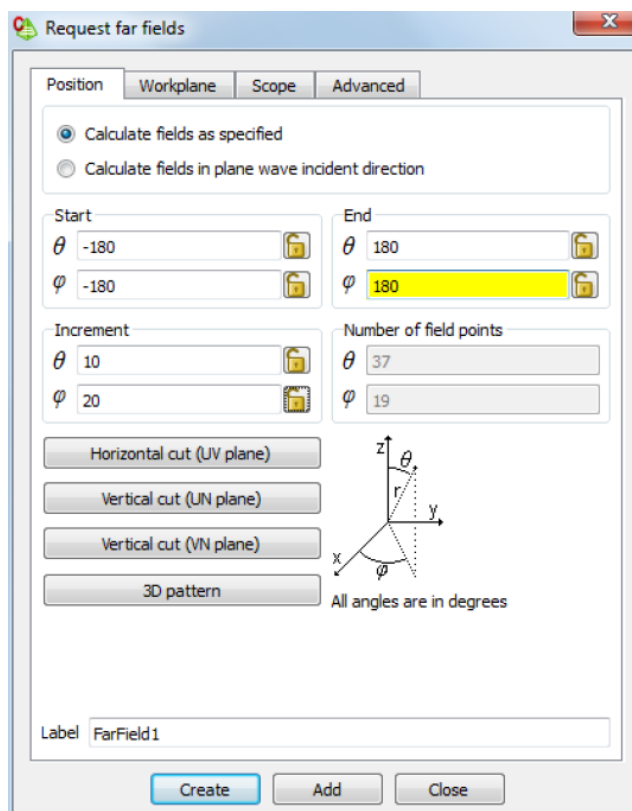


Рис. 6.9 – Определение параметров расчета в дальней зоне

12. Сверху, во вкладке **Mesh** нажимаем **Create mesh**, далее в **Mesh size** выбираем **Custom**, задаем **Triangle edge length** равным $\lambda/20$, **Wire segment length** равным $\lambda/100$, **Wire segment radius** равным $\lambda/1000$ и нажимаем кнопку **Mesh**.

13. Расчет выполняется за несколько минут путем нажатия на кнопку **FEKO Solver** на вкладке **Home** сверху. После этого там же необходимо нажать на кнопку **POSTFEKO** и в открывшейся программе получить и вставить в отчет следующие графики:

- пространственную диаграмму направленности на центральной частоте;
- диаграмму направленности на центральной частоте в прямоугольной системе координат в меридиональной плоскости ($\varphi = 0^\circ$);
- диаграмму направленности на центральной частоте в прямоугольной системе координат в меридиональной плоскости ($\varphi = 90^\circ$);
- диаграмму направленности на центральной частоте в прямоугольной системе координат в экваториальной (азимутальной) плоскости ($\theta = 90^\circ$);
- зависимость коэффициента усиления от частоты;
- зависимость коэффициента отражения от частоты;
- диаграмму направленности на центральной частоте в полярной системе координат в меридиональной системе координат ($\varphi = 0^\circ$);
- диаграмму направленности на центральной частоте в полярной системе координат в меридиональной системе координат ($\varphi = 90^\circ$);
- диаграмму направленности на центральной частоте в полярной системе координат в экваториальной (азимутальной) плоскости ($\theta = 90^\circ$).

Для построения диаграммы направленности в меню сверху на вкладке **Home** необходимо выбрать тип графика **Cartesian** (для получения графика в прямоугольной системе координат) или **Polar** (для получения графика в полярной системе координат). Далее необходимо там же наверху выбрать **Far Field** и в выпадающем меню выбрать поле, задаваемое ранее. Для изменения плоскости или отсчитываемого по оси абсцисс и ординат параметра можно воспользоваться меню справа. Для получения коэффициента усиления требуется построить график диаграммы направленности в прямоугольной системе координат и в качестве независимой переменной выбрать частоту **Frequency**, а в качестве **Quantity** установить **Gain**. Для получения коэффициента отражения необходимо при задании графика вместо **Far Fields** нажать на значок **S₂₁** наверху.

14. Для создания линейной антенной решетки в CADFEKO перейдите наверху во вкладку **Construct** и нажмите **Planes/arrays**, где в выпадающем меню выберите **Periodic Boundaries**. В появившемся диалоге (рис. 6.10) в выпа-

дающем меню выберите **One dimension** и установите периодические граничные условия модели, точно идущими по краю подложки. Для этого для начальной точки **Start point** введите координаты $(-base_width/2, -base_length/2, 0)$, для конца вектора **End point of first vector** – $(base_width/2, -base_length/2, 0)$.

При определении линейной антенной решетки, вектор имеет вид 1D, периодичность может иметь любую ориентацию, но должна иметь ненулевую длину. Граничные периодические условия для второго вектора не задаются.

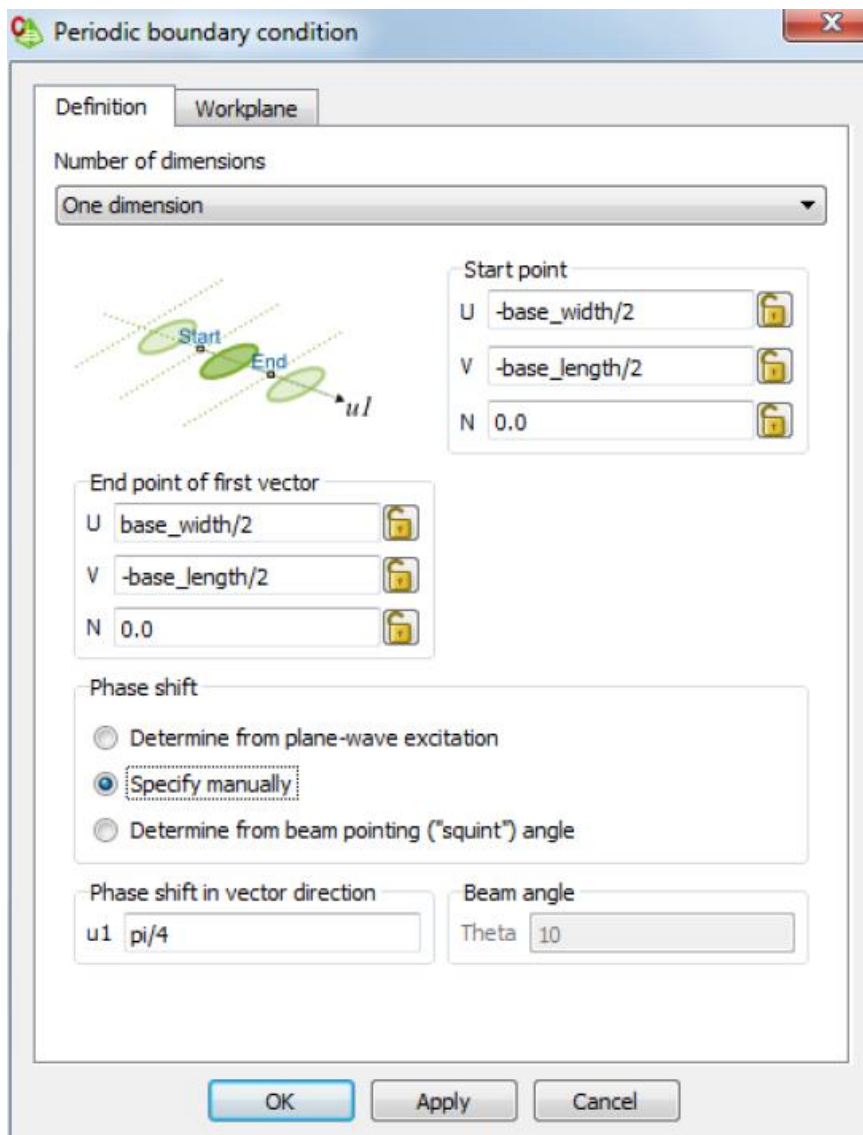


Рис. 6.10 – Установка периодических граничных условий

CADFEKO позволяет задавать фазовый сдвиг антенной решетки исходя из фазового сдвига в направлении вектора, определяющего элементарную ячейку, а также исходя из направления излучения или приема. Для моделирования решетки, использующей периодические граничные условия, фазовый сдвиг может быть определен, заданием углов α и θ соответственно (рис. 6.11).

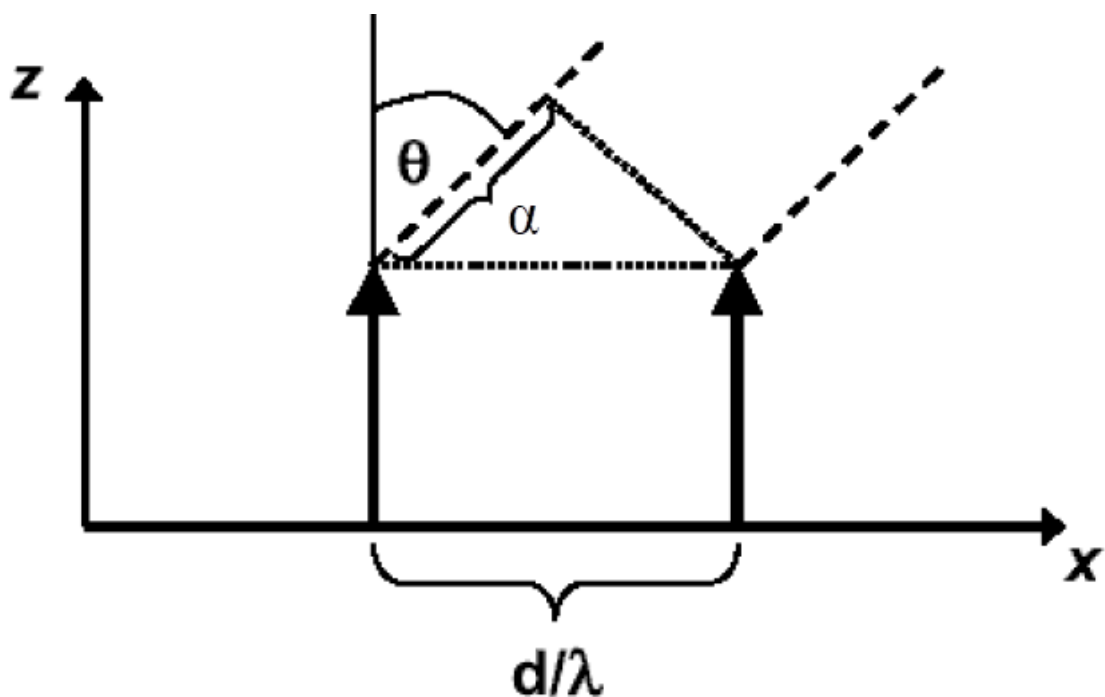


Рис. 6.11 – Формирование отклоненного луча антенной решетки

Фаза вдоль векторов периодической решетки будет вычислена автоматически, чтобы обеспечить указанное направление луча и наоборот.

При этом величина фазового сдвига определяется выражением:

$$\alpha = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta. \quad (6.8)$$

Исходя из задаваемого параметра (α и θ) в окне **Periodic boundary condition** в поле **Phase shift** выбирается либо пункт **Specify manually** и в поле **u1** задается величина α в радианах из табл. 6.1, либо пункт **Determine from beam pointing («squint») angle** и в поле **Theta** задается рассчитанная по формуле (6.8) величина θ в радианах.

15. Для начала зададим фазовый сдвиг α выбирая пункт **Specify manually** и в поле **u1** зададим в соответствии со своим вариантом величину α (рис. 6.10) и нажимаем **OK**.

16. Теперь зададим поле в дальней зоне для линейной антенной решетки из N элементов. Число N выбирается из таблицы 6.1. Для этого повторите пункт 11 и на вкладке **Advanced** в разделе **Periodic boundary condition options** поставьте галочку напротив **Calculate far field for an array of elements** и в поле **Number of elements along vector 1** поставьте число элементов N антенной решетки из табл. 6.1, а в поле **Number of elements along vector 2** поставьте **1** (рис. 6.12).

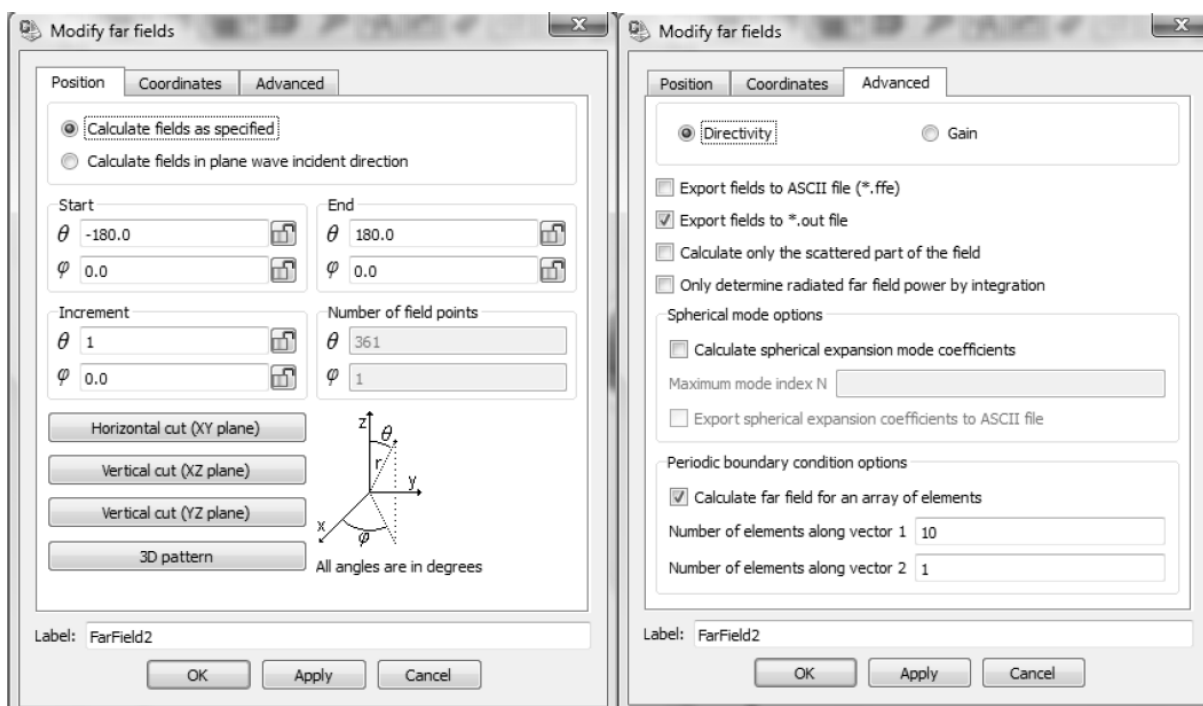


Рис. 6.12 – Задание параметров для расчета поля антенной решетки в дальней зоне

17. Далее запустите **FEKO Solver** и после окончания расчетов в программе **POSTFEKO** снимите и вставьте в отчет все характеристики из п.13 для поля **FarField2**, соответствующего антенной решетке.

18. Повторите пункты 15-17 задавая направление излучения/приема θ антенной решетки, рассчитанное по формуле (6.8). Для этого в окне **Periodic boundary condition** в поле **Phase shift** выберите пункт **Determine from beam pointing («squint») angle** и в поле **Theta** введите полученное значение θ в радианах. Сравните полученные результаты и сделайте выводы.

Требования к отчету

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально. Он должен содержать результаты выполнения расчетной части, краткое описание виртуального эксперимента, результаты измерений в виде таблиц и графиков, анализ результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию антенных решеток.
2. В чем заключается метод перемножения диаграмм направленности элементов антенной решетки?
3. Опишите поле излучения линейной антенной решетки?
4. Как зная поле излучения прямолинейной, эквидистантной, равноам-

плитудной, линейно-фазной антенной решетки получить ее множитель?

5. Какие известны основные параметры антенной решетки? Каково их влияние на диаграмму направленности антенной решетки и коэффициент направленного действия?
6. По каким критериям и каким образом проводится анализ множителя антенной решетки?
7. Опишите фазовую диаграмму направленности антенной решетки. Какова ее связь с амплитудной диаграммой направленности?
8. Что такое непрерывная линейная антенная решетка? В чем отличие ее множителя от множителя линейной антенной решетки?
9. Что представляют собой антенные решетки поперечного, осевого и наклонного излучения?
10. Получить выражение для множителя плоской антенной решетки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА

Цель работы: изучение основных параметров и характеристик симметричного вибратора, правил моделирования вибраторных антенн в программах CADFEKO и POSTFEKO.

Краткие теоретические сведения

Симметричный вибратор (СВ) – вибратор в виде двух симметрично расположенных в одной плоскости проводников одинаковой длины, к примыкающим концам которых подводится фидер. СВ, оси проводников которого располагаются на одной прямой, называют линейным.

Для того чтобы соблюдалась электрическая симметрия в такой антенне, необходимо выполнение следующих условий:

- оба плеча СВ по форме и размерам должны быть одинаковыми;
- они должны занимать одинаковые положения относительно поверхности нулевого потенциала (экрана, поверхности земли);
- питание вибратора должно быть симметричным, т.е. напряжения на клеммах (входных зажимах) должны быть равны по величине и иметь разную полярность (сдвинуты по фазе на 180°).

Симметричные вибраторы классифицируются по следующим признакам:

- по электрической длине: электрически короткий $2l \ll \lambda$; полуволновой $2l = \lambda/2$; волновой $2l = \lambda$;
- по конструкции: цилиндрический, петлевой, с ёмкостной нагрузкой, биконический, вибратор – «бабочка».

Ниже приведены основные характеристики и параметры симметричных вибраторов.

Диаграмма направленности. СВ имеет направленные свойства только в меридиональной (Е-) плоскости. При этом максимум излучения будет соответствовать $\theta_{\max} = \pi/2$ и $f_{\max}(90^\circ) = 1 - \cos kl$. Тогда нормированная диаграмма направленности будет иметь вид:

$$F(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta (1 - \cos kl)}. \quad (7.1)$$

В азимутальной (Н-) плоскости, т.е. вокруг СВ, направленные свойства отсутствуют и его ДН равна

$$F(\varphi) = 1. \quad (7.2)$$

Поляризационные свойства. Положение плоскости поляризации и соответственно вид линейной поляризации задаются положением СВ в пространстве.

Коэффициент направленного действия. КНД можно найти путём подстановки в общее выражение выражения ДН для заданных размеров СВ.

$$D_0 = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi F^2(\theta) \sin \theta d\theta}. \quad (7.3)$$

В инженерных расчётах пользуются приближённой эмпирической формулой, связывающей КНД с шириной ДН антенны в главных плоскостях:

$$D_0 = \frac{(35 \dots 45) \cdot 10^3}{2\theta_{0,5}^E \cdot 2\theta_{0,5}^H}. \quad (7.4)$$

Действующая длина. Для антенн линейного типа действующая длина определяется выражением

$$l_d = \frac{\lambda}{\pi} \operatorname{tg} \left(\frac{kl}{2} \right). \quad (7.5)$$

Сопротивление излучения. Наиболее часто сопротивление излучения определяется по отношению к пучности тока.

$$R_{\Sigma\Pi} = \int_0^\pi \frac{[\cos(kl \cos \theta) - \cos(kl)]^2}{\sin \theta (1 - \cos(kl))} d\theta. \quad (7.6)$$

Необходимо отметить, что сопротивление излучения $R_{\Sigma\Pi}$ для тонких вибраторов будет следующим:

– для полуволнового – $R_{\Sigma\Pi} = 73,1 \text{ Ом}$;

– для волнового – $R_{\Sigma\Pi} = 200 \text{ Ом}$.

Входное сопротивление. Оно по характеру является комплексным и равно отношению напряжения на входных зажимах к току питания:

$$\dot{Z}_A = \frac{\dot{U}_A(z=0)}{\dot{I}_A(z=0)} = R_A + jX_A. \quad (7.7)$$

Считая, что активная мощность в антенне расходуется лишь на излучение, активная составляющая входного сопротивления $R_A \cong R_\Sigma$. Для бесконечно тонкого полуволнового вибратора реактивная составляющая входного сопротивления равна $X_A = 0$.

Задание к расчетной части

По данным таблицы 7.1 построить диаграмму направленности симметричного вибратора и определить его основные характеристики согласно приведенному в теории описанию.

Таблица 7.1

Данные для определения параметров и характеристик вибратора		
Посл. цифра студ. билета	Длина волны λ , см	Длина вибратора $2l$, см
0	10	5
1	10	10
2	8	8
3	8	4
4	6	6
5	6	3
6	4	4
7	4	2
8	2	2
9	2	1

Порядок выполнения работы

Для проектирования двухвибраторной антенны на основе симметричного вибратора воспользуемся программой CADFEKO.

1. Прежде чем приступить к формированию геометрии, необходимо задать локальные переменные и единицы измерения, используемые в модели. Перейдите во вкладку **Home** главного меню и выберите пункт **Model Unit**, в открывшемся окне укажите единицу измерения, используемую в модели (**centimetres**) (рис. 7.1). В правом нижнем углу пользовательского окна значение **Unit** изменится на **cm**.

2. Далее нажимаем правой кнопкой мыши по вкладке **Variables** слева и выбираем пункт **Add Variable**. Это необходимо для удобной работы с моделью. Диалоговое окно **Create variable** имеет три строки ввода: **Name** – имя переменной, **Expression** – значение переменной, **Comment** – пояснение. В слож-

ных проектах с большим количеством переменных или параметров для оптимизации рекомендуется указывать пояснения к каждой инициализированной в модели величине, чтобы в процессе исследования исключить путаницу в обозначениях. Клавиша **Evaluate** предназначена для проверки правильности задания переменной (в строке вывода **Value** появляется значение величины в стандартном виде). Инициализируем переменную **wl** (wavelength – длина волны) со значением, выбираемым исходя из таблицы 7.1. После нажатия на кнопку **Create** (клавиша **Add** служит для перехода к инициализации новой переменной без выхода из диалогового окна) в списке **Definitions** во вкладке **Construct** (в окне проекта) появится вновь созданная переменная. В этом списке уже присутствуют стандартные для электродинамических задач константы (скорость света в вакууме – **c0**, электрическая и магнитная постоянные – **eps0** и **mu0**, волновое сопротивление вакуума – **z0**, число пи – **pi**).

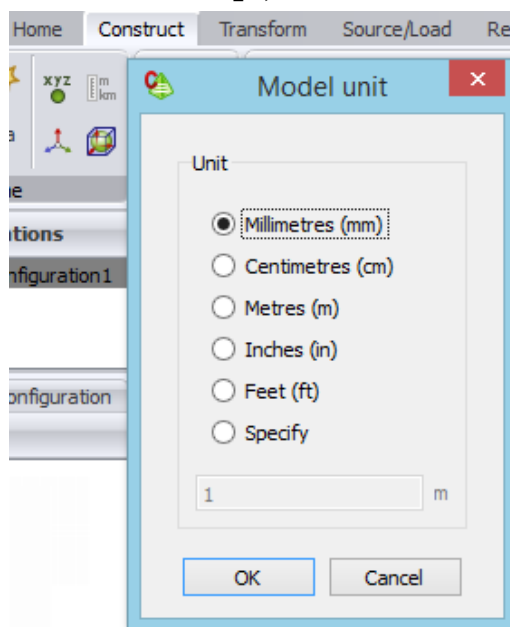


Рис. 7.1 – Выбор единицы измерения

3. Двухвибраторную антенну можно моделировать геометрическими объемными примитивами (цилиндром или поверхностью). Однако такая геометрия окажется более сложной, требующей детальной оптимизации (как топологической, так и вычислительной). Поэтому для создания двухвибраторной антенны в среде FEKO удобно использовать элемент **Line** из основного набора вкладки **Construct** главного меню.

Выберем элемент **Line** (раздел **Create curve**). Открывшееся диалоговое окно **Create line** (рис. 7.2) дает возможность пользователю разместить выбранный элемент в пространстве системы координатным методом.

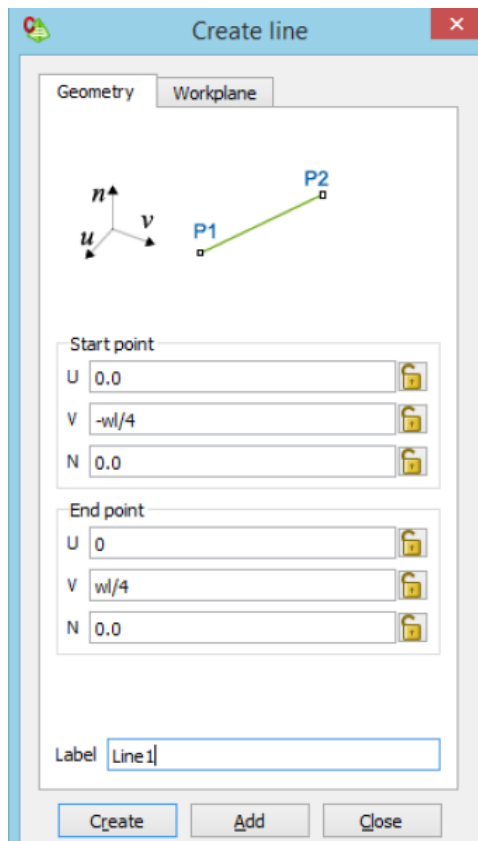


Рис. 7.2 – Диалоговое окно создания элемента Line

4. Сверху окна на рис. 7.2 показаны направления орт единичных векторов, при желании их можно изменить во вкладке **Workplane** того же окна. Чтобы сформировать полуволновый вибратор вдоль оси ОУ с центром в начале координат, необходимо расположить элемент в направлении орты V с начальной точкой, соответствующей значению $-l$ из таблицы 7.1, и конечной точкой, соответствующей значению l .

5. После расположения в системе симметричного вибратора (клавиша **Create** на рис. 7.2) соответствующий элемент появляется в области просмотра. Удерживая левую кнопку мыши и перемещая курсор, можно изменить направление обзора. Перейдя в раздел **View** главного меню, выберем наиболее удобный изометрический вид на антенну, нажав на кнопку **Isometric** в группе **Preset views**.

6. Теперь необходимо выбрать точку питания для вибратора. Вновь созданный элемент модели появляется в списке **Model – Geometry – Line1** вкладки **Construct** в окне проекта слева. После нажатия на него в окне **Details** ниже появляется список составных частей этой структуры. Элемент **Line** является двумерным проводом, поэтому содержит только одну область для решения электродинамической задачи: **Wires – Wire1**. Нажимая правой кнопкой мыши на **Wire 1**, получаем всплывающее меню, в котором необходимо выбрать пункт

Create port – Wire port. В строке ввода **Edge** должно быть указание на размещение порта (**Line1.Wire1**). Порт должен быть размещен на единичном сегменте провода по центру. Диалоговое окно создания порта представлено на рис. 7.3.

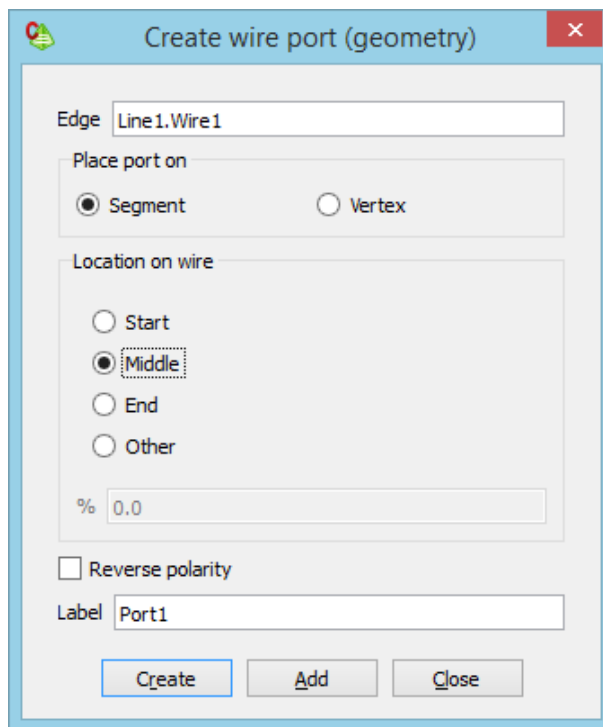


Рис. 7.3 – Окно создания порта

7. После того как порт создан, необходимо задать параметры его возбуждения. Как и в случае размещения линии в системе, заданный ранее порт появляется в списке окна **Construct** в разделе **Model – Ports** (окно проекта). Нажимая правой кнопкой мыши на **Port 1**, переходим в меню **Voltage source**. Магнитуда напряжения (**Magnitude**), начальная фаза (**Phase**) и сопротивление порта (**Port impedance**) в рассматриваемом случае сохраняют значения по умолчанию. После нажатия клавиши **Create** в модели создается источник напряжения. Для того чтобы задать его частоту, необходимо перейти на вкладку **Configuration** в окне проекта слева. В списке **Source** значится **VolageSource1**. Над ним располагается пункт **Frequency**, двойной щелчок мыши по которому открывает диалоговое меню **Solution frequency**. В выпадающем списке необходимо оставить значение **Single frequency** (одна частота), в строке ввода **Frequency** необходимо ввести частоту в герцах. Здесь можно указать как арифметическую операцию ($c0/(wl/100)$), так и численное значение, соответствующее данным таблицы 7.1. На этом проектирование активного вибратора окончено.

8. Инициализируем вторую переменную **d**, соответствующую половине длине вибратора, описанным в пункте 2 способом. Эта переменная будет определять расстояние между двумя вибраторами. Далее необходимо расположить в системе пассивный вибратор. Создавая новый элемент модели **Line2**, следует учесть, что пассивный вибратор должен быть параллелен активному, располагаться с ним в одной плоскости на расстоянии **d**. Выбор плоскости расположения вибраторов, строго говоря, является произвольным, однако для совпадения результирующих диаграмм рекомендуется выбирать плоскость XOY. Следует учесть, что длины обоих элементов будут одинаковыми. На рис. 7.4 показана одна из возможных геометрий модели двухвибраторной антенны.

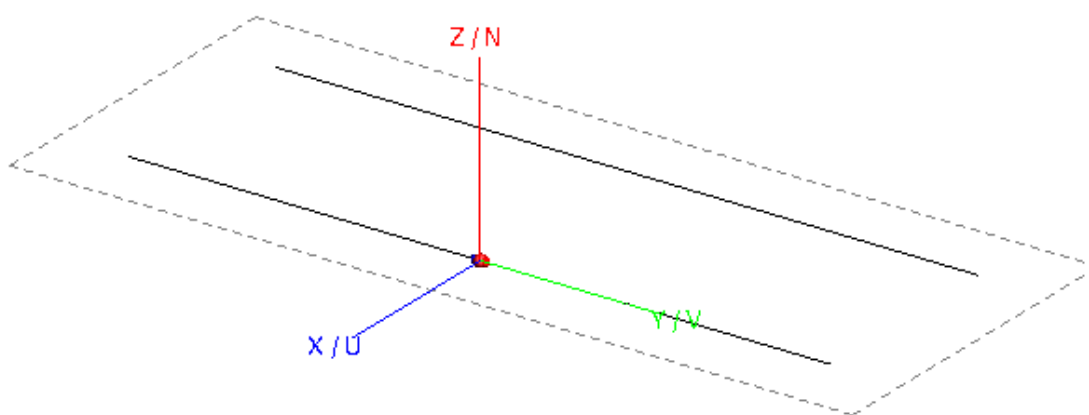


Рис. 7.4 – Модель двухвибраторной антенны в среде FEKO

9. Последним этапом проектирования является моделирование короткозамкнутого шлейфа пассивного вибратора. Вычерчивание топологии такого элемента антенны является нежелательным по ряду причин, главной из которой является то, что существенное усложнение геометрии не дает никакого преимущества в точности результатов, а зачастую попросту снижает ее. Для того чтобы задать входное сопротивление пассивного вибратора, необходимо разместить на нем импедансный порт. Процедура полностью совпадает с описанной в пунктах 6 и 7 процедурой размещения на проводе активного порта (источника напряжения) за одним исключением. В контекстном меню установленного порта вместо **Voltage Source** необходимо выбрать **Add load**. Тип нагрузки (**Load type**) – комплексный импеданс (**Complex impedance**). В силу того что шлейф является реактивной нагрузкой, строку ввода **Real part** необходимо оставить без изменения (ноль по умолчанию), в поле **Imagery part** следует ввести значение волнового сопротивления короткозамкнутого шлейфа, равное 50 Ом. На этом создание геометрии двухвибраторной антенны закончено.

10. Элементы **Line** в FEKO рассчитываются методом моментов, поэтому создание сетки является обязательным. Перейдя во вкладку **Mesh** главного меню, необходимо нажать на клавишу **Create mesh**. Появившееся диалоговое окно показано на рис. 7.5.

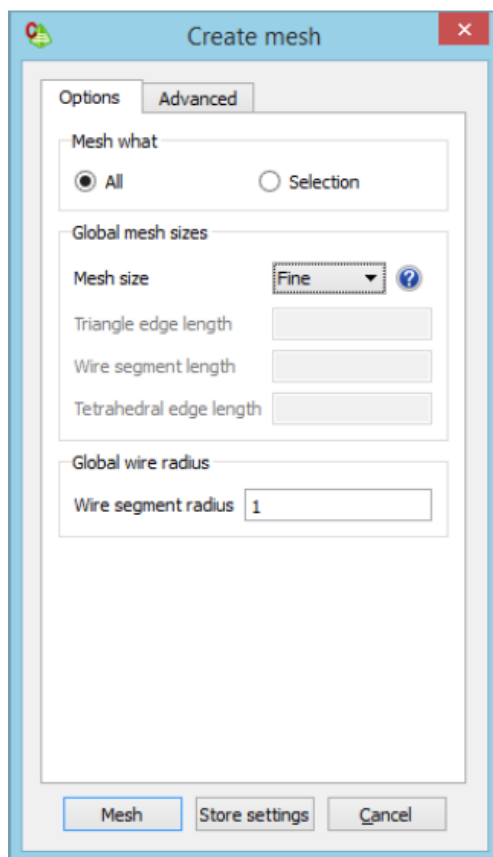


Рис. 7.5 – Создание сетки разбиения

В силу относительной простоты исследуемой геометрии сетку логично задавать стандартными алгоритмами. В выпадающем списке **Mesh size** следует выбрать значение **Fine**. В этом случае автоматическое разбиение геометрии на элементы осуществляется с минимальным пространственным шагом, равным $0,04\lambda$. Значение радиуса сегмента провода (**Wire segment radius**) выбирается в соответствии с время-точностными ожиданиями по симулированию. Примем радиус сегмента провода равным 0,1 мм. После нажатия на клавишу **Mesh** в области просмотра геометрия приобретает объемную форму с выделением сегментов разбиения; в текстовом терминале консоли можно наблюдать количество элементов сетки для каждого провода.

11. Требуемыми результатами расчета модели являются диаграмма направленности антенны в дальней зоне и распределение токов на вибраторах. Для того чтобы указать выходные параметры, в окне проекта слева необходимо

перейти во вкладку **Configuration** и вызвать контекстное меню пункта **Requests**, кликнув правой кнопкой мыши на нем. Далее следует выбрать **Far field**. Все величины в открывшемся диалоговом окне сохраняют значения по умолчанию. Обратите внимание на ориентацию сферических координат в системе FEKO. При нажатии на клавишу **3D pattern** в области просмотра появляется сферическая поверхность, на которой располагаются точки, расчет полей в которых будет производиться программой. После нажатия клавиши **Create** в списке **Requests** появится дерево **Far Fields** с одной ветвью **FarField1**. После этого в контекстном меню **Requests** следует выбрать пункт **Currents**. В открывшемся диалоге меню следует нажать клавишу **Create**, оставив значения всех пунктов без изменений. В списке **Requests** появляется новое дерево **Currents** с ветвью **Currents1**.

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

13. Для получения характеристик двухвибраторной антенны воспользуемся программой POSTFEKO, вызывая ее нажатием соответствующей кнопки в главном меню.

Для того чтобы получить диаграмму направленности по заданному контуру, в окне проекта необходимо перейти на вкладку **Model**, далее в списке **Requests** дважды кликнуть на пункте **FarField1**. В меню обработки результатов появятся параметры отображения. В выпадающем списке **Plot type** выберем **3D surface**, в списке выбора отображаемой характеристики выберем **Electric field**, отмеченная радиокнопка **Total** указывает на отображение суммарного электрического поля, также следует выделить значение **Normalise**, чтобы получить нормированное распределение напряженности. Далее двойной щелчок мыши на пункте **Currents1** в окне проекта слева запустит процедуру визуализации распределения токов на проводниках. Меня значения в выпадающем списке в меню обработки результатов, нужно получить как распределение электрических токов, так и зарядов на вибраторах. В этом случае следует также указать построение нормированных значений величины. Окно отображения с меню обработки представления результатов приведено на рис. 7.6. В списке **3D view results** можно контролировать отображаемые в окне просмотра результаты.

14. Требуется получить и вставить в отчет следующие графики:

- пространственную диаграмму направленности;

- диаграмму направленности в прямоугольной системе координат в меридиональной плоскости ($\varphi = 0^\circ$);
- диаграмму направленности в прямоугольной системе координат в меридиональной плоскости ($\varphi = 90^\circ$);
- диаграмму направленности в прямоугольной системе координат в экваториальной (азимутальной) плоскости ($\theta = 90^\circ$);
- диаграмму направленности в полярной системе координат в меридиональной системе координат ($\varphi = 0^\circ$);
- диаграмму направленности в полярной системе координат в меридиональной системе координат ($\varphi = 90^\circ$);
- диаграмму направленности в полярной системе координат в экваториальной (азимутальной) плоскости ($\theta = 90^\circ$);
- зависимость распределения тока на сегментах (см. п.17).

Для этого в меню сверху на вкладке **Home** необходимо выбрать тип графика **Cartesian** (для получения графика в прямоугольной системе координат) или **Polar** (для получения графика в полярной системе координат). Далее необходимо там же наверху выбрать **Far Field** и в выпадающем меню выбрать поле, задаваемое ранее. Для изменения плоскости или отсчитываемого по оси абсцисс и ординат параметра можно воспользоваться меню справа.

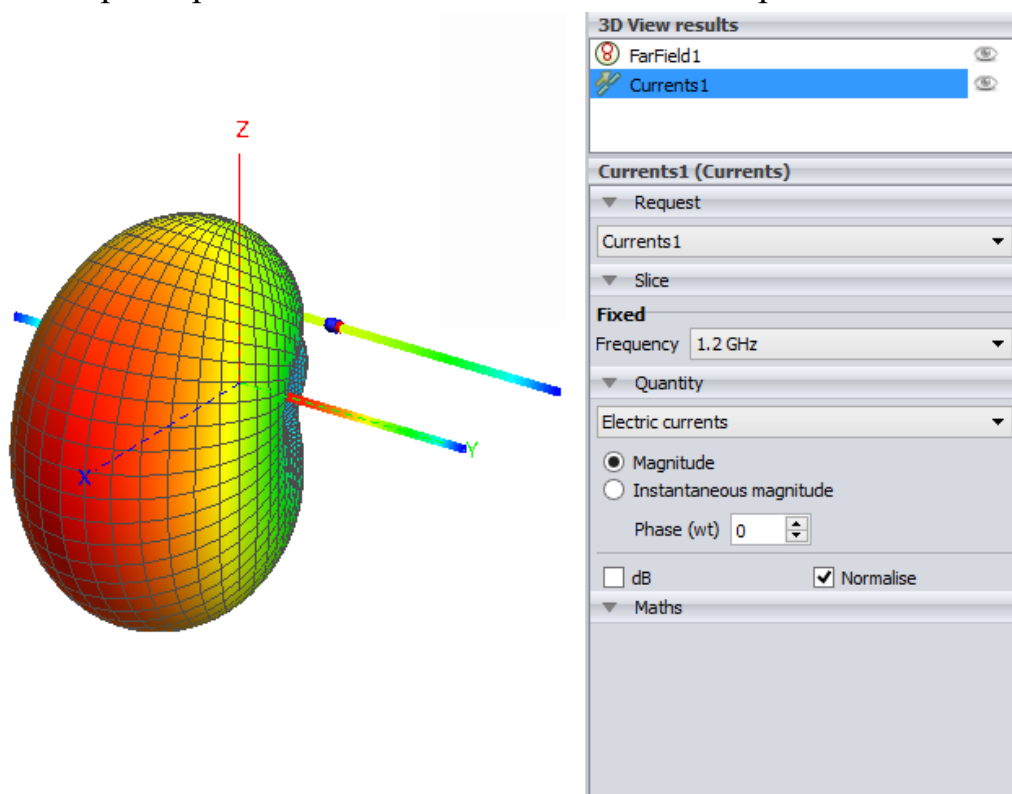


Рис. 7.6 – Полученная диаграмма направленности и распределение токов на двухвибраторной антенне

15. Для быстрого анализа полученной характеристики в среде POSTFEKO предусмотрен ряд автоматических операций. Перейдя во вкладку **Measure** главного меню, в группе выбора **Far filed annotations** необходимо нажать на клавишу **Beamwidth**. Данная процедура позволяет получить ширину главного лепестка диаграммы по разным уровням. Если в появившемся меню невозможно выбрать процедуру расчета, необходимо указать, к какой характеристике она должна быть применена. Для этого достаточно кликнуть на график функции в окне просмотра, либо в правом верхнем углу меню обработки результатов выбрать ее указатель в группе **Trace – FarFiled1**. После этого кнопки выбора становятся активными. Необходимо получить значение ширины главного лепестка по уровню –3дБ (клавиша **Half power**).

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

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

Требования к отчету

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально. Он должен содержать результаты выполнения расчетной части, краткое описание виртуального эксперимента, результаты измерений в виде таблиц и графиков, анализ результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой симметричный вибратор? Каково распределе-

ние тока по его длине?

2. Как определяется поле излучения симметричного вибратора?
3. Опишите основные параметры и характеристики симметричного вибратора.
4. Приведите примеры и принцип работы широкополосных вибраторов.
5. В чем заключается принцип построения и работы вибратора Пистолькорса?
6. Что такое несимметричная вибраторная антенна? Какие типы несимметричных вибраторных антенн Вы знаете?
7. В чем заключается метод зеркальных изображений в теории антенн?
8. Приведите основные параметры и характеристики несимметричных вибраторных антенн.
9. Как влияют экран и земная поверхность на характеристики вибратора?
10. Как влияет высота расположения антенны на характеристики несимметричного вибратора?
11. Что такое директорная антенна?
12. Что такое логопериодическая вибраторная антенна?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ИССЛЕДОВАНИЕ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ РАСКРЫВОМ

Цель работы: исследование конструкции и диаграммы направленности рупорной антенны в двух взаимно перпендикулярных Е- и Н-плоскостях.

Краткие теоретические сведения

Под рупорной антенной понимают излучатель в виде отрезка волновода, у которого размеры поперечного сечения увеличиваются в направлении раскрыва.

Раскрыв такой антенны может быть прямоугольной, квадратной или круглой формы. Различают Е- и Н-плоскостные рупоры (размеры изменяются соответственно только в плоскости векторов Е или Н), пирамидальные (в обеих плоскостях одновременно). Такие рупоры получают из волноводов прямоугольной формы. Из круглого волновода с плавно увеличивающимся радиусом получается конический рупор.

К геометрическим параметрам рупорной антенны можно отнести: a_p и b_p – размеры раскрыва в Н- и Е-плоскостях соответственно; L – длина образующей рупора; R – длина рупора; $2\Phi_0$ – угол раскрыва рупора.

Для **Н-секториального рупора** диаграмма направленности рассчитывается по следующим формулам:

– в Е-плоскости

$$F^E(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\sin\left(\frac{kb_p}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kb_p}{2} \sin \theta}; \quad (8.1)$$

– в Н-плоскости из-за квадратичного закона распределения фазы по раскрыву и косинусоидального закона распределения амплитуды ДН выражается очень сложно через интегралы Френеля.

Оптимальная длина рупора:

$$R_{\text{opt}} = \frac{a_p^2}{3\lambda}. \quad (8.2)$$

При этом ширина ДН оптимального Н-секториального рупора в Н- и Е-плоскости определяется соотношениями:

$$2\theta_{0,5\text{opt}}^H = 80^\circ \frac{\lambda}{a_p}; \quad (8.3)$$

$$2\theta_{0,5\text{opt}}^E = 51^\circ \frac{\lambda}{b_p}. \quad (8.4)$$

Для **Е-секториального рупора** диаграмма направленности рассчитывается по следующим формулам:

– в Н-плоскости

$$F^H(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\cos \left(\frac{ka_p}{2} \sin \theta \right)}{\left(\frac{\pi}{2} \right)^2 - \left(\frac{ka_p}{2} \sin \theta \right)^2}; \quad (8.5)$$

– в Е-плоскости за счёт квадратичного закона распределения фазы ДН описывается сложным выражением через интегралы Френеля.

Оптимальная длина Е-секториального рупора определяется выражением

$$R_{\text{opt}} = \frac{b_p^2}{2\lambda}. \quad (8.6)$$

При этом ширина ДН оптимального Е-секториального рупора в Н- и Е-плоскости определяется соотношениями:

$$2\theta_{0,5\text{opt}}^H = 68^\circ \frac{\lambda}{a_p}; \quad (8.7)$$

$$2\theta_{0,5\text{opt}}^E = 56^\circ \frac{\lambda}{b_p}. \quad (8.8)$$

Задание к расчетной части

По данным таблицы 8.1 определить оптимальную длину Н- и Е-секториально рупора, построить их диаграммы направленности в плоскостях, соответствующих раскрыву рупора, определить ширину диаграммы направленности оптимальных рупоров.

Таблица 8.1

Геометрические размеры раскрыва рупора

Посл. цифра студ. билета	Длина волны λ , см	Размер раскрыва в Н-плоскости a_p , мм	Размер раскрыва в Е-плоскости b_p , мм
0	15	90	45
1	1	200	123
2	7,5	58	29
3	3,3	23	10
4	10	72	34
5	12	90	45
6	6,7	58	29
7	3	23	10
8	10	90	45
9	2,5	23	10

Порядок выполнения работы

Для проектирования рупорной антенны воспользуемся программой CAD-FEKO.

1. Для начала, необходимо повторить пункты 1 и 2 из лабораторной работы №7. Длина волны задается в соответствии с заданной в таблице 8.1. Также необходимо задать еще четыре параметра, соответствующие геометрическим размерам раскрыва рупора (**ar** и **br**) и его длине для обоих рупоров, полученной в расчетной части данной лабораторной работы (**reopt** и **rhopt**).

2. Для того чтобы вычерчивать антенны с относительно большими размерами, необходимо увеличить масштаб величин, входящих в модель. Для этого во вкладке **Home** главного меню в поле **Model attribute** необходимо проследовать в раздел **Model extents**. В выпадающем списке вместо стандартного значения **5E+2** необходимо установить **5E+3**.

3. Реализация топологии рупорной антенны предполагает размещение в пространстве металлических поверхностей, форма и размер которых повторяют элементы антенны. Совокупность всех сегментов модели представляет собой необходимую топологию.

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

Приступим к черчению геометрии антенны. Для начала необходимо расположить волновод, подходящий к рупору. Для этого во вкладке **Construct** главного меню наверху выберем пункт **Cuboid**. В открывшемся диалоговом окне необходимо ввести габаритные параметры элемента, а также координаты основания параллелепипеда. На рис. 8.1 показано диалоговое окно с параметрами, которые необходимо указать. После нажатия клавиши **Create** в области просмотра появится заданная структура, а в меню проекта в разделе **Construct – Model – Geometry** появится указатель объекта – **Cuboid1**.

В силу того, что данная структура должна моделировать фидер, подходящий к антенне, верхнюю грань параллелепипеда необходимо удалить из геометрии. Для этого следует нажать на указатель геометрии в окне проекта (**Cuboid1**), далее в окне **Details** снизу появятся три списка, соответствующие элементам построения фигуры: **Edges** (границы), **Faces** (поверхности) и **Regions** (регионы). При переходе в список **Faces** появятся шесть поверхностей, формирующих фигуру. При клике на каждую из поверхностей (**Face1 – Face6**) в обла-

сти просмотра выбранная выделяется желтым цветом. В данном случае необходимо удалить верхнюю грань (**Face1**). Для удаления выбранной поверхности следует нажать на ее указатель правой кнопкой мыши и в контекстном меню выбрать функцию **Delete** либо просто нажать на одноименную клавишу на клавиатуре.

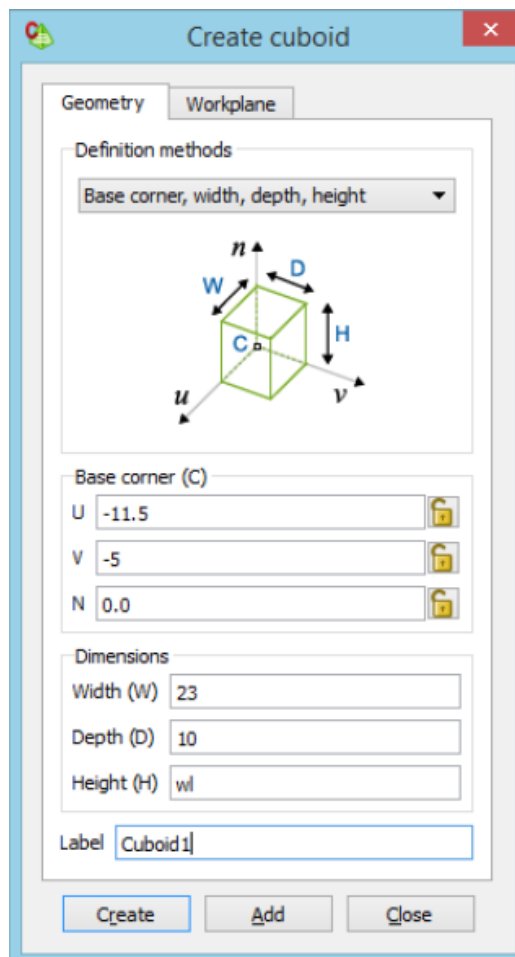


Рис. 8.1 – Размещение прямоугольного волновода

4. Далее в главном меню наверху во вкладке **Construct** необходимо выбрать геометрический примитив **Flare**. Следует обратить внимание, что еще до размещения элемента в области просмотра появляются контуры будущей фигуры, тем самым появляется возможность оперативно отслеживать вносимые в топологию изменения. Для того, чтобы изменить рабочую область построения раскрытия рупора, перейдите во вкладку **Workplane** диалогового окна **Create flare**. Очевидно, для того, чтобы реализуемая фигура была ориентирована вдоль оси рупора, ее необходимо повернуть на 180 градусов по оси OX. Для этого в области **Rotate workplane** под соответствующей клавишей необходимо ввести требуемое значение угла поворота в градусах и кликнуть на ней. Описанное действие показано на рис. 8.2.

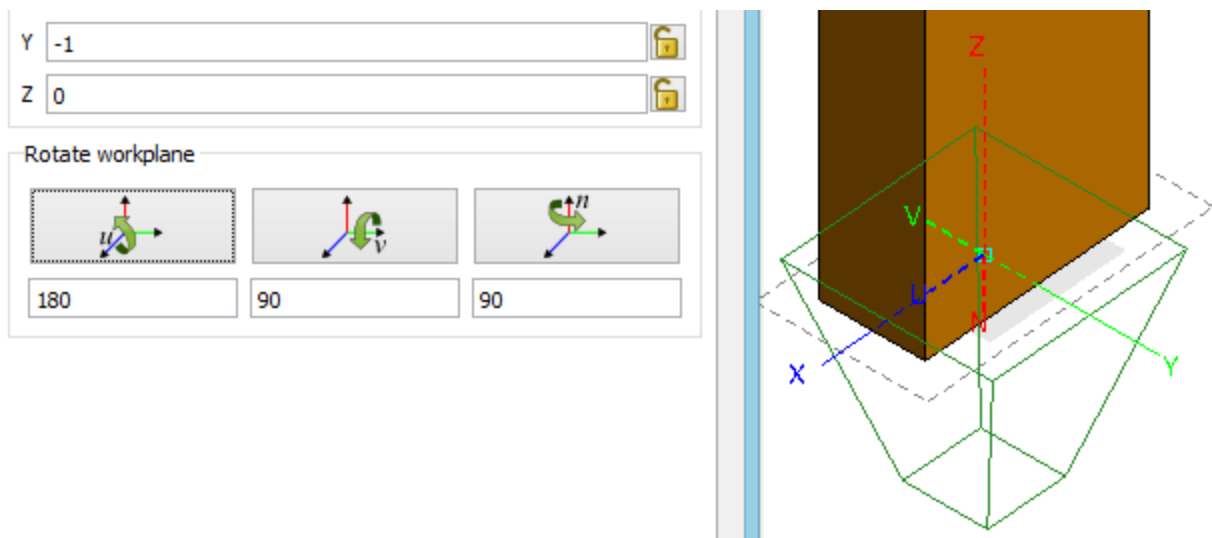


Рис. 8.2 – Поворот рабочей поверхности

5. После этой процедуры достаточно задать габаритные размеры и расположение основания усеченной пирамиды, вернувшись во вкладку **Geometry**. Диалоговое окно с введенными параметрами для Е-секториального рупора показано на рис. 8.3. Для того, чтобы сформировать Н-секториальный рупор, достаточно в поле **Bottom width** написать 23, а в **Bottom depth** написать br, координату N принять равной **-wl-rhopt** (сначала смоделируйте Е-секториальный рупор, а затем Н-секториальный). После нажатия на клавишу **Create** появится реализованная геометрия. Вполне вероятна ситуация, что топология антенны будет выходить из области просмотра. Для установки изометрического вида на антенну следует нажать на клавишу **Isometric** во вкладке **View** главного меню.

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

7. На данном этапе реализованная топология представляет собой две независимые геометрические фигуры. Строго говоря, решение может быть получено и в том случае, если они (рупор и волновод) не объединены в общую геометрию, однако для исключения погрешностей, вызванных сшиванием функций на границах раздела двух элементов, правильным решением будет объединить рупор и волновод в одну фигуру. Для этого в окне проекта во вкладке **Construct – Model – Geometry** необходимо выбрать требуемые структуры. При клике мышью последовательно сначала на указатель **Cuboid1**, затем на **Flare1** с зажатой клавишей **Shift** на клавиатуре в области просмотра обе

структуры будут выделены одним цветом. Далее во вкладке **Construct** главного меню необходимо выбрать процедуру **Union** в группе **Modify**. После этого в окне проекта указатели **Cuboid1** и **Flare1** станут элементами одного списка **Union1**.

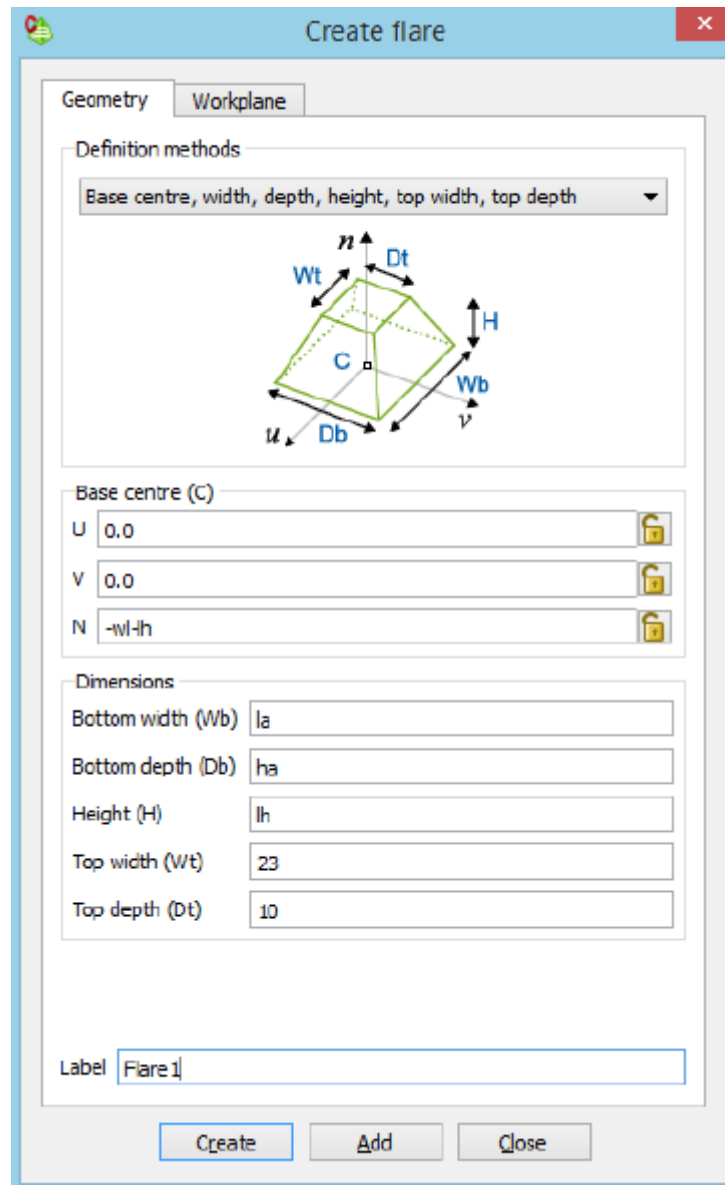


Рис. 8.3 – Габаритные размеры и расположение рупора

8. Последним этапом в проектировании рупорной антенны является задание способа ее возбуждения. Самым простым способом сделать это является выбор соответствующей процедуры в контекстном меню поверхности фидера, на которой должен располагаться порт. В меню проекта при нажатии на указатель объединенной структуры **Union1** в окне **Details**, как и ранее, имеются списки формирующих геометрию элементов. В списке **Faces** необходимо выбрать поверхность, которая является нижней гранью волновода (единственная

поверхность, лежащая в плоскости XOY). Нужно запомнить название этой поверхности, это пригодится в дальнейшем. Вызвав контекстное меню нажатием правой кнопки мыши по данной поверхности, необходимо выбрать **Create port – Waveguide port**. Значения в открывшемся диалоговом окне остаются без изменения. Создание порта подтверждаем клавишей **Create**. В меню проекта появляется список **Ports** с единственной ветвью **Port1**. Вызывая контекстное меню элемента нажав по нему правой кнопкой мыши, выбираем **Waveguide excitation**. Как и в предыдущем случае, значения возбуждения остаются по умолчанию. Завершаем процедуру клавишей **Create**. Следуя во вкладку **Configuration** слева, необходимо двойным щелчком мыши по полю **Frequency** вызвать строку ввода анализируемой частоты и задать значение, соответствующее заданной в таблице 8.1 длине волны или же ввести выражение $c0/(wl/100)$.

На этом проектирование рупорной антенны завершено. Возможная геометрия антенны в изометрическом виде представлена на рис. 8.4.

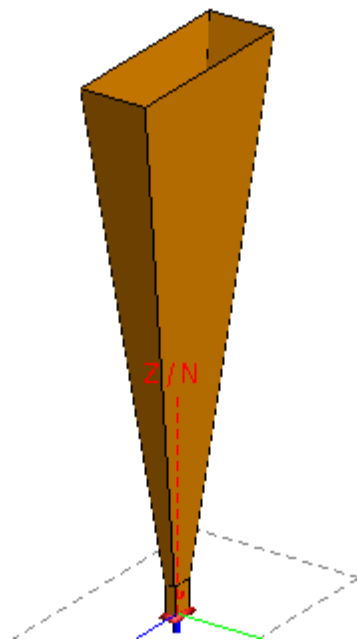


Рис. 8.4 – Рупорная антенна в программе FEKO

9. В силу того что в данной работе изучается достаточно большая структура, по отношению к длине волны целесообразно для экономии вычислительных ресурсов несколько оптимизировать модель. Первым шагом оптимизации будет упрощение рассчитываемой геометрии. Выделите антенну, либо кликнув по ней левой кнопкой мыши в области просмотра, либо выбрав ее указатель **Union1** в меню проекта слева (выбранный элемент становится желтым в области просмотра). Далее во вкладке **Transform** главного меню наверху необ-

ходимо нажать на клавишу **Simplify**. Нет необходимости менять параметры упрощения геометрии в открывшемся диалоговом окне, основной принцип этой процедуры заключается в удалении избыточных точек в топологии, а также в устранении граней металлических соприкосновений. Поэтому в открывшемся окне просто нажимаем **Create**. Вторым шагом оптимизации является задание плоскостей симметрии. Во вкладке **Solve/Run** главного меню следует нажать на клавишу **Symmetry**. FEKO предлагает пользователю указать системе три плоскости симметрии: геометрическая симметрия (определяемая классической геометрией), электрическая симметрия (электрическое поле находится только в одном полупространстве, ограниченном выбранной плоскостью, для второго полупространства оно зеркально отображается) и магнитная симметрия (то же, но только для магнитного поля). В данной работе следует задать только плоскости геометрической симметрии антенны. На рис. 8.5 показан пример такой формулировки.

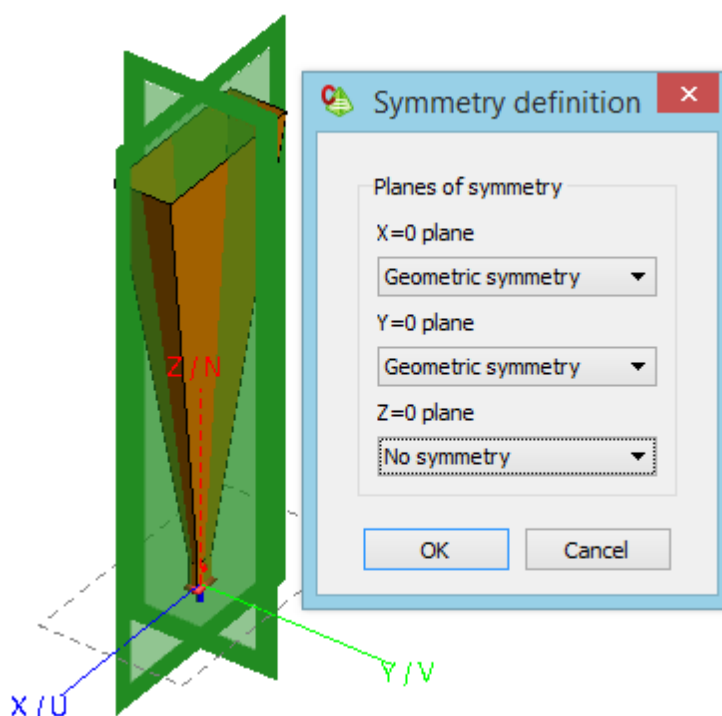


Рис. 8.5 – Плоскости симметрии в программе FEKO

10. Следующим этапом моделирования является определение вычислительного метода для каждой поверхности антенны. Общим для каждого случая является метод расчета грани фидера, на которой установлен волноводный порт (та самая нижняя поверхность, название которой необходимо было запомнить в п.8). Выбирая список **Faces** структуры **Union1**, необходимо двойным нажатием

мыши на указателе этой поверхности вызвать диалоговое меню, показанное на рис. 8.6.

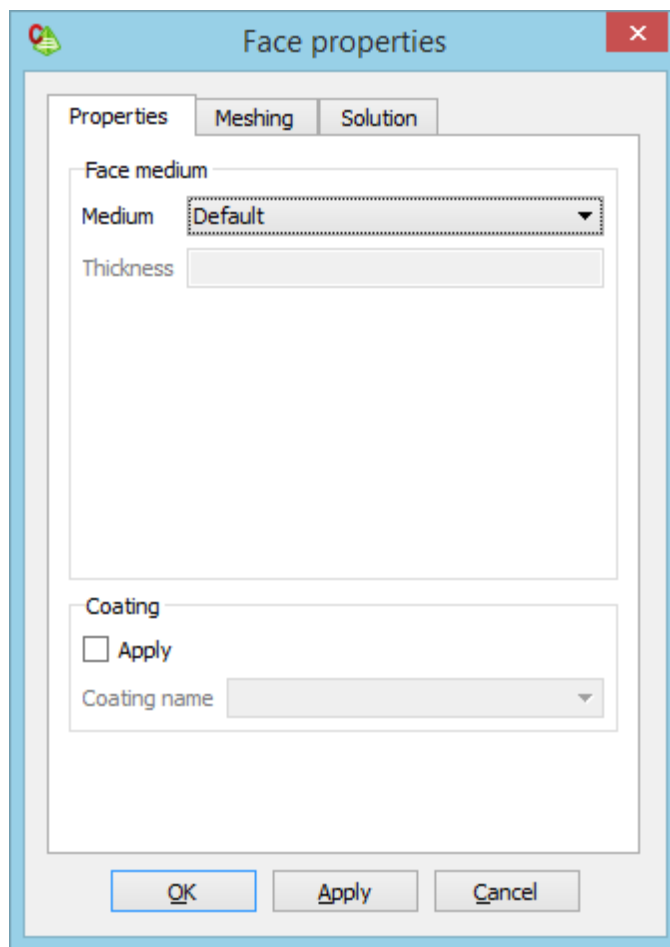


Рис. 8.6 – Меню свойств поверхности

Во вкладке **Meshing** поставьте галочку а поле **Local Mesh Size** и в поле ввода ниже ввести значение **0.07*wl**, соответствующее сетке разбиения. После этого нажмите клавишу **OK**.

Для всех остальных поверхностей вызывая то же самое окно необходимо во вкладке **Solution** в выпадающем списке **Solve with special solution method** указать **PO full ray-tracing**.

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

12. После окончания процедуры создания сетки следует задать выходные параметры работы модели. Во вкладке **Configuration** в окне проекта необходимо правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню поля **Requests**. Первым результатом расчета будет распределение поля в раскрыве рупора, для этого необходимо выбрать пункт **Near fields**. В открывшемся диалоговом окне необходимо задать область расчета, совпадающую с раскрывом рупора, и определить требуемое количество точек расчета. Диалоговое окно с введенными параметрами для Е-секториального рупора – представлено на рис. 8.7. Для Н-секториального рупора значения поля U необходимо указать -11.5 и 11.5 , а для V нужно указать $-br/2$ и $br/2$. Для того чтобы инициализировать расчет поля антенны в дальней зоне, в том же контекстном меню необходимо выбрать пункт **Far fields**. В открывшемся диалоговом окне требуется нажать клавишу **3D pattern** – расчет трехмерной ДН. Клавиша **Create** подтверждает выбор. В итоге в списке **Request** в меню проекта должны фигурировать два подраздела: **Near fields** и **Far fields**.

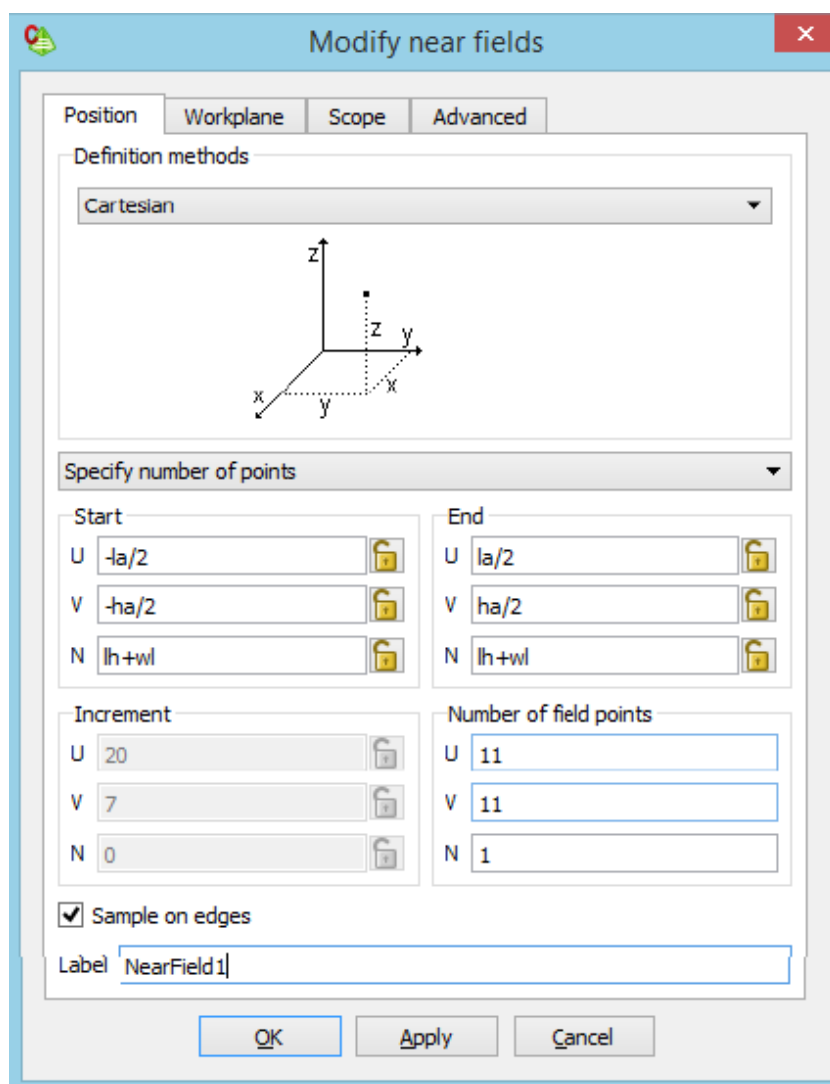


Рис. 8.7 – Задание параметров расчета ближней зоны

13. Теперь необходимо рассчитать сформированную геометрию системы. Прежде всего следует «объяснить» программе, как объединять (или не объединять) решения для областей, полученные различными вычислительными методами (так называемый гибридный метод расчета). Для этого на вкладке **Solve/Run** главного меню необходимо выбрать пункт **Solver settings**. Открывшееся окно показано на рис. 8.8. Далее следует перейти во вкладку **High frequency** и в группе выбора **PO parameters** сверху окна отметить **Decouple PO and MoM solutions** (не объединять решения). Для закрытия окна и подтверждения выбора следует нажать на клавишу **OK**.

14. Во вкладке **Solve/Run** стандартная процедура **FEKO solver** запускает процесс вычислений (прежде необходимо сохранить проект, причем в имени файла следует использовать только латинские буквы, название должно соответствовать фамилии одного из студентов бригады). После завершения процедуры (это займет некоторое время) необходимо нажать клавишу **OK**.

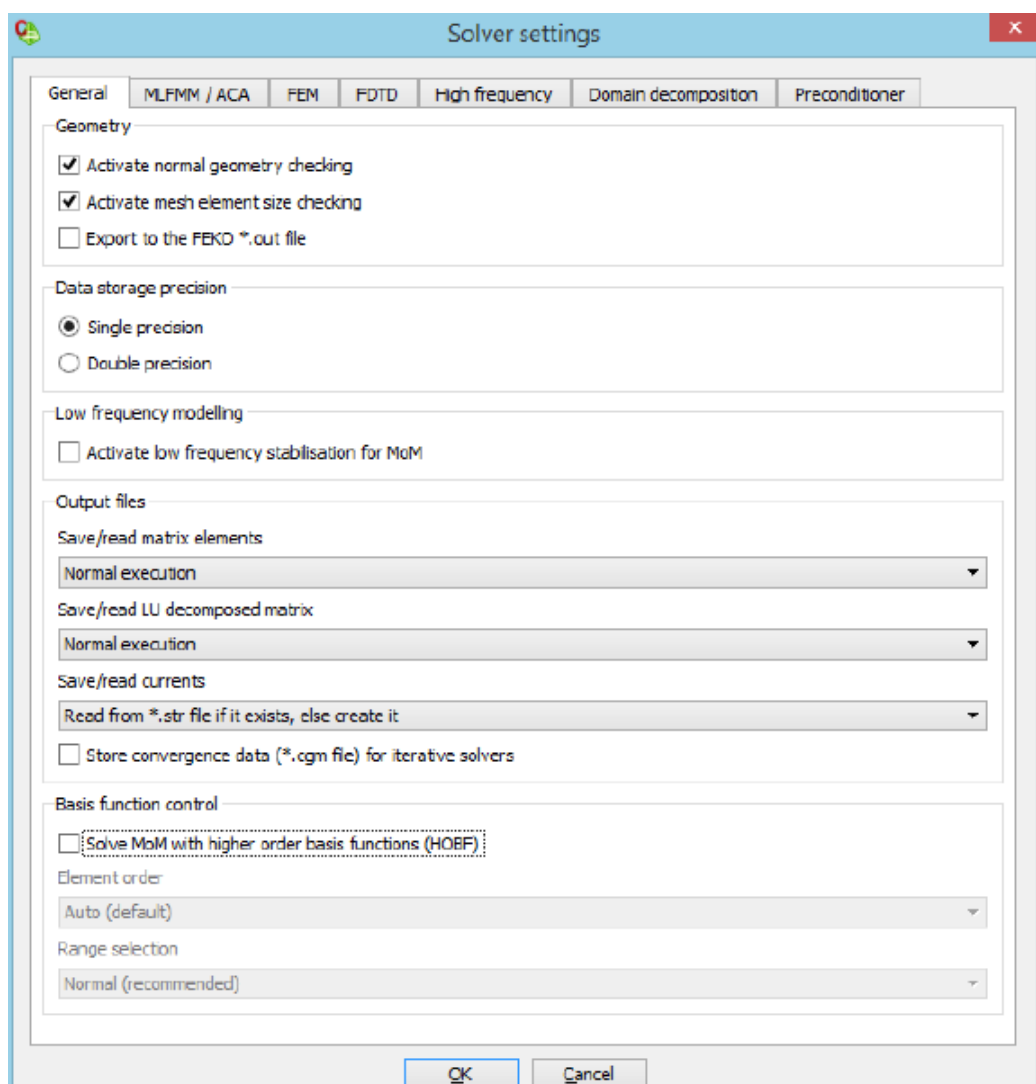


Рис. 8.8 – Настройки параметров расчета системы

15. Теперь перейдем к получению характеристик полученной антенны в программе POSTFEKO. Для того чтобы получить диаграмму направленности по заданному контуру, в окне проекта слева необходимо перейти на вкладку **Model**, далее в списке **Requests** дважды кликнуть на пункте **FarField1**. В меню обработки результатов справа появятся параметры отображения. В выпадающем списке **Plot type** выберем **3D surface**, в списке выбора отображаемой характеристики выберем **Electric field**, отмеченная кнопка **Total** указывает на отображение суммарного электрического поля, также следует выделить значение **Normalise**, чтобы получить нормированное распределение напряженности. Далее двойной щелчок мыши на пункте **NearField1** в окне проекта запустит процедуру визуализации полей в апертуре антенны. Меняя значения в выпадающем списке в меню обработки результатов, нужно получить нормированное мгновенное распределение электрического поля в раскрыве рупора (**Electric field** в группе **Quantity** с активированным значением **Instantaneous magnitude**). Окно отображения из меню обработки представления результатов приведено на рис. 8.9. В списке **3D view results** можно контролировать отображаемые в окне просмотра результаты.

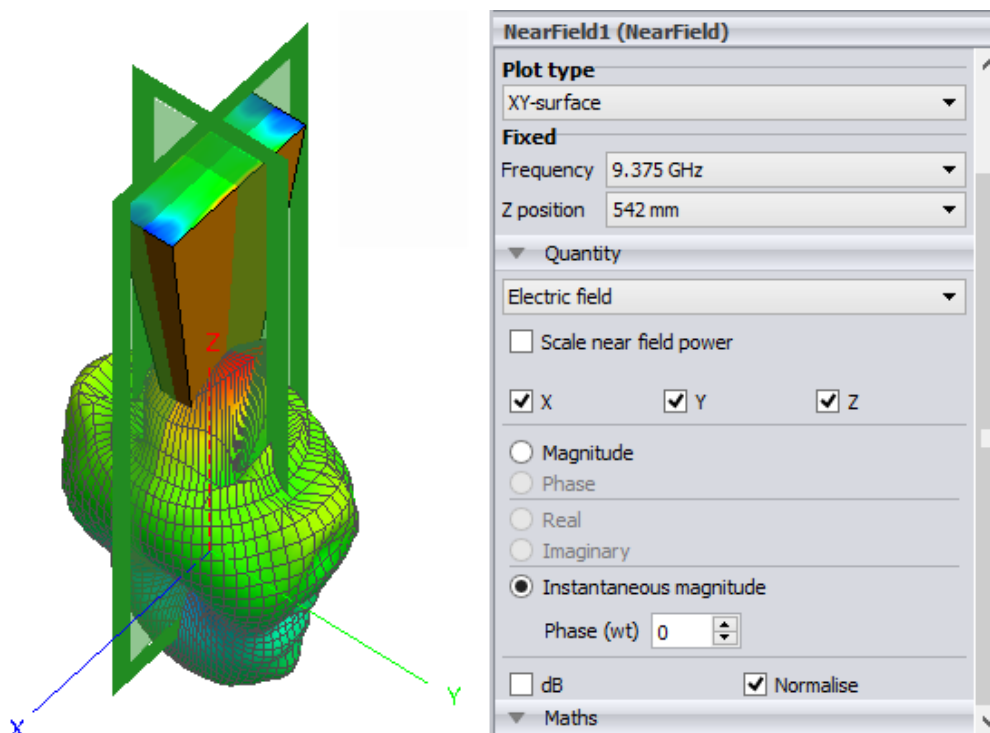


Рис. 8.9 – Результаты расчеты рупорной антенны

16. Требуется получить и вставить в отчет следующие графики:

- пространственную диаграмму направленности;

- диаграмму направленности в прямоугольной системе координат в меридиональной плоскости ($\varphi = 0^\circ$);
- диаграмму направленности в прямоугольной системе координат в меридиональной плоскости ($\varphi = 90^\circ$);
- диаграмму направленности в прямоугольной системе координат в экваториальной (азимутальной) плоскости ($\theta = 90^\circ$);
- диаграмму направленности в полярной системе координат в меридиональной системе координат ($\varphi = 0^\circ$);
- диаграмму направленности в полярной системе координат в меридиональной системе координат ($\varphi = 90^\circ$);
- диаграмму направленности в полярной системе координат в экваториальной (азимутальной) плоскости ($\theta = 90^\circ$);
- зависимость распределения электрического поля в раскрыве антенны от пространственной координаты (см. п.19).

Для этого в меню сверху на вкладке **Home** необходимо выбрать тип графика **Cartesian** (для получения графика в прямоугольной системе координат) или **Polar** (для получения графика в полярной системе координат). Далее необходимо там же наверху выбрать **Far Field** и в выпадающем меню выбрать поле, задаваемое ранее. Для изменения плоскости или отсчитываемого по оси абсцисс и ординат параметра можно воспользоваться меню справа.

17. Для быстрого анализа полученной характеристики в среде POSTFEKO предусмотрен ряд автоматических операций. Перейдя во вкладку **Measure** главного меню, в группе выбора **Far filed annotations**, необходимо нажать на клавишу **Beamwidth**. Данная процедура позволяет получить ширину главного лепестка диаграммы по разным уровням. Если в появившемся меню невозможно выбрать процедуру расчета, необходимо указать, к какой характеристике она должна быть применена. Для этого достаточно кликнуть на график функции в окне просмотра, либо в правом верхнем углу меню обработки результатов выбрать ее указатель в группе **Trace – FarFiled1** или **FarFiled1_1**. После этого кнопки выбора становятся активными. Необходимо получить значение ширины главного лепестка по уровню -3дБ (клавиша **Half power**) для диаграмм в обеих плоскостях.

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

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

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

Требования к отчету

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально. Он должен содержать результаты выполнения расчетной части, краткое описание виртуального эксперимента, результаты измерений в виде таблиц и графиков, анализ результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные типы рупорных антенн и опишите их конструкцию.
2. Опишите принцип действия Н-секториального рупора.
3. Как определяются основные параметры и характеристики Н-секториального рупора?
4. Опишите принцип действия Е-секториального рупора.
5. Как определяются основные параметры и характеристики Е-секториального рупора?
6. Опишите принцип действия пирамидального рупора.
7. Опишите принцип действия конического рупора.
8. Какие используются основные геометрические параметры рупорной антенны в зависимости от их конструкции?
9. Какие известны типы пирамидальных рупоров?
10. Как связаны диаграммы направленности Н- и Е-секториального рупоров с диаграммой направленности пирамидального рупора?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зейде К.М. Проектирование антенн в ALTAIR FEKO. Электронный образовательный тестовый ресурс. – Екатеринбург: УрФУ, 2018, 35 стр.
2. Костин М.С., Ярлыков А.Д. Электродинамика, радиоволновые процессы и технологии: учебное пособие / М.С. Костин, А.Д. Ярлыков. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021.
3. М.С. Костин, А.Д. Ярлыков, Д.С. Воруничев, Ю.А. Полевода, Е.А. Чистяков Модули и техника сверхвысоких частот [Электронный ресурс]: учебное пособие / М.С. Костин, А.Д. Ярлыков, Д.С. Воруничев, Ю.А. Полевода, Е.А. Чистяков. – М.: МИРЭА – Росстийский технологический университет, 2021.
4. Основы электродинамики: учебное пособие / А. Н. Коваленко. – М.: МГТУ МИРЭА, 2014.
5. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие: [в 3 ч.] / А. Н. Коваленко, А. Н. Щербицкий. – М.: МИРЭА, 1999-2004
6. Техническая электродинамика : Учеб. пособие: [В 2 ч.] / И. Ф. Будагян, В. Ф. Дубровин. - М.: МГТУ МИРЭА, 2014.
7. Техническая электродинамика. Устройства СВЧ и антенны [Электронный ресурс]: мультимедийное учебное пособие / И. Ф. Будагян, Д. Ф. Романов, Г. Г. Щучкин. – М.: МИРЭА, 2011. - Электрон. опт. диск (ISO).
8. Техническая электродинамика: Метод. указ. по выполнению лаб. работ по направлению 211000 "Конструирование и технология электронных средств" / И. Ф. Будагян, В. Ф. Дубровин, Г. Г. Щучкин. - М.: МИРЭА, 2014. - 32 с.
9. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. - М.: Радиотехника, 2006.
10. Дмитриев Е.Е. Основы моделирования в Microwave Office 2009. – М.: СОЛОН-Пресс, 2010.
11. Будагян И.Ф., Головченко Г.С., Дубровин В.Ф. Техническая электродинамика. Конструкции экранов и антенных устройств. Методические указания по выполнению лабораторных работ / МИРЭА. - М., 1997.
12. Будагян И.Ф., Дубровин В.Ф., Щучкин Г.Г. Техническая электродинамика. Методические указания по выполнению лабораторных работ./ МИРЭА. - М., 2008.
13. Техническая электродинамика: Лабораторный практикум / С. В. Грачев, Ю. Е. Лавренко, В. Н. Малышев, В. А. Степанов / СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
14. В.М. Гончаренко, Н.Н. Гурин, В.В. Чебышев Устройства сверхвысоких частот и антенны. Методические указания по выполнению лабораторных работ. – М.: МИРЭА, 2007.

15. Костин М.С., Воруничев Д.С., Корж Д.А., Севрюгин П.В. Радиоволновые процессы и техника СВЧ [Электронный ресурс]: методические указания по выполнению лабораторных работ / М.С. Костин, Д.С. Воруничев, Д.А. Корж, П.В. Севрюгин – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2019.
16. Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. – М., One-Book, 2013, 423 стр.
17. Зейде К.М. Проектирование антенн в ALTAIR FEKO. Электронный образовательный тестовый ресурс. – Екатеринбург: УрФУ, 2018, 35 стр.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА

Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем
Кафедра радиоволновых процессов и технологий

Дисциплина
«Модули и техника сверхвысоких частот»

Отчет по лабораторной работе №1
«ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ И УСТРОЙСТВ СВЧ
В САПР MICROWAVE OFFICE»

Выполнил студент:

Группа:

Преподаватель:

Учебное издание

Костин Михаил Сергеевич
Ярлыков Алексей Дмитриевич
Полевода Юрий Александрович
Чистяков Егор Алексеевич

**РАДИОВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА И
МОДЕЛИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ И УСТРОЙСТВ СВЧ**

*Методические указания по выполнению лабораторного практикума для
студентов, обучающихся по всем направлениям группы
11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи»*

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Формат ____ .
Физ. печ. л. ____ . Тираж ____ экз. Изд. № ____ . Заказ № ____ .

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78