

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам

по дисциплине «**Микроволновая техника**»
для студентов направления подготовки

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)

Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь 2026 г.

Печатается по решению
Учебно-методического совета
Северо-Кавказского
федерального университета

УДК
ББК

Рецензенты: Валухов Д.П.

Лапин А.А. **Микроволновая техника:** методические указания по выполнению лабораторных работ. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 20___. – 145 с.

Настоящие методические указания являются руководством по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Микроволновая техника» для студентов очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника. В методических указаниях приведены необходимые теоретические обоснования, оборудование и материалы, задания и задачи, требования к содержанию отчета, его форме, литература.

Методические указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, рабочим учебным планом и программой дисциплины «Микроволновая техника».

УДК
ББК

© ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский
федеральный университет», 20__

Введение

Целью дисциплины является формирование набора требуемых компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника.

Задачи дисциплины: сформировать знания, умения, навыки расчета и моделирования компонентов и элементов СВЧ, а также, навыки разработки и проектирования микроволновых приборов и устройств на их основе.

Выполнение лабораторных работ способствует получению знаний и умений, согласно заявленным для дисциплины компетенциям, на базе теоретического материала, изучаемого на лекционных занятиях.

Содержание

Лабораторная работа 1. Расчет и моделирование петлевого фазовращателя	5
Лабораторная работа 2. Расчет и моделирование делителя (сумматора) мощности	30
Лабораторная работа 3. Расчет пролетного клистрона	68
Лабораторная работа 4. Решение задач моделирования СВЧ-устройств в программном обеспечении <i>ANSYS HFSS</i>	87
Список рекомендуемой литературы	145

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Расчет и моделирование петлевого фазовращателя

1 Введение

Фазовращатель СВЧ (фазосдвигатель СВЧ) – это устройство, предназначенное для изменения фазы электромагнитных колебаний на выходе линии передачи СВЧ (полого или диэлектрического радиоволновода, коаксиальной длинной линии, полосковой линии) относительно фазы колебаний на её входе, осуществляемого посредством изменения электрической длины этой линии. Фазовращатели (ФВ) классифицируются по нескольким признакам:

- по типу волн;
- по физическому принципу;
- по изменению фазы;
- по способу включения в тракт.

В данной работе будет проводиться расчет проходного электрического петлевого фазовращателя с дискретным изменением фазы на базе полупроводниковых СВЧ *p-i-n*-диодов и полосковых линий.

2 Теоретическая часть

В нижней части СВЧ диапазона применяются обычно схемы проходных ФВ. Простейшая схема – это проходной ФВ (рисунок 1.1), имеющий минимальное количество ключевых элементов, в качестве которых используются СВЧ *p-i-n*-диоды.

Расстояние между концами петли с электрической длиной φ_1 много меньше длины волны, так что можно считать, что диод *VD1* непосредственно

соединяет концы петли. К середине петли через диод $VD2$ подключается короткозамкнутый параллельный шлейф с электрической длиной φ_2 с волновым сопротивлением ρ_2 . Когда диоды закрыты, сигнал проходит по петле. Если ФВ согласован по входу, то длина петли обеспечивает необходимый фазовый набег. Если диоды открыть, то фазовый набег будет равен нулю в случае, когда реактивное сопротивление, вносимое петлей, также равно нулю. Это же условие обеспечивает и согласование ФВ по входу.

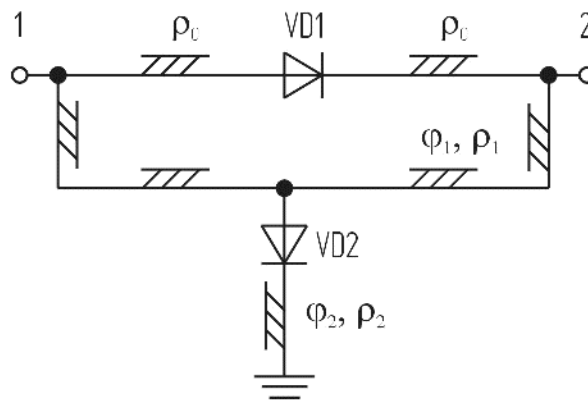


Рисунок 1.1 – Схема проходного ФВ на СВЧ $p-i-n$ -диодах и микрополосковой линии (МППЛ)

Длина петли фазовращателя рассчитывается по формуле:

$$l_1 = \frac{\varphi_1}{\beta_l}, \quad (1.1)$$

где φ_1 – электрическая длина петли;

β_l – постоянная распространения основного типа колебаний в петле фазовращателя.

Постоянная распространения β_l рассчитывается по формуле:

$$\beta_l = \frac{2\pi}{\lambda_1}, \quad (1.2)$$

где λ_1 – длина волны в линии, м.

Длина волны в линии λ_1 рассчитывается по формуле:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}\phi l}}}, \quad (1.3)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве, м;

$\varepsilon_{\text{эф}\phi l}$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится петля l_1 .

Длина волны в свободном пространстве λ_0 рассчитывается по формуле:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}, \quad (1.4)$$

где f – рабочая частота линии, Гц.

Электрическую длину отрезка φ_2 можно найти из соотношения:

$$\frac{\varphi_1}{2} + \varphi_2 = \frac{\pi}{4}(2n - 1), \quad (1.5)$$

где n – целое число.

Для данной задачи n равно единице. Тогда длина короткозамкнутого шлейфа составит величину:

$$l_2 = \frac{\varphi_2}{\beta_2}, \quad (1.6)$$

где β_2 – постоянная распространения основного типа колебаний в короткозамкнутом шлейфе.

β_2 рассчитывается также, как и β_1 , по формулам (1.3) и (1.4), с учетом $\varepsilon_{\text{эф}\phi 2}$.

Из условия обеспечения согласования по входу необходимо, чтобы волновое сопротивление ρ_1 петли равнялось:

$$\rho_1 \approx \frac{\sqrt{r_{\text{обп}}/r_{\text{нп}}}}{\omega C_\phi}, \quad (1.7)$$

где $r_{\text{обп}}$ и $r_{\text{нп}}$ – соответственно обратное (при обратном смещении) и

прямое (при прямом смещении) сопротивления СВЧ $p-i-n$ -диода, Ом;

ω – циклическая частота сигнала в петле;

C_δ – емкость перехода диода, Ф.

Из следующего выражения рассчитывается ρ_2 :

$$\operatorname{ctg}\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2 = \frac{2\rho_2}{\rho_1}. \quad (1.8)$$

Поскольку для расчетов используются параметры СВЧ $p-i-n$ -диода, то необходимо кратко рассмотреть его эквивалентную схему. Она приведена на рисунке 1.2 и учитывает все элементы, как при прямом, так и обратном смещении диода.

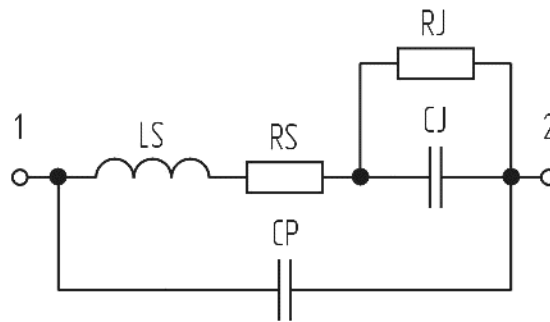


Рисунок 1.2 – Эквивалентная схема СВЧ $p-i-n$ -диода

На рисунке обозначены:

- CJ – емкость перехода (C_δ в формуле (1.7));
- RJ – сопротивление перехода ($r_{обр}$ и $r_{пр}$ в зависимости от смещения);
- RS – сопротивление потерь;
- LS – индуктивность соединений (выводов);
- CP – емкость корпуса.

Все параметры являются справочными данными.

Расчеты данного практического задания по приведенным выше формулам можно провести в системе компьютерной алгебры *MathCAD*.

Моделирование необходимо провести в системе проектирования *Microwave Office*. Система проектирования *Microwave Office* в настоящий

момент является самым современным пакетом проектирования планарных СВЧ устройств:

- включает средства разработки и моделирования линейных и нелинейных схем;
- мощное счетное ядро для выполнения различных видов анализа схем;
- мощное графическое ядро для представления расчетных данных;
- редакторы топологии и схем;
- дополнительные утилиты для упрощения расчетов и создания схемных решений и конструкций.

Таким образом, пакет *Microwave Office* является мощнейшим решением, позволяющим создавать ВЧ и СВЧ цепи и устройства от задания условий задачи, до получения результатов в виде схем и конструкций.

3 Задания (задачи)

Для решения поставленной задачи необходимо составить программу в ПО *MathCAD* версии не ниже 13. Необходимо помнить, что в *MathCAD* несколько иное представление об индексах и именах переменных, т. е. привычное для нас имя переменной ε_0 будет воспринято как элемент массива. Поэтому такие имена переменных необходимо в программе набирать так: $\varepsilon 0$. Показан пример только для диэлектрической проницаемости, остальные переменные, с именем в нижнем индексе, необходимо набирать также. Тоже лучше учитывать и для верхних индексов, чтобы исключить ошибки со степенью числа.

Расчеты производятся согласно следующей методике.

3.1 При составлении программы для расчета основных параметров по приведенным ранее формулам необходимо в *MathCAD* ввести исходные данные:

- электрическую длину петли φ_1 ;

- скорость распространения света в вакууме c , м/с;
- относительную диэлектрическую проницаемость среды $\varepsilon_{эф1}$, в которой находится петля l_1 ;
- обратное $r_{обр}$ и прямое $r_{пр}$ сопротивления СВЧ $p-i-n$ -диода, Ом;
- емкость перехода диода C_d , Ф;
- рабочую частоту линии f , Гц.

Варианты заданий приведены в таблице 1.1. Номер варианта задает преподаватель.

Таблица 1.1 – Исходные данные для задачи

Данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
φ_1 , град.	45	90	45	90	45	90	45	90	45	90
f , ГГц	0,55	0,69	0,8	1,0	1,3	1,5	1,85	2,05	2,30	2,45
ε	2	2	18,4	3,4	6,5	9,7	13,3	4,2	7,9	19,1
$tg\delta$	0,002	0,0015	0,01	0,0085	0,0091	0,0035	0,0001	0,0002	0,0008	0,005
H , мм	0,5	0,8	0,18	0,85	0,35	0,4	0,45	0,95	0,77	0,61
T , мм	0,05	0,06	0,07	0,04	0,045	0,055	0,065	0,075	0,08	0,085
Материал проводника	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Al</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Al</i>	<i>Ni</i>
Тип диода	<i>HMPR-3890</i>	<i>HMPR-4820</i>	<i>1N5767</i>	<i>MA4P165</i>	<i>MADP-011028-14150T</i>	<i>1N5767</i>	<i>MA4P165</i>	<i>MADP-011028-14150T</i>	<i>HMPR-3890</i>	<i>HMPR-4820</i>

Продолжение таблицы 1.1

Данные	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
φ_1 , град.	45	90	45	90	45	90	45	90	45	90
f , ГГц	0,48	0,51	1,29	2,15	1,94	2,67	1,11	2,22	1,9	2,06
ε	15	17	13	11	8	6	3	5	9	10
$tg\delta$	0,05	0,06	0,006	0,005	0,0084	0,0035	0,0055	0,0049	0,0034	0,007
H , мм	0,5	0,8	0,18	0,85	0,35	0,4	0,45	0,95	0,77	0,61
T , мм	0,05	0,06	0,07	0,04	0,045	0,055	0,065	0,075	0,08	0,085
Материал проводника	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Al</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag</i>	<i>Al</i>	<i>Ni</i>
Тип диода	<i>HMPP-3890</i>	<i>HMPP-4820</i>	<i>1N5767</i>	<i>M44P165</i>	<i>MADP-011028-14150T</i>	<i>1N5767</i>	<i>M44P165</i>	<i>MADP-011028-14150T</i>	<i>HMPP-3890</i>	<i>HMPP-4820</i>

3.2 Рассчитать длину петли фазовращателя l_1 и волновое сопротивление ρ_1 , используя формулы (1.1)-(1.4) и (1.7).

3.3 С помощью утилиты *TXLine*, входящую в состав системы проектирования *Microwave Office*, вычислить длину L и ширину W петли. Интерфейс утилиты показан на рисунке 1.3. Вызов утилиты осуществляется из меню программы *Microwave Office: Tools>TXLine...*

Необходимо ввести следующие данные:

- тип диэлектрика, согласно заданию. Если такого диэлектрика нет в программе, то нужно вручную ввести значения для диэлектрической проницаемости (*Dielectric Constant*) и тангенс угла диэлектрических потерь

(*Loss Tangent*);

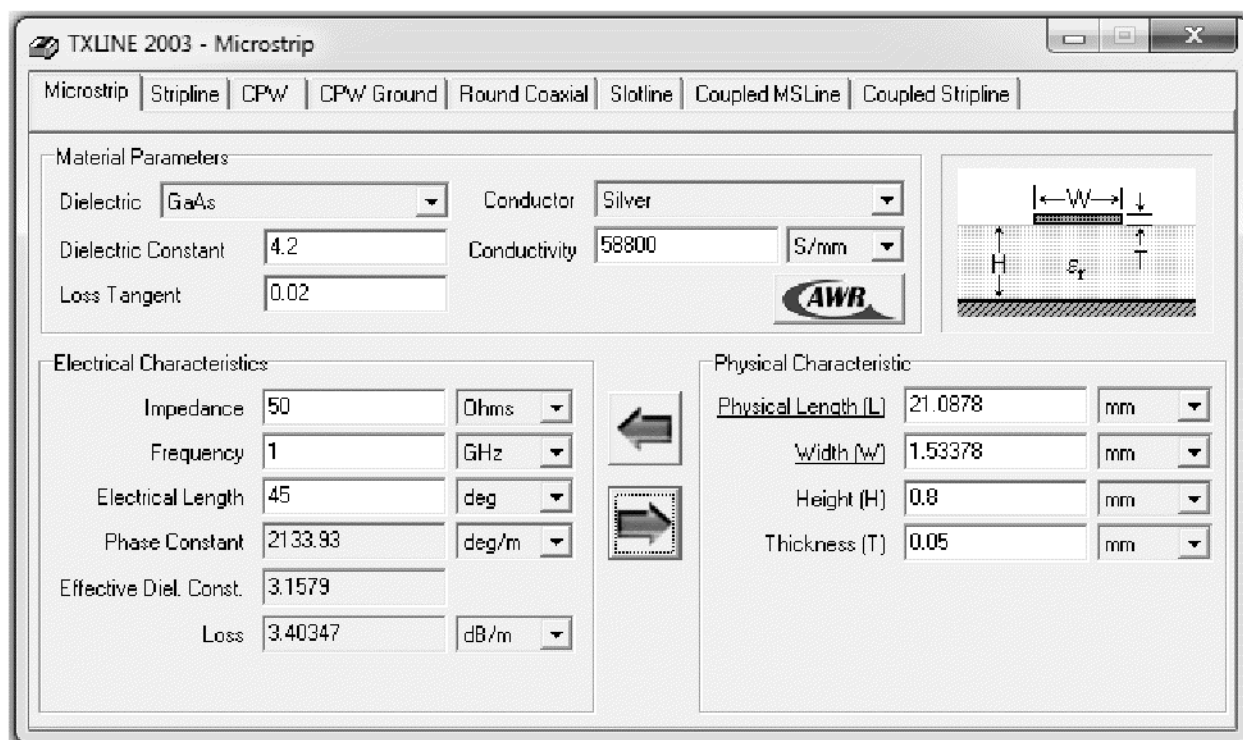


Рисунок 1.3 – Интерфейс утилиты *TXLine*

- тип проводника, согласно заданию;
- рассчитанное значение волнового сопротивления ρ_1 , Ом (*Impedance*);
- частоту, согласно заданию, ГГц (*Frequency*);
- электрическую длину петли φ_1 , согласно заданию, град. (*Electrical Lenght*);
- толщину подложки, согласно заданию, мм (*Height*);
- толщину проводника, согласно заданию, мм (*Thickness*).

После ввода данных необходимо нажать кнопку . Программа выполнит расчет физической длины (*Physical Length*) и ширины (*Width*) несимметричной МПЛ для петли фазовращателя.

Сравнить данные, полученные аналитическим путем и с помощью утилиты. Сделать выводы. При моделировании необходимо использовать расчетные данные утилиты.

3.4 Рассчитать электрическую длину короткозамкнутого шлейфа φ_2 , его длину l_2 и волновое сопротивление ρ_2 , используя формулы (1.5), (1.6) и (1.8) соответственно.

3.5 С помощью утилиты *TXLine*, входящую в состав системы проектирования *Microwave Office*, вычислить длину L и ширину W короткозамкнутого шлейфа.



После ввода данных необходимо нажать кнопку . Программа выполнит расчет физической длины (*Physical Length*) и ширины (*Width*) несимметричной МПЛ для короткозамкнутого шлейфа фазовращателя.

Сравнить данные, полученные аналитическим путем и с помощью утилиты. Сделать выводы. При моделировании необходимо использовать расчетные данные утилиты.

Предварительные расчеты на этом заканчиваются. Остальная работа проводится в системе проектирования *Microwave Office*.

3.6 Для создания нового проекта необходимо выполнить команды: *File>New Project*. Для сохранения проекта: *File>Save Project As*. В диалоговом окне необходимо указать имя проекта и путь сохранения. В качестве имени рекомендуется использовать «*PS_n*» (где *PS* – от английского *phase shifter* – фазовращатель, *n* – номер варианта).

3.7 Для установки единиц измерения проекта необходимо:

- выполнить команды: *Options>Project Options*;
- в диалоговом окне *Project Options* выбрать вкладку *Global Units*;
- выбрать необходимые единицы измерения (ГГц, мм, град., Ом, пФ, нГ и т. д.).

3.8 Далее создается файл схемы фазовращателя, для чего необходимо:

- выполнить команды: *Project>Add Schematic*. Откроется диалоговое окно создания схемы;
- в нем указать имя разрабатываемой схемы, – *PS_ON_n* (что означает –

фазовращатель, включенный (т. е. диоды находятся в состоянии обратного смещения), номер варианта) и нажать *OK*. Будет создано пустое поле в группе *Circuit Schematic* в окне просмотра проекта.

Необходимо учесть, что модель фазовращателя будет состоять из двух схем:

- схема *PS_ON_n* – фазовращатель включен;
- схема *PS_OFF_n* – фазовращатель выключен.

Сначала рассмотрим алгоритм создания первой схемы.

3.9 Для создания самой схемы *PS_ON_n* необходимо:

- нажать на панель *Elements* в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра элементов;

- щёлкнуть по значку «+» слева от группы *Circuit Elements*, чтобы развернуть группу элементов цепи;

- в категории *Circuit Elements* открыть группу *Linear Devices*. В нижней части окна появятся изображения доступных элементов;

- выбрать модель диода *PIN2* и перетащить ее в окно схемы. Установка элемента в нужное место осуществляется левой кнопкой мыши;

- в категории *Circuit Elements* развернуть группу сосредоточенных элементов (*Lumped Element*), затем подгруппу *Capacitor* в окне просмотра элементов. В нижней части окна появятся изображения доступных емкостей;

- выбрать модель емкости *CAP* и перетащить ее в окно схемы. Установка элемента в нужное место осуществляется левой кнопкой мыши;

- в категории *Circuit Elements* развернуть группу микрополосковых линий (*Microstrip*), затем подгруппу *Lines* в окне просмотра элементов. В нижней части окна появятся изображения доступных МПЛ;

- выбрать модель МПЛ *MLIN* и перетащить ее в окно схемы. Установка элемента в нужное место осуществляется левой кнопкой мыши;

- используя операции перетаскивания или копирования, собрать схему, как показано на рисунке 1.4. Поворот элемента осуществляется нажатием

правой кнопки мыши (каждое нажатие – поворот на 90 градусов). Соединение элементов осуществляется автоматически при совмещении их выводов. Другой способ соединения заключается в следующем:

- поместить курсор возле нужной клеммы элемента. Курсор будет отображаться в виде соленоида;
- щелкнуть левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать начало провода, перетащить курсор к другой клемме следующего элемента и снова щелкнуть левой кнопкой мышки.

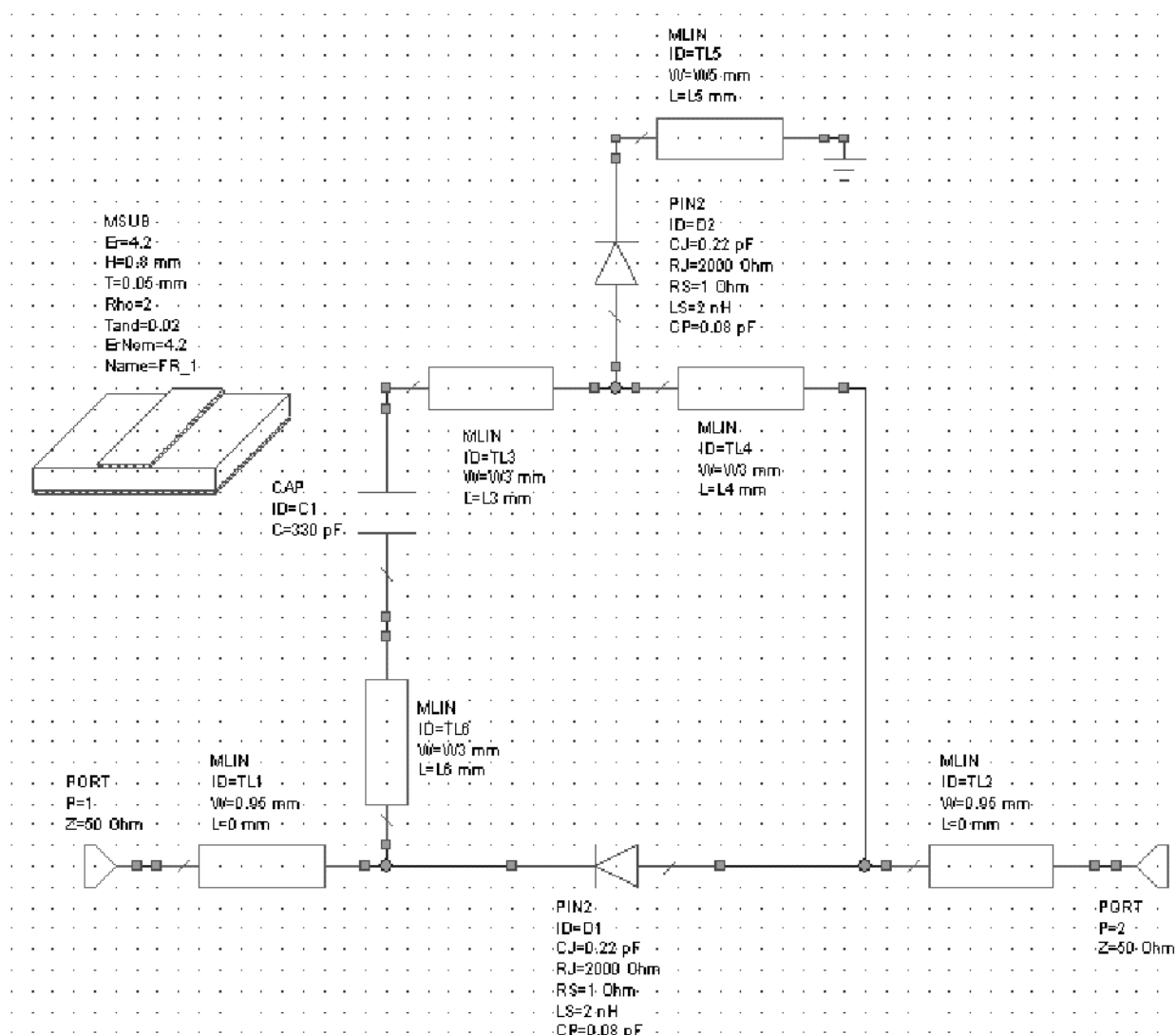


Рисунок 1.4 – Схема петлевого фазовращателя

3.10 Чтобы разместить порты необходимо:

- выполнить команды: *Draw>Add Port*;
- переместить курсор с портом в окно схемы и поместить порт на левую клемму МПЛ *MLIN ID = TL1*;
- повторить шаги для размещения второго порта на правом выводе МПЛ *MLIN ID = TL2*. Результат показан на рисунке 1.4.

3.11 Чтобы разместить общий провод (землю) необходимо:

- выбрать в меню *Draw>Add Ground*;
- переместить курсор в окно схемы, поместите землю на правой клемме МПЛ *MLIN ID = TL5* и зафиксировать, щёлкнув левой мыши. Результат показан на рисунке 1.4.

3.12 Для возможности задания и редактирования параметров МПЛ необходимо:

- в категории *Circuit Elements* открыть группу *Substrates*. В нижней части окна появятся изображения доступных элементов;
- выбрать модель *MSUB* и перетащить ее в окно схемы. Установка элемента в нужное место осуществляется левой кнопкой мыши;
- поместить курсор на элемент *MSUB* в окне схемы и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши. Откроется диалоговое окно *Element Options*;
- на вкладке *Parameters* этого окна в текстовые поля, расположенные в столбце *Value* напротив значений параметров ввести значения, соответствующие заданию и нажать *OK*. Изменение будет отражено на схеме.

3.13 Для редактирования параметров элементов необходимо:

- поместить курсор на элемент *CAP ID = C1* в окне схемы и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши. Откроется диалоговое окно *Element Options*;
- на вкладке *Parameters* этого окна в текстовое поле, расположенное в столбце *Value* напротив значения емкости (*C*), ввести значение емкости,

например, 330 и нажать *OK*. Изменение будет отражено на схеме;

- по аналогии с указанными шагами необходимо отредактировать значения всех элементов (диодов и МПЛ), согласно варианту задания и рассчитанным ранее значениям.

Для диода в данной схеме (*PS_ON_n*) необходимо ввести значение сопротивления перехода *RJ*, соответствующее обратному смещению $r_{обр}$, т. к. петля включена при условии обратно смещенного диода.

При вводе значений отрезков проводника в МПЛ необходимо руководствоваться следующим:

$$W_1 = W_2 = 0,95 \text{ мм};$$

$$L_1 = L_2 = 0 \text{ мм};$$

$$W_3 = W_4 = W_6;$$

$$L_3 = L_4.$$

Вход и выход фазовращателя нагружены на сопротивление 50 Ом. Длины отрезков МПЛ $L_3, \dots, L_6$ могут изменяться в процессе настройки. Ширина линий $W_3, \dots, W_6$ также может изменяться.

На первом этапе рекомендуется принять $L_6 = 0$ мм. Это значение может быть изменено в процессе настройки фазовращателя.

Выполнять моделирование данной задачи намного удобнее, если задать геометрические размеры проводников, используя глобальные переменные. Для этого необходимо:

- нажать на панель *Project* в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра проекта;
- щёлкнуть по значку «+» слева от группы *Project*, чтобы развернуть группу;
- щелкнуть папку *Global definition*;
- выбрать команду *Draw>Add Equations* в главном меню или нажать

кнопку  на панели инструментов. После нажатия на эту кнопку указатель мыши приобретет вид курсора с прямоугольником, являющимся полем для введения выражения;

- для установки поля уравнений в окне *Global Definition* щелкнуть левой кнопкой мыши, ввести уравнение и нажать *Enter*. Если уравнение сохранило черный цвет, значит, оно введено правильно, если цвет зеленый – то уравнение содержит ошибку. Пример ввода глобальных определений представлен на рисунке 1.5.

```
L3=10.04
L4=10.04
L5=9.779
L6=0
W3=4.132
W5=3.392
```

Рисунок 1.5 – Пример ввода глобальных определений

Глобальные уравнения позволяют изменять значения элементов во всех схемах проекта одновременно при их настройке. Следует учесть, что при наборе схемы определенным параметрам элементов (а именно, МПЛ) нужно присваивать не числовое значение, а переменную, которая описывается через глобальные определения, как показано на рисунках 1.4 и 1.6.

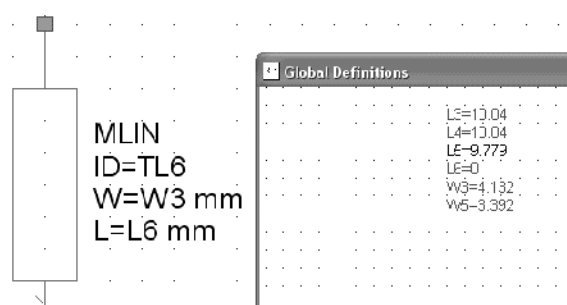


Рисунок 1.6 – Задание длины и ширины элемента *MLIN ID=TL6* с использованием глобальных переменных *L6* и *W3*

На этом этап создания схемы включенного фазовращателя *PS_ON_n* заканчивается.

3.14 Для создания самой схемы PS_OFF_n необходимо:

- нажать на панель *Project* в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра проекта;
- щёлкнуть по значку «+» слева от группы *Project*, чтобы развернуть группу;
- щёлкнуть по значку «+» слева от группы *Circuit Schematics*, чтобы развернуть группу;
- нажать левой кнопкой мыши на папку схемы PS_ON_n и, удерживая кнопку, перетащить папку схемы на папку *Circuit Schematics*. Отпустить кнопку. В данную папку будет скопирована схема с названием $PS_ON_n_1$. Необходимо переименовать схему в PS_OFF_n ;
- изменить в параметрах обоих диодов значение сопротивления перехода RJ , на значение, соответствующее прямому смещению r_{np} , т. к. петля выключена при условии диода, смещенного в прямом направлении.

Остальные параметры схемы остаются такими же, как в PS_ON_n .

На этом этап создания схемы выключенного фазовращателя PS_OFF_n , а также создание полной модели петлевого фазовращателя заканчиваются.

3.15 Далее необходимо задать частоты для моделирования:

- щёлкнуть левой кнопки мыши по панели *Projects* в нижней части левого окна – откроется окно проекта;
- дважды щёлкнуть по группе *Project Options* – откроется диалоговое окно *Project Options*;
- в этом окне открыть вкладку *Frequencies*;
- в области *Data Entry Units* установить *GHz* (должно быть установлено по умолчанию, так ранее были заданы глобальные определения для проекта);
- отметить *Replace*. Задать начальную частоту f_{min} в поле *Start*, конечную частоту f_{max} в поле *Stop* и шаг в поле *Step* ($0,01 \cdot f$, где f –

рабочая частота линии). Для подтверждения изменений нажать *Apply*. В области *Current Range* будет отображен частотный диапазон с заданным шагом по частоте. Нажать ОК.

Расчет значений f_{min} и f_{max} произвести, используя соотношение $0,1 \cdot f$.

3.16 Для построения графика коэффициента передачи S_{21} фазовращателя необходимо:

- щелкнуть правой кнопкой мышки по группе *Graphs* в окне просмотра проекта и выбрать *New Graph* во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно *New Graph*;

- ввести название, например, «Коэффициент передачи» в поле ввода имени графика. Отметить *Rectangular* в переключателе типа графика и нажать ОК. Окно графика создаётся на рабочем поле, и имя графика появляется как подгруппа в группе *Graphs* в окне просмотра проекта;

- щелкнуть правой кнопкой мышки по имени графика «Коэффициент передачи» в окне просмотра проекта и выбрать *Add Measurement* во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно *Add Measurement*;

- выбрать *Linear* и затем *Port Parameters* в области *Measurement Type*, *S* – в области *Measurement*, имя схемы (можно для каждой схемы создать свой график, а можно выбрать параметр *All Sources*) – в поле *Data Source Name*, «2» – в поле *To Port Index* и «1» – в поле *From Port Index*. Указать *Mag* (Модуль) и *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;

- нажать «ОК». Измеряемые величины $PS_ON_n.DB(|S[2,1]|)$ и $PS_OFF_n.DB(|S[2,1]|)$ появятся как подгруппы в группе «Коэффициент передачи» в окне просмотра проекта.

На этом этап добавления графиков коэффициента передачи S_{21} заканчивается.

3.17 Для построения графика коэффициента стоячей волны V_{SWR} фазовращателя необходимо выполнить действия, аналогичные п. 3.16, учитывая, что:

- необходимо создать новый график с названием, например, «КСВН», в прямоугольной системе координат;

- требуемый параметр выбрать в *Linear* в области *Measurement Type*, *VSWR* – в области *Measurement*, имя схемы (выбрать параметр *All Sources*) – в поле *Data Source Name*, «1» – в поле *Port Index*. Убрать *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;

- повторить тоже, указав параметр «2» – в поле *Port Index*;

- нажать «ОК». Измеряемые величины появятся как подгруппы в группе «КСВН» в окне просмотра проекта.

На этом этап добавления графиков коэффициента передачи *VSWR* заканчивается.

3.18 Для построения графика фазы фазовращателя необходимо:

- задать уравнение, описывающее значение фазы от частоты, т. к. такой характеристики в пакете *Microwave Office* не существует;

- задать параметры вывода графика фазы.

График фазы фазовращателя представляет собой разность фаз коэффициента передачи *S21* для схем *ON* и *OFF*.

Для задания выходных уравнений необходимо:

- дважды щелкнуть на папке *Output Equation* в дереве проекта, далее кликнуть кнопку  на панели инструментов. Откроется окно *Add Measurement Equation* (рисунок 1.7);

- ввести имя формируемой функции в поле *Variable name*. В данном примере введено имя выходной функции для схемы *ON*;

- выбрать тип функции: *Linear* и затем *Port Parameters* в области *Measurement Type*, *S* – в области *Measurement*, имя схемы (в данном примере *ON_1*) – в поле *Data Source Name*, «2» – в поле *To Port Index* и «1» – в поле *From Port Index*. Указать *Angle* (Угол) и убрать *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*. Данным уравнением будет сформирован график зависимости фазы петлевого фазовращателя от частоты для схемы *ON_1*. При задании

имени необходимо выбрать имя схемы включенного фазовращателя, соответствующее варианту задания, и указанное ранее при ее синтезе;

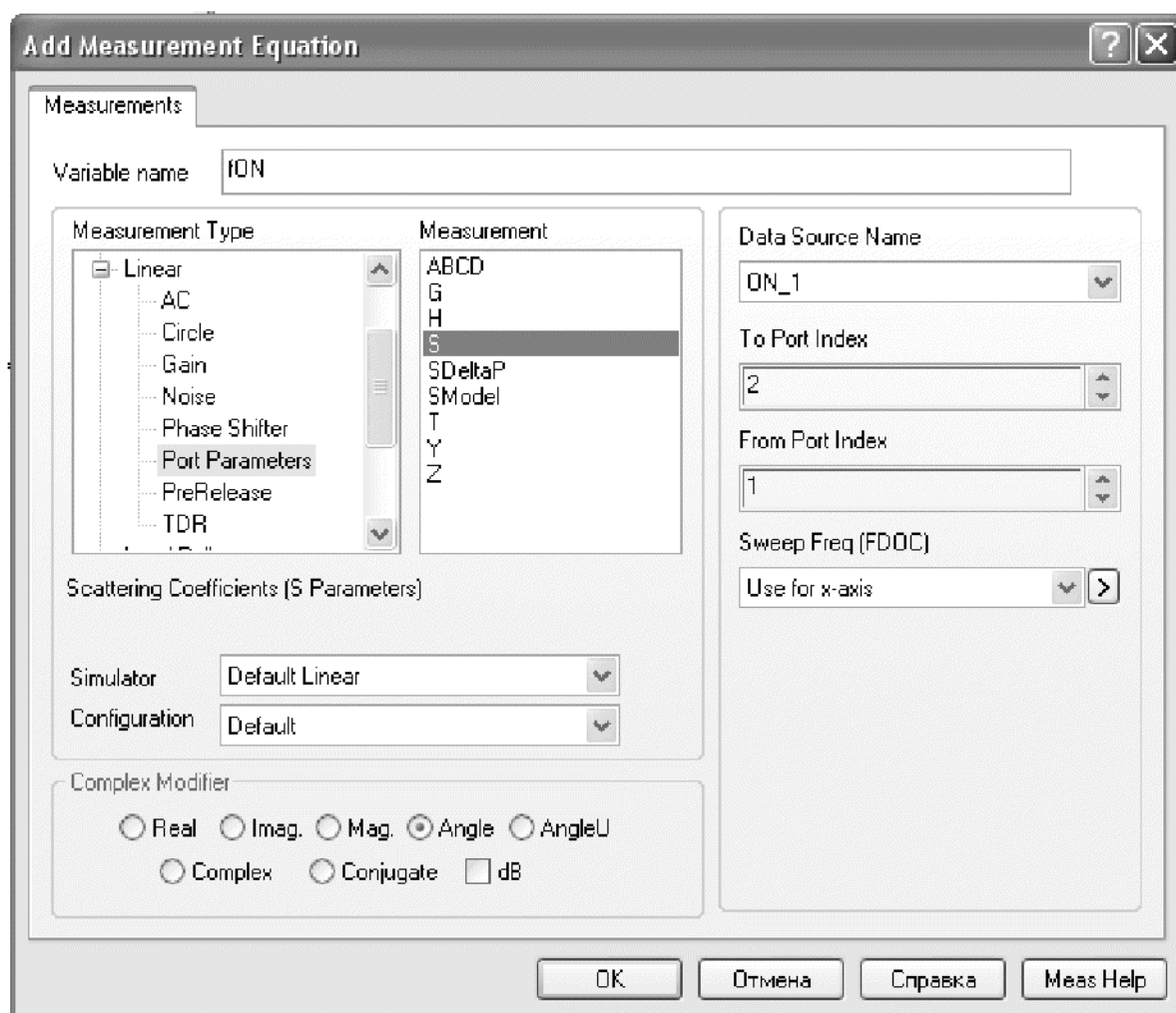


Рисунок 1.7 – Окно формирования выходного уравнения

- аналогично сформировать график зависимости фазы выключенного петлевого фазовращателя от частоты для схемы *OFF*;

- поскольку в программе аргументы коэффициента передачи рассчитываются в радианах, то необходимо ввести уравнения для перевода фазы из радиан в градусы. Ввод уравнений осуществляется после нажатия кнопки , как было описано ранее;

- для расчета фазы необходимо сформировать соответствующее уравнение, представляющее собой разность фаз для схем *ON* и *OFF*. Ввод

уравнения осуществляется после нажатия кнопки , как было описано ранее.

Пример задания выходных уравнений приведен на рисунке 1.8.

```
fON = ON_1:Ang(S(2,1))  
fOFF = OFF_1:Ang(S(2,1))  
a=fON*180/_PI  
b=fOFF*180/_PI  
c=a+b
```

Рисунок 1.8 – Пример задания выходных уравнений

Для задания параметров вывода графика фазы необходимо выполнить действия, аналогичные п. 3.16, учитывая, что:

- необходимо создать новый график с названием, например, «Фаза фазовращателя», в прямоугольной системе координат;
- требуемый параметр выбрать в *Output Equation* в области *Measurement Type*, *Eqn* – в области *Measurement*, имя переменной (выбрать имя *c*) – в поле *Equation Name*. Убрать *dB* в области *Complex Modifier*, выбрать вывод действительного значения фазы кнопкой *Real* и нажать *Apply*;
- повторить действия предыдущего абзаца для вывода графиков переменной *a* и переменной *b* в одну координатную плоскость с переменной *c*.

На этом этап добавления графиков фазы заканчивается.

3.19 Чтобы выполнить анализ схемы (моделирование) необходимо:

- выполнить команды: *Simulate>Analyze*. Результаты расчетов коэффициента передачи, коэффициента стоячей волны и фазы фазовращателя будут показаны на графиках в соответствующих окнах.

На этом этап моделирования заканчивается.

3.20 Провести анализ графиков на соответствие условиям задачи:

- φ_1 – не более плюс-минус 10° для исходного значения 45° и не более плюс-минус 5° для исходного значения 90° ;
- коэффициенты стоячей волны *VSWR1* и *VSWR2* – не более 1,5;

- коэффициент передачи S_{21} – не менее минус 0,8 дБ.

Если решение удовлетворяет условиям, то задачу можно считать решенной, а фазовращатель синтезированным. В противном случае, требуется настройка схемы фазовращателя.

3.21 Для настройки схемы в ручном режиме необходимо:

- указать параметры элементов, которые необходимо изменять при настройке. Для этого выполнить команды: *Simulate>Tune Tool*;
- поместить курсор на параметр, например, длины $L3$ полоскового проводника в окне *Global Definitions*. Курсор должен отображаться в виде перекрестия;
- щелкнуть левой кнопкой мышки по выбранному параметру. Цвет параметра изменится с черного на синий, означая, что элемент доступен для настройки;
- повторить указанные шаги для остальных параметров проводников МПЛ;
- перейти в окно графика и выполнить команды: *Simulate>Tune*. Откроется окно *Variable Tuner*;
- перемещением регулировочных ползунков необходимо попытаться изменить графики характеристик так, чтобы они соответствовали задаче синтеза.

На этом этап настройки схемы заканчивается. Если решение удовлетворяет условиям, то задачу можно считать решенной, а фазоинвертор синтезированным. В противном случае, требуется оптимизация схемы фазоинвертора с помощью программы *Microwave Office*.

3.22 Для автоматизированной настройки фазовращателя необходимо:

- назначить переменные для оптимизации;
- добавить цели оптимизации;
- запустить процесс оптимизации.

Для назначения переменных для оптимизации необходимо:

- выполнить команды: *View>Variable Browser* – откроется вкладка *Variables*;

- в столбце *Optimize* «птичкой» отметить переменные, которые оптимизатор будет изменять в процессе настройки. Это параметры проводников МПЛ: $L_3, \dots, L_6$ и $W_3, \dots, W_6$ (проводники с индексами «3», «4» и «6» – одна и та же микрополоска, поэтому на схеме и в глобальных переменных обозначены одним параметром $W3$. Изменяться будет ширина для проводников всех индексов одновременно).

Для добавления целей оптимизации необходимо:

- открыть вкладку *Project* в левом окне проекта и окно графика;

- ввести цель для фазы в полосе пропускания. Для этого щёлкнуть правой кнопкой мышки по *Optimization Goals* и выбрать *Add Optimizer Goal* во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно *New Optimization Goal*;

- выделить $c:Re(Eqn())$ в окне списка измеряемых величин *Measurement*. Отметить *Meas=Goal* в области *Goal Type*, убрать «галочку» в квадратике *Max* в области *Range*, ввести значение частоты f_{max} , убрать «галочку» в квадратике *Min* в области *Range*, ввести значение частоты f_{min} , ввести значение цели (например значение фазы 45) в поле *Goal* и нажать *OK*. Можно добавить погрешность, согласно заданию, что осуществляется в поле *Cost*. Формула для расчета приведена непосредственно в данном окне;

- аналогично добавить цели оптимизации для коэффициентов стоячей волны и передачи. Для каждой цели необходимо создавать свою группу.

Результаты выполнения отразятся на соответствующих графиках. Направления штриховки у цели на графике указывает на недопустимые значения измеряемой величины. На этом этап создания переменных для оптимизации заканчивается.

Для запуска процесса оптимизации необходимо:

- выполнить команды: *Simulate>Optimize* – откроется диалоговое окно

Optimizer,

- выбрать необходимый метод оптимизации (например, *Random (Local)*) в области *Optimization Methods*, установить максимальное количество итераций (например, 5000) в поле *Maximum Iteration*, нажать *Start*, чтобы начать оптимизацию.

Когда оптимизация закончится, закрыть диалоговое окно *Optimize*. Результаты оптимизации будут отображены как на графиках, так и на схеме фазовращателя.

На этом этап оптимизации заканчивается. Если решение удовлетворяет условиям, то задачу можно считать решенной, а фазоинвертор синтезированным. В противном случае, необходимо сообщить преподавателю о полученных результатах.

3.23 Для построения графика шумовой характеристики настроенного фазовращателя необходимо выполнить действия, аналогичные п. 3.16, учитывая, что:

- необходимо создать новый график с названием, например, «Шумовая характеристика», в прямоугольной системе координат;

- требуемый параметр выбрать в группе *Linear* параметр *Noise* в области *Measurement Type*, *NF* – в области *Measurement*, имя схемы (выбрать параметр *All Sources*) – в поле *Data Source Name*. Убрать *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;

- нажать «ОК». Измеряемые величины появятся как подгруппы в группе «Шумовая характеристика» в окне просмотра проекта.

На этом этап добавления графиков для шумовой характеристики заканчивается.

3.24 Для построения графика коэффициента усиления настроенного фазовращателя необходимо выполнить действия, аналогичные п. 3.16, учитывая, что:

- необходимо создать новый график с названием, например,

«Усиление», в прямоугольной системе координат;

- требуемый параметр выбрать в группе *Linear* параметр *Gain* в области *Measurement Type*, *GA* – в области *Measurement*, имя схемы (выбрать параметр *All Sources*) – в поле *Data Source Name*. Установить *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;

- нажать «ОК». Измеряемые величины появятся как подгруппы в группе «Усиление» в окне просмотра проекта.

На этом этап добавления графиков для коэффициента усиления заканчивается.

3.25 Чтобы провести анализ схемы (моделирование) необходимо выполнить команды: *Simulate>Analyze*. Результаты расчетов коэффициента передачи, коэффициента стоячей волны, фазы, а также шумовой характеристики и коэффициента усиления настроенного фазовращателя будут показаны на графиках в соответствующих окнах.

На этом все этапы проектирования петлевого фазовращателя завершены. Результаты необходимо сохранить в файл, выполнив команды: *File>Save Project*.

3.26 Далее проводится работа по исследованию влияния параметров проводников МПЛ на параметры и характеристики фазовращателя. Для выполнения операций необходимо загрузить предыдущий проект и сохранить его под новым именем. Исследования включают два этапа:

- исследование влияния длины короткозамкнутого шлейфа *L5*;
- исследование влияния длины отрезка *L4* петли.

Для исследования влияния длины короткозамкнутого шлейфа *L5* на параметры и характеристики фазовращателя необходимо:

- изменить длину шлейфа в проекте, например, в сторону увеличения;
- выполнить анализ схемы (моделирование) и получить графики коэффициента передачи, коэффициента стоячей волны и фазы фазовращателя;

- выполнить описанные выше действия ещё для четырех значений длины $L5$ (как в сторону увеличения, так и уменьшения значения), фиксируя каждый раз вид указанных графиков;

- результаты исследований оформить в виде графиков зависимостей s , $VSWR1$, $VSWR2$ и $S21$ от длины короткозамкнутого шлейфа $L5$ для пяти точек на рабочей частоте линии f .

Для исследования влияния длины отрезка $L4$ петли на параметры и характеристики фазовращателя необходимо выполнить те же действия, что и для короткозамкнутого шлейфа $L5$.

4 Указания по технике безопасности

Перед проведением практического занятия следует изучить инструкцию по технике безопасности при работе на компьютере. Также следует соблюдать правила и требования, установленные для данного компьютерного класса.

5 Содержание отчета, форма и правила оформления отчета о выполненной работе

Отчет по практической работе выполняется на листах формат А4 согласно требований ГОСТ и ЕСКД и должен содержать следующие пункты:

а) титульный лист с названием работы, дисциплины, кода группы, ФИО исполнителя и преподавателя;

б) краткое теоретическое введение;

в) условия, ход выполнения и решения задачи пункта 3;

г) текст программы, разработанной для расчетов в системе компьютерной алгебры *MathCAD*;

д) результаты промежуточного моделирования и оптимизаций, а также

конечные результаты расчета и синтеза петлевого фазовращателя (схема, номиналы компонентов, графики и т. д.);

е) результаты исследования влияния параметров проводников МПЛ на параметры и характеристики фазовращателя (графики и выводы);

ж) выводы по результатам работы.

6 Контрольные вопросы и защита работы

6.1. Почему $p-i-n$ -диод называется управляющим резистивным?

6.2. Изобразите эквивалентную схему $p-i-n$ -диода и объясните назначение элементов.

6.3. Изобразите схему петлевого фазовращателя и поясните принцип его работы.

6.4. Какие характеристики фазовращателя существуют? Каков их физический смысл?

6.5. Почему модель фазовращателя в программе *Microwave Office* формируется в виде двух схем?

6.6. Какие еще схемы фазовращателей известны? Каковы их отличия и области применения?

6.7. Как задаются глобальные уравнения и выходные уравнения? Чем отличаются глобальные уравнения от выходных?

6.8. Как сформировать график разности фаз для схем включенного и выключенного состояний фазовращателя?

6.9. Как влияет изменение геометрических размеров проводников МПЛ на параметры и характеристики фазовращателя? Привести примеры.

6.10. Какой диапазон регулировки угла рассчитанного в ходе работы фазовращателя?

7 Литература: [].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Расчет и моделирование делителя (сумматора) мощности

1 Введение

Тракт любой системы СВЧ состоит из большого числа различных устройств СВЧ. К их числу относятся отрезки линий передачи, разъемы, изгибы и скрутки, согласующие устройства, фазовращатели, фильтры СВЧ, делители мощности СВЧ, невзаимные устройства СВЧ с использованием ферритов, коммутирующие устройства и т. п. Общим для этих и им подобных устройств является то, что они принадлежат к классу устройств с распределенными параметрами. Геометрические размеры этих устройств сравнимы с длиной волны электромагнитных колебаний. Это определяет всю специфику расчета и проектирования устройств СВЧ, так как процессы, происходящие в них, имеют волновой характер.

В данной практической работе будут рассматриваться пассивные линейные устройства СВЧ. Устройство СВЧ называется пассивным, если в его состав не входят активные преобразующие или усиливающие элементы, например, транзисторы, электронные устройства СВЧ и т. п. Линейность устройств СВЧ означает независимость его характеристик от величины подводимой к нему мощности. Внешние характеристики пассивных линейных устройств СВЧ связаны между собой системами линейных алгебраических уравнений. Поэтому в теории устройств СВЧ широко используется аппарат теории матриц.

Теория устройств СВЧ тесно связана с электродинамикой и включает в себя два больших раздела: анализ устройств СВЧ и синтез устройств СВЧ. Задача анализа состоит в изучении волновых характеристик устройств СВЧ, а также в определении этих внешних характеристик из решения

соответствующей внутренней задачи методами прикладной электродинамики или из эксперимента. Задача синтеза устройств СВЧ состоит в определении структуры и геометрических размеров устройства СВЧ по заданным его характеристикам.

В данной работе будут решаться обе указанные задачи.

2 Теоретическая часть

Делители мощности предназначены для распределения мощности СВЧ сигнала, поступающей от одного источника между N нагрузками. Сумматоры выполняют обратную задачу сложения мощностей сигналов, поступающих от N источников на одной общей нагрузке.

В связи с тем, что в технике СВЧ чаще всего используются двухканальные делители с равным делением и многоканальные делители на их основе, в данной работе будет рассмотрен двухканальный делитель. Он представляет собой шестиполосник, т.е. электрическое устройство, обладающее шестью полюсами. Волновые процессы в шестиполоснике определяются его волновой матрицей рассеяния. Для исследования двухканальных делителей можно использовать хорошо зарекомендовавший себя для шестиполосников метод четных и нечетных колебаний или метод симметрии.

Простейший двухканальный одноступенчатый делитель (рисунок 2.1, а) состоит из двух фазосдвигающих четырехполосников и одного развязывающего резистора R . Каждый фазосдвигающий четырехполосник на центральной частоте рабочего диапазона устройства должен вносить фазовый сдвиг Ψ_0 , равный плюс или минус 90° и иметь волновое сопротивление Z_1 , которое в рабочем диапазоне частот делителя должно изменяться незначительно.

Если резистор R имеет такие габариты, что нельзя пренебречь

вносимым им фазовым сдвигом Ψ_R , то электрическую длину фазосдвигающих четырехполосников необходимо откорректировать так, чтобы на частоте ω_0 выполнялось равенство:

$$\Psi = 90^\circ + \frac{\Psi_R}{2}. \quad (2.1)$$

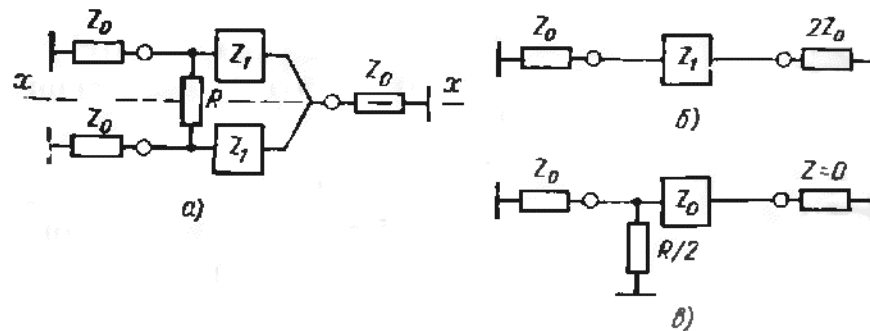


Рисунок 2.1 – Делитель (а) и его представление при четном (б) и нечетном возбуждении (в)

В качестве фазосдвигающего четырехполосника можно использовать четвертьволновый отрезок линии передачи, укороченный отрезок линии передачи, либо фильтры верхних и нижних частот на элементах с сосредоточенными параметрами (ЭСП). Применение фильтров на ЭСП при использовании гибридно-пленочной технологии является наиболее предпочтительным, т.к., с одной стороны, позволяет расширить спектр воспроизводимых волновых сопротивлений фазосдвигающих четырехполосников, а с другой – существенно снизить габариты делителей мощности. В данной работе будет выполнен расчет и моделирование делителя как на микрополосковых линиях, так и на сосредоточенных элементах.

Делитель, изображенный на рисунке 2.1, а симметричен относительно оси xx , поэтому его можно разделить на два несвязанных четырехполосника и исследовать их по отдельности. Для этого делитель при четном возбуждении «разрезается» по линии xx плоскостью из идеального

диэлектрика, в результате чего получается четырехполосник, изображенный на рисунке 2.1, б. При нечетном возбуждении делитель разрезается по линии xx плоскостью из идеального проводника, в результате чего получается четырехполосник, изображенный на рисунке 2.1, в. Элементы S -матрицы делителя будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} S_{11} = S_{22} = (C / D + F / H) / 2; \\ S_{12} = S_{21} = (C / D - F / H) / 2; \\ S_{13} = S_{31} = S_{23} = S_{32} = \sqrt{2} / D; \\ S_{33} = -K / D, \end{cases} \quad (2.2)$$

где соответствующие коэффициенты составляют:

$$\begin{aligned} C &= A_{11}^{++} + A_{12}^{++} - A_{21}^{++} - A_{22}^{++}; \\ F &= A_{11}^{+-} + A_{12}^{+-} - A_{21}^{+-} - A_{22}^{+-}; \\ D &= A_{11}^{++} + A_{12}^{++} + A_{21}^{++} + A_{22}^{++}; \\ H &= A_{11}^{+-} + A_{12}^{+-} + A_{21}^{+-} + A_{22}^{+-}; \\ K &= A_{11}^{++} - A_{12}^{++} + A_{21}^{++} - A_{22}^{++}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где: $A_{11}^{++}, A_{12}^{++}, A_{21}^{++}, A_{22}^{++}$ и $A_{11}^{+-}, A_{12}^{+-}, A_{21}^{+-}, A_{22}^{+-}$ – элементы нормированных матриц передачи четырехполосников, изображенных на рисунке 2.1, б и 2.1, в соответственно.

При известных элементах матрицы рассеяния делителя его рабочие характеристики определяются следующими соотношениями:

- деление мощности по выходным каналам:

$$C_{13} = C_{23} = 10 \lg \left(1 / |S_{13}|^2 \right), \text{ дБ}; \quad (2.4)$$

- развязка между каналами:

$$C_{12} = C_{21} = 10 \lg \left(1 / |S_{12}|^2 \right), \text{ дБ}; \quad (2.5)$$

- коэффициент стоячей волны:

$$KCB_1 = KCB_2 = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}, \quad (2.6)$$

$$КСВ_3 = \frac{1 + |S_{33}|}{1 - |S_{33}|}, \quad (2.7)$$

При использовании приведенных формул необходимо учесть, что на рисунке 2.1, а слева обозначены порты «1» (верхний) и «2» (нижний), а порт 3 – правая часть схемы делителя.

Методика расчета компонентов делителя (сумматора) на МПЛ.

Толщина подложки, при которой на рабочей частоте f возникает поверхностная волна:

$$h_{max} = \frac{75}{f\sqrt{\varepsilon - 1}}. \quad (2.8)$$

Чтобы исключить работу вблизи критической частоты, толщину подложки МПЛ необходимо выбрать меньше h_{max} .

Для уменьшения потерь на излучение и устранения влияния поля излучения линии на работу соседних СВЧ блок устройство на несимметричных ПЛ часто помещают в замкнутый металлический корпус, выполняющий роль экрана, наличие которого может оказывать заметное влияние на условия работы ПЛ. Для уменьшения влияния экрана необходимо выбирать расстояния:

- высота экрана над поверхностью ПЛ:

$$H \geq (6 \div 10)h; \quad (2.9)$$

- расстояние от краев ПЛ до боковых стенок экрана – не менее $3h$.

Толщина проводящей пленки определяется по формуле:

$$t \geq (3 \div 5)\Delta, \quad (2.10)$$

где Δ – глубина проникновения (расстояние от поверхности проводника, на котором амплитуда плотности тока уменьшается в e раз), равная примерно толщине скин-слоя.

Значения глубины проникновения для различных металлов приведены

в таблице 2.1, где даны также значения их удельной проводимости.

Таблица 2.1 – Глубина проникновения и удельная проводимость металлов

Материал проводника	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Al</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Ta</i>
Удельная проводимость, 10^7 , См/м	6,17	5,8	4,1	3,72	1,78	1,76	1,14	0,77	0,64
Глубина проникновения, $10^4 / \sqrt{f}$, мкм	6,41	6,6	7,86	8,24	11,88	12	1,38	18,07	19,78
Примечание – f – рабочая частота, Гц.									

Волновое сопротивление несимметричной полосковой линии (если оно не задано при проектировании) чаще всего выбирают равным 50 Ом для удобства соединения линии с высокочастотными разъемами и отдельными СВЧ блоками. Использование отрезков линий с большим волновым сопротивлением, а значит с очень узкими проводящими полосками нежелательно из-за технологических трудностей при их изготовлении и возрастания затухания в линии. Таким образом, при расчетах, для входных и выходных проводников необходимо использовать МПЛ с указанным значением сопротивления.

Для удобства представим делитель, показанный на рисунке 2.1, а так, как показано на рисунке 2.2, а. Здесь входной порт имеет номер «1», а выходные – «2» и «3». В связи с этим соответственно изменяются индексы в формулах (2.2) – (2.7), что необходимо учитывать в дальнейшем.

Вследствие малых габаритных размеров этот делитель часто применяют в разнообразных устройствах СВЧ.

В качестве Z_0 используем выбранное ранее значение 50 Ом.

Будем предполагать, что волновые сопротивления линий, питающих все порты, одинаковы и равны Z_0 . Очевидно, что отрезки линий передач должны трансформировать сопротивление Z_0 в величину $2 \cdot Z_0$, чтобы суммарное сопротивление на входе первого порта было бы равно Z_0 . Для этого отрезки должны иметь длину $\lambda/4$ и волновое сопротивление Z_1 , удовлетворяющее условию:

$$Z_1 = \sqrt{2} \cdot Z_0. \quad (2.11)$$

Очевидно, что при этом порт «1» будет согласован, а мощности в портах «2» и «3» будут равны половине мощности, входящей в порт «1».

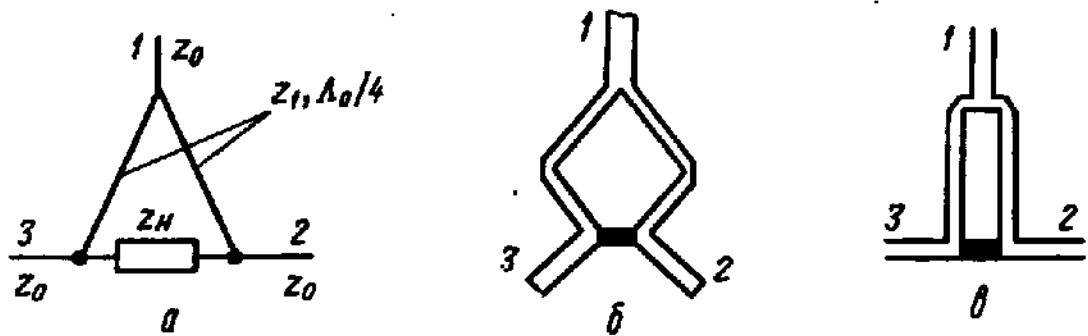


Рисунок 2.2 – Двухканальный синфазный направленный делитель мощности: а – эквивалентная схемы; б и в – топологии

При отклонении частоты от номинальной, (при которой длина отрезков равна $\lambda/4$), коэффициенты матрицы будут изменяться, так как при трансформации Z_0 из портов «2» и «3» в порт «1» на его входе суммарное сопротивление уже не будет равно Z_0 . Для улучшения согласования входного порта «1» при отклонении нагрузок в портах «2» и «3» от величины Z_0 , между портами «2» и «3» включается балластное сопротивление величиной

$$Z_H = R = 2 \cdot Z_0. \quad (2.12)$$

Длина микрополосковой линии для Z_0 выбирается из соображений конструктивных особенностей так, чтобы не увеличивать значительно размеры делителя.

Ширина МПЛ Z_0 , а также длина и ширина МПЛ Z_1 , рассчитываются по достаточно громоздким формулам, которые зависят от нескольких факторов:

- отношение ширины полоски к толщине подложки w/h ;
- отношение толщины полоски к толщине подложки t/h ;
- значение диэлектрической проницаемости подложки и т. д.

В зависимости от указанных соотношений меняются и расчетные формулы, чтобы обеспечить приемлемую точность расчетов. Но в большинстве случаев, эти данные дают погрешность от десятых долей процента до единиц процентов. Поэтому в данной практической работе предлагается выполнить расчет геометрических размеров Z_0 и Z_1 с помощью утилиты *TXLine*, входящей в состав системы проектирования *Microwave Office*. Она учитывает все факторы, указанные выше, и обеспечивает такую же точность вычислений.

Для определения сопротивления балластного резистора Z_H необходимо знать условное сопротивление квадрата пленки $R_{\square}$, рассчитываемое по формуле:

$$R_{\square} = \frac{\rho_{z_H}}{d_{z_H}}, \quad (2.13)$$

где ρ_{z_H} – удельное сопротивление пленки, Ом·м;

d_{z_H} – толщина пленки резистивного слоя, м.

Исходя из значения $R_{\square}$, выбираются размеры резистора, который обычно выполняют в виде прямоугольника. Площадь резистора должна рассеивать подводимую к резистору мощность. Мощность рассеяния материала обычно задается в задании или выбирается из имеющихся в

производстве образцов резистивных материалов. Необходимо выбрать площадь с некоторым запасом относительно параметра мощности рассеяния материала.

Способ выполнения пленочного резистора показан на рисунке 2.3.

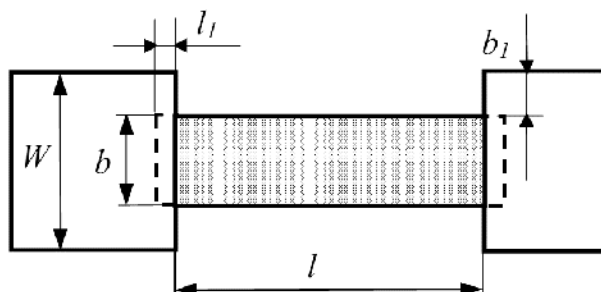


Рисунок 2.3 – Топология пленочного резистора

Электрический контакт с проводниками обеспечивают перекрытием соответствующих участков резистивной и проводящей пленок. При проектировании тонкопленочных резисторов для обеспечения необходимого контакта между резистивным слоем и проводником размеры l_1 и b_1 не должны быть меньше 200 мкм.

На данном этапе известны:

- геометрические размеры Z_0 и Z_1 ;
- геометрические размеры резистора l и b , а также площадки перекрытия l_1 и b_1 .

Это позволяет рассчитать габаритные размеры пластины диэлектрика, на которой будет размещаться проектируемый делитель (сумматор). Примерный вид пластины с размещенным делителем (по типу рисунка 2.2, в) показан на рисунке 2.4. Здесь длина Z_0 , как было сказано выше, выбирается произвольной. Для примера выбрано значение 2 мм. Аналогично рассчитываются габаритные размеры пластины диэлектрика по типу рисунка 2.2, б. Такой тип топологии применяется для получения более компактной структуры устройства.

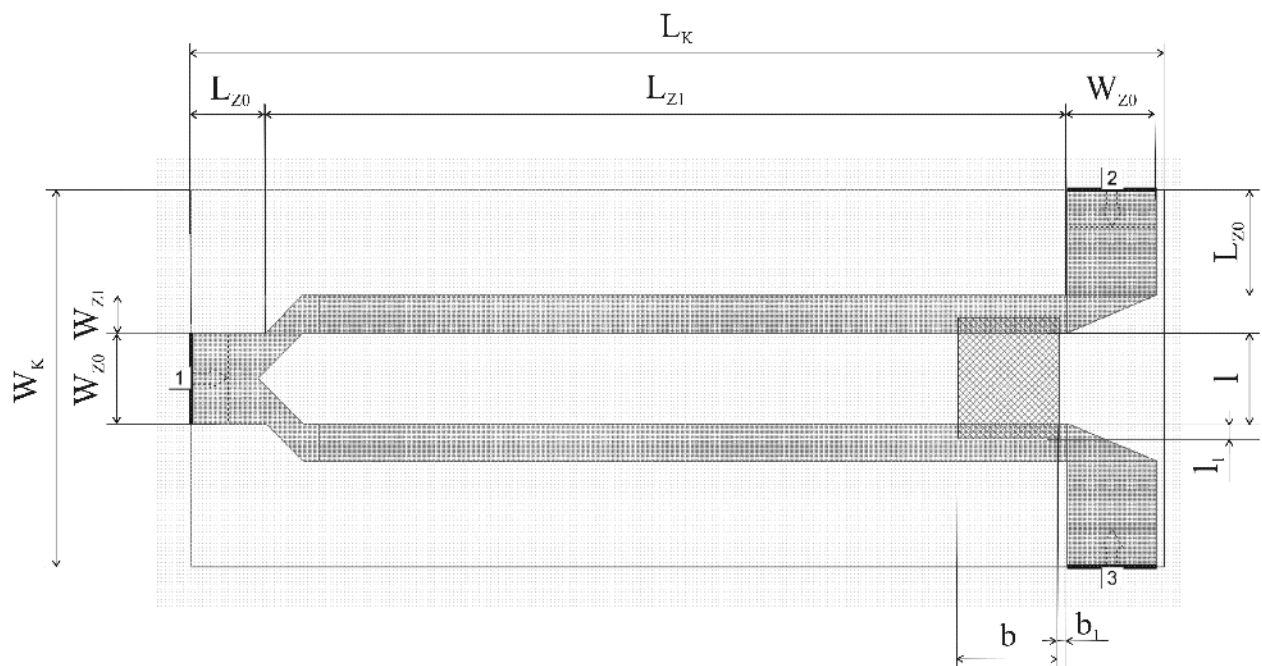


Рисунок 2.4 – Пример размещения на пластине диэлектрика двухканального синфазного направленного делителя мощности

Методика расчета компонентов делителя (сумматора) на сосредоточенных элементах.

Делители на сосредоточенных элементах являются аналогами устройств на четвертьволновых отрезках полосковых линий. Делитель в этом случае состоит из емкостей и индуктивностей, включенных по схеме П- или Т-образного фильтра. Т. к. размеры этих компонентов очень малы, то с их помощью можно реализовывать устройства, рассчитанные на небольшую мощность (порядка единиц Ватт). Эти элементы будут являться сосредоточенными на частотах порядка единицы – пары десятков гигагерц.

Вне зависимости от схемы фильтра компоненты рассчитываются по формулам:

- индуктивность:

$$L = \frac{\rho}{2\pi f_0}, \quad (2.14)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 \rho}, \quad (2.15)$$

где f_0 – центральная частота, Гц;

ρ – волновое сопротивление эквивалентного четвертьволнового отрезка линии передачи, Ом.

В данной задаче ρ соответствует вычисленному ранее Z_1 .

Схема делителя на сосредоточенных элементах приведена на рисунке 2.5. Для дальнейших расчетов выбрана топология фильтра Т-типа, т. к. реализация такого делителя на печатной плате более удобна и компактна, чем П-фильтра.

На рисунке Z_0 – это волновое сопротивление линий, питающих все порты. Его значение выбрано ранее, что необходимо учитывать при установке параметров портов при моделировании. Сопротивление балластного резистора Z_H также было рассчитано ранее.

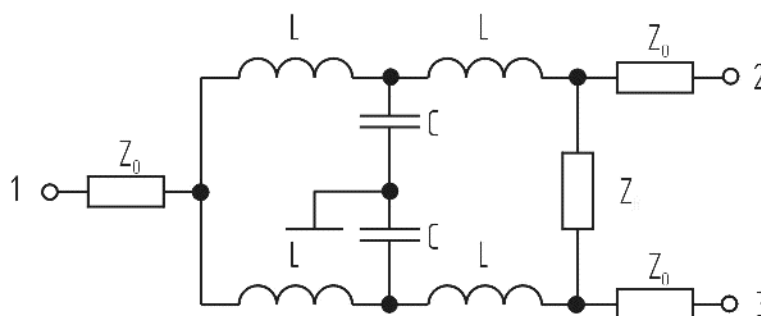


Рисунок 2.5 – Схема делителя на сосредоточенных элементах

Расчеты данного практического задания по приведенным выше формулам можно провести в системе компьютерной алгебры *MathCAD*.

Моделирование необходимо провести в системе проектирования *Microwave Office*.

Преимущества использования указанных программных продуктов рассмотрены в практической работе 1.

3 Задания (задачи)

Для решения поставленной задачи необходимо составить программу в ПО *MathCAD* версии не ниже 13. Необходимо помнить, что в *MathCAD* несколько иное представление об индексах и именах переменных, т. е. привычное для нас имя переменной ε_0 будет воспринято как элемент массива. Поэтому такие имена переменных необходимо в программе набирать так: $\varepsilon 0$. Показан пример только для диэлектрической проницаемости, остальные переменные, с именем в нижнем индексе, необходимо набирать также. Тоже лучше учитывать и для верхних индексов, чтобы исключить ошибки со степенью числа.

Расчеты производятся согласно следующей методике.

3.1 При составлении программы для расчета основных параметров по приведенным ранее формулам необходимо в *MathCAD* ввести исходные данные:

- центральную (рабочую) частоту f , Гц;
- полосу рабочих частот от f_{min} до f_{max} , Гц;
- уровень развязки между выходными каналами N , дБ;
- материал диэлектрика (относительная диэлектрическая проницаемость ε_r ; тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$);
- материал проводника полосковой линии (удельная проводимость δ ; См/м, глубина проникновения Δ , м);
- материал экрана (удельная проводимость δ , См/м);
- заполнитель конструкции (относительная диэлектрическая проницаемость ε_r ; тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$);
- материал резистивной пленки (сопротивление квадрата пленки $R_{\square}$, Ом/кв; толщина пленки d_{zn} , мкм; допустимая удельная мощность рассеивания P_{max} , Вт/см³).

Варианты заданий приведены в таблице 2.1. Номер варианта задает преподаватель.

Таблица 2.1 – Исходные данные для задачи

Данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , ГГц	0,48	0,51	1,29	2,15	1,94	2,67	1,11	2,22	1,9	2,06
f_{min} / f_{max} , ГГц	0,4/ 0,6	0,35/ 0,7	1,15/ 1,4	1,9/ 2,4	1,8/ 2,2	2,5/ 2,78	0,95/ 1,33	2,01/ 2,52	1,75/ 2,22	1,87/ 2,28
N , -дБ	55	50	60	40	35	60	45	25	22	37
ε_r (диэл.)	2	2	18,4	3,4	6,5	9,7	13,3	4,2	7,9	19,1
$tg\delta$ (диэл.)	0,002	0,0015	0,01	0,0085	0,0091	0,0035	0,0001	0,0002	0,0008	0,005
Материал ПЛ	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Al</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Ta</i>	<i>Ag</i>
Материал экрана	<i>Al</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Al</i>
$R_{\square}$, Ом/кв (резист.)	55	60	65	70	75	80	40	45	47	67
d_{ZH} , мкм (резист.)	0,25	0,5	0,75	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,15	0,95
P_{max} , Вт/см ³ (резист.)	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	1,0	0,65	1,15	1,20

Продолжение таблицы 2.1

Данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , ГГц	0,55	0,69	0,8	1,0	1,3	1,5	1,85	2,05	2,30	2,45
f_{min} / f_{max} , ГГц	0,43/ 0,66	0,48/ 0,77	0,71/ 0,95	0,75/ 1,5	1,11/ 1,55	1,19/ 1,68	1,61/ 2,03	1,82/ 2,33	2,01/ 2,59	2,1/ 2,61
N , -дБ	60	42	48	25	37	28	33	27	21	20
ε_r (диэл.)	15	17	13	11	8	6	3	5	9	10
$tg\delta$ (диэл.)	0,05	0,06	0,006	0,005	0,0084	0,0035	0,0055	0,0049	0,0034	0,007
Материал ПЛ	<i>Al</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Ta</i>	<i>W</i>
Материал экрана	<i>Al</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Al</i>
$R_{\square}$, Ом/кв (резист.)	35	42	37	66	48	91	52	45	39	58
d_{ZH} , мкм (резист.)	1,25	1,35	2,0	1,75	1,4	1,8	1,64	1,42	0,77	1,11
P_{max} , Вт/см ³ (резист.)	1,25	1,17	1,4	1,33	1,1	0,75	5,0	4,0	3,0	2,0

3.2 Используя методику расчета компонентов делителя (сумматора) на МПЛ, выполнить расчет и моделирование устройства.

3.2.1 Рассчитать все необходимые параметры для моделирования на МПЛ согласно приведенной выше методике. При расчетах использовать

утилиту *TXLine*, входящую в состав системы проектирования *Microwave Office*. Интерфейс утилиты показан на рисунке 2.6. Вызов утилиты осуществляется из меню программы *Microwave Office: Tools>TXLine...*

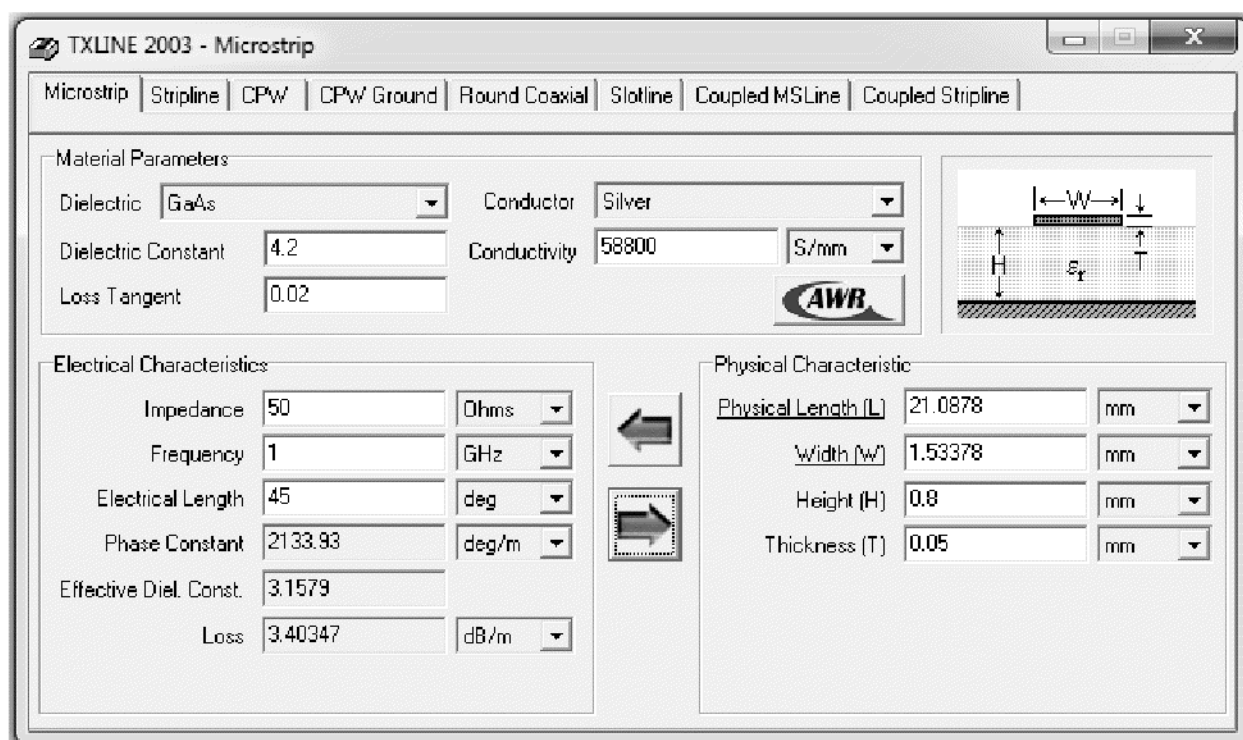


Рисунок 2.6 – Интерфейс утилиты *TXLine*

Необходимо ввести следующие данные:

- тип диэлектрика, согласно заданию. Если такого диэлектрика нет в программе, то нужно вручную ввести значения для диэлектрической проницаемости (*Dielectric Constant*) и тангенс угла диэлектрических потерь (*Loss Tangent*);
- тип проводника, согласно заданию. Если такого проводника нет в программе, то нужно вручную ввести значение для удельной проводимости (*Conductivity*);
- рассчитанное значение волнового сопротивления, Ом (*Impedance*);
- центральную частоту, согласно заданию, ГГц (*Frequency*);
- электрическую длину (*Electrical Lenght*). Рекомендуется использовать для элементов делителя значение 90 градусов;

- толщину подложки, согласно рассчитанному значению, мм (*Height*);
- толщину проводника, согласно рассчитанному значению, мм (*Thickness*).



После ввода данных необходимо нажать кнопку . Программа выполнит расчет физической длины (*Physical Length*) и ширины (*Width*) элемента делителя.

Предварительные расчеты на этом заканчиваются. Остальная работа проводится в системе проектирования *Microwave Office*. Моделирование делителя производится методом электромагнитного моделирования (*EM*) и включает следующие основные шаги:

- создание электромагнитной структуры;
- определение корпуса;
- создание топологии;
- моделирование межслойных переходов, если необходимо;
- просмотр структуры в трёхмерном изображении;
- определение портов и установка референсных плоскостей;
- конфигурирование структуры сетки;
- анализ;
- настройка параметров делителя.

3.2.2 Для создания нового проекта необходимо выполнить команды: *File>New Project*. Для сохранения проекта: *File>Save Project As*. В диалоговом окне необходимо указать имя проекта и путь сохранения. В качестве имени рекомендуется использовать «*DIV_n*» (где *DIV* – от английского *divider* – делитель, *n* – номер варианта).

3.2.3 Для установки единиц измерения проекта необходимо:

- выполнить команды: *Options>Project Options*;
- в диалоговом окне *Project Options* выбрать вкладку *Global Units*;
- выбрать необходимые единицы измерения (ГГц, мм, град., Ом, пФ, нГ

и т. д.).

3.2.4 Для создания электромагнитной структуры необходимо:

- выполнить команды: *Project>Add EM Structure>New EM Structure*;
- набрать *Div_1* (делитель) в поле *Enter a name for the EM Structure*, отметить *AWR EMSight Simulator* и нажать *Create*. На рабочем поле откроется окно электромагнитной структуры.

3.2.5 При определении корпуса задаются все диэлектрические материалы для каждого из слоев в электромагнитной структуре, краевые условия, все физические размеры структуры и размер сетки, который будет использоваться. Для определения корпуса необходимо:

- выполнить команды: *Options>Project Options*. Откроется диалоговое окно *Project Options*;
- на вкладке *Global Units* этого окна в поле *Frequency* ввести *GHz*, в поле *Length type* ввести *mm* и нажать *OK*;
- выполнить команды: *Options>Layout Options*. Откроется диалоговое окно *Layout Options*. На вкладке *Layout* этого окна в области *Grid Options* в поле *Grid Spacing* ввести интервалы сетки (в зависимости от рассчитанных размеров можно принять – 1 *mm*), в поле *Database unit size* ввести десятую или сотую часть от указанного выше размера (зависит от количества цифр после запятой в рассчитанных ранее размерах. Не рекомендуется использовать разбиение, менее 0,001 *mm*) и нажать *OK*;
- дважды щелкнуть левой кнопкой мышки по подгруппе *Enclosure* в дереве делителя *Div_1* (в группе *EM Structures*) в окне просмотра проекта. Откроется диалоговое окно свойств электромагнитной структуры;
- на вкладке *Enclosure* открывшегося окна в поля *X_Dim* и *Y_Dim* ввести рассчитанные размеры корпуса, в поля *Grid_X* и *Grid_Y* ввести размеры сетки (сетка также зависит от количества чисел после запятой рассчитанных размеров);
- на вкладке *Material Defs* щелкнуть мышкой по кнопке *Add* для

Dielectric Definitions, чтобы добавить материал диэлектрика. Откроется дополнительное диалоговое окно *Add Dielectric*. В поле *Preset* ввести тип диэлектрика, щёлкнув мышкой по кнопке в правом конце этого поля или ввести вручную: в поле *Er* – значение диэлектрической проницаемости (если заданного диэлектрика нет в списке программы), в поле *TanD* – значение тангенса диэлектрических потерь. Нажать *OK*;

- щёлкнуть мышкой по кнопке *Add* для *Conductor Definitions*, чтобы добавить материал проводника. Откроется дополнительное диалоговое окно *Add Conductor*. В поле *Presets* ввести тип, остальные поля этого окна заполняются автоматически. Если проводника нет в списке программы, то необходимо ввести вручную: имя проводника и значение его удельной проводимости. Нажать *OK*;

- щёлкнуть мышкой по кнопке *Add* для *Conductor Definitions*, чтобы добавить материал экрана структуры. Откроется дополнительное диалоговое окно *Add Conductor*. В поле *Presets* ввести тип, остальные поля этого окна заполняются автоматически. Если проводника нет в списке программы, то необходимо ввести вручную: имя проводника и значение его удельной проводимости. Нажать *OK*;

- щёлкнуть мышкой по кнопке *Add* для *Conductor Definitions*, чтобы добавить сведения о резистивном материале. Откроется дополнительное диалоговое окно *Add Conductor*. Необходимо ввести вручную: имя резистивного слоя (например, *Resist*) и значение его удельной проводимости. Нажать *OK*;

- в столбцах *Color*, можно изменить цвет и тип штриховки, которыми будут окрашиваться (заполняться) начерченные на этих слоях элементы топологии. Необходимо выбрать разные цвета и типы штриховок для удобства дальнейшей работы;

- на вкладке *Dielectric Layers* для слоя «1» в колонке *Thickness* ввести значение толщины (это значение расстояния от полосковой линии до экрана,

рассчитанное ранее), в колонке *Material Definition* ввести тип заполнителя (для всех вариантов заданий использовать воздух – *Air*), в колонке *Draw Scale* ввести значение удобного масштаба черчения. Для слоя «2» провести аналогичные установки (тип заполнителя дан в задании).

Граничные условия для боковых стенок корпуса в электромагнитной структуре всегда идеальные и не могут быть изменены. Верхняя и нижняя стенки корпуса также являются идеальными проводниками по умолчанию, но они могут быть изменены на вкладке *Dielectric Layers* выбором материала в полях *Top Boundary* и *Bottom Boundary*. Для данной задачи верхняя крышка (*Top Boundary*) – это материал экрана по заданию, а нижняя (*Bottom Boundary*) – медь (*1 oz Cu*);

- на вкладке *Materials* определяются материалы для всех проводников. Нажать *Insert*. В столбце *Name* заменить появившееся имя *Trace 1* на материал проводника (рекомендуется не использовать полное имя проводника, указанное ранее), в столбце *Material Definition* выбрать тип материала, введенный ранее, в столбце *Thickness* ввести значение толщины.

- аналогичные действия произвести для резистивного материала (имя *Trace 1* заменив, например, на *Res*) и материала экрана. Нажать *OK*.

На этом этап создания корпуса заканчивается.

3.2.6 Создание топологии.

Чтобы создать топологию для моделирования, можно использовать редактор топологии, имеющийся в *Microwave Office* (можно так же импортировать структуры из файлов формата *AutoCAD DXF* или *GDSII*). Для создания топологии необходимо:

- щелкнуть мышкой по панели *Layout* и отметить *Conductor*. В поле *EM Layer* ввести количество слоев структуры. В поле *Material* ввести материал проводника;

- щелкнуть по значку *View Area* на панели инструментов и выделить среднюю часть платы левого края так, чтобы хорошо была видна сетка. Это

облегчит черчение;

- рекомендуется отдельно вычертить входной и выходной порты, плечи делителя. Затем установить созданные элементы согласно структуре проектируемого делителя (см. рисунок 2.2, в);

- для создания входного порта выполнить команды: *Draw>Polygon*;

- переместить курсор в окно электромагнитной структуры, поместив его на левый край корпуса примерно в центре по ширине корпуса, и щёлкнуть левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать начало рисунка топологии;

- не нажимая кнопки мышки, двигать курсор вправо так, чтобы было отображено $dx:_$, $dy:_$, соответствующие рассчитанным значениям вершин размеров топологии входного порта. Щёлкнуть левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать эту точку. Можно пользоваться абсолютными и относительными координатами для черчения контуров топологии;

- когда будет задана последняя вершина топологии, нужно щёлкнуть дважды левой кнопкой мышки, чтобы замкнуть контур;

- для создания плеча делителя лучше использовать команду: *Draw>Rectangle*;

- поместить курсор в окно электромагнитной структуры и нажать клавишу *Tab* на клавиатуре. Откроется диалоговое окно *Enter Coordinates*;

- ввести координаты в поля x и y и нажать *OK*;

- нажать клавишу *Tab* снова, чтобы снова открыть диалоговое окно *Enter Coordinates*. Установить флажок *Rel*, чтобы активизировать относительные координаты. Ввести координаты в поля dx и dy , нажать *OK*. Проводник прямоугольного сечения будет отображен в окне электромагнитной структуры;

- для создания второго плеча прямоугольного сечения рекомендуется выполнить команды: *Edit>Copy* и *Edit>Past*. Далее установить полученный элемент в нужно место перемещением курсора;

- повторить шаги предыдущих пунктов, вводя необходимые координаты x и y и относительные координаты dx и dy , а также операции копирования-вставки для создания выходных портов;

- выделить всю созданную топологию. Для этого установить курсор левее и выше созданной электромагнитной структуры, нажать левую кнопку мышки и переместить курсор правее и ниже электромагнитной структуры так, чтобы вся топология попала в образовавшийся прямоугольник. Или выполнить команду: *Edit>Select All*;

- щёлкнуть правой кнопкой мышки по любому выделенному проводнику и выбрать *Shape Properties*. В открывшемся окне в поле *Material* выбрать материал полоскового проводника и нажать *OK*;

- повторить шаги предыдущих пунктов, вводя необходимые координаты x и y и относительные координаты dx и dy для создания балластного резистора;

- выделить созданный резистор, щёлкнуть правой кнопкой мышки по нему и выбрать *Shape Properties*. В открывшемся окне в поле *Material* выбрать материал резистивного материала и нажать *OK*.

Далее необходимо установить все элементы в соответствии с выбранной топологией делителя. В результате выполнения операций должна получиться топология двухканального синфазного направленного делителя мощности, примерный вид которой показан на рисунке 2.4.

Все размеры можно измерить с помощью инструментов *Measure* или *Ruler*, находящихся на панели инструментов.

На этом этап создания топологии завершен.

Примечание. Если дважды щёлкнуть левой кнопкой по проводнику, в серединах ограничивающих проводник линиях появятся тёмно-синие ромбики, а в углах – тёмно-синие квадратики. Поместив курсор на такой ромбик или квадратик так, чтобы он отображался в виде двойной стрелки, можно, нажав левую кнопку мышки, двигать линию или угол топологии и,

таким образом, редактировать топологию. Если установить курсор на вершину многоугольника и перемещать её с нажатой кнопкой мышки, то будет перемещаться и сторона, прилегающая к этой вершине. Если при перемещении вершины нажать клавишу *Shift*, то будет перемещаться только вершина.

3.2.7 При электромагнитном моделировании можно определять электрические порты на краю платы (т. е. внешние порты) или как зонд, проходящий через нижнюю или верхнюю крышки (т. е. *Via Port*). Чтобы определить внешний порт необходимо:

- щелкнуть левой кнопкой мышки по входному проводнику, чтобы выделить его. Этот проводник должен быть позиционирован точно на левом краю подложки перед добавлением порта;

- выполнить команды: *Draw>Add Port*;

- переместить курсор с портом в окно схемы и поместить порт на левый край входного проводника, пока не отобразится квадрат, и щелкнуть левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать порт;

- дважды щелкнуть левой кнопкой мышки по порту «1». Откроется окно свойств порта. В поле *Ref. Plane Distance* ввести расстояние 1 mm, на которое нужно сдвинуть референсную плоскость. Нажать *OK*;

- аналогично разместить порты и установить референсные плоскости для портов «2» и «3» в соответствии с рисунком 2.4.

3.2.8 Для просмотра трехмерной структуры необходимо:

- выполнить команды: *View>View 3D EM Layout*. На рабочем поле появится трехмерное изображение;

- выполнить команды: *Window>Tile Horizontal* для одновременного просмотра двумерной и трехмерной структур.

3.2.9 Далее необходимо задать частоты для моделирования:

- щелкнуть левой кнопки мыши по панели *Projects* в нижней части левого окна – откроется окно проекта;

- дважды щёлкнуть по группе *Project Options* – откроется диалоговое окно *Project Options*;

- в этом окне открыть вкладку *Frequencies*;

- в области *Data Entry Units* установить *GHz* (должно быть установлено по умолчанию, так ранее были заданы глобальные определения для проекта);

- отметить *Replace*. Задать начальную частоту f_{min} в поле *Start*, конечную частоту f_{max} в поле *Stop* и шаг в поле *Step* (рекомендуется использовать значение не более 0,1 ГГц). Для подтверждения изменений нажать *Apply*. В области *Current Range* будет отображен частотный диапазон с заданным шагом по частоте. Нажать *OK*.

3.2.10 Чтобы выполнить моделирование электромагнитное структуры необходимо:

- проверить, достаточно ли ресурсов компьютера для выполнения задачи. Дважды щёлкнуть левой кнопкой мышки по подгруппе *Information* делителя *Div_1* в группе *EM Structures*. Откроется диалоговое окно *Solver Information*. В этом окне на вкладке *Summary* отображается доступное (*Available*) и необходимое (*Required*) количество памяти на компьютере для моделирования и оценочное время анализа. Если ресурсов достаточно, то можно выполнять моделирование. Закрыть окно, нажав *OK*;

- выполнить команды: *Simulate>Analyze*. Откроется окно, в котором отображается процесс анализа. По завершении анализа окно закроется.

На этом этап электромагнитного моделирования завершен.

3.2.11 Для определения амплитуды коэффициентов передачи необходимо построить соответствующие графики в электромагнитной структуре. Для этого необходимо:

- щёлкнуть правой кнопкой мышки по группе *Graphs* в окне просмотра проекта и выбрать *New Graph* во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно *New Graph*;

- ввести название, например, «Коэффициенты передачи» в поле ввода

имени графика. Отметить *Rectangular* в переключателе типа графика и нажать *OK*. Окно графика создаётся на рабочем поле, и имя графика появляется как подгруппа в группе *Graphs* в окне просмотра проекта;

- щелкнуть правой кнопкой мышки по имени графика «Коэффициенты передачи» в окне просмотра проекта и выбрать *Add Measurement* во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно *Add Measurement*;

- выбрать *Linear* и затем *Port Parameters* в области *Measurement Type*, *S* – в области *Measurement*, имя схемы – в поле *Data Source Name*, «2» – в поле *To Port Index* и «1» – в поле *From Port Index*. Указать *Mag* (Модуль) и *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;

- выбрать «3» – в поле *To Port Index* и «1» – в поле *From Port Index*. Указать *Mag* (Модуль) и *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;

- нажать «OK». Измеряемые величины $Div_1:DB(|S[2,1]|)$ и $Div_1:DB(|S[3,1]|)$ появятся как подгруппы в группе «Коэффициенты передачи» в окне просмотра проекта.

На этом этап добавления графиков коэффициентов передачи *S21* и *S31* заканчивается.

3.2.12 Для определения амплитуды коэффициента развязки между плечами делителя необходимо построить соответствующий график в электромагнитной структуре. Для этого необходимо:

- щелкнуть правой кнопкой мышки по группе *Graphs* в окне просмотра проекта и выбрать *New Graph* во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно *New Graph*;

- ввести название, например, «Коэффициенты развязки» в поле ввода имени графика. Отметить *Rectangular* в переключателе типа графика и нажать *OK*. Окно графика создаётся на рабочем поле, и имя графика появляется как подгруппа в группе *Graphs* в окне просмотра проекта;

- щелкнуть правой кнопкой мышки по имени графика «Коэффициент развязки» в окне просмотра проекта и выбрать *Add Measurement* во

всплывающем меню. Откроется диалоговое окно *Add Measurement*,

- выбрать *Linear* и затем *Port Parameters* в области *Measurement Type*, *S* – в области *Measurement*, имя схемы – в поле *Data Source Name*, «3» – в поле *To Port Index* и «2» – в поле *From Port Index*. Указать *Mag* (Модуль) и *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;

- нажать «ОК». Измеряемая величина $Div_1:DB(|S[3,2]|)$ появится как подгруппа в группе «Коэффициенты развязки» в окне просмотра проекта.

На этом этап добавления графика коэффициента развязки *S32* заканчивается.

3.2.13 Для построения графика коэффициента стоячей волны *VSWR* делителя необходимо выполнить действия, аналогичные п. 3.2.12, учитывая, что:

- необходимо создать новый график с названием, например, «КСВН», в прямоугольной системе координат;

- требуемый параметр выбрать в *Linear* в области *Measurement Type*, *VSWR* – в области *Measurement*, имя схемы – в поле *Data Source Name*, «1» – в поле *Port Index*. Убрать *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;

- повторить тоже, указав параметр «2» – в поле *Port Index*;
- повторить тоже, указав параметр «3» – в поле *Port Index*;
- нажать «ОК». Измеряемые величины появятся как подгруппы в группе «КСВН» в окне просмотра проекта.

На этом этап добавления графиков коэффициента передачи *VSWR* заканчивается.

3.2.14 Для определения фазы коэффициентов передачи и отражения необходимо выполнить действия, аналогичные п. 3.2.12, учитывая, что:

- необходимо создать новый график с названием, например, «Фазы коэффициентов передачи и отражения», в прямоугольной системе координат;
- требуемый параметр выбрать в *Linear* и затем *Port Parameters* в области *Measurement Type*, *S* – в области *Measurement*, имя

схемы – в поле *Data Source Name*, «2» – в поле *To Port Index* и «1» – в поле *From Port Index*. Указать *Angle* (Угол) и убрать *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;

- выбрать «3» – в поле *To Port Index* и «1» – в поле *From Port Index*. Указать *Angle* (Угол) и убрать *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;
- выбрать «3» – в поле *To Port Index* и «2» – в поле *From Port Index*. Указать *Angle* (Угол) и убрать *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;
- выбрать «1» – в поле *To Port Index* и «1» – в поле *From Port Index*. Указать *Angle* (Угол) и убрать *dB* в области *Complex Modifier* и нажать *Apply*;
- нажать «OK». Измеряемые величины $Div_1:Ang(S(2,1))$, $Div_1:Ang(S(3,1))$, $Div_1:Ang(S(3,2))$ и $Div_1:Ang(S(1,1))$ появятся как подгруппы в группе «Фазы коэффициентов передачи и отражения» в окне просмотра проекта.

На этом этап добавления графиков фазы коэффициентов передачи и отражения заканчивается.

3.2.15 Чтобы выполнить анализ схемы (моделирование) необходимо:

- выполнить команды: *Simulate>Analyze*. Результаты расчетов коэффициентов передачи, коэффициента развязки, коэффициентов стоячей волны и фазы коэффициентов передачи и развязки делителя будут показаны на графиках в соответствующих окнах.

На этом этап моделирования заканчивается.

3.2.16 Провести анализ графиков на соответствие условиям задачи:

- коэффициент деления равен двум не более плюс-минус 2 %;
- коэффициент развязки – не менее, заданного по условию значения;
- коэффициент стоячей волны – не более 1,5;
- расхождение с частотным диапазоном – не более плюс-минус 30 МГц.

Если решение удовлетворяет условиям, то задачу можно считать решенной, а делитель – синтезированным. В противном случае, требуется настройка схемы делителя.

3.2.17 Настройка схемы делителя может осуществляться только в ручном режиме, изменением геометрических размеров:

- ширины подводящих линий портов «1», «2» и «3». Также необходимо попытаться варьировать и их длиной;

- ширины плеч делителя. Необходимо помнить, что ширину плеч необходимо поддерживать одинаковой, иначе коэффициент деления может стать несимметричным для плеч;

- длины плеч делителя. Необходимо помнить, что длину плеч также необходимо поддерживать одинаковой, иначе коэффициент деления может стать несимметричным для плеч;

- совместным изменением групп или всех геометрических размеров.

Возможно, потребуется изменение геометрических размеров диэлектрической подложки, что вполне допустимо.

Для более точной настройки можно уменьшить шаг сетки проекта.

Результаты, вносимые изменением каждого параметра и группы параметров, необходимо фиксировать с помощью графиков, сравнивая их с результатами этапа моделирования. Необходимо выявить:

- влияние ширины подводящих линий портов «1», «2» и «3» на все параметры исходной структуры делителя;

- влияние длины подводящих линий портов «1», «2» и «3» на все параметры исходной структуры делителя

- влияние ширины линий плеч делителя на все параметры исходной структуры делителя;

- влияние длины линий плеч делителя на все параметры исходной структуры делителя;

- геометрические размеры элементов делителя, при которых выполняется соответствие условиям задачи. Если это не удастся, то необходимо сообщить преподавателю о полученных результатах.

На этом этап настройки делителя завершен. Результаты необходимо

сохранить в новый файл, выполнив команды: *File>Save Project*.

3.2.18 Провести моделирование делителя (сумматора) на МПЛ согласно топологии, приведенной на рисунке 2.2, б. Для этого необходимо выполнить пп. 3.2.2 – 3.2.16. Сравнить результаты моделирования с результатами для топологии рисунка 2.2, в. Сделать выводы.

3.3 Используя методику расчета компонентов делителя (сумматора) на сосредоточенных элементах, выполнить расчет и моделирование устройства.

3.3.1 Рассчитать все необходимые параметры для моделирования на сосредоточенных элементах согласно приведенной выше методике.

3.3.2 Для создания нового проекта выполнить п. 3.2.2, дав имя файлу «*DIV_1_n*».

3.3.2 Установка единиц измерения проекта выполняется аналогично п. 3.2.2.

3.3.3 Далее создается файл схемы делителя, для чего необходимо:

- выполнить команды: *Project>Add Schematic*. Откроется диалоговое окно создания схемы;

- в нем указать имя разрабатываемой схемы, – *Div_1_n* и нажать *OK*. Будет создано пустое поле в группе *Circuit Schematic* в окне просмотра проекта.

3.3.4 Для создания самой схемы *Div_1_n* необходимо:

- нажать на панель *Elements* в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра элементов;

- щёлкнуть по значку «+» слева от группы *Circuit Elements*, чтобы развернуть группу элементов цепи;

- в категории *Circuit Elements* развернуть группу сосредоточенных элементов (*Lumped Element*), затем подгруппу *Capacitor* в окне просмотра элементов. В нижней части окна появятся изображения доступных емкостей;

- выбрать модель емкости *CAP* и перетащить ее в окно схемы. Установка элемента в нужное место осуществляется левой кнопкой мыши;

- развернуть подгруппу *Inductor* в окне просмотра элементов. В нижней части окна появятся изображения доступных индуктивностей;

- выбрать модель индуктивности *IND* и перетащить ее в окно схемы.

Установка элемента в нужное место осуществляется левой кнопкой мыши;

- развернуть подгруппу *Resistor* в окне просмотра элементов. В нижней части окна появятся изображения доступных резисторов;

- выбрать модель резистора *RES* и перетащить ее в окно схемы.

Установка элемента в нужное место осуществляется левой кнопкой мыши;

- используя операции перетаскивания или копирования, собрать схему, как показано на рисунке 2.7. Поворот элемента осуществляется нажатием правой кнопки мыши (каждое нажатие – поворот на 90 градусов). Соединение элементов осуществляется автоматически при совмещении их выводов.

Другой способ соединения заключается в следующем:

- поместить курсор возле нужной клеммы элемента. Курсор будет отображаться в виде соленоида;

- щелкнуть левой кнопкой мышки, чтобы зафиксировать начало провода, перетащить курсор к другой клемме следующего элемента и снова щелкнуть левой кнопкой мыши.

3.3.5 Чтобы разместить порты необходимо:

- выполнить команды: *Draw>Add Port*;

- переместить курсор с портом в окно схемы и поместить порт «1» с левой стороны схемы так, как показано на рисунке 2.7;

- повторить шаги для размещения второго и третьего с правой стороны схемы так, как показано на рисунке 2.7.

3.3.6 Чтобы разместить общий провод (землю) необходимо:

- выбрать в меню *Draw>Add Ground*;

- переместить курсор в окно схемы, поместите землю так, как показано на рисунке 2.7 и зафиксировать, щёлкнув левой мыши.

3.3.7 Для редактирования параметров элементов необходимо:

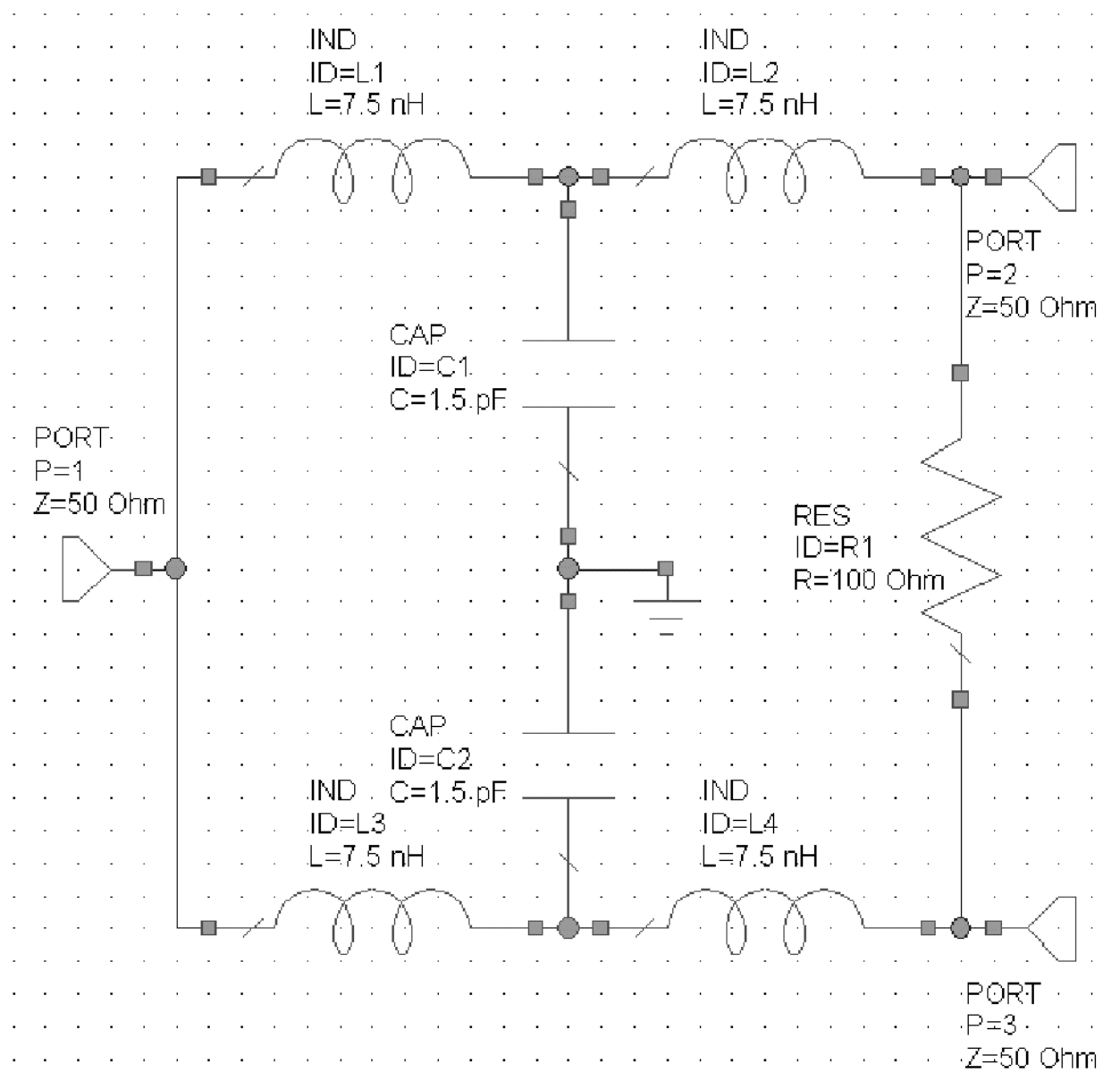


Рисунок 2.7 – Схема делителя (сумматора) на сосредоточенных элементах

- поместить курсор на элемент *CAP ID=C1* в окне схемы и дважды щелкнуть левой кнопкой мышки. Откроется диалоговое окно *Element Options*;

- на вкладке *Parameters* этого окна в текстовое поле, расположенное в столбце *Value* напротив значения емкости (*C*), ввести значение емкости, согласно рассчитанному ранее значению. Изменение будет отражено на

схеме;

- по аналогии необходимо отредактировать значения всех элементов (индуктивностей и резистора), согласно варианту задания и рассчитанным ранее значениям.

Вход и выход делителя нагружены на сопротивление 50 Ом.

Выполнять моделирование данной задачи намного удобнее, если задать параметры конденсаторов и индуктивностей, используя глобальные переменные. Для этого необходимо:

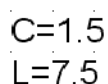
- нажать на панель *Project* в нижней части левого окна, чтобы открыть окно просмотра проекта;

- щёлкнуть по значку «+» слева от группы *Project*, чтобы развернуть группу;

- щелкнуть папку *Global definition*;

- выбрать команду *Draw>Add Equations* в главном меню или нажать кнопку  на панели инструментов. После нажатия на эту кнопку указатель мыши приобретет вид курсора с прямоугольником, являющимся полем для введения выражения;

- для установки поля уравнений в окне *Global Definition* щелкнуть левой кнопкой мыши, ввести уравнение и нажать *Enter*. Если уравнение сохранило черный цвет, значит, оно введено правильно, если цвет зеленый – то уравнение содержит ошибку. Пример ввода глобальных определений представлен на рисунке 2.8.



C=1.5
L=7.5

Рисунок 2.8 – Пример ввода глобальных определений

Глобальные уравнения позволяют изменять значения элементов во всех схемах проекта одновременно при их настройке. Следует учесть, что при

наборе схемы определенным параметрам элементов нужно присваивать не числовое значение, а переменную, которая описывается через глобальные определения, как показано на рисунке 2.9.

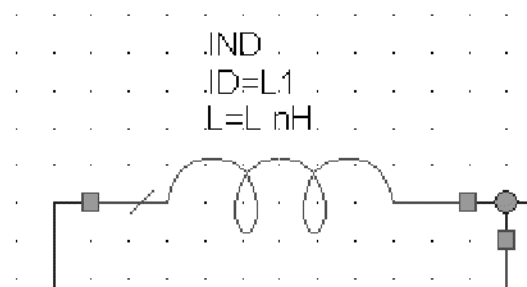


Рисунок 2.9 – Задание индуктивности элемента $IND ID = L1$ с использованием глобальной переменной L

На этом этап создания схемы делителя (сумматора) на сосредоточенных элементах заканчивается.

3.3.8 Далее необходимо задать частоты моделирования, для чего выполнить действия п. 3.2.9.

3.3.9 Для определения амплитуды коэффициентов передачи необходимо построить соответствующие графики, выполнив действия п. 3.2.11.

3.3.10 Для определения амплитуды коэффициента развязки между плечами делителя необходимо построить соответствующий график, выполнив действия п. 3.2.12.

3.3.11 Для построения графика коэффициента стоячей волны $VSWR$ делителя необходимо выполнить действия п. 3.2.13.

3.3.12 Для определения фазы коэффициентов передачи и отражения необходимо выполнить действия п. 3.2.14.

3.3.13 Чтобы выполнить анализ схемы (моделирование) необходимо:

- выполнить команды: *Simulate>Analyze*. Результаты расчетов коэффициентов передачи, коэффициента развязки, коэффициентов стоячей волны и фазы коэффициентов передачи и развязки делителя будут показаны

на графиках в соответствующих окнах.

На этом этап моделирования заканчивается.

3.3.14 Провести анализ графиков на соответствие условиям задачи, указанным в п. 3.2.16.

Если решение удовлетворяет условиям, то задачу можно считать решенной, а делитель – синтезированным. В противном случае, требуется настройка схемы делителя.

3.3.15 Для настройки схемы в ручном режиме необходимо:

- указать параметры элементов, которые необходимо изменять при настройке. Для этого выполнить команды: *Simulate>Tune Tool*;

- поместить курсор на параметр, например, L индуктивности в окне *Global Definitions*. Курсор должен отображаться в виде перекрестия;

- щелкнуть левой кнопкой мышки по выбранному параметру. Цвет параметра изменится с черного на синий, означает, что элемент доступен для настройки;

- повторить указанные шаги для остальных элементов, параметры которых можно изменять;

- перейти в окно графика и выполнить команды: *Simulate>Tune*. Откроется окно *Variable Tuner*,

- перемещением регулировочных ползунков необходимо попытаться изменить графики характеристик так, чтобы они соответствовали задаче синтеза.

На этом этап настройки схемы заканчивается. Если решение удовлетворяет условиям, то задачу можно считать решенной, а делитель синтезированным. В противном случае, требуется оптимизация схемы делителя с помощью программы *Microwave Office*.

3.3.16 Для автоматизированной настройки делителя необходимо:

- назначить переменные для оптимизации;

- добавить цели оптимизации;

- запустить процесс оптимизации.

Для назначения переменных для оптимизации необходимо:

- выполнить команды: *View>Variable Browser* – откроется вкладка *Variables*;
- в столбце *Optimize* «птичкой» отметить переменные, которые оптимизатор будет изменять в процессе настройки. Это параметры индуктивностей: $L_1, \dots, L_4$ и конденсаторов C_1, C_2 (элементы с указанными индексами – это одинаковые плечи делителя, поэтому на схеме и в глобальных переменных обозначены одним параметром: L и C соответственно. Изменяться будут соответствующие значения всех индексов одновременно).

Для добавления целей оптимизации необходимо:

- открыть вкладку *Project* в левом окне проекта и окно графика;
- ввести цель для амплитуды коэффициентов передачи в полосе пропускания. Для этого щёлкнуть правой кнопкой мышки по *Optimization Goals* и выбрать *Add Optimizer Goal* во всплывающем меню. Откроется диалоговое окно *New Optimization Goal*;

- выделить $Div_n: DB(|S(2,1)|)$ в окне списка измеряемых величин *Measurement*. Отметить *Meas=Goal* в области *Goal Type*, убрать «галочку» в квадратике *Max* в области *Range*, ввести значение частоты f_{max} , убрать «галочку» в квадратике *Min* в области *Range*, ввести значение частоты f_{min} , ввести значение цели (требуемый коэффициент деления) в поле *Goal* и нажать *OK*. Можно добавить погрешность, согласно заданию, что осуществляется в поле *Cost*. Формула для расчета приведена непосредственно в данном окне;

- аналогично добавить цели оптимизации для остальных величин, указанных в условии задания. Для каждой цели необходимо создавать свою группу.

Результаты выполнения отразятся на соответствующих графиках. Направления штриховки у цели на графике указывает на недопустимые значения измеряемой величины. На этом этап создания переменных для оптимизации заканчивается.

Для запуска процесса оптимизации необходимо:

- выполнить команды: *Simulate>Optimize* – откроется диалоговое окно *Optimizer*;
- выбрать необходимый метод оптимизации (например, *Random (Local)*) в области *Optimization Methods*, установить максимальное количество итераций (например, 5000) в поле *Maximum Iteration*, нажать *Start*, чтобы начать оптимизацию.

Когда оптимизация закончится, закрыть диалоговое окно *Optimize*. Результаты оптимизации будут отображены как на графиках, так и на схеме делителя.

На этом этап оптимизации заканчивается. Если решение удовлетворяет условиям, то задачу можно считать решенной, а делитель синтезированным. В противном случае, необходимо сообщить преподавателю о полученных результатах.

3.3.17 Далее проводится работа по исследованию влияния параметров сосредоточенных элементов на параметры и характеристики делителя. Для выполнения операций необходимо загрузить предыдущий проект и сохранить его под новым именем. Исследования включают два этапа:

- исследование влияния емкости конденсаторов;
- исследование влияния индуктивности катушек.

Для исследования влияния емкости конденсаторов на параметры и характеристики делителя необходимо:

- изменить емкость конденсаторов в проекте, например, в сторону увеличения (одинаково для всех!);
- выполнить анализ схемы (моделирование) и получить все

необходимые графики;

- выполнить описанные выше действия ещё для четырех значений емкости (как в сторону увеличения, так и уменьшения значения), фиксируя каждый раз вид указанных графиков;

- результаты исследований оформить в виде графиков зависимостей коэффициентов передачи, коэффициента развязки, коэффициентов стоячей волны и фазы коэффициентов передачи и развязки делителя от емкости конденсаторов для пяти точек на рабочей частоте делителя f .

Для исследования влияния индуктивности катушек на параметры и характеристики делителя необходимо выполнить те же действия, что и для емкости конденсаторов.

4 Указания по технике безопасности

Перед проведением практического занятия следует изучить инструкцию по технике безопасности при работе на компьютере. Также следует соблюдать правила и требования, установленные для данного компьютерного класса.

5 Содержание отчета, форма и правила оформления отчета о выполненной работе

Отчет по практической работе выполняется на листах формат А4 согласно требований ГОСТ и ЕСКД и должен содержать следующие пункты:

- а) титульный лист с названием работы, дисциплины, кода группы, ФИО исполнителя и преподавателя;
- б) краткое теоретическое введение;
- в) условия, ход выполнения и решения задачи пункта 3;
- г) текст программы, разработанной для расчетов в системе

компьютерной алгебры *MathCAD*;

д) результаты промежуточного моделирования и оптимизации, а также конечные результаты расчета и синтеза двухканального синфазного направленного делителя мощности на МПЛ (параметры компонентов, топология, трехмерная структура, графики и т. д.);

е) результаты сравнения моделирования двухканального синфазного направленного делителя мощности на МПЛ различных топологий (см. рисунок 2.2, б и в);

ж) результаты промежуточного моделирования и оптимизаций, а также конечные результаты расчета и синтеза двухканального синфазного направленного делителя мощности на сосредоточенных элементах (схема, номиналы компонентов, графики и т. д.);

з) результаты исследования влияния параметров проводников МПЛ на параметры и характеристики делителя (графики и выводы);

и) результаты исследования влияния параметров сосредоточенных элементов на параметры и характеристики делителя (графики и выводы);

к) выводы по результатам работы.

6 Контрольные вопросы и защита работы

6.1. Что представляют собой пассивные элементы СВЧ? Почему они называются пассивными?

6.2. Каково назначение делителей? Какие разновидности известны? Каковы особенности СВЧ-делителей по сравнению с делителями на средних и низких частотах?

6.3. Что представляет собой структурная схема делителя на два? Каково назначение элементов в этой схеме?

6.4. Каковы различия и что общего между делителями и сумматорами СВЧ-диапазона?

6.5. Как выглядит эквивалентная схема делителя на два? Какие возможны топологии такого делителя?

6.6. Как записывается матрица рассеяния делителя? Каково ее назначение?

6.7. Как рассчитываются элементы делителя на два? Какова элементная база их реализации? Зачем нужен балластный резистор?

6.8. Какими параметрами и характеристиками оценивается СВЧ-делитель?

6.9. Как реализуются многоканальные делители?

6.10. Каковы требования к материалам полосковых линий и диэлектриков, используемых при изготовлении СВЧ-делителей?

6.11. Как расширить полосу пропускания делителя?

7 Литература: [].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Расчет пролетного клистрона

1 Введение

Существует много различных специальных приборов для СВЧ, работа которых основана на том, что электроны приобретают кинетическую энергию от постоянного электрического поля, созданного источником питания, и передают часть своей энергии электромагнитному полю СВЧ, так как тормозятся в этом поле.

Специальные электронные приборы СВЧ делятся на две группы: О-типа и М-типа. В приборах О-типа постоянное магнитное поле отсутствует или применяется только для фокусировки электронного потока.

Исторически первыми представителями приборов О-типа стали клистроны, широко, применяемые и в настоящее время. В клистронах значительное время пролета электронов не только не вредно, но и необходимо для нормальной работы прибора. Основные типы клистронов – пролетные (двух- и многорезонаторные), пригодные для генерации и усиления колебаний, и отражательные (однорезонаторные), работающие только в качестве генераторов.

В клистронах применяется динамическое управление током, при котором, как правило, на поле объемного заряда у катода действует только постоянное ускоряющее поле, а возникновение переменного тока происходит в области, удаленной от катода, в результате взаимодействия электронов с полем СВЧ и их смещения относительно друг друга при дальнейшем движении.

В данной практической работе будет произведен расчет пролетного клистрона.

2 Теоретическая часть

Клистрон – электровакуумный прибор, в котором преобразование постоянного потока электронов в переменный происходит путём модуляции скоростей электронов электрическим полем СВЧ (при пролёте их сквозь зазор объёмного резонатора) и последующей группировки электронов в сгустки (из-за разности их скоростей) в пространстве дрейфа, свободном от СВЧ поля.

В пролётном клистроне электроны последовательно пролетают сквозь зазоры объёмных резонаторов. В простейшем случае резонаторов два: входной и выходной. Дальнейшим развитием пролётных клистронов являются каскадные многорезонаторные клистроны, которые имеют один или несколько промежуточных резонаторов, расположенных между входным и выходным резонаторами.

Пролётные клистроны являются основой всех мощных СВЧ передатчиков когерентных радиосистем, где реализуется стабильность и спектральная частота высокостабильных водородных стандартов частоты. В частности, в выходных каскадах самых мощных в мире радиолокаторов для исследования астероидов и комет (радиолокационные телескопы, планетные и астероидные радары), которые расположены в обсерваториях Аресибо (Пуэрто-Рико), Голдстоуне (Калифорния) и Евпатории (Крым), используются именно пролетные клистроны с водяным охлаждением.

Устройство многорезонаторного пролетного клистрона приведено на рисунке 3.1.

Электронный поток, создаваемый электронной пушкой 1, ускоряется в пространстве «катод-анод» высоким положительным напряжением и далее движется по инерции от входного резонатора 9 до коллектора 4. Высокочастотные колебания во входном резонаторе создаются за счет мощности усиливаемого сигнала, поступающей в резонатор через ввод

энергии 8. Резонаторный блок состоит из объемных резонаторов, резонансная частота которых может меняться с помощью механизмов перестройки 2. Взаимодействие электронов с высокочастотными полями происходит в зазорах 10. Между резонаторами электроны движутся в металлических трубах, так называемых пространствах дрейфа 7. Радиус трубы дрейфа должен быть таким, чтобы для рабочей длины волны труба являлась запердельным волноводом. Следовательно, в пространстве дрейфа отсутствует СВЧ-электрическое поле и на электроны действуют только электростатические (кулоновские) силы расталкивания.

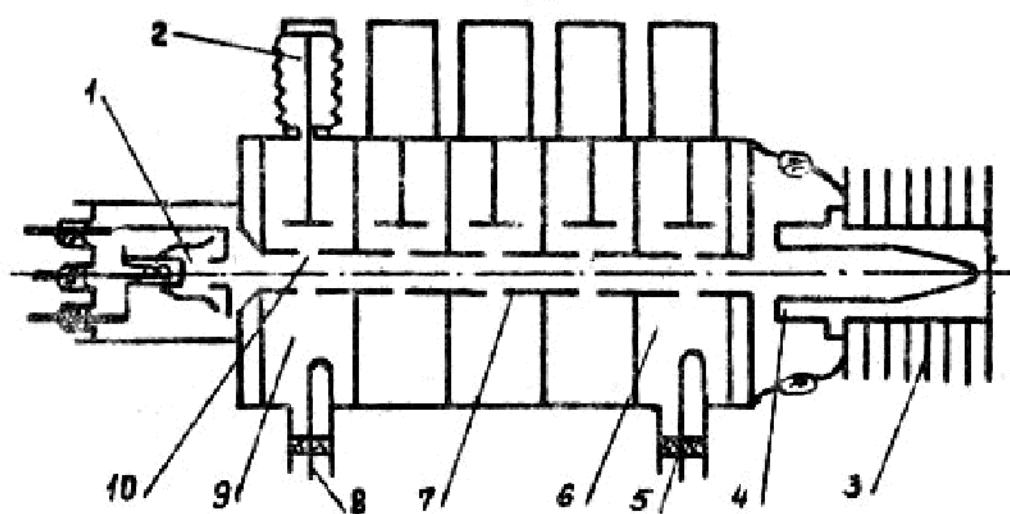


Рисунок 3.1 – Устройство многорезонаторного пролетного клистрона

С помощью входного и промежуточных резонаторов однородный по плотности электронный пучок преобразуется в последовательность электронных уплотнений (сгустков), частота следования которых совпадает с частотой входного сигнала. Электронные сгустки возбуждают в выходном резонаторе 6 СВЧ-поле той же частоты, тормозятся этим полем и отдают ему свою энергию, которая выводится в нагрузку через вывод 5.

Отдав значительную часть энергии полю выходного резонатора, электроны попадают на коллектор 4, в котором остаток энергии

превращается в тепло и рассеивается в окружающем пространстве, чему способствует наличие радиатора 3. Для лучшего отвода тепла может быть применено дополнительное принудительное воздушное или водяное охлаждение.

Для того чтобы электронный пучок мог пройти от катода до коллектора без заметного рассеяния на пролетных трубах, используются магнитные или электростатические фокусирующие системы. Чаще применяются магнитные фокусирующие, поля, направленные вдоль оси потока и создаваемые либо соленоидом, либо с помощью постоянных магнитов.

При подаче СВЧ-мощности во входной резонатор на его зазоре возникает переменное продольное электрическое поле, изменяющееся с частотой сигнала. Следующие друг за другом с постоянной скоростью электроны, пролетая через зазор в разные моменты времени (фазы поля), испытывают ускорение либо замедление. На выходе из зазора скорости электронов оказываются различными, причем различие в скоростях тем больше, чем больше амплитуда поля в зазоре. Этот процесс называется скоростной модуляцией электронного потока. При дальнейшем движении в пространстве дрейфа передние (замедленные) и задние (ускоренные) электроны приближаются к центральному (непромодулированному) электрону, пролетавшему через зазор в момент времени, когда напряжение на нем равно нулю. Таким образом, однородный по плотности электронный поток за счет скоростной модуляции в зазоре резонатора при дальнейшем движении оказывается промодулированным по плотности. В результате образуются электронные сгустки, следующие друг за другом с частотой сигнала. Процесс образования сгустков носит название группировки электронного потока. Если бы не было сил кулоновского расталкивания, то все частицы двигались бы только по инерции и в какой-то плоскости сошлись бы вместе (этот случай называется кинематическим приближением). Однако за счет сил расталкивания группировка происходит медленнее, и,

начиная с некоторого момента, сгустки могут начать расплываться. Благодаря образованию сгустков, в пучке появляется переменная составляющая конвекционного тока, которая обуславливает возникновение наведенного тока в промежуточных резонаторах. Поскольку их сопротивление достаточно велико, наведенный ток вызывает появление СВЧ-полей с амплитудами, существенно большими, чем во входном резонаторе. В результате происходит дополнительная модуляция и подгруппировка электронных уплотнений по мере их движения.

Далее рассмотрим основные этапы проектирования многорезонаторного пролетного клистрона.

Необходимая выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$ и среднее значение частоты усиливаемого сигнала f_0 всегда задаются на проектируемый прибор. Также известно значение полного к. п. д. η . Зная указанные параметры можно определить ориентировочное значение мощности питания клистрона:

$$P_{0k} = I_{0k} U_0 = \frac{I_0 U_0}{\delta} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{\eta}. \quad (3.1)$$

Таким образом, оказывается известным произведение:

$$I_0 U_0 = \frac{\delta P_{\text{ВЫХ}}}{\eta}.$$

В этой формуле δ представляет собой коэффициент токопрохождения, характеризующий расфокусировку потока. Его типовой значение составляет диапазон от 0,8 до 0,95. Коэффициент может быть рассчитан по формуле:

$$\delta = \frac{I_0}{I_{0k}}.$$

Отношение тех же величин $I_0 U_0$ можно связать с широкополосностью клистрона.

Действительно, при синхронной настройке клистрона полоса усиливаемых частот будет зависеть от полосы пропускания резонаторов, равной

$$\Delta f = \frac{f_0}{2Q}. \quad (3.2)$$

Таким образом, целесообразно проектировать клистроны, которые могут работать при низких значениях добротности резонаторов

$$Q = \frac{R_H}{\rho}, \quad (3.3)$$

где ρ – волновое сопротивление.

Считая величину ρ заданной выбором конструкции резонатора, приходим к выводу, что возможность использования резонаторов с малым Q определяется возможностью использования малых нагрузочных сопротивлений R_H . Это возможно при больших токах и малых ускоряющих напряжениях, так как именно в этом случае можно получить на резонаторах с низким нагрузочным сопротивлением амплитуду переменного напряжения, сопоставимую с ускоряющим напряжением. Таким образом, получение более широкой полосы усиливаемых сигналов требует увеличения отношения I_0 / U_0 . Однако в практике проектирования клистронов удобнее использовать в качестве параметра не это отношение, а так называемый микропервеанс, равный:

$$\rho_1 = 10^6 \frac{I_0}{U_0^{3/2}}. \quad (3.4)$$

Увеличение микропервеанса ведет к увеличению отношения I_0 / U_0 и, следовательно, дает возможность работать с резонаторами с более низким значением добротности Q . В современных многорезонаторных клистропах величина микропервеанса варьируется обычно в пределах

$$\rho_1 = 0,25 \div 4 \text{ мкА/В}^{3/2}.$$

Задаваясь значением величины ρ_1 , которая одновременно определяет проектирование фокусирующей электронный поток системы, можно получить обоснованный выбор величин I_0 и U_0 . Для этого надо составить

уравнения:

$$\begin{cases} I_0 U_0 = \frac{\delta P_{\text{ВЫХ}}}{\eta}, \\ \frac{I_0}{U_0^{3/2}} = 10^{-6} \rho_1. \end{cases} \quad (3.5)$$

Решая их совместно, получим:

$$U_0 = 252 \left(\frac{\delta P_{\text{ВЫХ}}}{\eta \rho_1} \right)^{2/5}, \text{ В}; \quad (3.6)$$

$$I_0 = 3,98 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\delta P_{\text{ВЫХ}}}{\eta} \right)^{3/5} \rho_1^{2/5}, \text{ А}. \quad (3.7)$$

Для нахождения внутреннего диаметра пролетных труб необходимо учесть, что для получения малой неоднородности скоростной модуляции по сечению электронного потока следует выбирать угол пролета

$$\zeta_{a0} = \frac{\omega a}{v_0} \leq 1. \quad (3.8)$$

При практической разработке устройств эта величина выбирается в диапазоне:

$$\zeta_{a0} = 0,4 \div 1,0.$$

Задавшись значением ζ_{a0} , для заданной частоты f_0 рассчитывают внутренний радиус пролетной трубы по формуле (3.8), учитывая, что постоянная скорость электронов составляет величину:

$$v_0 = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_0}. \quad (3.9)$$

Далее рассчитываем значение собственной частоты колебаний электронного потока бесконечного сечения:

$$\omega_p = 1,83 \cdot 10^{10} j_0^{1/2} U_0^{-1/4}, \text{ с}^{-1}, \quad (3.10)$$

где j_0 – плотность постоянной составляющей электронного тока, рассчитываемая по формуле:

$$j_0 = \frac{I_0}{\pi b^2}, \text{ A/cm}^2 \quad (3.11)$$

Собственная частота колебаний электронного потока конечного сечения при малосигнальном режиме рассчитывается по формуле:

$$\omega_q = F_{0med}^{1/2} \omega_p, \quad (3.12)$$

где функция F_{0med} равна:

$$F_{0med} = 2,56 \frac{J_1^2\left(2,4 \frac{b}{a}\right)}{1 + \frac{5,76}{\zeta_{a0}^2}}, \quad (3.13)$$

где J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Приближенно значение F_{0med} можно определить графическим путем, используя рисунок 3.2. На нем даны расчетные кривые, иллюстрирующие значения величины F_{0med} как функции ζ_{a0} , причем в качестве параметра взята величина отношения $\frac{b}{a}$.

Параметр расталкивания a_q для значения ω_q составляет:

$$a_q = \frac{\omega_q}{\omega}. \quad (3.14)$$

Благодаря большому коэффициенту усиления по мощности в каждой пролетной трубе в современном многорезонаторном пролетном клистроне нелинейный процесс группирования практически имеет место только в последней пролетной трубе. В этой трубе процесс группирования должен обеспечить высокое содержание первой гармоники тока, так как оно будет определять достигаемое значение к. п. д. клистрона. Из сказанного следует, что в предшествующей последней пролетной трубе имеет место линейное группирование.

Нелинейный колебательный процесс в электронном потоке сопровождается для потока конечного сечения изменением собственной

частоты колебаний. В этом случае можно применить уравнение колебаний для одномерного однородного потока, если использовать среднее значение собственной частоты колебаний, равное:

$$\omega_{q\text{СРЕД}} = F_{0\text{мед}}^{1/2} f_2(\Theta) = \omega_q f_2(\Theta), \quad (3.15)$$

где Θ – условный угол пролета, определяющий протяженность прямоугольного импульса, аппроксимирующего реальное электронное уплотнение.

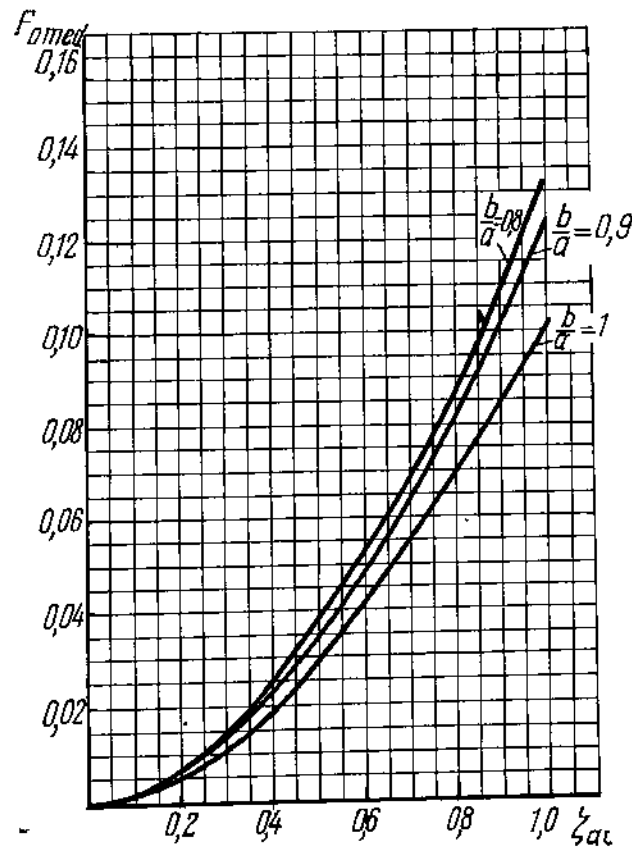


Рисунок 3.2 – Расчетные кривые величины $F_{0\text{мед}}(\zeta_{a0})$ при значениях

$$\frac{b}{a} = 0,8; 0,9; 1,0$$

Величина угла Θ равна

$$\cos \Theta = \frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}, \quad (3.16)$$

где ρ_{m1} и ρ_{m2} – амплитуды первой и второй гармоник переменной со-

ставляющей объемного заряда.

Функция $f_2(\Theta)$ может быть определена:

$$f_2(\Theta) = 0,705 \left[1 + \frac{\pi}{2\Theta} \left(1 - e^{-4,8 \frac{\Theta}{\zeta_{a0}}} \right) \right]^{1/2}. \quad (3.17)$$

Степень группирования электронного потока характеризуется параметром группирования:

$$\begin{aligned} X_{(n-1)} &= [\zeta_{m0}^2 (1 - \cos a_{q \text{ сред}} \zeta)^2 + \frac{v_{(n-1)}^2}{a_{q \text{ сред}}^2} \sin^2 a_{q \text{ сред}} \zeta - \\ &- 2\zeta_{m0} \frac{v_{(n-1)}}{a_{q \text{ сред}}} (1 - \cos a_{q \text{ сред}} \zeta) \sin a_{q \text{ сред}} \zeta \sin \varnothing_{(n-1)}]^{1/2} \approx \\ &\approx \left[\zeta_{m0}^2 (1 - \cos a_{q \text{ сред}} \zeta_0)^2 + \frac{v_{(n-1)}^2}{a_{q \text{ сред}}^2} \sin^2 a_{q \text{ сред}} \zeta_0 - \right. \\ &\left. - 2\zeta_{m0} \frac{v_{(n-1)}}{a_{q \text{ сред}}} (1 - \cos a_{q \text{ сред}} \zeta_0) \sin a_{q \text{ сред}} \zeta_0 \sin \varnothing_{(n-1)} \right]^{1/2} \dots \end{aligned} \quad (3.18)$$

Из практики известно, что оптимальной величиной параметра группирования является значение 1,4, а условного угла пролета — $\frac{\pi}{6}$. Это будет соответствовать наибольшему сжатию аппроксимирующего импульса и может рассматриваться как оптимум перехода кинетической энергии скоростной модуляции в потенциальную энергию электронного уплотнения, т. е. как момент, когда разброс скоростей электронов минимален.

Для указанных значений и необходимо рассчитать $\omega_{q \text{ СРЕД}}$.

Переходя от $\omega_{q \text{ СРЕД}}$ к соответствующему значению параметра расталкивания

$$a_{q \text{ СРЕД}} = \frac{\omega_{q \text{ СРЕД}}}{\omega} = \frac{\omega_{q \text{ СРЕД}}}{2\pi f_0} \quad (3.19)$$

можно для оптимального значения длины последней пролетной трубы $l_{(n-1)}$ принять

$$a_{q\text{ СРЕД}} \zeta_{0(n-1)} = F_{0\text{ мед}}^{1/2} f_2 \left(\frac{\pi}{6} \right) \frac{\omega_p}{\omega} \frac{\omega l_{(n-1)}}{\nu_0} = F_{0\text{ мед}}^{1/2} f_2 \left(\frac{\pi}{6} \right) \frac{\omega_p l_{(n-1)}}{\nu_0} = \frac{\pi}{2}.$$

Отсюда, подставляя значения ω_p и ν_0 и используя величину микропервеанса ρ_1 , получаем оптимальное значение длины:

$$\left[l_{(n-1)} \right]_{\text{opt}} = 9,0 \frac{\left(\frac{b}{a} \right)}{p_1^{1/2} F_{0\text{ мед}}^{1/2} f_2 \left(\frac{\pi}{6} \right)} a. \quad (3.20)$$

Для определения оптимальной длины остальных пролетных труб полагаем процесс группирования в них линейным. Их оптимальная длина будет $\frac{\omega_{q\text{ СРЕД}}}{\omega_q} = f_2 \left(\frac{\pi}{6} \right)$ раз больше длины последней трубы. Однако, в практических устройствах (в силу определенных расчетных соотношений), обычно выбирают длины всех пролетных труб одинаковыми и равными последней пролетной трубе, т. е.

$$l_1 = l_2 = \dots = l_{(n-1)}.$$

Это делает конструкцию клистрона менее протяженной и облегчает конструирование системы фокусировки электронного потока. Кроме того, укорочение пролетных труб в первых каскадах и размещение за счет этого большего числа промежуточных резонаторов всегда дает выигрыш в коэффициенте усиления по мощности.

Знание внутреннего радиуса пролетных труб дает основание и для рационального выбора протяженности бессеточных зазоров в резонаторах. Действительно, на практике отношение эффективной протяженности зазора, учитывающей распространение поля во внутрь пролетных труб, к реальной протяженности зазора имеет наименьшее значение при $\frac{d}{a} = 0,8$. На этом основании оптимальное значение $d = 0,8a$, которое и следует использовать при проектировании. Знание величины d дает исходные данные для

проектирования резонаторов. Определение a задает оптимальные значения длины пролетных труб и зазоров в резонаторах.

Далее необходимо рассчитать количество резонаторов n , необходимое для получения заданного коэффициента усиления μ_p . Для узкополосного усиления при равенстве длин всех труб все резонаторы, кроме последнего, не расстраиваются. Тогда общее количество резонаторов составит:

$$n = \frac{1}{2} \frac{\lg\left(\zeta_{m0}^2 \frac{\delta\mu_p}{\eta}\right) + 5\lg(M_i^2 G_0 R_H) + 4\lg\left(\frac{\sin a_q \zeta_0}{2a_q}\right)}{\lg(M_i^2 G_0 R_H) + \lg\left(\frac{\sin a_q \zeta_0}{2a_q}\right)}, \quad (3.21)$$

где ζ_{m0} – условный постоянный угол пролета;

M_i – коэффициент связи электронного потока с i -м резонатором;

G_0 – проводимость постоянного тока;

R_H – ненагруженное значение сопротивления резонатора при резонансе;

ζ_0 – приведенная длина пролетной трубы.

Из условий оптимального случая группирования принимают ζ_{m0} равным 0,28.

Коэффициент связи электронного потока с i -м резонатором:

$$M_i = M = m \cdot m_{ab}, \quad (3.22)$$

где m – коэффициент связи для сеточного зазора;

m_{ab} – поправочный коэффициент, учитывающий ослабление поля за счет отсутствия сеток.

При выборе $\delta_{a0} \leq 1$ поправочный коэффициент составит:

$$m_{ab} = \frac{1}{\pi b^2} \int_0^b m_R 2\pi R dR = \frac{2I_1(\zeta_{b0})}{\zeta_{b0} I_0(\zeta_{a0})}, \quad (3.23)$$

где b – радиус электронного потока ($b < a$);

I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка;

ζ_{b0} – соответствующий ему условный постоянный угол пролета.

Указанный угол рассчитывается по формуле:

$$\zeta_{b0} = \frac{\omega b}{\nu_0}. \quad (3.24)$$

Коэффициент связи для сеточного зазора определяется по формуле:

$$m = \frac{\sin \frac{\zeta_{d0}}{2}}{\frac{\zeta_{d0}}{2}}, \quad (3.25)$$

где ζ_{d0} – угол пролета в зазоре.

Указанный угол рассчитывается по формуле:

$$\zeta_{d0} = \frac{\omega d}{\nu_0}. \quad (3.26)$$

Для удобства расчетов по формуле (3.22) на рисунке 3.3 дан график функции $m = f_1(\zeta_{d0})$, а на рисунке 3.4 – графики функций $m_{ab} = f_2(\zeta_{d0}, b/a)$ для двух разных значений $b/a = 1$ и $b/a = 0,8$.

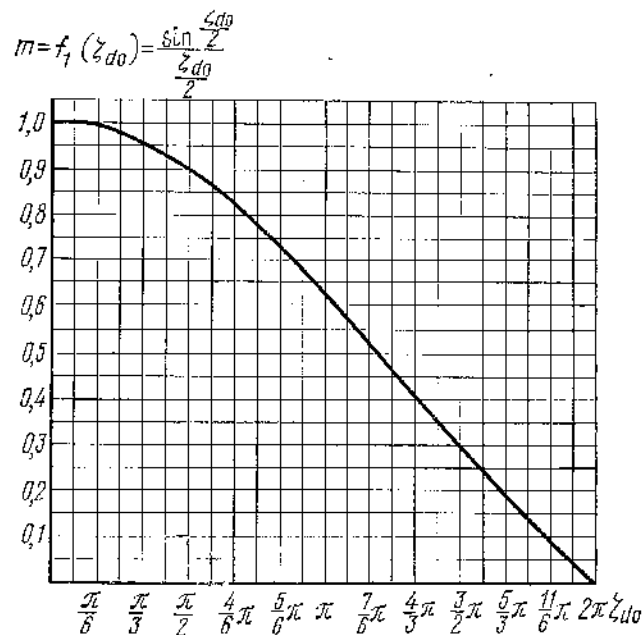


Рисунок 3.3 – График функции $m = f_1(\zeta_{d0})$

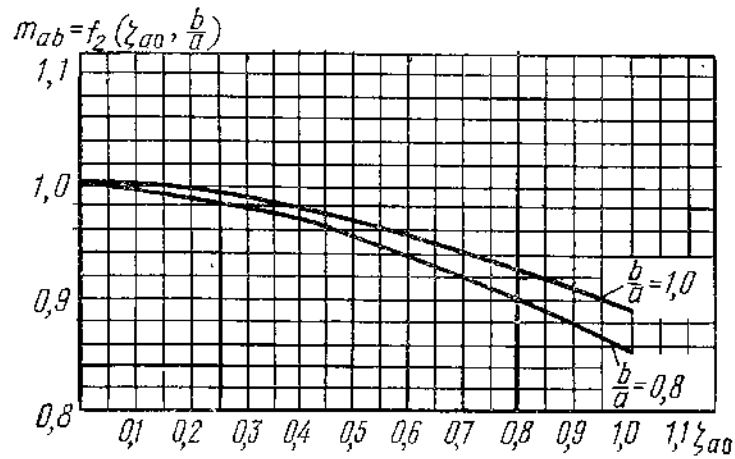


Рисунок 3.4 – График функции $m_{ab} = f_2(\zeta_{a0}, b/a)$

Величина проводимости постоянного тока G_0 рассчитывается по формуле:

$$G_0 = \frac{I_0}{U_0}. \quad (3.27)$$

Сопротивление R_H складывается из собственного сопротивления R_0 , обусловленного потерями в стенках, и шунтирующего сопротивления электронного потока R_e :

$$R_H = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_e}}. \quad (3.28)$$

В узкополосных клистронах обычно используются резонаторы с высоким значением добротности, собственное сопротивление которых велико ($R_0 \gg R_e$), тогда формула (3.28) примет вид:

$$R_H \cong \frac{1}{\frac{1}{R_e}} = \frac{1}{G_e}. \quad (3.29)$$

Шунтирующая проводимость G_e может быть рассчитана по формуле:

$$G_e = \Psi_3(\zeta_{d0}, \zeta_{a0}, \zeta_{b0})G_0, \quad (3.30)$$

где функция $\Psi_3(\zeta_{d0}, \zeta_{a0}, \zeta_{b0})$ определяется как:

$$\Psi_3(\zeta_{d0}, \zeta_{a0}, \zeta_{b0}) = \frac{1}{2} M^2 \left[\left(1 - \frac{\zeta_{d0}}{2} \operatorname{ctg} \frac{\zeta_{d0}}{2} \right) + \left(\frac{\zeta_{a0}^2}{\sqrt{4 + \zeta_{a0}^2}} - \frac{\zeta_{b0}^2}{4} \right) \right]. \quad (3.31)$$

Из условий оптимального случая группирования и принимая по указанным ранее причинам равенство всех длин труб, рассчитываем приведенную длину пролетной трубы:

$$\zeta_0 = \frac{\pi}{2} \frac{1}{a_{q \text{ СРЕД}}}. \quad (3.32)$$

Теперь есть все необходимые данные для расчета общего количества резонаторов n по формуле (3.21). Расчетное значение n следует дополнить до ближайшего целого числа.

Решение задачи выполняется в *MathCAD*. Это система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования, ориентированная на подготовку интерактивных документов с вычислениями и визуальным сопровождением, отличается легкостью использования и применения для коллективной работы.

Задача имеет достаточно большое количество вычислений, которые вручную выполнить можно, но очень долго и можно допустить ошибку, которая отразится на последующих расчетах. Программа *MathCAD* позволит решать задачи и в том случае, когда отсутствует аналитическое решение. Она проводит математическое моделирование в полном объеме.

В силу указанных причин решение задачи будет проводиться с применением системы компьютерной алгебры *MathCAD* по приведенным выше формулам.

3 Задания (задачи)

Для решения поставленной задачи необходимо составить программу в ПО *MathCAD* версии не ниже 13. Необходимо помнить, что в *MathCAD*

несколько иное представление об индексах и именах переменных, т. е. привычное для нас имя переменной ε_0 будет воспринято как элемент массива. Поэтому такие имена переменных необходимо в программе набирать так: $\varepsilon0$. Показан пример только для диэлектрической проницаемости, остальные переменные, с именем в нижнем индексе, необходимо набирать также. Тоже лучше учитывать и для верхних индексов, чтобы исключить ошибки со степенью числа.

Расчеты производятся согласно следующей методике.

3.1 При составлении программы для расчета по приведенным ранее формулам необходимо в *MathCAD* ввести исходные данные:

- значение выходной мощности $P_{\text{ВЫХ}}$;
- коэффициент полезного действия η ;
- коэффициент усиления по мощности μ ;
- средняя частота усиливаемых сигналов f_0 ;
- полоса частот $2\Delta f$;
- ослабление на краях полосы частот Λ .

Варианты заданий приведены в таблице 3.1. Номер варианта задает преподаватель.

Таблица 3.1 – Исходные данные для задачи

Данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{\text{ВЫХ}}$, кВт	15	0,05	10	0,5	5	0,07	12	0,7	7,5	0,4
η	35	21	40	40	38	35	37	32	39	27
μ , дБ	45	30	42	40	40	35	38	33	35	37
f_0 , ГГц	1	15	2	10	5	12	0,7	7,8	3,5	14,5
$2\Delta f$, МГц	12	50	40	60	50	70	35	80	30	100

Λ										
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 3.1 – Исходные данные для задачи

Данные	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_{\text{ВЫХ}}$, кВт	2,5	0,37	20	0,52	18,5	0,69	6,6	0,46	11,8	0,88
η	36	31	36,5	26,5	36,6	27,1	38,2	22	39,1	33
μ , дБ	43	31	44,5	34,2	42,8	38,1	43,2	40	40,8	30
f_0 , ГГц	8	9,2	0,6	10,5	0,75	8,6	2,9	13	5,2	11
$2\Delta f$, МГц	45	95	15	85	14	75	22	65	33	55
Λ										

3.2 Используя формулы, приведенные в п. 2 «Теоретическое обоснование» и составленную в *MathCAD* программу, рассчитать:

- постоянную составляющую электронного тока в клистроне и ускоряющее напряжение;
- значение собственной частоты колебаний электронного потока бесконечного сечения и соответствующий ей параметр расталкивания;
- среднее значение собственной частоты колебаний и соответствующий ей параметр расталкивания;
- оптимальное значение длины последней пролетной трубы;
- оптимальную длину остальных пролетных труб;
- ненагруженное значение сопротивления резонатора при резонансе;
- коэффициент связи электронного потока с i -м резонатором;
- шунтирующую проводимость;
- количество резонаторов, необходимое для получения заданного коэффициента усиления.

4 Указания по технике безопасности

Перед проведением практического занятия следует изучить инструкцию по технике безопасности при работе на компьютере. Также следует соблюдать правила и требования, установленные для данного компьютерного класса.

5 Содержание отчета, форма и правила оформления отчета о выполненной работе

Отчет по практической работе выполняется на листах формат А4 согласно требований ГОСТ и ЕСКД и должен содержать следующие пункты:

- а) титульный лист с названием работы, дисциплины, кода группы, ФИО исполнителя и преподавателя;
- б) краткое теоретическое введение;
- в) условия, ход выполнения и решения задачи пункта 3;
- г) текст программы, разработанной для расчетов в системе компьютерной алгебры *MathCAD*;
- д) результаты расчетов клистрона;
- е) выводы по результатам работы.

6 Контрольные вопросы и защита работы

6.1. Что представляет собой процесс динамического управления током в клистроне?

6.2. Что представляет собой клистрон? Какие разновидности их бывают? Пояснить принципиальные отличия.

6.3. Какова структура пролетного клистрона? Каков его принцип работы?

6.4. Каково назначение резонаторов в клистроне? Какие виды резонаторов используются и почему?

6.5. Каковы основные параметры и характеристики пролетного клистрона?

6.6. Что такое «собственная частота электронного потока»? Как она рассчитывается?

6.7. Каков смысл понятия «коэффициент расталкивания»? Как он рассчитывается?

6.8. Как оценивается связь электронного потока с резонатором?

6.9. Как настраиваются резонаторы клистрона? Как выбирается частота?

6.10. Каковы материалы изготовления отдельных элементов пролетного клистрона?

7 Литература: [].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Решение задач моделирования СВЧ-устройств в программном обеспечении *ANSYS HFSS*

1 Введение

HFSS – это стандартизованный в промышленности инструмент для моделирования трехмерных электромагнитных полей. Технология *HFSS* позволяет выполнять расчет электрических и магнитных полей, токов, *S*-параметров, излучений полей в ближней и дальней зоне. Процесс выполнения расчета полностью автоматизирован, пользователю необходимо всего лишь определить геометрические параметры, свойства материалов и желаемый результат. *HFSS* автоматически построит точную сеточную модель, соответствующую конкретному случаю, для решения задачи при помощи метода конечных элементов. В технологии *HFSS* физика определяет параметры сеточной модели, а не наоборот. Модуль *HFSS* может быть связан с другими модулями *ANSYS* для выполнения междисциплинарного анализа и изучения возможностей оптимизации изделия. Технология *HFSS* является надежным инструментом, используемым при разработке высокоскоростных компонентов, в том числе расположенных на кристалле пассивных компонентов, корпусов интегральных схем, соединительных элементов печатных плат и высокочастотных компонентов, таких как антенны, СВЧ/ВЧ-компоненты, биомедицинские устройства и т. д.

Возможности *HFSS*:

- моделирование трехмерного электромагнитного поля;
- конечные элементы, описываемые тангенциальными векторами;
- автоматическое адаптивное создание и сгущение сетки;
- расчет *S*, *Y*, *Z*-параметров через трансфинитные элементы;

- восстановление модели, автоматическое определение свойств, управление разрешающей способностью сеточной модели, отказоустойчивые алгоритмы построения сетки при импорте модели из *CAD*-системы;
- базисные функции низшего, среднего и высшего порядков;
- прямые и итерационные решатели матриц (возможность для 64-битных систем);
- обобщенные многорежимные описания портов, в том числе портов с большими потерями и портов Флоке;
- автоматическое назначение управляемых портов;
- различные случайные источники электромагнитных полей, в том числе диполи и произвольные плоские волны.

Результаты расчетов:

- *S*-параметры;
- расчет поля в дальней зоне;
- расчет удельной мощности поглощения излучения;
- преобразование видов колебаний;
- потери в материалах, потери на излучение.

Отображение данных/визуализация результатов:

- матрица *S*, *Y*, *Z*-параметров;
- двумерные и трехмерные декартовы графики, полярные графики, диаграммы Водьперта-Смита и таблицы данных;
- наложение результатов измерений;
- копирование векторной графики в буфер обмена;
- копирование и вставка описания графика или других данных из одного отчета в другой;
- библиотека шаблонов для отчетов: создание шаблонов на основе отчетов и наоборот;
- характеристический импеданс поверхности порта;
- трехмерные статичные и анимированные поля на любой поверхности:

ток, электрическое/магнитное поле; диаграмма направленности, проверка излучений; отображение величин и векторов.

В данной практической работе будут решаться две задачи:

- моделирование СВЧ-устройства с визуализацией результатов;
- оптимизация первичной модели СВЧ-устройства, выполненной в предыдущей задаче.

2 Теоретическая часть

В данной практической работе будет выполнено моделирование пассивного СВЧ-устройства – пассивного делителя мощности, выполненного:

- на основе коаксиальной линии;
- на основе прямоугольного волновода.

Решение первой задачи носит обучающий характер и направлено на получение основных навыков работы в программном обеспечении (ПО) *ANSYS HFSS*.

Решение второй задачи включает три этапа:

- расчет основных параметров делителя мощности на основе прямоугольного волновода;
- моделирование делителя в ПО *ANSYS HFSS*;
- оптимизация первичной модели делителя.

Основные формулы и методика расчета прямоугольного волновода уже известны из дисциплины «Электродинамика и микроволновая техника» (см. практическое занятие «Условия распространения, фазовая скорость и длина волны в волноводе. Структура поля и токов в волноводе. Переносимая мощность, затухание волн в волноводах. Групповая скорость в волноводах»).

Расчеты данного практического задания можно провести в системе компьютерной алгебры *MathCAD*. Преимущества использования

рассмотрены в практической работе 1.

Моделирование и оптимизацию необходимо провести в ПО *ANSYS HFSS*.

3 Задания (задачи)

Для решения задачи расчета делителя мощности на основе прямоугольного волновода необходимо составить программу в ПО *MathCAD* версии не ниже 13. Необходимо помнить, что в *MathCAD* несколько иное представление об индексах и именах переменных, т. е. привычное для нас имя переменной ε_0 будет воспринято как элемент массива. Поэтому такие имена переменных необходимо в программе набирать так: $\varepsilon 0$. Показан пример только для диэлектрической проницаемости, остальные переменные, с именем в нижнем индексе, необходимо набирать также. Тоже лучше учитывать и для верхних индексов, чтобы исключить ошибки со степенью числа.

Расчеты производятся согласно методике, приведенной в методических указаниях к практической работе «Условия распространения, фазовая скорость и длина волны в волноводе. Структура поля и токов в волноводе. Переносимая мощность, затухание волн в волноводах. Групповая скорость в волноводах» по дисциплине «Электродинамика и микроволновая техника».

3.1 При составлении программы для расчета основных параметров по приведенным ранее формулам необходимо в *MathCAD* ввести исходные данные:

- f_{min} и f_{max} – частотный диапазон, Гц;
- материал стенок волновода с соответствующей ему удельной проводимостью σ , См/м (см. таблицу 2.1 в методических указаниях к практической работе 2 данной дисциплины);
- относительная диэлектрическая проницаемость ε и диэлектрическая

проницаемость вакуума ε_0 ;

- относительная магнитная проницаемость μ и магнитная проницаемость вакуума μ_0 ;

- скорость распространения света в вакууме c , м/с.

Варианты заданий приведены в таблице 4.1. Номер варианта задает преподаватель.

Таблица 4.1 – Исходные данные для задачи

Данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_{min} , ГГц	0,6	0,8	1,46	3,2	6,3	9,5	23,0	34,2	250	110
f_{max} , ГГц	1,2	1,8	2,15	5,2	10,5	16,0	30,0	45,2	280	120
Материал стенок	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Al</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Ta</i>	<i>Ag</i>
Заполнитель	<i>Al₂O₃</i>	<i>Стекло</i>	<i>Si₃N₄</i>	<i>Тефлон</i>	<i>Кварц-стекло</i>	<i>Плексиглас</i>	<i>Полиэтилен</i>	<i>Taconic TLE</i>	<i>GIL GML1032</i>	<i>Полиамид</i>

Продолжение таблицы 4.1

Данные	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
f_{min} , ГГц	1,9	2,9	4,5	7,5	10,0	17,6	38,0	55,6	68,3	0,45
f_{max} , ГГц	2,3	3,5	5,2	11,5	15,5	23,0	45,2	72,8	100,8	0,55
Материал стенок	<i>Al</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Ta</i>	<i>W</i>
Заполнитель	<i>Polyflon CuFlon</i>	<i>Duroid</i>	<i>Arlon AD250A</i>	<i>Neltec NY9255</i>	<i>Rogers TMM 3</i>	<i>GIL GML2032</i>	<i>Arlon AD450</i>	<i>FR4 epoxy</i>	<i>Diamond</i>	<i>Arlon 25N</i>

Распределение мощности между портами «2» и «3» также зависит от

варианта n :

- для вариантов с первого по пятый установить распределение мощности между портами «2» и «3» согласно соотношению $1,2 / n$;
- для вариантов шестого по десятый установить распределение мощности между портами «2» и «3» согласно соотношению $n / 1,3$;
- для вариантов с 11 по 15 установить распределение мощности между портами «2» и «3» согласно соотношению $3,5 / n$;
- для вариантов 16 по 20 установить распределение мощности между портами «2» и «3» согласно соотношению $n / 4,5$.

3.2 Моделирование пассивного делителя мощности на основе коаксиальной линии (рисунок 4.1).

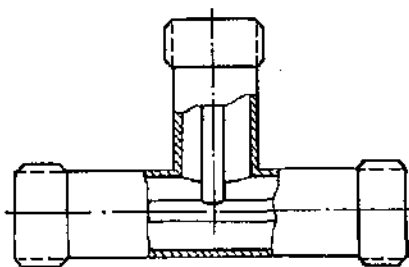


Рисунок 4.1 – Пассивный делитель мощности на основе коаксиальной линии

В силу особенностей алгоритма решения электромагнитной задачи, *HFSS* выполняет разбиение на элементарные ячейки некоторого объема (области пространства). Поэтому программа в результате черчения должна получить не набор поверхностей, а именно замкнутый объем. В случае Т-образного разветвления это часть пространства, заключенная между внешними и внутренними проводниками, а также между плоскостями, ограничивающими коаксиальные линии по длине. Программе нужно указать, какая часть пространства должна использоваться при анализе.

3.2.1 Для начала моделирования необходимо запустить исполняемый

файл программы. На экране монитора появится рабочий стол *HFSS* (рисунок 4.2).

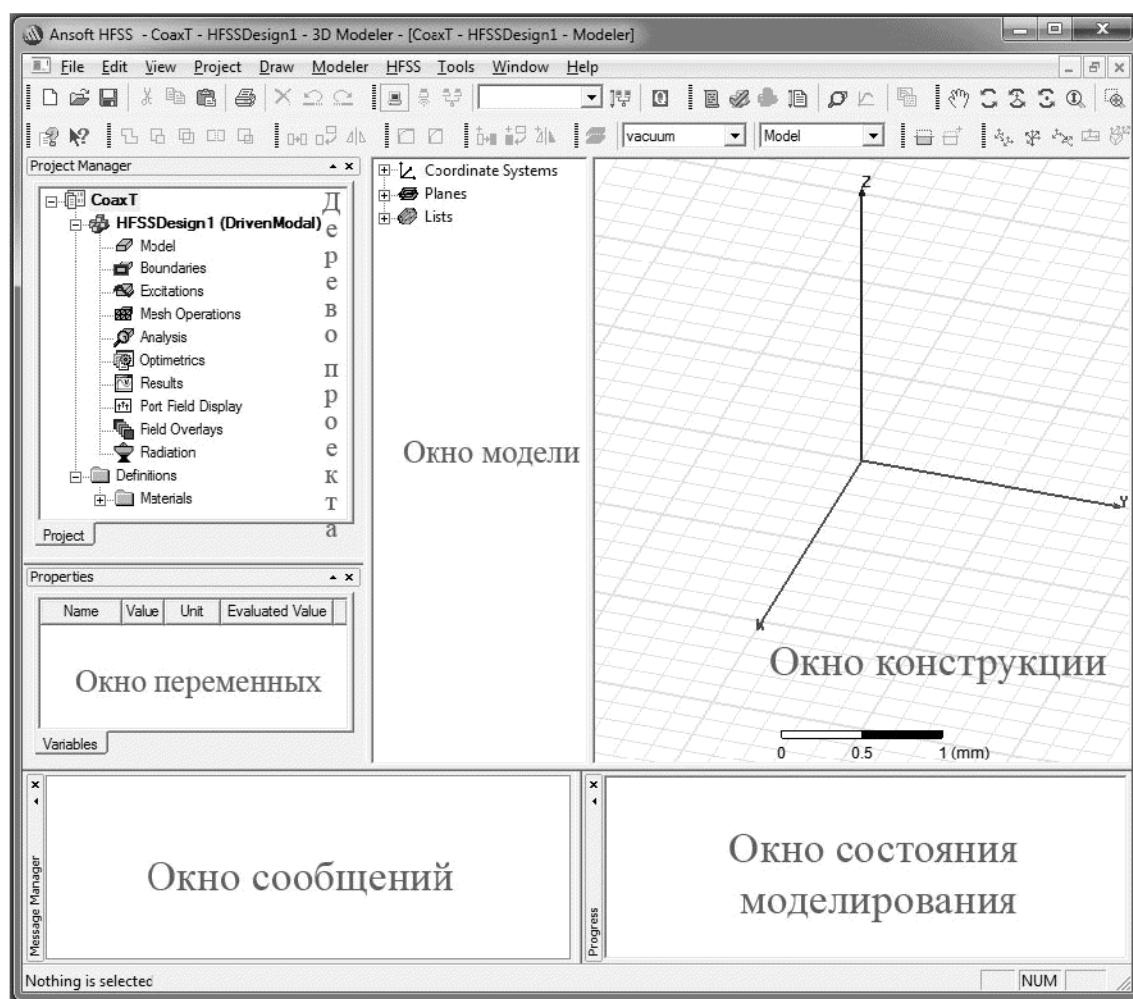


Рисунок 4.2 – Рабочий стол *HFSS*

Для того чтобы начать работать с проектом, в него необходимо включить хотя бы одну модель. Чтобы добавить в текущий проект новую модель необходимо, используя меню, дать команду *Project>Insert HFSS Design*, либо на панели инструментов нажать кнопку .

Далее необходимо сохранить проект под необходимым именем, например, *CoaxT*, выполнив команды *File>Save As...*, выбрав при этом путь и папку для сохранения проекта.

3.2.2 Далее необходимо задать установки проекта, выполнив команды: *Project>Project Variables*. На вкладке *Intrinsic Variables* установить

необходимые единицы измерения для проекта: расстояния – в миллиметрах, частоту – в гигагерцах, угол и электрический угол – в градусах и нажать *OK*.

3.2.3 Черчение коаксиальной линии, расположенной вдоль оси *OZ*.

3.2.3.1 Для того, чтобы начертить внешний цилиндр необходимо:

- выполнить команды: *Draw Cylinder* (или нажать на кнопку  на панели инструментов);

- поместить курсор мыши в виде ромбика в начало координат, щелкнуть левой кнопкой мыши, чтобы зафиксировать положение центра окружности;

- перемещая курсор в плоскости *XY* (желательно вдоль оси *OX*), следить за изменением координаты *X* в открывшемся окне *Measure Data*. Когда значение координаты достигнет значения радиуса окружности цилиндра, необходимо нажать левую кнопку мыши. Если размер окружности велик (мал) для текущего масштаба сетки, то можно его уменьшить (увеличить) вращением колесика мыши прямо во время поиска координаты для радиуса. Перемещение начала координат также можно производить во время поиска координаты, для чего необходимо: удерживая нажатой кнопку *Shift*, нажать и удерживать левую кнопку мыши; перемещать курсор мыши по окну конструкции в нужном направлении; по окончании процедуры отпустить левую кнопку мыши и клавишу *Shift*;

- перемещая курсор вдоль оси *OZ*, следить за изменением координаты *Z* в окне *Measure Data*. Когда значение координаты достигнет значения высоты цилиндра, необходимо нажать левую кнопку мыши;

- в окне конструктора появится изображение внешнего вертикального цилиндра, а в дерево модели будет добавлен новый узел, которому по умолчанию будет присвоено имя *Cylinder1*;

- выбрав в дереве модели в узле *Cylinder1* элемент *CreateCylinder* в окне переменных можно редактировать параметры начерченного цилиндра. Для удобства лучше открыть окно параметров данного объекта, нажав на

CreateCylinder правой кнопкой мыши и выбрав команду *Properties...*. Вид окна приведен на рисунке 4.3. Здесь можно отредактировать радиус окружности основания цилиндра, его высоту, положение точки симметрии относительно начала координат (*Center Position*) и количество сегментов круга *Number of Segments*.

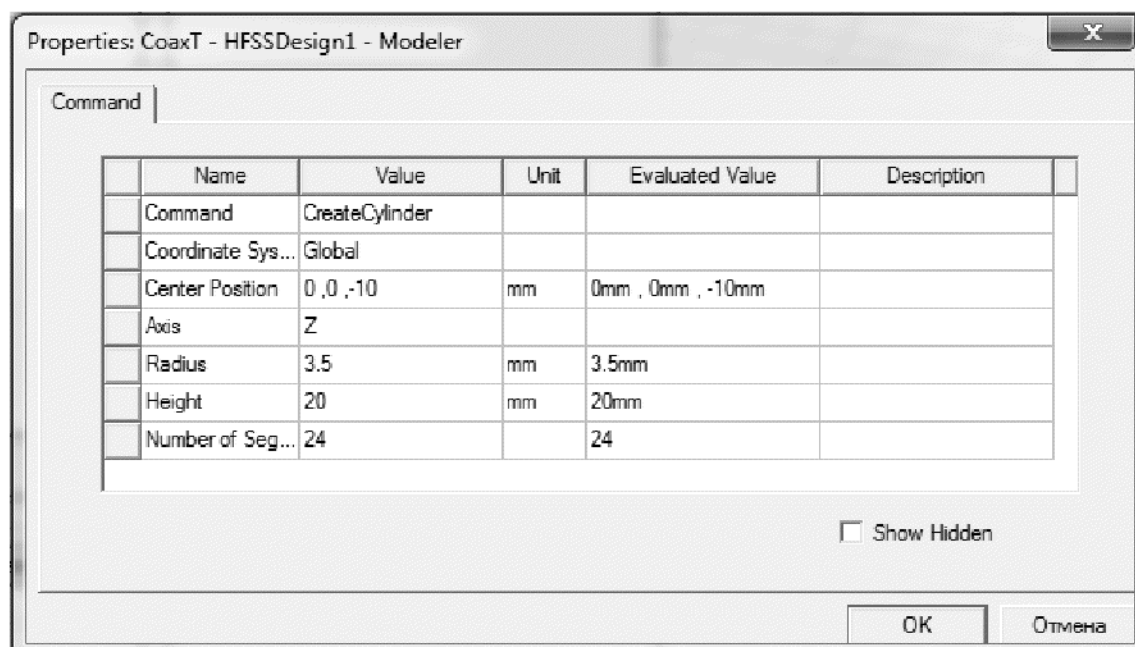


Рисунок 4.3 – Окно *Properties*

Поскольку в *HFSS* круг аппроксимируется многоугольником, имеющим N одинаковых углов и соответственно N идентичных сторон, то каждая его сторона формирует сегмент окружности. Каждый такой сегмент характеризуется углом сегмента, который равен углу между радиальными линиями, проведенными из центра окружности к вершинам сегмента. Этот угол равен $360^\circ / N$. Поле *Number of Segments* используется, чтобы задать число сторон, которое имеет круг. Чем больше угол, тем более крупный и менее совершенный круг. Чем меньше угол, тем большее количество сторон в круге и более совершенный и ровный круг. Поскольку коаксиальное Т-образное соединение – простая структура, которая не будет требовать много компьютерных ресурсов для решения, выбран угол сегмента в 15° , откуда

рассчитывается значение N и вводится в данный проект.

Для удобства соединения с коаксиальной линией, расположенной вдоль оси OY , рекомендуется начерченный цилиндр установить симметрично начала координат, задав координаты центра в виде $(0, 0, -10)$.

Для удобства работы с большим количеством объектов, рекомендуется каждому давать более-менее определенное название. Для этого необходимо в окне модели для выбранного узла, нажав на *Cylinder1* правой кнопкой мыши и выбрав команду *Properties...*, в открывшемся окне в поле *Name* ввести необходимое имя (в данном примере будет *CylOZout*, что означает: цилиндр внешний вдоль оси OZ).

Чтобы визуально удобнее было наблюдать объекты, пересекающие друг друга, или находящиеся внутри и т. д., необходимо задать параметр прозрачности для данного объекта, выбрав в дереве модели узел *CylOZout*. Теперь в окне переменных можно редактировать параметр прозрачности *Transparent*.

На этом черчение внешнего вертикального цилиндра заканчивается. Увидеть полученную модель в разных проекциях можно, используя кнопки команд панели инструментов .

3.2.3.2 Для того, чтобы начертить внутренний цилиндр необходимо выполнить действия п. 3.2.3.1, учитывая что:

- радиус внутреннего цилиндра – 1,5 мм, высота – 20 мм, угол сегмента – 15° ;
- координаты центра симметрии такие же;
- имя узла внутреннего цилиндра – *CylOZin*.

На этом черчение коаксиальной линии, расположенной вдоль оси OZ .

3.2.4 Черчение коаксиальной линии, расположенной вдоль оси OY .

Прежде, чем приступить к черчению цилиндров, необходимо изменить плоскость, в которой будет выполняться окружность основания. По умолчанию эта плоскость XU , что и было использовано для черчения

коаксиальной линии, расположенной вдоль оси *OZ*. Теперь же нужно выбрать плоскость *YZ* командами: *Modeler>Grid Plane>XZ* или, выбрав в панели инструментов в раскрывающемся списке  пункт *ZX*.

Далее необходимо выполнить действия п. 3.2.2, учитывая что:

- радиус внешнего цилиндра – 3,5 мм, высота – 7,5 мм, угол сегмента – 15°;
- координаты центра симметрии внешнего цилиндра (0, 0, 0);
- имя узла внешнего цилиндра – *CylOYout*;
- радиус внутреннего цилиндра – 1,5 мм, высота – 7,5 мм, угол сегмента – 15°;
- координаты центра симметрии внутреннего цилиндра (0, 0, 0);
- имя узла внутреннего цилиндра – *CylOYin*.

На этом черчение коаксиальной линии, расположенной вдоль оси *OY*.

3.2.5 Формирование объемной модели делителя мощности.

На данный момент с помощью 3D-конструктора были созданы четыре цилиндра: два внешних (*CylOZout* и *CylOYout*), имеющих диаметр 7 мм, и два внутренних (*CylOZin* и *CylOYin*), имеющих диаметр 3 мм.

Из этого набора цилиндров при помощи команд 3D-конструктора, позволяющих работать с трехмерными объектами, необходимо сформировать модель делителя:

- нажать клавишу *Ctrl* и, удерживая ее, щелкнуть мышью в окне конструкции по внешним цилиндрам *CylOZout* и *CylOYout* (в больших проектах лучше поступать иначе: удерживая клавишу *Ctrl*, щелкнуть мышью в окне модели по узлам *CylOZout* и *CylOYout*. Это обеспечит достоверность выбора требуемых элементов при их большом количестве и различном расположении на чертеже);
- объединить выделенные цилиндры в единую конструкцию, используя операции Булевой алгебры, командами: *Modeler>Boolean>Unite*. В дереве окна модели узлы *CylOZout* и *CylOYout* объединятся в один узел, которому

будет присвоено имя узла, первым занесенным в список объединения. Имя объединенного узла рекомендуется установить более-менее определенным, например, *Coaxout*. Для команды *Unite* порядок выделения цилиндров не имеет значения. Он влияет только на имя, которое дается по умолчанию единой конструкции;

- выполнив два выше описанных этапа данного пункта, объединить узлы *CylOZin* и *CylOYin* в узел с именем *Coaxin*;

- чтобы сформировать модель делителя необходимо из Т-образной конструкции, состоящей из цилиндров большего диаметра (*Coaxout*), вырезать Т-образную конструкцию, состоящую из цилиндров меньшего диаметра (*Coaxin*). Для этого необходимо выбрать их в дереве окна моделей (или окне конструкции). Начинать выделение необходимо с узла *Coaxout*, т. к. для команды *Subtract* порядок выделения имеет значение. Далее задать команды: *Modeler>Boolean—Subtract*. Появится диалоговое окно команды *Subtract*, которое содержит два списка *Blank Parts* и *Tool Parts*.

В списке *Blank Parts* перечислены объекты, из которых будут вырезаны объекты, содержащиеся в списке *Tool Parts*. По умолчанию в список *Blank Parts* попадает объект, который был выделен первым, а в список *Tool Parts* – остальные выделенные объекты.

При необходимости, объект из одного списка можно перенести в другой список. Для этого с помощью левой кнопки мыши нужно выделить объект, который нужно переместить, и нажать активизировавшуюся кнопку со стрелкой.

После того как списки *Blank Parts* и *Tool Parts* будут сформированы необходимо нажать кнопку *OK*. В результате выполнения команды *Subtract*, в дереве модели останется один узел, которому необходимо дать более-менее определенное имя, например, *CoaxT*. В окне 3D-конструктора появится изображение коаксиального Т-разветвления (рисунок 4.4).

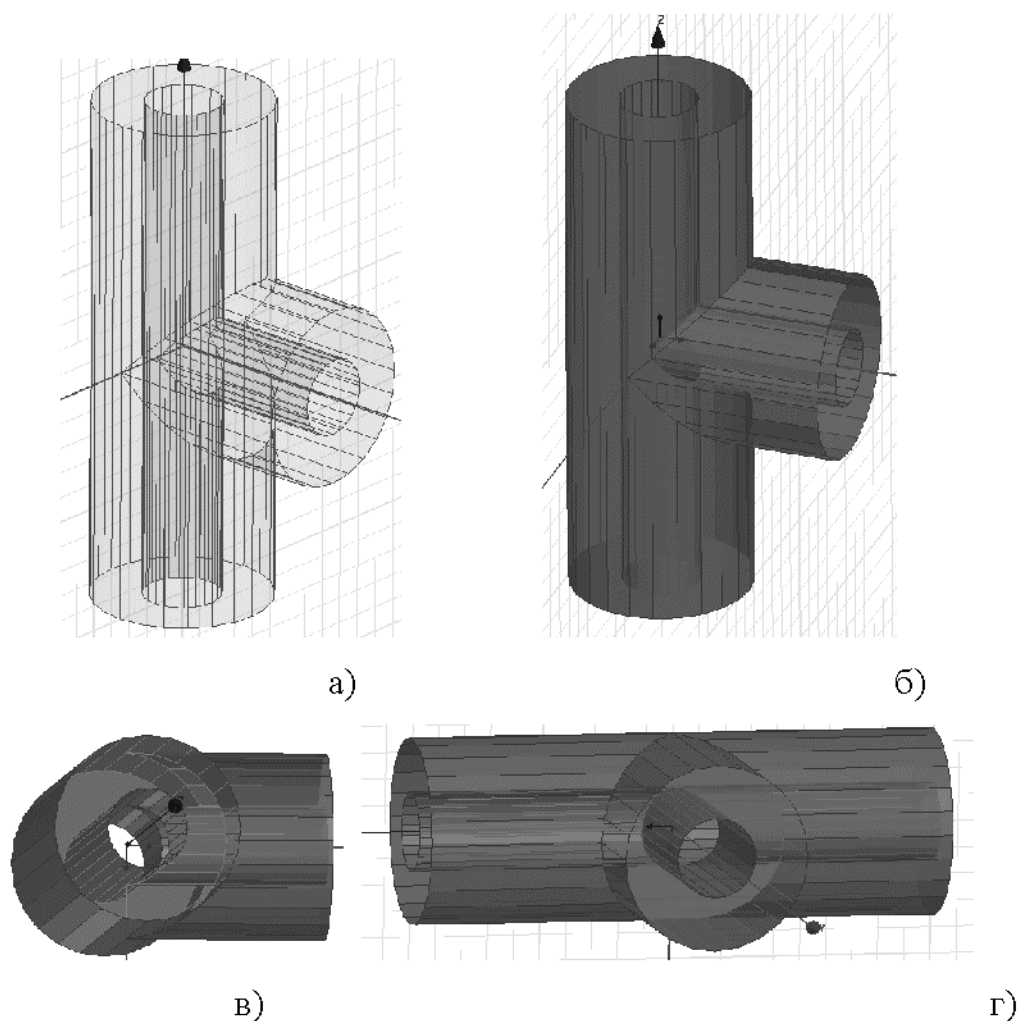


Рисунок 4.4 – Внешний вид готовой объемной модели делителя мощности на основе коаксиальной линии

3.2.6 Описание материалов модели.

После создания чертежа конструкции, каждому из объектов, включая пространство, необходимо задать его материальные свойства. Это выполняется, после черчения и перехода в основное меню. Можно также задавать материалы, из которых состоят структуры, сразу после того, как структура была начерчена в окне переменных, выбрав узел в окне модели.

Для описания материалов готовой конструкции необходимо:

- выбрать узел *CoaxT* в окне модели и, щелкнув по нему правой кнопкой мыши, выбрать пункт *Properties...* ;
- в открывшемся окне свойств выбрать материал (*Material*) линии,

нажав на тип материала в столбце *Value*, а затем выбрав пункт *Edit*,

- в открывшемся окне выбрать для данного примера – воздух (*air*). Если в данном списке не окажется нужного материала, то его можно создать, нажав на кнопку *Add Material*. Нажать кнопку *OK* в данном окне и затем в окне *Properties: CoaxT*.

Типы материалов, используемых в программе *HFSS*:

- металлы с потерями или без потерь;
- изотропный или анизотропный диэлектрик;
- полупроводник;
- резистивный материал.

3.2.7 Определение портов и задание граничных условий.

3.2.7.1 Если в структуре имеется электрическая или магнитная симметрия, то можно разрезать ее вдоль плоскости симметрии, и искать поле для половины структуры, которая остается после разрезания. Или можно просто чертить половину, четверть или даже меньшую часть структуры и затем моделировать полную структуру.

Решение только для части структуры экономит время, дисковое пространство и память. Однако если структура имеет геометрическую симметрию, то это еще не значит, что она обязательно имеет электрическую или магнитную симметрию. Для наличия такой симметрии необходима симметрия возбуждающего поля или токов.

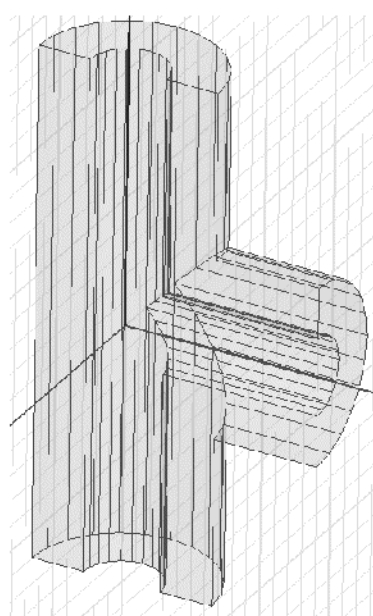
Моделируемый делитель мощности на основе коаксиальной линии имеет симметрию, соответствующую идеальной магнитной плоскости, расположенной в плоскости *YZ*. Поэтому для ускорения расчета необходимо разрезать структуру пополам магнитной стенкой, расположенной в плоскости *YZ*. Для этого нужно:

- выделив узел *CoaxT*, щелкнуть по нему правой кнопкой мыши и выполнить команды: *Edit>Boolean Split...*;
- в открывшемся диалоговом окне выбрать плоскость сечения (*YZ*) и

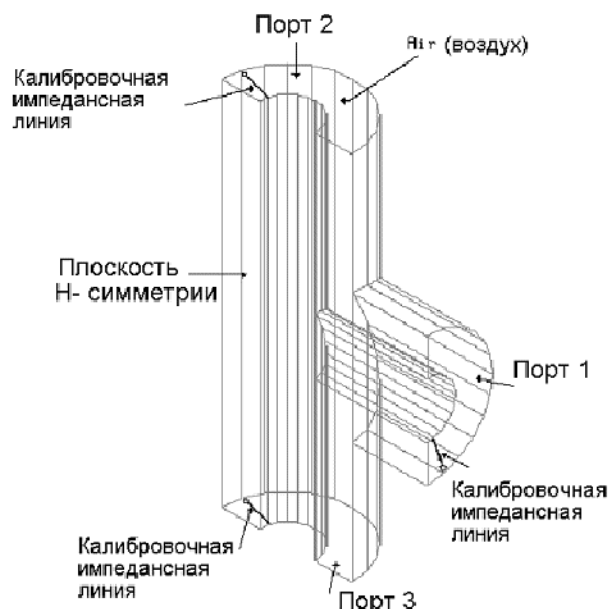
сохраняемую в проекте часть модели, относительно значений оси OX (например, *Negative side*);

- в этом же окне выбрать *Split entire selection* и *Delete invalid objects created during operation*;

- нажать кнопку *OK*. Результат показан на рисунке 4.5, а.



а)



б)

Рисунок 4.5 – Результат разрезания модели плоскостью симметрии (а); граница и линия калибровки импеданса (б)

3.2.7.2 Делитель мощности – это коаксиальная линия передачи с внутренней и внешней металлическими границами. На рисунке 4.5, б показаны границы и порты модели. Модель имеет три порта: в порт «1» поступает входной сигнал, а порты «2» и «3» – выходные. Для определения порта «1» необходимо:

- щелкнуть правой кнопкой мыши по свободному месту окна конструкции и выбрать режим выделения поверхности (*Select Faces*);

- подвести курсор мыши к участку внешней границы, который будет определен как порт «1» и щелкнуть по нему левой кнопкой мыши. Выбранный участок будет выделен цветом;

- щелкнуть по этому участку правой кнопкой мыши и выполнить из выпавшего меню команды: *Assign Excitation>Wave port...* Появляется ассистент инициализации волнового порта.

На первой странице мастера (*Wave Port: General*) задается имя порта. Необходимо присвоить порту недлинное, но понятное имя, например, *P1*, и нажать кнопку «Далее>»;

На второй странице мастера (*Wave Port: Modes*) определяется: сколько собственных волн (*Number of Modes*) будет учитываться при расчете поля в плоскости порта. По умолчанию это число принимается равным единице. В случае модели коаксиального делителя мощности это значение подходит, поэтому менять его не нужно.

Для каждой моды можно также определить линию интегрирования (*Integration Line*) и способ вычисления характеристического импеданса порта (*Characteristic Impedance*).

Линия интегрирования представляет собой вектор, который может представлять следующие понятия:

- калибровочная линия, определяющая направление возбуждающего поля в порту;

- линия, вдоль которой вычисляется напряжение при расчете характеристического импеданса порта Z_{PI} или Z_{VI} .

Определение линии интегрирования важно, если в порту могут существовать вырожденные моды, например как в случае квадратного или круглого волноводов. В случае коаксиальной линии, используя свойства симметрии, достаточно принять значения, присваиваемые по умолчанию: для *Integration Line* – *None*, для *Characteristic Impedance* – Z_{PI} , а также *Set mode polarity using integration lines*, и нажать кнопку «Далее>».

На последней странице ассистента (*Wave Port: Post Processing*) можно определить действия, которые будут выполнены в ходе пост процессорной обработки результатов расчета: перенормировать матрицу рассеяния

устройства относительно заданного значения импеданса порта (*Port Renormalization*) и переместить плоскость отсчета (положение порта) для расчета матрицы рассеяния (*Deembed Setting*).

В данном проекте необходимо воспользоваться установками, заданными по умолчанию (*Do Not Renormalize*) и нажать кнопку Готово.

Аналогично, используя мастер инициализации порта, необходимо определить два оставшихся порта.

3.2.7.3 Структура поля *TEM*-волны коаксиальной линии обладает симметрией относительно идеальной магнитной стенки (*Perfect H*). Модель рассечена плоскостью симметрии, которая проходит через все три порта. Граничные условия в плоскости симметрии должны соответствовать свойствам симметрии *TEM*-волны коаксиальной линии.

Сечение коаксиального делителя плоскостью симметрии представляет из себя три несвязанных плоских поверхности: одна прямоугольная и две Г-образных (см. рисунок 4.5). Необходимо указать, что все эти три поверхности являются идеальными магнитными стенками. Для этого:

- щелкнуть правой кнопкой мыши по свободному месту окна конструкции и выбрать режим выделения поверхности (*Select Faces*);

- нажать клавишу *Ctrl* и, удерживая ее, в окне конструкции щелкнуть мышью по каждой из трех поверхностей сечения. Выбранные участки будут выделены цветом;

- щелкнуть правой кнопкой мыши по любой из выделенных поверхностей и выполнить команды: *Assign Boundary>Symmetry...*;

- в окне открывшегося мастера *Symmetry Boundary* задать имя (можно оставить по умолчанию – *Sym1*) и выбрать тип – *Perfect H* (идеальная магнитная стенка);

- щелкнуть кнопку *Edit Port Impedance Multiplier...* В открывшемся диалоговом окне установить значение импедансного множителя равное 0,5. Поскольку модель коаксиального делителя имеет *H*-стенку в плоскости

симметрии, рассчитанные импедансы получаются в два раза больше реальных. Поэтому и устанавливается такой множитель, чтобы точно вычислить полное сопротивление всей структуры.

На этом определение портов и задание граничных условий закончено. Все назначенные порты (*Excitations*) и граничные условия (*Boundaries*) будут отображены в виде узлов дерева проекта.

3.2.8 Установка параметров решения задачи и выполнение расчета.

3.2.8.1 Чтобы определить, как *HFSS* будет осуществлять расчет структуры поля анализируемого устройства, необходимо произвести установку параметров решения задачи. Для одного проекта можно задать несколько разных установок. Каждая установка параметров включает следующую информацию:

- общие данные о решении задачи;
- параметры адаптивного измельчения сетки, если необходимо изменить характер измельчения сетки при плохой сходимости решения;
- параметры частотной развертки, если необходимо получить решение в диапазоне частот.

Чтобы произвести установку параметров решения задачи для данного проекта необходимо в дереве проекта выделить узел *Analysis*, и, щелкнув по нему правой кнопкой мыши, из контекстного меню выбрать команду *Add Solution Setup...* Появится диалоговое окно установок *Solution Setup*.

На закладке *General* задаются общие данные о решении:

- *Setup Name* – имя данной установки, под которым она будет фигурировать в дереве проекта (по умолчанию – *Setup1*);
- *Solution Frequency* – частота на которой выполняется поиск решения;
- *Maximum Number of Passes* – максимальное число итераций (максимальное число циклов измельчения сетки) для получения решения с точностью;
- *Maximum Delta S* – параметр, который определяет критерий

сходимости решения.

Поиск решения будет осуществляться по следующему алгоритму:

- на заданной частоте производится начальная генерация сетки. В результате чего весь объем модели разбивается на конечные элементы (тетраэдры). Конфигурация сетки и размер тетраэдров определяются установками параметров, заданными в закладках *Options* и *Advanced*. На данном этапе эти параметры принимаем такими, какими они задаются в *HFSS* по умолчанию;

- в узлах сетки вычисляется электромагнитное поле, которое удовлетворяет уравнениям Максвелла и граничным условиям;

- рассчитывается обобщенная матрица рассеяния устройства;

- выполняется процесс измельчения сетки, в соответствии с установками, заданными на закладках *Options* и *Advanced*. Для новой сетки вычисляется электромагнитное поле и обобщенная матрица рассеяния;

- вычисляется параметр *Maximum Delta S*, который характеризует степень различия матриц рассеяния, рассчитанных для двух соседних итераций. Если величина этого параметра становится меньше заданного значения, вычисления прекращаются. В противном случае они продолжаются вплоть до достижения заданного максимального числа итераций *Maximum Number of Passes*.

Далее для данного примера необходимо установить:

- частоту – 2 ГГц;
- количество итераций – шесть;
- *Maximum Delta S* – 0,02 и нажать кнопку *OK*.

На этом установку параметров решения задачи, а также создание проекта можно считать законченным.

3.2.8.2 Далее необходимо провести проверку созданного проекта, выполнив команды: *HFSS>Validation Check...* или, нажав на кнопку  на панели инструментов.

В процессе выполнения этой операции проверяется отсутствие ошибок при создании графического изображения 3D-модели, корректность задания граничных условий и определения портов, правильность установок параметров для решения задачи.

После окончания проверки появляется окно *Validation Check* с результатами проверки проекта (рисунок 4.6). На этом рисунке представлены успешного завершения проверки проекта. Далее необходимо нажать на кнопку *Close*, чтобы закрыть окно с результатами проверки проекта.

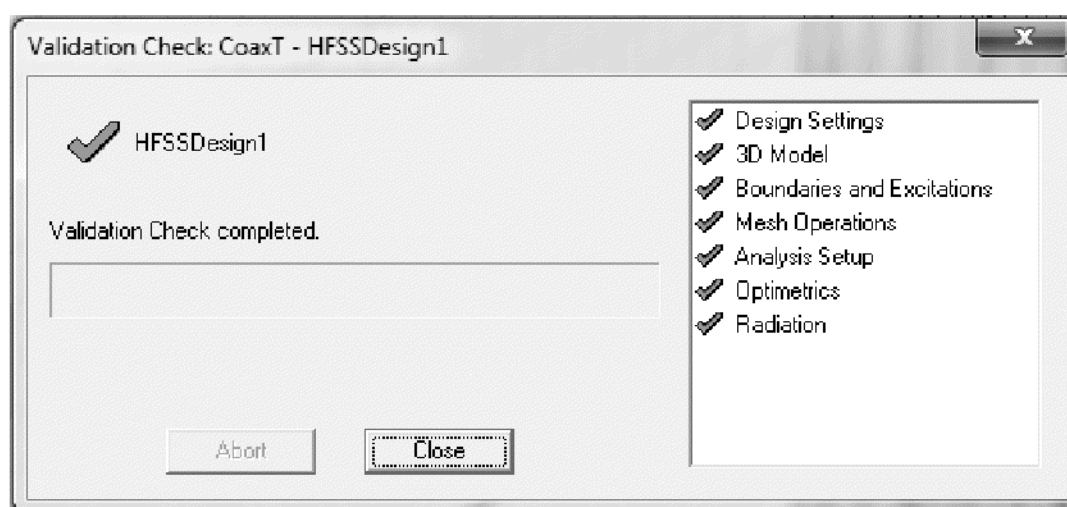


Рисунок 4.6 – Окно *Validation Check* с результатами проверки проекта

Если в проекте обнаружены ошибки, то необходимо нажать кнопку *Close*, исправить обнаруженные ошибки и провести повторную проверку проекта.

Проект, успешно прошедший проверку, готов для выполнения задачи анализа. Чтобы начать решение задачи анализа необходимо выполнить команды: *HFSS>Analyze All* или нажать на кнопку  на панели инструментов.

Ход выполнения задачи анализа отображается в окне состояния, в котором выводится название выполняемого в данный момент шага задания и бегущая полоска, показывающая степень завершенности этого шага. Решение задачи анализа можно прервать, нажав кнопку *Abort*.

После завершения анализа окно состояния очистится, а в окне сообщений появится сообщение об успешном выполнении задачи анализа. В случае возникновения ошибок или предупреждений, необходимо выяснить причины их возникновения, оценить степень их влияния на результаты расчетов, и, при необходимости, внести соответствующие коррективы в проект. После этого необходимо снова выполнить проверку проекта и произвести решение задачи анализа.

3.2.9 Анализ результатов расчета и их вывод в виде графиков и таблиц.

3.2.9.1 Просмотр результатов в диалоговом окне *Solutions*.

Чтобы более подробно просмотреть данные о ходе решения задачи, задействованных ресурсах и результатах расчета необходимо выполнить команды: *HFSS>Results>Solution Data...* или нажать на кнопку  на панели инструментов. Появится диалоговое окно *Solutions* с несколькими вкладками.

На вкладке *Convergence* приводятся данные о сходимости и проведенном числе итераций. В списке *Simulation* можно выбрать имя установки параметров задачи, для которой необходимо посмотреть результаты решения. Это актуально в том случае, если было задано несколько установок параметров и необходимо сравнить между собой результаты расчета для разных установок. Для данной задачи этот список содержит имя только одной установки *Setup1*.

В таблице *Number of Passes* сказано, что итерационный процесс завершился (*Completed*) за две итерации, при заданном максимальном числе итераций (*Maximum*) равном шести. Минимальное число итераций (*Minimum*) соответствует не итерационному процессу (*N/A*).

В таблице *Max Mag. Delta S* приводится текущее (*Current*) значение параметра сходимости, равное 0,00081201, и предельная величина параметра сходимости (*Target*), при достижении которой итерационный процесс останавливается.

Из приведенных данных следует, что в данной задаче итерационный процесс сошелся за две итерации, о чем также свидетельствует зеленая «птичка» в верхней части окна и сообщение *CONVERGED* в левом нижнем углу окна.

Ход итерационного процесса можно просмотреть в виде графика *Plot* или в виде таблицы *Table*, выбрав вид просмотра посредством переключения кнопки *View*. Таблица содержит три столбца: номер итерации, число тетраэдров в сетке и значение параметра сходимости для данной итерации.

Закладка *Profile* содержит записи журнала, отображающие ход выполняемого задания. В этих записях содержатся сведения о выполненных этапах задания, об объеме задействованной памяти и времени, затраченном на выполнение каждого этапа.

В закладке *Matrix Data* можно посмотреть результаты расчета матрицы рассеяния устройства, характеристические сопротивления и волновые числа для каждой собственной волны (*mode*) каждого порта и ряд других параметров. Все эти данные можно увидеть для всех итераций и параметров.

Параметр *Simulation* содержит два значения, выбираемые из списка: имя установки параметров *Setup1*, и имя итерации; в данном случае выбрана последняя итерация *LastAdaptive*.

Флажками отмечены параметры, которые выводятся для просмотра. По умолчанию флажок установлен для просмотра матрицы рассеяния *S Matrix*. Можно выбрать вид представления матрицы рассеяния. Необходимо установить *Magnitude/Phase* (Модуль/Фаза), а также флажки для просмотра постоянной распространения собственных волн порта (*Gamma*) и его характеристического сопротивления (*Z0*). Провести анализ выведенных данных с целью понимания, что, где и как отображается.

Характеристическое сопротивление коаксиальной линии с воздушным заполнением определяется соотношением:

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{D}{d} \right),$$

где D, d – диаметры соответственно внешнего и внутреннего цилиндров коаксиальной линии.

Для данного примера отношение диаметров составляет:

$$\frac{D}{d} = \frac{7}{3},$$

тогда

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{7}{3} \right) = 50,838 \text{ Ом.}$$

Рассчитанные в *HFSS* величины характеристических сопротивлений портов отличаются от теоретического значения на величину, не превышающую 0,1 %.

Для ТЕМ-волны коаксиальной линии справедливо соотношение:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где c – скорость света в вакууме, м/с;

f – рабочая частота линии, Гц.

Для данного примера λ составит значение 0,15 м. Рассчитанное в *HFSS* значение длины волны *Lambda* для всех равно 0,1499 м. Погрешность расчета составляет 0,07 %.

В отчет необходимо привести рассмотренные в данном пункте таблицы в виде рисунков. При разработке собственного устройства также необходимо выполнить указанный расчет и оценить погрешность.

Используя команду *Solution Data*, можно осуществлять оперативное наблюдение за процессом решения задачи в реальном времени. После запуска задачи на решение можно открыть окно *Solutions* и наблюдать, как изменяется параметр сходимости и элементы матрицы рассеяния на каждом шаге итерационного процесса.

3.2.9.2 Просмотр собственных волн портов.

После завершения задачи анализа в узле дерева проекта *Port Field Display* появятся узлы портов *P1*, *P2* и *P3*, каждый из которых включает узлы собственных волн порта вида *Mode n*, где *n* – номер собственной волны порта. Число собственных волн порта определяется при его инициализации. В данном примере было задано по одной собственной волне для каждого порта.

Узлы собственных волн порта в дереве проекта предоставляют доступ к информации о структуре поля собственных волн, возбуждаемых в порту. Знание структуры поля собственных волн всех портов позволяет обнаружить ошибки проекта, которые не могут быть выявлены при проверке, выполняемой по команде *Validate*.

Например, не задать граничные условия в плоскости симметрии для коаксиального делителя, то в этом случае по умолчанию будет принято, что плоскость симметрии представляет из себя идеальную электрическую стенку. Проверка проекта по команде *Validate* не выявит этой ошибки, так как задача с такими граничными условиями также имеет право на существование.

Поэтому если будет получено решение, которое кажется неверным, по Вашему мнению, нужно проверить структуру поля собственных волн порта. Для этого нужно раскрыть узел проекта *Port Field Display*, выберите узел любого порта, например, *P1* и щелкнуть мышью по узлу *Mode 1*. На чертеже модели в сечении порта возникнет семейство векторов, отображающее структуру электрического поля собственной волны порта.

В отчет необходимо привести рисунки из программы, отражающие структуру электрического поля собственной волны каждого порта.

3.2.9.3 Просмотр распределения полей. Анимирование изображений.

Имея решение для структуры поля, можно получить визуальное изображение распределения поля, как по всему объему устройства, так и на любой поверхности модели или в любой заранее определенной плоскости.

Для примера выведем распределение поля в плоскости симметрии YZ :

- в дереве модели в узле *Planes* выбрать плоскость YZ в глобальной системе координат, щелкнув левой кнопкой мыши по ветви *Global:YZ*;
- в окне 3D-конструктора появится изображение цветного квадрата, расположенного в плоскости YZ ;
- правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню и выполнить команду *Plot Fields>E>Mag_E* (распределение амплитуды электрического поля);
- в раскрывшемся диалоговом окне *Create Field Plot* нужно подтвердить сделанный выбор и нажать кнопку *Done*. В дереве проекта появится узел *E-Field* с ветвью *Mag_E1*, а в окне 3D-конструктора появится изображение распределения поля в выбранной плоскости. Это изображение наложено на графический чертеж конструкции. В отчете необходимо привести данное распределение поля.

Для визуального представления распределения поля выбрана цветовая гамма из шестнадцати цветов, каждому цвету соответствует определенная амплитуда поля. Соответствие цветов и амплитуд приведено в таблице *E Field [V_rer_meter]*, которая расположена в левом верхнем углу окна 3D-конструктора.

Параметры визуализации поля можно изменить, для чего нужно навести курсор внутрь таблицы, вызвать правой кнопкой мыши контекстное меню и выбрать команду *Modify...*

Использование порта *P1* в качестве источника возбуждения в *HFSS* принято по умолчанию. Чтобы посмотреть распределение поля при возбуждении через другие порты, необходимо изменить эти установки:

- в дереве проекта выделить узел *Field Overlays*;
- правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню, в котором выбрать пункт *Edit Sources...*;
- в диалоговом окне *Edit Sources* выбрать необходимые установки

(*scaling factor*, значение «1» – возбуждение, «0» – отсутствие) и нажать кнопку *OK*. *HFSS* произведет перерасчет и отобразит новое распределение поля в окне 3D-вида.

В отчет необходимо привести результаты распределения поля при возбуждении каждого из портов *P2* и *P3*. После сравнения результатов необходимо вернуть источник возбуждения в порт *P1*.

Для просмотра распределения поля по всему объему устройства необходимо:

- в окне модели выделить все устройство (*CoaxT*) левой кнопкой мыши;
- в дереве проекта в узле *Field Overlays* правой кнопкой вызвать меню и выполнить команды: *Plot Fields>E>Mag_E* (распределение амплитуды электрического поля);

- в раскрывшемся диалоговом окне *Create Field Plot* нужно подтвердить сделанный выбор и нажать кнопку *Done*. В дереве проекта в узле *E-Field* появится ветвь *Mag_E2*, а в окне 3D-конструктора появится изображение распределения поля по всему объему. Это изображение наложено на графический чертеж конструкции и суммируется с распределением поля по плоскости *Mag_E1*. Этот факт нужно учитывать!;

- нажав правой кнопкой мыши на ветке *Mag_E1*, выбрать команду: *Plot Visibility*, сняв «птичку» с этого пункта меню. Теперь в окне 3D-конструктора будет показано только распределение амплитуды электрического поля по всему объему. В отчете необходимо привести данное распределение в нескольких ракурсах.

Самостоятельно создать распределения полей:

- амплитуды магнитного поля в плоскости *YZ*;
- амплитуды магнитного поля по всему объему устройства;
- векторов электрического поля в плоскости *YZ*;
- векторов электрического поля по всему объему устройства;
- векторов магнитного поля в плоскости *YZ*;

- векторов магнитного поля по всему объему устройства.

Далее рекомендуется сделать все ветки распределений невидимыми. Нажатием левой кнопкой мыши по нужной ветке в окне 3D-конструктора выбирается к просмотру нужное распределение. Для каждого распределения необходимо привести соответствующие рисунки в отчете.

HFSS позволяет анимировать изображения, т. е. представить их в виде последовательности кадров. На каждом кадре отображается распределение поля, изменяющееся в зависимости от некоторого заданного параметра.

Для создания анимированного изображения, зависящего, например, от фазы отображаемого поля, необходимо:

- построить по описанному выше в данном пункте алгоритму необходимое к анимированию распределение поля;

- в дереве проекта раскрыть узел *Field Overlays*, а затем узел типа поля (например, *E Field*) и выделить необходимую ветвь (например, *Mag_E1*). Необходимо помнить, что анимация возможна только для ветви с установленным параметром *Plot Visibility*;

- правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню, в котором выбрать пункт *Animate...*;

- если это первое анимированное изображение в данном проекте, то появится диалоговое окно *Setup Animation*. В текстовом окне *Name* указать имя для создаваемого изображения; на закладке *Swept Variable* из списка выбрать значение *Phase*; задать значения фазы (начальное значение фазы – в окно *Start*, конечное – в окно *Stop*); количество шагов анимации внести в окно *Step*. Количество кадров в анимированном изображении будет равно $Step + 1$. Нажать на кнопку *OK*.

На экране будет воспроизводиться анимированное изображение распределения поля. В левом верхнем углу окна 3D-конструктора появится панель управления с помощью которой можно остановить и возобновить воспроизведение изображения, изменить скорость и частоту следования

кадров, а также сохранить анимацию в формате *gif* или *avi*.

Самостоятельно выполнить анимацию всех полей, распределение которых было выполнено в данном пункте ранее. Сохранить каждую анимацию в отдельный файл формата *avi* с качеством не хуже 85 %. Проверить работоспособность файла с помощью системного плеера *Windows*.

Анимация может быть выполнена и для нескольких параметров одновременно. Большой интерес представляет анимация распределения полей векторов электрического и магнитного полей по всему объему устройства. Для ее получения необходимо:

- установить параметр *Plot Visibility* только у веток указанных распределений полей;
- чтобы отличить векторы *E* от векторов *H* необходимо им задать разные цветовые палитры, например в таблице *H Field [V_rer_meter]* в настройках выбрать серые тона для спектра отображения;
- в дереве проекта левой кнопкой мыши выбрать узел *Field Overlays*, а правой – раскрыть контекстное меню, в котором выбрать пункт *Animate...*;
- установить параметры анимации и нажать *OK*.

Рассмотреть анимацию распределения векторов приближаясь к портам, под разными углами и т. д. Сохранить полученную анимацию в файл формата *avi* с качеством не хуже 85 %. Проверить работоспособность файла с помощью системного плеера *Windows*.

3.2.9.4 Получение решения в диапазоне частот.

До данного пункта решения производилось на фиксированной частоте (было установлено значение 2 ГГц). Но *HFSS* позволяет проводить исследование устройств в диапазоне частот. Для этого необходимо в установку параметров для решения задачи включить развертку по частоте. *HFSS* выполняет расчет в диапазоне частот после завершения итерационного процесса на фиксированной частоте.

Чтобы в установку параметров включить развертку по частоте необходимо:

- раскрыть в дереве проекта узел *Analysis* и выделить ветвь *Setup1*;
- правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню, в котором выбрать пункт *Add Frequency Sweep...*;
- в диалоговом окне *Edit Sweep* ввести имя (*Sweep Name*) для создаваемой частотной развертки или принять имя, присвоенное по умолчанию;
- из набора частотных разверток *Sweep Type* выбрать развертку *Discrete*. Для данного вида развертки поле будет рассчитываться в заданных точках частотного диапазона;
- в окнах *Start* и *Stop* ввести начальную и конечную точки частотного диапазона, соответственно, а также шаг изменения частоты *Step Size* (для данного примера 1; 3 и 0,01 ГГц);
- из списка *Type* выбрать линейную шкалу для частот *LinearStep*;
- нажать кнопку *Display*. В окне справа будет отображен весь набор точек частотной шкалы, в которых будет производиться расчет;
- по умолчанию, решение для поля будет сохранено только для конечной точки частотного диапазона, а также для частоты, на которой получено оптимизированное решение. Если вы нужно сохранить решения для поля во всех точках частотного диапазона, необходимо установить флажок *Save Fields (All Frequencies)*. *S*-параметры всегда сохраняются для всех заданных точек частотного диапазона;
- нажать кнопку *OK*;
- на панели инструментов нажать кнопку . Программа выполнит расчет в заданном диапазоне. Информация об успешном завершении решения появится в окне сообщений.

Необходимо знать, что для получения решения в диапазоне частот *HFSS* использует сетку, созданную по методу конечных элементов и

оптимизированную в ходе итерационного процесса при получении решения на частоте *Solution Frequency*, которая была задана при установке параметров на решение в окне *Solution Setup*. Эта сетка используется для всех точек частотного диапазона без дальнейшего измельчения. Так как эта сетка оптимизирована только для одной частоты, то вполне возможно, что при удалении от этой частоты точность решения будет падать. Чтобы минимизировать эту погрешность надо в качестве частоты, на которой ищется оптимизированное решение, выбирать центральную частоту частотного диапазона.

3.2.9.5 Визуализация и вывод расчетов в виде таблиц и графиков.

После окончания решения задачи результаты расчетов можно вывести в виде таблиц и графиков для визуализации, анализа и хранения.

Для вывода результатов расчета необходимо:

- в дереве проекта выделить левой кнопкой мыши узел *Results*;
- правой кнопкой открыть контекстное меню;
- выбрать команды: *Create Modal Solution Data Report* или *Create Fields Report*. Указанные команды не конечные, а имеют дальнейший выбор.

Наиболее часто используемые варианты для *Create Modal Solution Data Report*:

- *Rectangular Plot* – график в прямоугольной системе координат;
- *Polar Plot* – график в полярной системе координат;
- *Data Table* – таблица с данными;
- *Smith Chart* – диаграмма Смита;
- *3D Rectangular Plot* – 3D-график в декартовой системе координат;
- *3D Polar Plot* – 3D-график в полярной системе координат.

Для вывода графической характеристики коэффициента деления необходимо:

- в дереве проекта выделить левой кнопкой мыши узел *Results*;
- правой кнопкой открыть контекстное меню;

- выбрать команды: *Create Modal Solution Data Report*>*Rectangular Plot*;
- откроется окно *Report: CoaxT*;
- в поле *Context* выбрать решение в диапазоне частот (*Setup1: Sweep* в поле *Solution*) и диапазон частот (*Sweep* в поле *Domain*);
- в поле *Category* выбрать *S Parameter*;
- в поле *Quantity* выбрать *S(P2,P1)*, а в поле *Function* – *dB*;
- удерживая клавишу *Ctrl*, выбрать *S(P3,P1)*, и, отпустив *Ctrl* в поле *Function* выбрать *dB*;
- удерживая клавишу *Ctrl*, выбрать *S(P1,P1)*, и, отпустив *Ctrl* в поле *Function* выбрать *dB*. В результате получатся установки для графика, как показано на рисунке 4.7;
- нажать кнопку *New Report* и далее *Close*. Будет сформирован график зависимости коэффициента деления для проектируемого делителя мощности на основе коаксиальной линии от частоты в заданном ранее диапазоне.

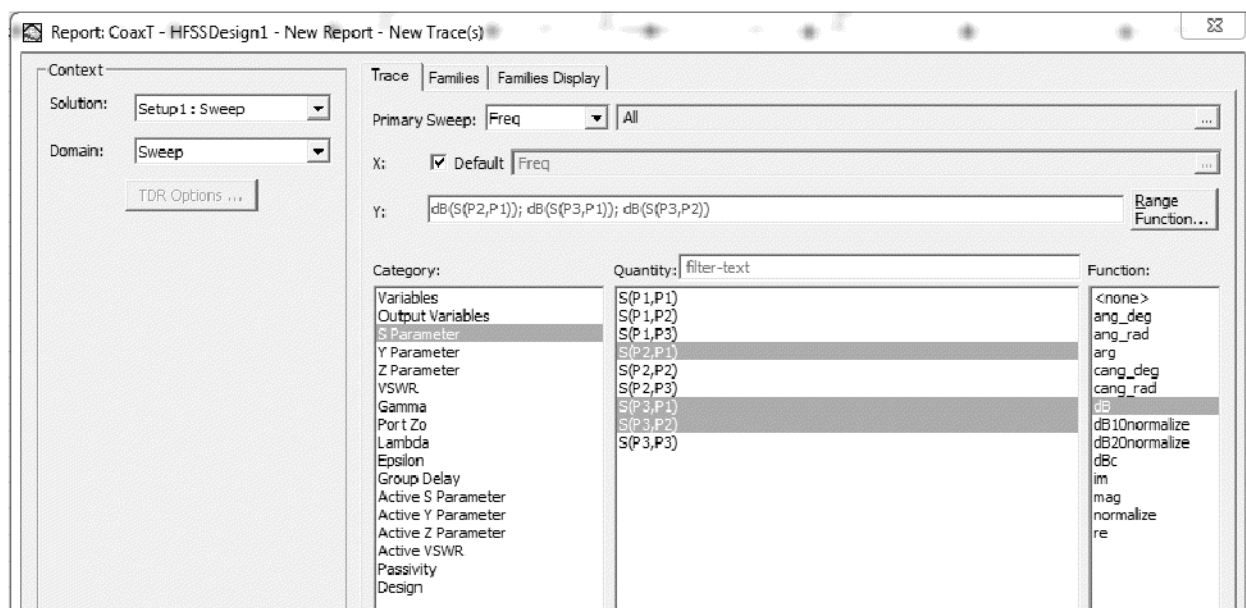


Рисунок 4.7 – Установки для вывода графической характеристики коэффициента деления

График можно:

- скопировать в буфер обмена, нажав в окне графика правую кнопку

мышь и выбрав в контекстном меню команду: *Copy Image*;

- сохранить в виде отдельного файла рисунка, если нажать в окне графика правую кнопку мыши и выбрать в контекстном меню команду: *Export...* Далее необходимо задать имя файла, путь сохранения и формат рисунка;

- сохранить в виде текстового файла, если нажать в окне графика правую кнопку мыши и выбрать в контекстном меню команду: *Export...* Далее необходимо задать имя файла, путь сохранения и выбрать формат текстового файла *txt*.

Выполните все указанные действия. Рисунок из буфера обмена можно использовать для составления отчета по практической работе. Файл рисунка и текстовый файл должны быть представлены в электронном виде при защите работы.

Самостоятельно построить графические характеристики:

- зависимости коэффициента стоячей волны от частоты;
- зависимости коэффициента отражения от частоты;
- постоянной распространения собственных волн каждого порта от частоты;
- зависимости характеристического сопротивления каждого порта от частоты;
- зависимости длины волны от частоты;
- зависимости групповой задержки от частоты.

Каждый график сохранить в буфер обмена для отчета, в виде рисунка и текстового файла.

Для вывода значений коэффициентов матрицы рассеяния в виде таблицы необходимо:

- в дереве проекта выделить левой кнопкой мыши узел *Results*;
- правой кнопкой открыть контекстное меню;
- выбрать команды: *Create Modal Solution Data Report>Data Table*;

- откроется окно *Report: CoaxT*;
- в поле *Context* выбрать решение для фиксированной (центральной) частоты (*Setup1: LastAdaptive* в поле *Solution*);
- в поле *Category* выбрать *S Parameter*;
- в поле *Quantity* выбрать $S(P1,P1)$, а в поле *Function* – $\langle none \rangle$;
- удерживая клавишу *Ctrl*, выбрать $S(P1,P2)$, и, отпустив *Ctrl* в поле *Function* выбрать $\langle none \rangle$;
- удерживая клавишу *Ctrl*, выбрать $S(P1,P3)$, и, отпустив *Ctrl* в поле *Function* выбрать $\langle none \rangle$. В результате получатся установки для таблицы, как показано на рисунке 4.8;
- нажать кнопку *New Report* и далее *Close*. Будет сформирована таблица первой строки коэффициентов матрицы рассеяния для проектируемого делителя мощности на основе коаксиальной линии.

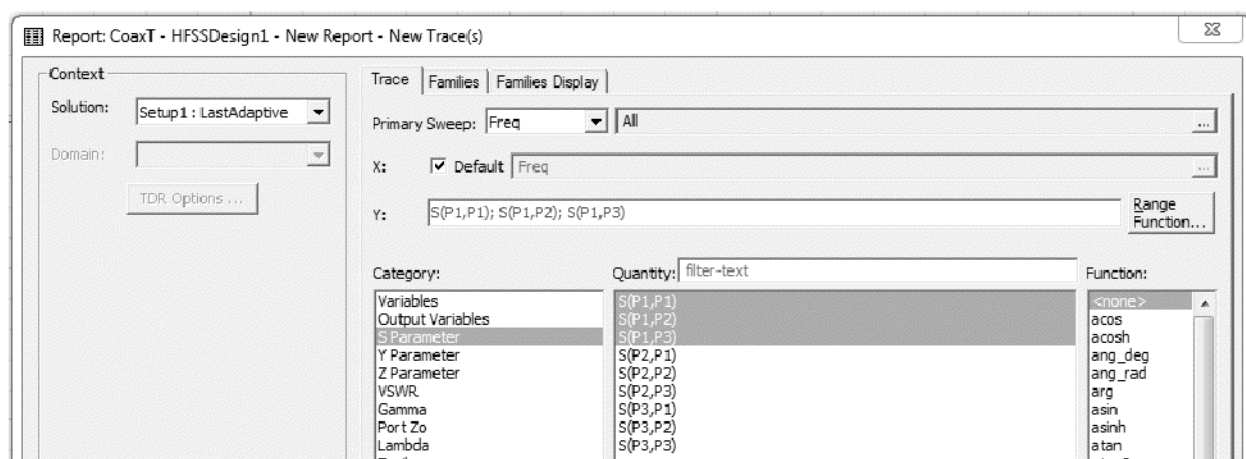


Рисунок 4.8 – Установки для вывода первой строки таблицы матрицы рассеяния

Аналогично сформировать таблицы для второй ($S(P2,P1)$, $S(P2,P2)$, $S(P2,P3)$) и третьей ($S(P3,P1)$, $S(P3,P2)$, $S(P3,P3)$) строк матрицы рассеяния. Расположив таблицы в окне конструкции одна под одной можно провести анализ полученной матрицы. Конечно, можно вывести все коэффициенты в одну таблицу, но она будет не очень наглядна для анализа. Таблицы

значений коэффициентов матрицы рассеяния должны быть приведены в отчете.

Этапы анализа:

- рассчитанная матрица рассеяния для данного устройства должна обладать свойствами взаимности:

$$\begin{cases} S_{21} = S_{12}, \\ S_{31} = S_{13}, \\ S_{23} = S_{32}, \end{cases}$$

- если построить эквивалентную схему спроектированного делителя, используя теорию длинных линий, и пренебречь влиянием неоднородностей, то для элементов матрицы рассеяния должны выполняться соотношения:

$$\begin{cases} |S_{11}| = |S_{22}| = |S_{33}| = \frac{1}{3}; \\ |S_{21}| = |S_{31}| = \frac{2}{3}. \end{cases}$$

Рассмотреть результаты графиков коэффициентов и таблиц и убедиться, что на центральной частоте проекта указанные выше соотношения выполняются. Выявить диапазон частот, в котором соотношения выполняются с достаточно высокой точностью (от 1 до 5 %).

На этом задачу моделирования пассивного делителя мощности на основе коаксиальной линии можно считать завершенной.

3.2.9.6 Решить задачи исследования влияния геометрических размеров и заполнителя коаксиальной линии пассивного делителя мощности при:

- изменении внешнего диаметра (одно значение в сторону уменьшения и одно в сторону увеличения) при сохранении значений остальных геометрических размеров;

- изменении внутреннего диаметра (одно значение в сторону уменьшения и одно в сторону увеличения) при сохранении значений остальных геометрических размеров;

- изменении длины цилиндров коаксиальной линии (одно значение в сторону уменьшения и одно в сторону увеличения для всех цилиндров одинаково);

- изменении типа заполнителя коаксиальной линии.

Для всех задач привести результаты расчетов и сделать выводы.

3.3 Моделирование пассивного делителя мощности на основе прямоугольного волновода

В ходе решения данной задачи необходимо выполнить этапы:

- расчет параметров делителя мощности по известным формулам;
- черчение геометрической модели;
- описание материалов модели;
- определение портов и задание граничных условий;
- установка параметров решения задачи и выполнение расчета;
- анализ результатов расчета и их вывод в виде графиков и таблиц;
- получение решения в диапазоне частот;
- визуализация и вывод расчетов в виде графиков и таблиц;
- решение задачи при изменении положения перегородки;
- оптимизация пассивного делителя мощности на основе

прямоугольного волновода.

3.3.1 Черчение геометрической модели, описание материалов модели, определение портов и задание граничных условий.

Черчения всей конструкции будет состоять из следующих шагов:

- черчение одной части волноводного моста – отрезка волновода в виде параллелепипеда. Принять длину бокса равной трем длинам основной волны в волноводе;

- создание волноводного порта с линией интегрирования;
- дублирование секции, для создания двух других секций;
- объединение всех трех секций;

- черчение перегородки;
- вычитание объема перегородки из объема волноводного моста;
- задание математической переменной, связанной с положением перегородки.

Первые пять пунктов были подробно рассмотрены при построении геометрической модели пассивного делителя мощности на основе коаксиальной линии.

Задание материала и порта лучше сделать сразу для первого же элемента – прямоугольника. В этом случае не придется это делать каждый раз для каждого элемента и порта. Задание материала выполняется так же, как описано в примере п. 3.2. Тип материала заполнителя выбирается согласно варианту задания. Для задания порта необходимо:

- выбрать грань первого порта;
- на первой странице мастера (*Wave Port: General*) задать его имя и нажать кнопку «Далее>»;
- на второй странице выбрать количество мод, равное единице;
- на этой же странице определить линию интегрирования, выбрав *New Line* из списка *Integration Line*;
- на этой же странице в окне 3D-конструкции выбрать начальную точку вектора, щелкая на центр границы нижней поверхности. Курсор должен «захватиться» к ребру в этой точке, преобразуясь в треугольник (рисунок 4.9);
- выбрать координаты конечной точки, щелкая точку в центре верхней стороны волновода. Построенная линия интегрирования показана красным вектором на рисунке 4.9;
- для *Characteristic Impedance* установить Z_{PI} , а также *Set mode polarity using integration lines*, и нажать кнопку «Далее>»;
- на третьей странице оставить параметры по умолчанию (*Do Not Renormalize*) и нажать кнопку Готово.

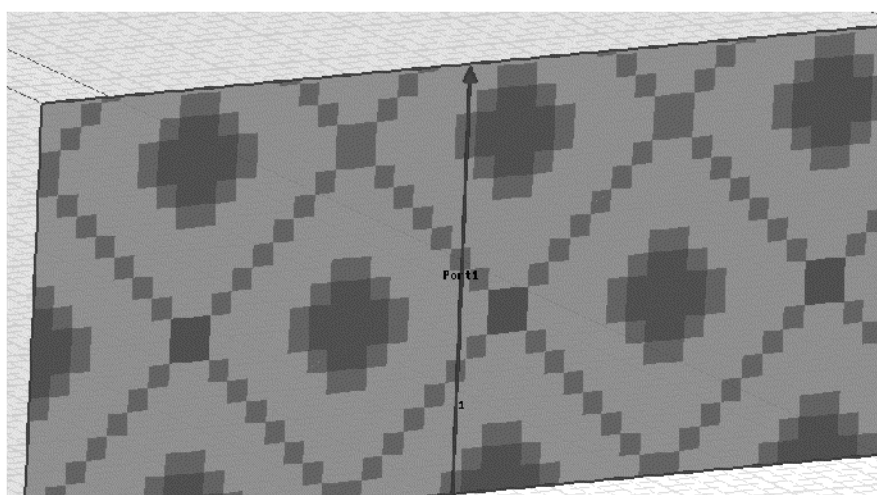


Рисунок 4.9 – Выбор начальной и конечной точки импедансной линии порта *Port1*

Дублирование начерченного бокса:

- чтобы вместе с геометрией можно продублировать и граничные условия, включая настройки портов, необходимо выполнить команды: *Tools>Options>HFSS Options...* и в открывшемся окне *HFSS Options* в разделе *Assignment Options* установить «птичку» для *Duplicate boundaries/mesh operations with geometry*;

- перейти в режим выделения объектов и выделить начерченный бокс как объект;

- выполнить команду: *Edit>Duplicate>Around Axes* или нажать на кнопку  на панели инструментов;

- в открывшемся окне *Duplicate Around Axes* выбрать ось *Z*, установить значение угла поворота (*Angle*) – плюс 90° , задать общее количество создаваемых объектов, включая исходный объект – два (*Total number*), нажать кнопку *OK*;

- исходный объект дублируется и получает новое имя с добавкой «_1». Он сдвинулся вокруг оси *Z* на угол 90° (рисунок 4.10). «Птичку» у атрибута *Attach To Original Object* необходимо убрать;

- порт *Port1* будет продублирован с геометрией бокса. Новый порт

Port2 можно увидеть в разделе *Excitations* в дереве проекта.

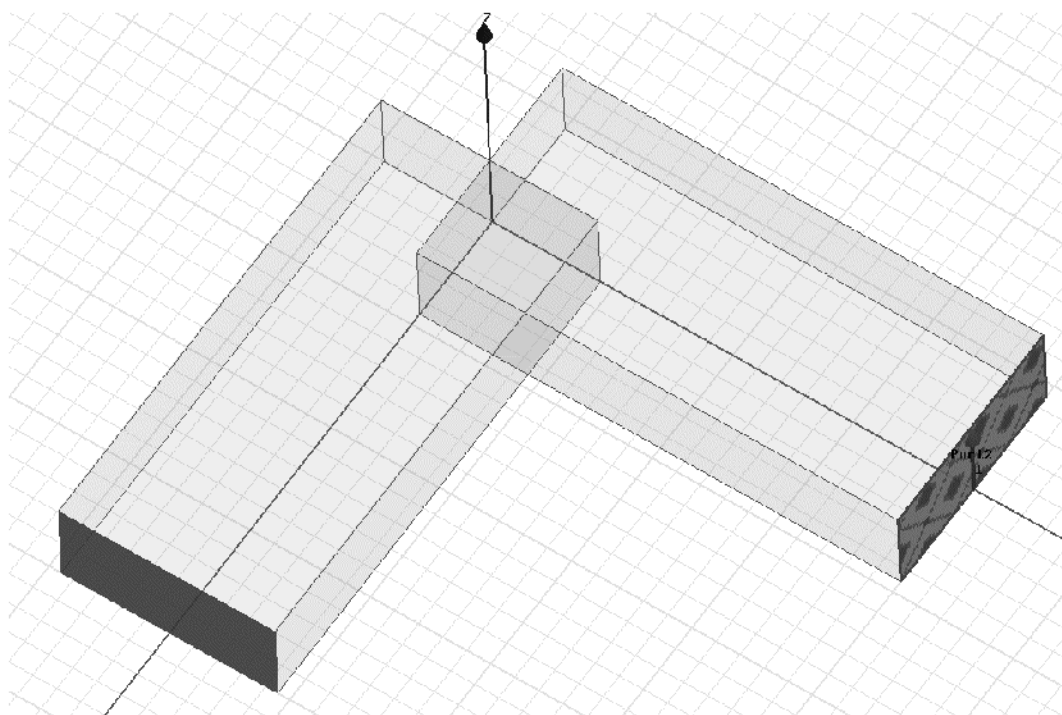


Рисунок 4.10 – Дублирование и вращение первого бокса

Аналогично выполнить дублирование первого бокса, задав те же параметры, кроме угла поворота – минус 90° . Новый порт *Port3* появится в разделе *Excitations* в дереве проекта.

Перед объединением объектов в общую структуру нужно убедиться, что *HFSS* не будет создавать копии исходного объекта перед соединением их, для чего надо снять опцию дублирования в диалоговом окне *Modeler Options*, появляющегося после выполнения команд: *Tools>Options>Modeler Options...*. В разделе *Clone* убрать «птичку» для *Clone tool objects before uniting*.

Операция объединения объектов выполняется так же, как описано в примере п. 3.2.

Для создания индуктивной перегородки необходимо:

- начертить элемент *Box* с необходимыми размерами (длина перегородки равна 0,5 от ширины волновода, высота перегородки – высота волновода, толщина перегородки – 0,1 ширины волновода);
- установить в требуемое положение (симметрично портов «2» и «3»);

- вычесть начерченный и установленный элемент перегородки из модели разветвителя.

Операция вычитания объектов выполняется так же, как описано в примере п. 3.2, вычитать необходимо бокс перегородки. Окончательный вид модели пассивного делителя мощности на основе прямоугольного волновода приведен на рисунке 4.11.

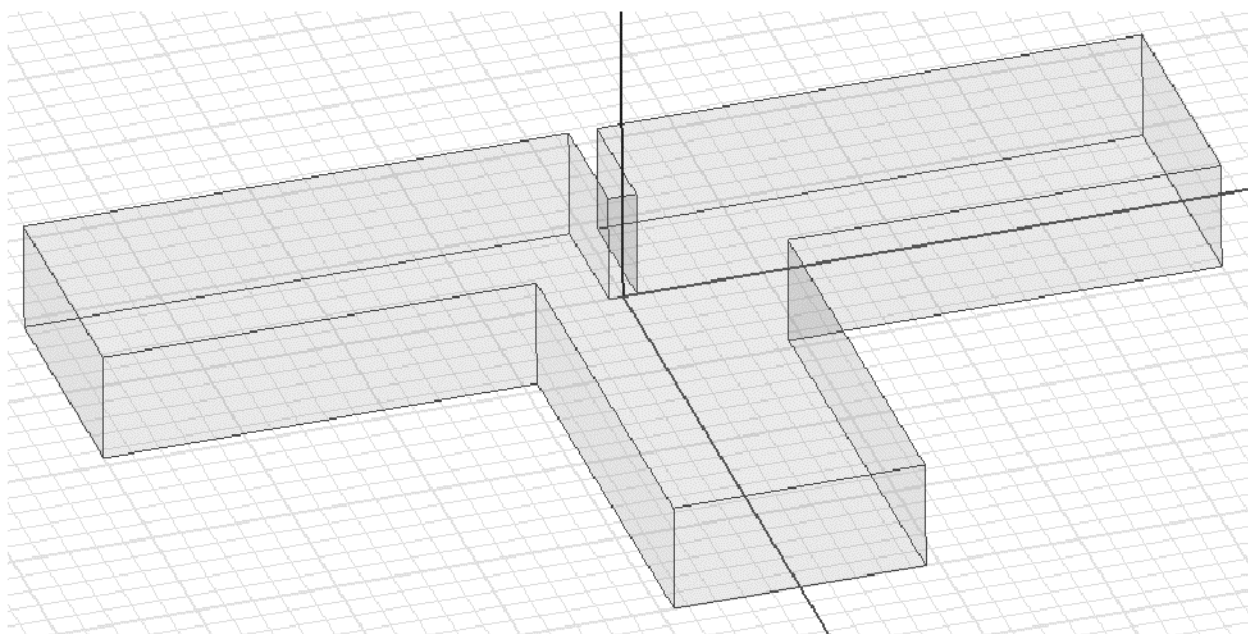


Рисунок 4.11 – Модель пассивного делителя мощности на основе прямоугольного волновода

Для задания математической переменной, связанной с положением перегородки, необходимо:

- создать в проекте переменную смещения. Для этого, выделив в дереве проекта узел самого проекта, нажать на нем правую кнопку мыши и выполнить команду: *Project Variables*;

- в открывшемся окне *Properties* во вкладке *Project Variables* установить переключатель в поле *Value* и нажать кнопку *Add*;

- в открывшемся окне *Add Property* ввести имя переменной, например, *offset* (смещение), и значение переменной *Value*, равное нулю. Обязательно рядом с числовым значением указать единицы измерения без пробела! В

результате в поле *Value* получится запись «0mm». Нажать кнопку *OK*;

- теперь в окне *Properties* появится строка введенной переменной, которой будет присвоено имя со значком «\$» в начале имени. Именно в таком виде имя переменной необходимо использовать в проекте. В последующих колонках будет указано числовое значение переменной, единица измерения и вид отображения в проекте (*\$offset – 0 – mm – 0mm*). Нажать кнопку *OK*;

- в окне модели выбрать как объект перегородку и открыть окно свойств;

- в поле позиции для координаты *y* к числовому значению дописать имя переменной смещения (например, «*\$offset-0.05mm*», где *\$offset* – имя переменной смещения, *0.05mm* – это половина толщины перегородки. Координата положения и толщина перегородки в каждом варианте задания будет иметь свое значение). Поскольку теперь координата *y* задана в единицах размеров, то и к координатам *x* и *z* необходимо дописать единицы измерения (в итоге получится запись координаты в виде: *-0.45mm , \$offset-0.05mm , 0mm*).

На этом черчение геометрической модели всей конструкции, описание материалов модели, определение портов и задание граничных условий завершено.

По желанию, модель может быть рассечена плоскостью симметрии, которая проходит через все три порта.

Вид модели в нескольких проекциях необходимо представить в отчете в виде рисунков.

3.3.2 Установка параметров решения задачи и выполнение расчета.

Чтобы произвести установку параметров решения задачи для данного проекта необходимо выполнить такие же действия, как в примере п. 3.2. Для этого:

- по данным варианта условия задачи рассчитывается и

устанавливаются значений центральной частоты;

- задается количество итераций – шесть;
- задается *Maximum Delta S* – 0,02. После нужно нажать кнопку *OK*.

На этом установку параметров решения задачи, а также создание проекта можно считать законченным.

Далее необходимо провести проверку созданного проекта, выполнив команды: *HFSS>Validation Check...* или, нажав на кнопку  на панели инструментов. Чтобы начать решение задачи анализа необходимо выполнить команды: *HFSS>Analyze All* или нажать на кнопку  на панели инструментов. Более подробное описание действий – см. пример п. 3.2.

3.3.3 Анализ результатов расчета и их вывод в виде графиков и таблиц.

В ходе данного пункта необходимо:

- выполнить просмотр результатов в диалоговом окне *Solutions*;
- выполнить просмотр собственных волн портов;
- выполнить просмотр распределения полей и анимирование изображений;
- получить решения в диапазоне частот;
- выполнить визуализацию и вывод результатов в виде таблиц и графиков.

3.3.3.1 Выполнение указанных заданий полностью аналогично примеру п. 3.2. для первого этапа также необходимо определить характеристическое сопротивление и длину волны теоретическим путем и сравнить со значениями, рассчитанными программой. Сделать выводы.

3.3.3.2 В отчет необходимо привести рисунки из программы, отражающие структуру электрического поля собственной волны каждого порта.

3.3.3.3 Распределение полей выполнить для тех же плоскостей и по всему объему устройства, как и в примере п. 3.2.

3.3.3.4 Для всех выполненных распределений необходимо сделать

анимации, включая анимацию распределения полей векторов электрического и магнитного полей по всему объему устройства (см. пример п. 3.2). Все файлы формата *avi* должны быть предоставлены в электронном виде на защите.

3.3.3.5 Для получения решения в диапазоне частот необходимо выполнить такие же операции, как в примере п. 3.2. Исключение составляет метод развертки: вместо развертки *Discrete* нужно выбрать интерполяцию *Interpolating*. В этом случае будет плавная частотная характеристика. Далее необходимо:

- ввести значения диапазона частот в соответствии с заданием;
- ввести шаг изменения частоты (выбрать самостоятельно так, чтобы характеристика получилась как можно более плавной, т.е., не менее 50 точек);
- выполнить проверку и выполнить решение задачи анализа.

3.3.3.6 Для визуализации и вывода расчетов в виде таблиц и графиков необходимо выполнить такие же действия, как и в примере п. 3.2. Построить графические характеристики:

- зависимости коэффициента деления от частоты;
- зависимости коэффициента стоячей волны от частоты;
- зависимости коэффициента отражения от частоты;
- постоянной распространения собственных волн каждого порта от частоты;
- зависимости характеристического сопротивления каждого порта от частоты;
- зависимости длины волны от частоты;
- зависимости групповой задержки от частоты.

Рисунки из буфера обмена можно использовать для составления отчета по практической работе. Файлы рисунков и текстовые файлы должны быть представлены в электронном виде при защите работы.

Вывести значения коэффициентов матрицы рассеяния в виде таблицы. Рассмотреть результаты графиков коэффициентов и таблиц и убедиться, что на центральной частоте проекта указанные в примере п. 3.2 соотношения выполняются. Выявить диапазон частот, в котором соотношения выполняются с достаточно высокой точностью (от 1 до 5 %).

На этом задачу моделирования пассивного делителя мощности на основе прямоугольного волновода можно считать завершенной.

3.3.4 Решение задачи при изменении положения перегородки.

3.3.4.1 Для изменения положения перегородки необходимо изменить значение переменной *\$offset*, выделив в дереве проекта узел самого проекта, нажав правую кнопку мыши и выполнив команду: *Project Variables*. В открывшемся окне *Properties* в поле *Value* ввести значение смещения, равное 0,2 толщины перегородки и нажать кнопку *OK*.

В окне 3D-конструкции будет видно смещение перегородки. Привести полученный рисунок модели в отчет. Далее необходимо:

- выполнить проверку проекта и начать решение задачи анализа;
- выполнить просмотр распределения амплитуды электрического поля и его анимацию на одной поверхности модели в плоскости, параллельной плоскости *XY*. Результаты распределения и анимации сохранить в буфере обмена для отчета, в виде отдельных файлов рисунков и текстовых файлов и в виде видео файла формата *avi*.

3.3.4.2 Выполнить решение задачи для значений переменной *\$offset*:

- 2/3 от ширины волновода;
- 1/2 от ширины волновода плюс 1/2 толщины перегородки.

Для каждого случая привести необходимые рисунки, текстовые и видео файлы.

3.3.4.3 Изменяя значение переменной *\$offset* от нулевого значения до максимального, пока перегородка не приблизится максимально близко к одному из портов, получать картинку и анимацию распределения амплитуды

электрического поля на поверхности модели в плоскости, параллельной плоскости XU . Для каждого случая картинку распределения поля копировать в буфер обмена и приводить в отчет.

3.3.4.4 Проведя анализ данных, полученных в п. 3.3.4.3 выяснить, есть ли такое положение перегородки, при котором сигнал в портах «2» и «3» будет практически равен нулю. Если такие положения существуют, то необходимо выявить координаты перегородки максимально точно, построить картинку распределения поля и анимацию и сохранить их в отчете и в отдельных файлах.

3.3.4.5 Построить в одной координатной плоскости графические характеристики зависимости коэффициента деления от частоты для следующих положений перегородки:

- смещение равно нулю;
- смещение равно 0,2 толщины перегородки;
- смещение равно $2/3$ от ширины волновода;
- смещение равно $1/2$ от ширины волновода плюс $1/2$ толщины перегородки;
- при котором сигнал в портах «2» и «3» будет практически равен нулю, если такое решение найдено в п. 3.3.4.4.

Методика построения графика описана ранее, но в данном случае необходимо задать требуемые вариации переменной *\$offset*:

- выбрать необходимые установки и величины для отображения, как описано ранее;
- открыть вкладку *Families* в окне *Report* и установить переключатель в положение *Available variations*;
- в открывшейся таблице установить «птички» слева от требуемых к выводу значений переменной *\$offset*;
- перейти на вкладку *Trace* и нажать кнопки *New Report* и *Close*.

График скопировать в буфер обмена для отчета, сохранить в виде

рисунка и текстового файла.

Оценить коэффициент деления (передачи) при каждом из этих значений положения переключки с использованием маркеров на графиках, а также с помощью таблиц коэффициентов матрицы рассеяния. Сделать выводы.

3.3.5 Оптимизация пассивного делителя мощности на основе прямоугольного волновода.

Программа *Optimetrics*, входящая в систему *Ansoft HFSS*, дает возможность найти лучшую конструкцию, изменяя ее геометрию, параметры материалов и элементов. В процессе проектирования сначала создается первоначальная модель, или номинальная конструкция, и затем задаются параметры конструкции, которые изменяются.

Этими параметрами может быть почти любой параметр, имеющий численное значение в *HFSS*. Например, можно параметризовать геометрию модели, свойства материала, или граничные условия. С помощью *HFSS* можно выполнить следующие типы исследований номинального проекта, при оптимизации конструкции:

- *Parametric* (параметрический анализ). Задание одного или большего числа изменяемых параметров, составляющих ряд значений в заданном диапазоне. *HFSS* выполняет анализ при каждом изменении параметров;

- *Optimization* (оптимизация). Задается целевая функция и цель оптимизации. *Optimetrics* изменяет значения параметров проекта так, чтобы достигнуть заданной цели;

- *Sensitivity* (чувствительность). Расчет чувствительности характеристик к небольшому изменению заданных переменных;

- *Tuning* (подстройка). Переменные значения изменяются в интерактивном (ручном) режиме, и для каждого положения настраиваемой конструкции рассчитываются характеристики;

- *Statistical* (статраспределение). Нахождение статистического

распределения характеристик проекта, вызванное случайным распределением переменных.

В данной задаче необходимо оптимизировать пассивный делитель мощности на основе прямоугольного волновода. В результате оптимизации будет найдено оптимальное положение перегородки, при котором мощность в порту «3» будет в n раз больше (меньше), чем мощность в порту «2». Этот искомый результат называется целью оптимизации. *Optimetrics* будет варьировать конструкцию проекта, пока целевая функция не достигнет минимума.

До выполнения оптимизации, выполняется т. н. параметрический анализ. Для этого используется введенная ранее в проект переменная *\$offset*, равная смещению перегородки. В процессе параметрического анализа выполняется расчет *S*-параметров, и находится т. о., как каждое изменение конструкции влияет на разделение мощности на выходах делителя. Это поможет задать разумный диапазон величин смещения *\$offset*, для последующей оптимизации.

Параметрический анализ и оптимизацию рекомендуется проводить на одной частоте – центральной заданного диапазона, для чего:

- сохранить текущий проект под новым именем, например, *RectT_Optim*;
- удалить установку *Sweep1* в дереве проекта при *Analysis>Setup1*.

3.3.5.1 Установки параметрического анализа.

Установки параметрического анализа включают все изменения проекта, необходимые, когда *Optimetrics* будет управлять *HFSS*.

Чтоб прибавить параметрические установки к проекту, необходимо:

- щелкнуть правой кнопкой мыши *Optimetrics* в дереве проекта;
- выполнить команды: *Add>Parametric* в меню. Появляется диалоговое окно *Setup Sweep Analysis*.

Чтобы прибавить изменяемую переменную необходимо:

- в закладке *Sweep Definitions* нажать *Add*. Появится окно *Add/Edit Sweep*;

- смещение *\$offset* находится в списке *Variable* по умолчанию. Это – переменная, значение которой будет изменять в процессе оптимизации;

- выбрать *Linear step* как равномерный шаг изменения переменной;

- в поле *Start* указать значение «0» и выбрать единицу измерения;

- в поле *Stop* указать максимально возможное значение смещения перегородки и выбрать единицу измерения;

- в поле *Step* указать шаг перемещения перегородки и выбрать единицу измерения. Размер шага определяет число изменений конструкции между начальным и конечным значениями. *HFSS* решит модель на каждом шаге в указанном диапазоне, включая начальное и конечное значения;

- щелкнуть *Add*. Справа появится окно с выбранной переменной и ее описанием;

- нажать *OK*. Произойдет переход к диалоговому окну *Setup Sweep Analysis*. Кроме равномерного шага в диапазоне изменения, можно выбрать разбиение на заданное количество шагов (*Linear count*), логарифмический масштаб изменения диапазона (*Exponential count*) и т. д.;

- по умолчанию *HFSS* не сохраняет полученные значения электромагнитного поля для каждой измененной конструкции. Если нужно сохранить решения поля, чтобы рассчитать характеристики на этапе постобработки данных, в закладке *Options* нужно выбрать режим *Save Fields and Mesh*. В закладке *Table* будут перечислены все значения переменной *\$offset*, при которых будет решаться задача. Это дает возможность увидеть вариации проекта, которые будут решены и вручную скорректировать величины изменений, в случае необходимости.

Чтобы задать рассчитываемые характеристики необходимо:

- на вкладке *Calculations* нажать кнопку *Setup Calculations...*, а в открывшемся окне *Add/Edit Calculation* нажать кнопку *Output Variables...*;

- в текстовом поле *Name* задать имя, например, «*Power11*»;
- в списке *Category*, выбрать *S Parameter*, в списке *Quantity* – *S (Port 1, Port 1)*, а списке *Function* – модуль параметра: *mag*;
- нажать кнопку *Insert Into Expression*, в конце выражения в строке, в текстовом поле *Expression*, напечатать «*» (знак умножения) и затем снова нажать *Insert Into Expression*. В строке в текстовом поле *Expression* будет записано выражение «*mag(S(Port1,Port1))*mag(S(Port1,Port1))*», т. е. рассчитывается выражение

$$Power11 = |S11|^2;$$

- нажать кнопку *Add*. Новая переменная *Power11* и выражение, которое она представляет, добавляется в список выходных переменных сверху диалогового окна;
- аналогично создать переменные «*Power21*» и «*Power31*» и выражения для их расчета:

$$Power21 = mag(S(Port2,Port1))*mag(S(Port2,Port1));$$

$$Power31 = mag(S(Port3,Port1))*mag(S(Port3,Port1));$$

- нажать кнопку *Done*;
- в окне *Add/Edit Calculation* выбрать параметр «*Power11*» и нажать кнопку *Add Calculation*, выбрать параметр «*Power21*» и нажать кнопку *Add Calculation*, выбрать параметр «*Power31*» и нажать кнопку *Add Calculation*;
- нажать кнопку *Done*. В окне *Setup Sweep Analysis*, во вкладке *Calculations* будут показаны три рассчитываемых выражения. Нажать кнопку *OK*.

3.3.5.2 Выполнение параметрического анализа.

Для запуска параметрического анализа необходимо выделить в дереве проектов правой кнопкой мыши созданную установку *ParametricSetup1* и выбрать команду *Analyze*.

HFSS вычисляет электромагнитное поле для каждого указанного

изменения конструкции, кроме уже решенных во время расчета номинального проекта.

3.3.5.3 Построение графика зависимости S -параметров от положения перегородки.

Алгоритм построения графиков не отличается от предыдущих случаев, за исключением:

- в поле *Quantity* выбрать $S(P1,P1)$, а в поле *Function* – *mag*;
- удерживая клавишу *Ctrl*, выбрать $S(P1,P2)$, и, отпустив *Ctrl* в поле *Function* выбрать *mag*;
- удерживая клавишу *Ctrl*, выбрать $S(P1,P3)$, и, отпустив *Ctrl* в поле *Function* выбрать *mag*;
- в качестве величины *Primary Sweep* выбрать из выпадающего списка переменную *\$offset*. После этого выбора для значений оси X будет по умолчанию в соответствующем поле выставлена эта переменная;
- нажать кнопку *New Report* и далее *Close*. Будет сформирован график зависимости S -параметров от положения перегородки.

Анализ графика должен показать, что сначала по мере удаления перегородки от центра симметрии к порту «2» передача к порту уменьшается, а к порту «3» увеличивается. Одновременно изменяется и отражение в сторону порта «1», т. к. электромагнитные волны отражаются от стенки напротив порта. В результате анализа необходимо найти такое значение положения переключки (переменная *\$offset*), при котором модуль коэффициента S_{11} будет иметь минимальное значение. Это значение и является оптимальным.

3.3.5.4 Создание графика зависимости распределения мощности от положения перегородки.

Алгоритм построения графиков не отличается от предыдущих случаев, за исключением:

- в поле *Category* выбрать *Output Variables*;

- в поле *Quantity* выбрать *Power11*, а в поле *Function* – *<none>*;
- удерживая клавишу *Ctrl*, выбрать *Power21*, и, отпустив *Ctrl* в поле *Function* выбрать *<none>*;
- удерживая клавишу *Ctrl*, выбрать *Power31*, и, отпустив *Ctrl* в поле *Function* выбрать *<none>*;
- в качестве величины *Primary Sweep* выбрать из выпадающего списка переменную *\$offset*. После этого выбора для значений оси *X* будет по умолчанию в соответствующем поле выставлена эта переменная;
- нажать кнопку *New Report* и далее *Close*. Будет сформирован график зависимости распределения мощности от положения перегородки.

Анализируя построенный график необходимо найти такое значение положения перегородки, при котором соблюдается требуемое по заданию соотношение распределения мощности между портами «2» и «3». Это и будет начальное значение переменной *\$offset*. Также по графикам необходимо определить диапазон, в котором к заданному порту идет наибольшая мощность и при этом отражение к первому порту минимально.

3.3.5.5 Чтобы посмотреть картину распределения амплитуды электрического поля и его анимацию на одной поверхности модели в плоскости, параллельной плоскости *XY*, в зависимости от положения переключки, необходимо выполнить тот же алгоритм, что и ранее, за исключением:

- выбрать пункт *New...* ;
- в качестве *Swept Variable* выбрать переменную *\$offset* и нажать кнопку *OK*.

Полученную анимацию необходимо сохранить в файл формата *avi*.

3.3.5.6 Окончательная настройка и выполнение оптимизации.

На первом этапе необходимо выбрать переменную оптимизации, для этого:

- в дереве проектов нажать правой кнопкой мыши на название проекта

и в открывшемся меню выбрать команду *Project Variables*;

- на вкладке *Optimization* в ячейку *Nominal Value* переменной *\$offset* вписать значение равное «0» и установить «птичку» в ячейку *Include*;

- в поля *min* и *max* вписать значения диапазона положения переменычки, в котором к заданному порту идет наибольшая мощность и при этом отражение к первому порту минимально (см. п. 3.3.5.4);

- нажать кнопку *OK*.

На втором этапе необходимо задать цель оптимизации, для этого:

- в дереве проектов нажать правой кнопкой мыши на узел *Optimetrics* и в открывшемся меню выполнить команды: *Add>Optimization...*;

- в открывшемся окне *Setup Optimization* на вкладке *Goals* выбрать метод оптимизации. Для данного проекта рекомендуется использовать *Quasi Newton*;

- максимальное количество итераций установить не менее 100, а для мощных ПК – не менее 1000. Когда выполнится это число расчетов целевой функции, оптимизация остановится. Иначе *HFSS* продолжает выполнять итерации, пока не будет достигнута заданная целевая функция, или наступят другие ограничения;

- на вкладке *Options* необходимо отключить опцию *Save Fields and Mesh*, т. к. не нужны будут поля, поскольку их расчет не будет использоваться для включения в целевую функцию.

Далее добавляется целевая функция, которая представляет собой цель оптимизации – найти такое положение перегородки, при котором осуществляется заданное по условию распределение мощности между портами «2» и «3». При этом используются рассчитанные ранее *S*-параметры. Для этого:

- на вкладке *Goals* нажать кнопку *Setup Calculations*;

- в открывшемся окне *Add/Edit Calculation* выбрать *Output Variables* в поле *Category* и в строку *Calculation Expression* ввести выражение, для

вычисления распределения мощности между портами «2» и «3» согласно заданию;

- нажать кнопку *Add Calculation* и затем кнопку *Done*;

- в окне *Setup Optimization* на вкладке *Goals* в поле *Calculation* будет вписано выражение для расчета распределения мощности. В поле *Condition* необходимо установить знак математической операции для выражения, а в поле *Goals* – числовое значение выражения. Например, если требуется, чтобы в порт «3» распределялось в два раза больше мощности, чем в порт «2», то в этом случае окно *Setup Optimization* будет выглядеть так, как показано на рисунке 4.12;

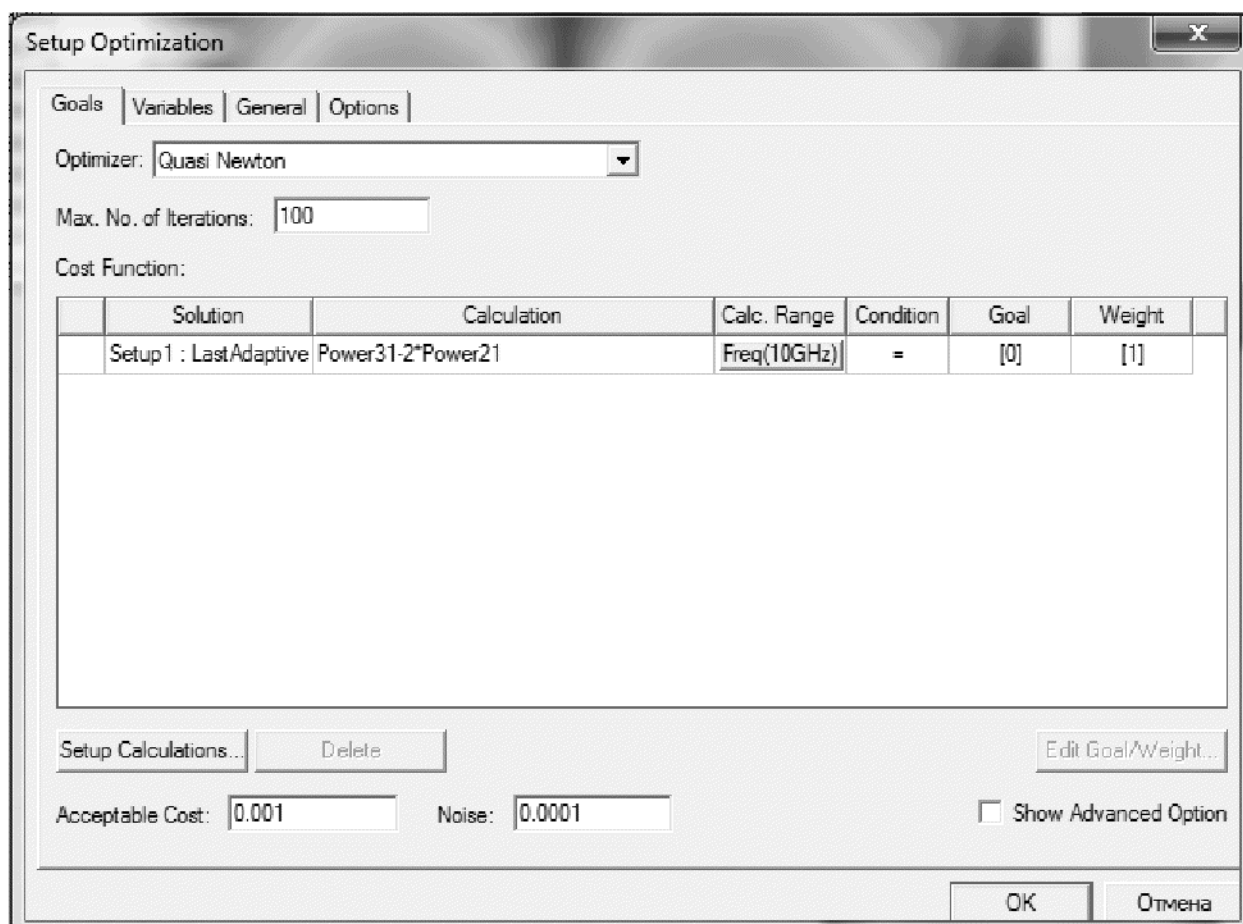


Рисунок 4.12 – Настройки для оптимизации положения перегородки с целью передачи мощности в порт «3» в два раза большей, чем в порт «2»

- в поле *Calc. Range* будет указана центральная частота, установленная

ранее для проекта. Изменять ее не следует;

- значение *Acceptable Cost* задает точность оптимизации целевой функции. Если значение целевой функции станет меньше этого значения, оптимизация остановится. Можно использовать значение, указанное на рисунке 4.12;

- значение шума *Noise* также рекомендуется оставить таким же, как на рисунке 4.12;

- значение *Weight* задает вес по значимости каждой цели, если их несколько. Для одной цели данного проекта рекомендуется установить значение, равное единице.

Далее необходимо выполнить модификацию начального значения переменной – это первое значение, при котором выполняется решение в процессе оптимизации. Это значение было определено ранее (см. п. 3.3.5.4). Для модификации необходимо:

- открыть вкладку *Variables*;
- вписать требуемое значение в ячейку *Starting Value* и «птичку» в ячейки *Override* и *Include*;

- минимальное и максимальное значения установить согласно диапазону, выявленному ранее (см. п. 3.3.5.4);

- на вкладке *General* выбрать *ParametricSetup1* в списке *Parametric Analysis*;

- выбрать опцию *Solve the parametric sweep before optimization*. В этом случае *HFSS* выполнит параметрический анализ перед оптимизацией, а после оптимизации перерисует геометрию делителя с новой оптимальной величиной *\$offset*;

- выбрать опцию *Update design parameter' values after optimization* (подстановка величин параметров после оптимизации);

- нажать *OK* диалогового окна *Setup Optimization*. В выбранном режиме начальное значение переменной, установленное ранее, игнорируется, если в

результате параметрического анализа находится более подходящее начальное значение.

Теперь можно запустить оптимизацию. Для этого в дереве проекта в разделе *Optimetrics*, нужно нажать правой кнопкой мыши установку *OptimizationSetup1*, и затем выполнить команду *Analyze* в выплывающем меню.

После выполнения анализа можно просмотреть изменение целевой функции, для этого:

- щелкнуть правой кнопкой мыши *OptimizationSetup1* в дереве проекта, и затем нажать *View Analysis Result...* в меню. Откроется окно *Post Analysis Display*;

- в закладке *Result* выбрать *Plot*. Появляется график целевой функции при каждой итерации. Видим, что оптимизация заканчивается, когда значение целевой функции достигает введенного выше параметра *Acceptable Cost*;

- точные значения целевой функций на каждом шаге оптимизации можно вывести в таблицу, если выбрать *Table*. Здесь видно оптимальное значение переменной, при которой достигается минимальная целевая функция. Это значение уже установлено программой для модели делителя. Его можно увидеть в настройках проекта в поле *Value* вкладки *Project Variables*, если в дереве проектов нажать правой кнопкой мыши на название проекта и в открывшемся меню выбрать команду *Project Variables*. Необходимо сравнить эти значения, чтобы убедиться в том, что программа выполнила установку оптимального значения переменной. Если этого не произошло по каким-то причинам, то в виде *Table* вкладки *Result* окна *Post Analysis Display* необходимо курсором мыши выбрать нужную итерацию и нажать кнопку *Apply*. После выполнить проверку установленного значения в *Project Variables*. Если требуется вернуть геометрию к номинальному проекту, нужно нажать *Revert* в виде *Table* вкладки *Result* окна *Post Analysis*

Display.

3.3.5.7 Повторный анализ конструкции с оптимальной установленной перегородкой.

Чтобы посмотреть картину распределения амплитуды электрического поля и его анимацию на одной поверхности модели в плоскости, параллельной плоскости XY , в зависимости от фазы, при оптимальном положении переключки, необходимо выполнить тот же алгоритм, что и ранее, за исключением:

- выбрать пункт *New...* ;
- в качестве *Swept Variable* выбрать *Phase*;
- установить количество шагов 59 и нажать кнопку *OK*.

Полученную картину распределения сохранить: в буфер обмена для использования в отчете, как картинку и текстовый файл, а анимацию сохранить в файл формата *avi*.

Чтобы построить график зависимости коэффициента деления от частоты необходимо:

- получить решения в диапазоне частот (см. п. 3.3.3.5), за исключением способа запуска решения задачи. Его необходимо выполнить, выбрав в дереве проектов правой кнопкой узел *Analysis>Setup1>Sweep* и выполнив в выпадающем меню команду *Analyze*. Выполнение такого способа запуска решения является обязательным!;

- воспользоваться рекомендациями п. 3.3.3.6 для вывода графика в диапазоне частот для оптимального положения переключки.

Рисунки из буфера обмена можно использовать для составления отчета по практической работе. Файлы рисунков и текстовые файлы должны быть представлены в электронном виде при защите работы.

Вывести значения коэффициентов матрицы рассеяния в виде таблицы. Рассмотреть результаты графиков коэффициентов и таблиц и убедиться, что на центральной частоте проекта требуемое соотношение распределения

мощности в порты «2» и «3» выполняется.

На этом задачу оптимизации пассивного делителя мощности на основе прямоугольного волновода можно считать завершенной.

4 Указания по технике безопасности

Перед проведением практического занятия следует изучить инструкцию по технике безопасности при работе на компьютере. Также следует соблюдать правила и требования, установленные для данного компьютерного класса.

5 Содержание отчета, форма и правила оформления отчета о выполненной работе

Отчет по практической работе выполняется на листах формат А4 согласно требований ГОСТ и ЕСКД и должен содержать следующие пункты:

- а) титульный лист с названием работы, дисциплины, кода группы, ФИО исполнителя и преподавателя;
- б) краткое теоретическое введение;
- в) условия, ход выполнения и решения задачи пункта 3;
- г) текст программы, разработанной для расчетов в системе компьютерной алгебры *MathCAD*;
- д) модель делителя мощности на основе коаксиальной линии и прямоугольного волновода;
- е) результаты решения из диалогового окна *Solutions* и их анализ;
- ж) расчет величин и оценка погрешности между теоретическими результатами и программным расчетом характеристического сопротивления коаксиальной линии (прямоугольного волновода) и длины волны;
- з) рисунки структуры электрического поля собственной волны каждого

порта делителя мощности на основе коаксиальной линии (прямоугольного волновода);

и) рисунки требуемых по заданию распределений полей в плоскостях и в объеме;

к) требуемые по заданию графические характеристики параметров делителя мощности;

л) анализ результатов графиков коэффициентов и таблиц;

м) результаты решения задачи исследования влияния геометрических размеров и заполнителя коаксиальной линии пассивного делителя мощности;

н) результаты решения задачи при изменении положения перегородки;

о) результаты решения задачи оптимизации пассивного делителя мощности на основе прямоугольного волновода;

п) выводы по результатам работы.

6 Контрольные вопросы и защита работы

6.1. Интерфейс программы *ANSYS HFSS*. Какие основные окна существуют? Каково их назначение?

6.2. Интерфейс программы *ANSYS HFSS*. Какие основные команды существуют? Каково их назначение?

6.3. Как выполняется создание эскиза объекта (координатные плоскости, команды, единицы измерения и т. д.)? Показать на примере.

6.4. Для чего в программе используются Булевы операции? Показать на примере.

6.5. Для чего необходимы порты? Как их задать?

6.6. Что представляют собой граничные условия? Как их задать?

6.7. Какие материалы можно использовать в программе? Как их задать?

6.8. Что такое линии интегрирования? Как их задать?

- 6.9. Что представляет собой процедура проверки проекта? Как она выполняется?
- 6.10. Как выполняется решение проекта? Какие алгоритмы использует программа? Как запустить решение и оценить результаты?
- 6.12. Построение графических характеристик: основные возможности, виды и способы построения.
- 6.13. Что представляют собой распределения полей? Какие разновидности распределения можно исследовать в программе? Как выполнить распределение?
- 6.14. Что представляет собой анимирование изображений? Для чего и как оно выполняется в программе?
- 6.15. Что такое собственные волны портов? Как их построить в программе?
- 6.16. В каком виде можно сохранять различные действия в проекте? Показать на примерах.
- 6.17. В каком виде можно представить коэффициенты матрицы рассеяния? Показать на примере.
- 6.18. Как задаются глобальные переменные в проекте? Как они используются?
- 6.19. Что представляет собой процесс оптимизации в *HFSS*? Какие типы исследований возможны при оптимизации?
- 6.20. Каковы основные этапы при выполнении оптимизации проекта?

7 Литература: [].

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная учебная литература

1. Григорьев, А. Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник. 2-е изд., доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2007. – 704 с.: ил. + вклейка (4 с.). – Учебники для вузов. Специальная литература).

Дополнительная литература

2. Соколова Ж.М. Микроволновые приборы и устройства: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2009. – 272 с.

3. Рычков Ю.М. Электронные приборы сверхвысоких частот: Учеб. пособие / Ю.М.Рычков. – Гродно: ГрГУ, 2002. – 103 с.

4. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн : учеб. пособие / Г. А. Ерохин, О. В. Чернышев, Н. Д. Козырев, В. Г. Кочержевский. – М. : Горячая линия-Телеком, 2004. – 491 с. : ил. – Библиогр.: с. 485-487.

5. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие для вузов / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под. ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высшая школа, 1981. – 295 с. : ил., рис. – Библиогр.: с. 288. – Предм. указ.: с. 289.

6. Полосковые платы и узлы : проектирование и изготовление / [Е. П. Котов, В. Д. Каплун, А. А. Тер-Маркарян и др.] ; под ред. Е. П. Котова и В. Д. Каплуна. – М. : Советское радио, 1979. – 248 с. – Библиогр.: с. 226-236. – Указ. обознач.: с. 237-239. – Предм. указ.: с. 240-242. – Прил.: с. 243-246.

7. Кравченко, А. Н. Электродинамические расчеты в электротехнике / А. Н. Кравченко, Л. П. Нижник. – Киев : Техніка, 1977. – 184 с. – Прил.: с. 176-178. – Библиогр.: с. 179-181.

МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕХНИКА

Методические указания по выполнению лабораторных работ

по направлению подготовки

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Квалификация выпускника

Бакалавр

Составитель: Лапин А.А.

Редактор:

Подписано в печать _____			
Формат _____	Усл. п. л. – _____	Уч.-изд. л. – _____.	
Бумага _____.	Печать _____.	Заказ _____	Тираж _____ экз.
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»			
355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2			

Издательство Северо-Кавказского федерального университета
Отпечатано в типографии СКФУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания
по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «Микроволновая техника»
для студентов направления подготовки
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленность (профиль)
Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь 2026 г.

Печатается по решению
Учебно-методического совета
Северо-Кавказского федераль-
ного университета

УДК
ББК

Рецензент: Валюхов Д.П.

Лапин А.А. **Микроволновая техника:** методические указания для студентов по организации самостоятельной работы. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 20___. – 10 с.

Настоящие методические указания являются руководством по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Микроволновая техника» для студентов очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника. В методических указаниях приведены: общая характеристика СРС, план-график выполнения, контрольные точки и виды отчетности, необходимые методические рекомендации и указания.

Методические указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, рабочим учебным планом и программой дисциплины «Микроволновая техника».

УДК
ББК

© ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский
федеральный университет», 20__

Введение

Целью дисциплины является формирование набора требуемых компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника.

Задачи дисциплины: сформировать знания, умения, навыки расчета и моделирования компонентов и элементов СВЧ, а также, навыки разработки и проектирования микроволновых приборов и устройств на их основе.

Самостоятельная работа студентов является необходимым компонентом процесса обучения и может быть определена как творческая деятельность студентов, направленная на приобретение ими новых знаний и навыков. Настоящие методические указания помогут студентам выполнить указанный вид работ.

Содержание

1. Пояснительная записка	5
1.1. Цель и задачи СРС	5
1.2. Рекомендации и указания по выполнению СРС и форме контроля ...	5
2. План-график выполнения СРС	6
3. Методические рекомендации к СРС	6
4. Список рекомендуемой литературы	11

1 ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

1.1 Цель и задачи СРС

Цель самостоятельной работы студентов – систематическое изучение дисциплин в течение семестра, закрепление и углубление полученных знаний и навыков, подготовка к предстоящим занятиям, а также формирование культуры умственного труда и самостоятельности в поиске и приобретении новых знаний и умений, и, в том числе, формирование компетенций.

Основная тенденция инноваций в области образования определяется как переход от «научения к изучению»

Именно систематическое изучение учебной дисциплины позволяет студенту достигнуть уровня требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) к профессиональной подготовленности, которые сформулированы следующим образом: знать, уметь, владеть.

1.2 Тематика выполнения СРС, указания по форме контроля

Тематика СРС соответствует рабочей программе дисциплины «Микроволновая техника» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника». Темы дисциплины приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Темы дисциплины

№	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание; вид самостоятельной работы	Форма контроля	Зачетные единицы (часы)
6 семестр			
1	Генерация, преобразование и усиление сигналов в диапазоне СВЧ		
1.1	Расчет и моделирование петлевого фазовращателя	Опрос	1
1.2	Расчет и моделирование делителя (сумматора) мощности	Опрос	1
1.3	Самостоятельное изучение темы «Преобразование сигналов в диапазоне СВЧ»	Опрос	6
1.4	Конспектирование источников по теме «Преобразо-	Презентация	3

	вание сигналов в диапазоне СВЧ»		
2	Электронные приборы типов О и М		
2.1	Расчет пролетного клистрона	Опрос	1
3	Компьютерное моделирование и проектирование микроволновых приборов и устройств		
3.1	Решение задач моделирования СВЧ-устройств в программном обеспечении <i>ANSYS HFSS</i>	Опрос	6
	Контрольная работа	Защита, презентация результатов	15
Итого за 6 семестр			33
ИТОГО			33

2 ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ СРС

Подготовка к лекциям и практическим занятиям осуществляется непосредственно перед каждым занятием.

Контрольная работа выполняется в 6 семестре (сроки выполнения: 6 семестр; срок сдачи: сессия; формы контроля: защита, презентация результатов).

Темы контрольной работы выдаются в первые две недели учебного семестра. Защита работы проводится минимум за две недели до зачетно-экзаменационной сессии. Примерный календарный план ее выполнения приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Примерный календарный план выполнения контрольной/домашней работы

Ход выполнения контрольной работы	Недели семестра
Получение задания	2 или 3
Ознакомление с основной и дополнительной литературой	3
Разработка структуры	4-5
Разработка схемы	6-8
Выполнение моделирования, настроек, построение графиков и характеристик	9-12
Оформление	13
Защита контрольной работы	14-15

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К СРС

Опрос по темам, изученным самостоятельно, может проходить в интерактивной форме в виде дискуссий или презентаций.

Выполнение заданий ведется в тетрадях для СРС или в электронном виде. Второй вид может быть использован для конспектирования.

Подготовка к практическим занятиям представляет собой внеаудиторную самостоятельную работу студентов и заключается в чтении:

- конспекта соответствующей лекции (если она читалась по данной теме);
- соответствующего раздела учебника и первоисточников (основная и дополнительная литература, интернет-ресурсы).

Контрольная работа выполняется в 6 семестре (сроки выполнения: 6 семестр; срок сдачи: летняя сессия; формы контроля: защита, презентация результатов).

Примерная тема контрольной работы: «Разработка и проектирование микроволновых приборов и устройств на их основе».

Для каждого студента предлагаются различные варианты задания, имеющие различные начальные условия.

Контрольная работа призвана путем решения практических задач обучить студентов:

- решать задачи построения структуры и разработки схемы или конструкции простейших микроволновых приборов и устройств;
- выполнять моделирование рассчитанных микроволновых приборов и устройств в специальном программном обеспечении;
- выполнять настройку;
- строить необходимые графики и характеристики в специализированном программном обеспечении.

Контрольная работа оформляется в виде пояснительной записки и приложений общим объемом от 25 до 35 листов формата А4. Схемы электрические прин-

ципиальные и рисунки выполняются с соблюдением требований соответствующих государственных стандартов, ЕСПД, ЕСКД, ЕСТД.

К защите должны быть представлены расчеты, скрины, результаты моделирования и графики схем в распечатанном виде, так же в электронном виде с целью демонстрации преподавателю их работоспособности.

Общие требования к оформлению текстовой части работы приведены в ГОСТ 2.105 – 95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам (с поправкой от 05.12.2011 г.).

Текст работы выполняют с использованием компьютера на одной стороне листа белой бумаги формата А4, шрифт – Times New Roman, размер – 14 пт, межстрочный интервал – 1,5. Номер страницы проставляют в центре нижней части листа. Страницы текстового материала следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему документу. Титульный лист текстового документа и листы задания включают в общую нумерацию страниц. Номер страницы на указанных листах не проставляют. Расстояние от края бумаги до границ текста следует оставлять: в начале строк – 30 мм; в конце строк – 10 мм; от верхней или нижней строки текста до верхнего или нижнего края бумаги – 20 мм. Размер абзацного отступа должен быть одинаковым по всему тексту работы и равным 12,5 мм.

4 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

4.1 Основная

1. Григорьев, А. Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник. 2-е изд., доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2007. – 704 с.: ил. + вклейка (4 с.). – Учебники для вузов. Специальная литература).

4.2. Дополнительная литература:

1. Климачев, И. И. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования / И. И. Климачев, В. А. Иовдальский ; под науч. ред. А. Н. Королёва. – М. : Техносфера, 2006. – 351 с. – (Мир электроники). – Библиогр.: с. 335-351. – ISBN 5-94836-074-1.

2. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы : Руководство к решению задач : учеб. пособие / С. И. Баскаков. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2002. – 214 с. : ил. – Библиогр.: с.213. – ISBN 5-06-003994-3.

3. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов / С. И. Баскаков. – Изд. 3-е , перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2000. – 462 с. : ил. – Прил.: с. 456. – Библиогр.: с. 457-458. – Предм. указ.: с. 459-462. – ISBN 5-06-003843-2.

4. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие для вузов / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б. А. Мишустин ; под. ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высшая школа, 1981. – 295 с. : ил., рис. – Библиогр.: с. 288. – Предм. указ.: с. 289.

5. Полосковые платы и узлы : проектирование и изготовление / [Е. П. Котов, В. Д. Каплун, А. А. Тер-Маркарян и др.] ; под ред. Е. П. Котова и В. Д. Каплуна. – М. : Советское радио, 1979. – 248 с. – Библиогр.: с. 226-236. – Указ. обознач.: с. 237-239. – Предм. указ.: с. 240-242. – Прил.: с. 243-246.

6. Кравченко, А. Н. Электродинамические расчеты в электротехнике / А. Н. Кравченко, Л. П. Нижник. – Киев : Техніка, 1977. – 184 с. – Прил.: с. 176-178. – Библиогр.: с. 179-181.

МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕХНИКА

**Методические указания для студентов
по организации самостоятельной работы
по направлению подготовки
11.03.04 Электроника и наноэлектроника**

Квалификация выпускника

Бакалавр

Составитель: Лапин А.А.

Редактор:

Формат _____	Подписано в печать _____	Уч.-изд. л. – _____.
Бумага _____.	Усл. п. л. – _____	Заказ _____
Печать _____.	Тираж _____ экз.	

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2

Издательство Северо-Кавказского федерального университета
Отпечатано в типографии СКФУ