

**УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

Кафедра АФУ

**МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ № 3,4,5**

по дисциплинам «Электромагнитные поля и волны»

и «Антенны и устройства СВЧ»

для студентов очного и заочного обучения

и направлений подготовки «Телевидение,  
радиосвязь и радиовещание», «Радиотехника» и  
«Телекоммуникации»

Ташкент 2004

# Лабораторная работа № 3

## «ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ»

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить свойства волноводного направленного ответвителя и определить его параметры. Применить направленный ответвитель для измерения мощности СВЧ поля, поглощаемого нагрузкой.

### 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Простейшим направленным ответвителем (НО) является узкополосный НО. Он выполняется следующим образом. Два волновода, основной и ответвляющий, имеют общую стенку с двумя отверстиями связи (рис.2.1).

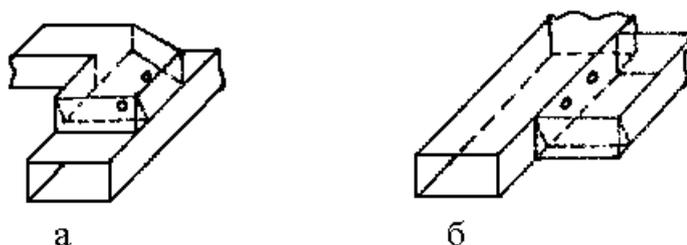


Рис.2.1. Эскизы узкополосного направленного ответвителя с двумя отверстиями связи

Отверстия связи малы по сравнению с длиной волны в волноводе  $\Lambda$  и располагаются на расстоянии  $\Lambda/4$ . Проанализируем работу направленного ответвителя по схеме рис. 2.2.

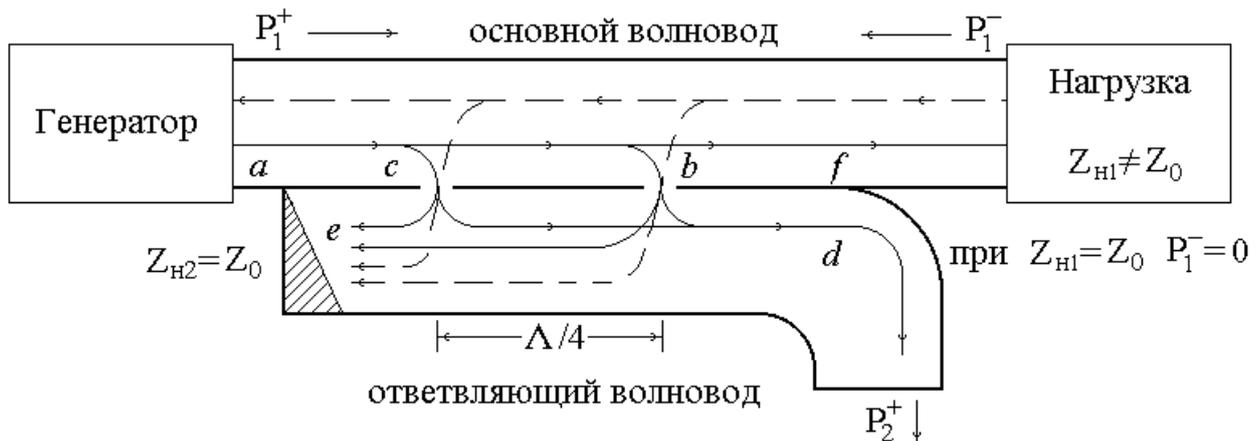
Пусть два волноводных отрезка имеют общую стенку с двумя отверстиями связи, центры которых находятся в точках "с" и "b". Слева по основному волноводу распространяется прямая волна типа  $H_{10}$  с мощностью  $P_1^+$ . Второй волновод, в который следует ответить часть мощности, слева имеет согласованную нагрузку  $Z_{H2}=Z_0$ , где  $Z_0$  – волновое сопротивление волновода. Прямая волна  $P_1^+$  возбуждает через отверстия связи волны в ответвляющем волноводе. Вправо в ответвляющем волноводе будет распространяться волна, сформировавшаяся из волн, направляющихся по путям «acd» и «abd». Поскольку расстояния, проходимые этими волнами, одинаковы, то они складываются в фазе.

Влево, в ответвляющем волноводе, (к нагрузке  $Z_{H2}$ ) волны распространяются по путям "ace" и "abe" и имеют разность хода в половину длины волны  $\Lambda/2=(\Lambda/4+\Lambda/4)$ , т.е. находятся в противофазе, и энергия волны не распространяется в этом направлении.

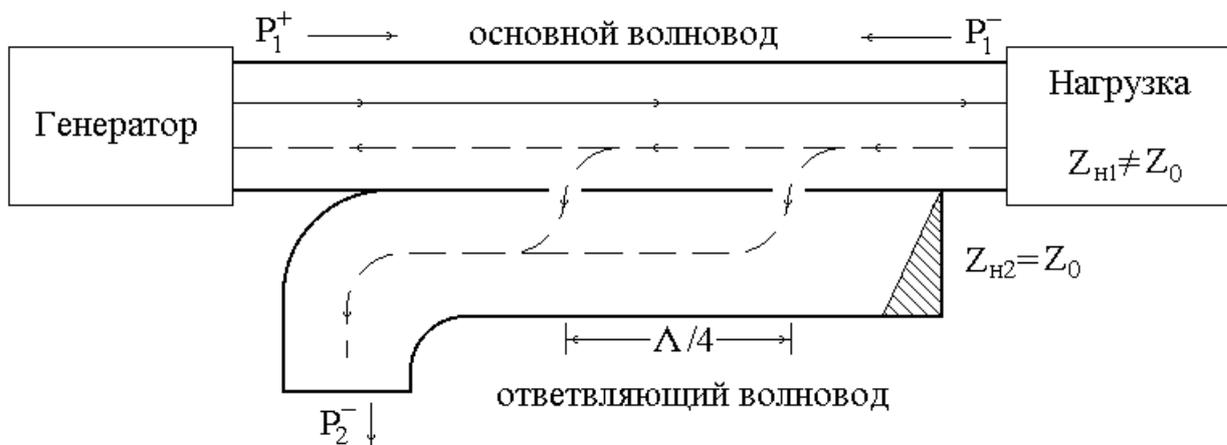
При произвольной нагрузке  $Z_{н1}$  в основном волноводе формируется обратная волна с мощностью  $P_1^-$ . Части отраженной волны, пришедшие из основного волновода по путям «fce» и «fbe», сложатся в фазе в ответвляющем волноводе и поглотятся в поглощающей нагрузке  $Z_{н2}$ .

Таким образом, в ответвляющем волноводе прямая волна с мощностью  $P_2^+$  и обратная волна с мощностью  $P_2^-$  разделены.

При  $Z_{н1}=Z_0$  значение  $P_2^+$  пропорционально мощности  $P_1^+$ .



а) прямое включение направленного ответвителя



б) обратное включение направленного ответвителя

Рис.2.2. Объяснение принципа действия направленного ответвителя

Если перевернуть ответвляющий волновод так, как показано на рис. 2.2.б, то можно выделить часть мощности отраженной волны  $P_2^-$ , пропорциональную  $P_1^-$ .

Таким образом, используя два направленных ответвителя, включённых в противоположных направлениях, можно измерить значения  $P_2^+$  и  $P_2^-$  и рассчитать значение модуля коэффициента отражения  $\Gamma$  из формулы

$$\Gamma^2 = P_2^- / P_2^+ \quad (2.1)$$

Если имеется один направленный ответвитель, то значения  $P_2^+$  и  $P_2^-$  можно измерить при поочерёдном включении направленного ответвителя в прямом и обратном направлениях.

Мощность, поступающая в нагрузку, на выходе направленного ответвителя (рис.2.3) определяется выражением

$$P_n = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}} = P_{\text{пад}}(1 - P_{\text{отр}}/P_{\text{пад}}) = P_{\text{пад}}(1 - \Gamma^2) = P_1^+(1 - \Gamma^2). \quad (2.2)$$

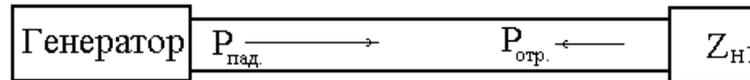


Рис.2.3

Узкополосность направленного ответвителя следует из фиксированного расстояния в четверть длины волны между отверстиями связи. При изменении длины волны в ответвляющем волноводе волны у нагрузки  $Z_{н2}$  полностью не компенсируются (сдвиг фаз не равен  $180^\circ$ ), что наблюдается также и при неточном изготовлении направленного ответвителя.

Увеличение числа отверстий улучшает диапазонную характеристику направленного ответвителя.

Основными параметрами направленного ответвителя являются *переходное ослабление* и *направленность*.

Переходное ослабление  $L_{\text{пер}}$ , измеряемое в децибелах, определяется по формуле

$$L_{\text{пер}} = 10 \lg(P_1^+ / P_2^+), \quad (2.3)$$

где  $P_1^+$  - мощность волны, распространяющейся в прямом направлении по основному волноводу;

$P_2^+$  - мощность, ответвляемая во второй волновод в том же направлении.

Направленность  $L_{\text{напр}}$ , измеряемая в децибелах, определяется по формуле

$$L_{\text{напр}} = 10 \lg(P_2^+ / P_2^-), \quad (2.4)$$

где  $P_2^+$  - мощность, ответвленная в прямом направлении;

$P_2^-$  - мощность, ответвленная в обратном направлении.

Даже для хороших ответвителей  $L_{\text{напр}}$  не превышает 40 дБ, что определяется неидеальным исполнением направленного ответвителя, в частности, неточным расположением отверстий связи и неидентичностью этих отверстий.

### 3.ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

3.1. Исследовать направленный ответвитель: ознакомиться с устройством и областью применения; измерить переходное ослабление и направленность.

3.2. Измерить мощность СВЧ поля, поглощаемую нагрузкой, с помощью направленного ответвителя.

## 4. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 4.1. Измерение переходного ослабления и направленности направленного ответвителя

Собрать установку, как показано на рис.4.1. Для этого необходимо подключить направленный ответвитель к выходу волноводного тракта от генератора (например, к выходу измерительной линии).

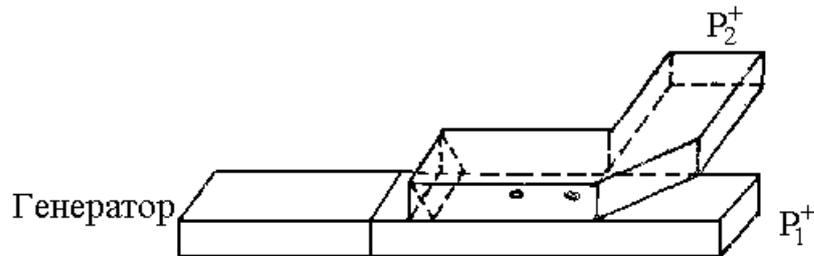


Рис.4.1

Подсоединяя измеритель мощности поочерёдно к ответвляющему и основному волноводам направленного ответвителя, измерить значения мощности  $P_1^+$  и  $P_2^+$ . Перевернуть направленный ответвитель (см. рис.4.2) и измерить значения мощности  $P_1^+$  и  $P_2^-$ . При этих измерениях на свободные выходы направленного ответвителя устанавливается согласованная нагрузка.

При включении направленного ответвителя в обратном направлении с согласованной нагрузкой на выходе основного волновода ответвляемая мощность будет очень мала. Поэтому, если Вы не увидите отклонения стрелки индикаторного прибора, можно условно принять  $P_2^- = 0,02$  мВт.

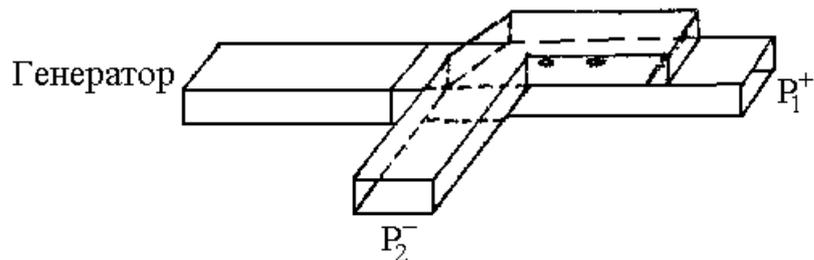


Рис.4.2

Параметры  $L_{пер}$  и  $L_{напр}$  рассчитываются по формулам (2.3) и (2.4).  
Результаты измерений и расчёта занести в таблицу типа табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты экспериментального исследования характеристик  
направленного ответвителя на частоте ..... МГц

$P_1^+$ , мВт	$P_2^+$ , мВт	$P_2^-$ , мВт	$L_{перех}$ , дБ	$L_{напр}$ , дБ

## 4.2. Определение величины мощности электромагнитного поля, поглощаемой нагрузкой, при помощи направленного ответвителя

В волноводном тракте непосредственное измерение уровня мощности электромагнитного поля СВЧ, распространяющегося в волноводе, затруднено.

Измерение и контроль уровня мощности производят с помощью направленных ответвителей, включенных в волноводный тракт.

В настоящей лабораторной работе измерение мощности, поступающей в нагрузку, размещенную на конце волновода, производится с помощью одного НО. Для этого необходимо выполнить следующие операции.

Установить произвольную волноводную нагрузку (сопротивление нагрузки не равно волновому сопротивлению волновода) на выходе основного волновода направленного ответвителя (рис.4.3) и измерить значение мощности  $P_2^-$ .

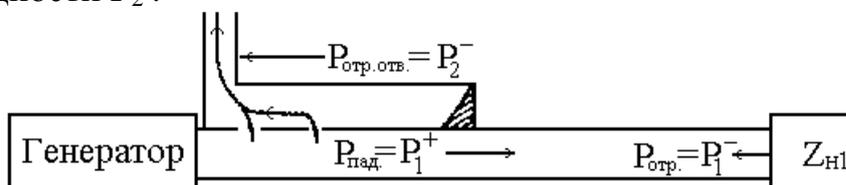


Рис.4.3

Включить направленный ответвитель в противоположном направлении (рис.4.4) и измерить значение мощности  $P_2^+$ .

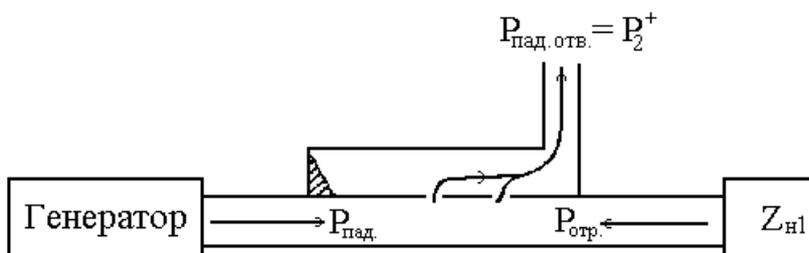


Рис.4.4

Отсоединить произвольную нагрузку от основного волновода направленного ответвителя и вместо неё подключить измеритель мощности, измерить значение мощности  $P_1^+$ .

С помощью формулы (2.2) рассчитать значение мощности  $P_H$  электромагнитного поля, поглощаемой произвольной нагрузкой.

Результаты измерений и расчёта занести в таблицу типа табл. 4.2

Таблица 4.2

Результаты определения величины мощности, поглощаемой произвольной нагрузкой на частоте ..... МГц

$P_1^+$ , мВт	$P_2^+$ , мВт	$P_2^-$ , мВт	$P_H$ , мВт

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать:

- 5.1. Структурные схемы для определения переходного ослабления и направленности направленного ответвителя. Значения измеренных мощностей  $P_1^+$ ,  $P_2^+$  и  $P_2^-$  и результаты расчета параметров  $L_{\text{пер}}$  и  $L_{\text{напр}}$  (табл.4.1).
- 5.2. Структурные схемы измерения мощности.
- 5.3. Результаты расчета мощности, поступающей в нагрузку, на выходе направленного ответвителя (табл.4.2).

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Какое устройство называется направленным ответвителем? ([1] §17.5, [2] §8.8, [3] §24.10).
- 6.2. Нарисуйте волноводный двухдырочный направленный ответвитель и объясните его принцип действия ([1] §17.5, [2] §8.8, [3] §24.10).
- 6.3. Какими параметрами характеризуются направленные ответвители? ([2] §8.8, [3] §24.10).
- 6.4. Дайте определения переходного ослабления и направленности направленного ответвителя ([2] §8.8, [3] §24.10).
- 6.5. Нарисуйте структурную схему установки для измерения и контроля мощности в волноводном тракте с помощью направленного ответвителя ([2] §8.9).
- 6.6. Нарисуйте структурные схемы установок для определения параметров направленного ответвителя. ([2] §8.8).
- 6.7. Нарисуйте структурную схему установки для определения модуля коэффициента отражения с помощью двух направленных ответвителей ([2] §8.9).
- 6.8. Почему волноводный двухдырочный ответвитель является узкополосным устройством? Как можно увеличить рабочую полосу частот направленного ответвителя? ([1] §17.5, [2] §8.8, [3] §24.15).
- 6.9. Для чего предназначена детекторная секция (головка)? Нарисуйте волноводную детекторную секцию и объясните принцип её действия ([2] §8.6).
- 6.10. Для чего предназначена поглощающая (согласованная) нагрузка? Нарисуйте поглощающую нагрузку для прямоугольного волновода, объясните принцип её действия ([2] §8.3, [3] §24.2).
- 6.11. Объясните принцип работы многодырочного волноводного направленного ответвителя ([1] §17.5, [2] §8.8, [3] §24.15).
- 6.12. Объясните функцию отверстия связи как возбуждающего устройства ([1] §17.4, [2] §8.8).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ, том 1. – М.: Высшая школа, 1970.
3. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1978.

# Лабораторная работа № 4 «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТОВ»

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

*Приобретение умений* по измерению параметров элементов и узлов трактов СВЧ на основе знаний об их свойствах.

*Получение навыков* расчета распределения поля в плечах СВЧ-узлов с помощью их матриц рассеяния.

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 2.1. Диафрагмы

Для согласования волновода с нагрузкой на фиксированной частоте на практике используются специфические для волноводов элементы, такие как *диафрагмы*, индуктивные или емкостные, штыри и др. Волноводная диафрагма представляет собой тонкую металлическую перегородку с отверстием, устанавливаемую в поперечном сечении волновода. На рис.2.1 показаны примеры диафрагм для волновода прямоугольного сечения.

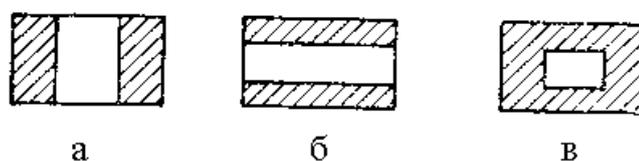


Рис.2.1. Волноводные диафрагмы (а – индуктивная, б – емкостная, в – индуктивно-емкостная)

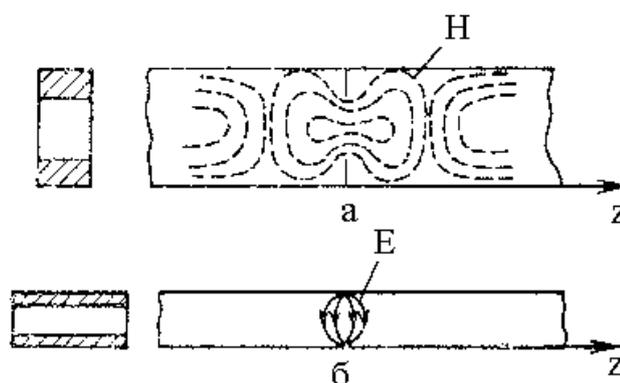


Рис.2.2. Пояснение принципа работы волноводных диафрагм (а – индуктивной, б – емкостной)

Из рис.2.2.а видно, что в индуктивной диафрагме создается концентрация магнитного поля и потому такая диафрагма действует как индуктивность,

включённая параллельно линии. Из рис.2.2.б видно, что в ёмкостной диафрагме концентрируется электрическое поле и такая диафрагма действует как ёмкость, включённая параллельно линии. Диафрагма, изображённая на рис.2.1.в, эквивалентна параллельному соединению индуктивности и ёмкости и соответствует включению в линию параллельного колебательного контура. Подбором размеров диафрагмы можно настроить её в резонанс с рабочей частотой, и тогда она не будет шунтировать волновод.

## 2.2. Согласованные нагрузки

К числу наиболее распространённых элементов трактов СВЧ относятся *согласованные нагрузки*, предназначенные для поглощения остаточной мощности в конце тракта передачи. Согласованные нагрузки применяют также в качестве эквивалентов антенн при настройке передающей аппаратуры и в виде меры сопротивления в измерительных устройствах СВЧ.

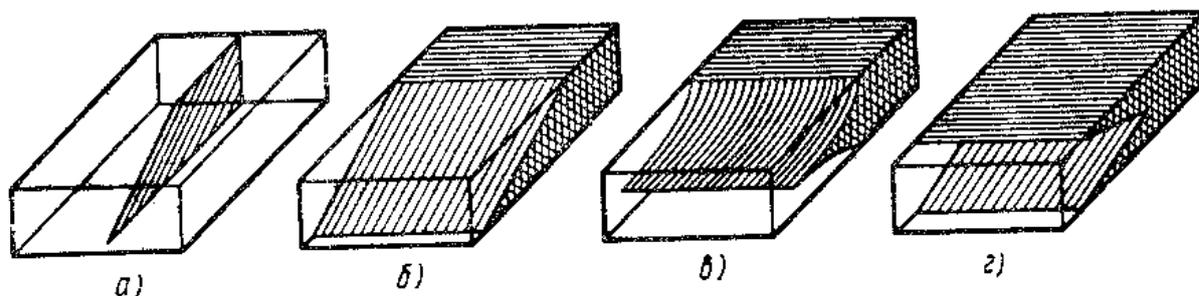


Рис.2.3. Волноводные согласованные нагрузки

Волноводные согласованные нагрузки выполняют в виде поглощающих вставок переменного профиля в отрезке короткозамкнутого волновода. В маломощных нагрузках вставки имеют вид тонких диэлектрических пластин, покрытых графитовыми или металлическими пленками (рис.2.3.а). Объемные поглощающие вставки (рис.2.3.б...г) с большой мощностью рассеяния выполняют из композитных материалов на основе порошков графита, карбонильного железа или карбида кремния. Для уменьшения отражения поглощающим вставкам придают вид клиньев или пирамид.

Основной характеристикой согласованной нагрузки является модуль её коэффициента отражения  $|\Gamma|$  или соответствующее значение  $K_{БВ}$  или  $K_{СВ}$  в заданной полосе частот. Технически возможно создание нагрузок с  $|\Gamma| \leq 0,01$  в относительной полосе частот 20...30% и более. Ввиду малости  $|\Gamma|$  требования к фазе коэффициента отражения не предъявляются. Другой важной характеристикой нагрузки является допустимая поглощаемая мощность.

### 2.3. Повороты линий передачи

*Изгибы и изломы* линий передачи относятся к числу нерегулярностей, снижающих качество согласования и электропрочность. В уголкового изломе любых линий передачи в той или иной мере возбуждаются поля нераспространяющихся волн высших типов, в которых происходит накопление электромагнитной энергии. Для минимизации возникающих из-за этого отражений изломы дополняют различными согласующими элементами. Подрезание внешних углов поворота оказывается эффективным способом при уменьшении отражений в прямоугольных и круглых волноводах (рис.2.4.а).

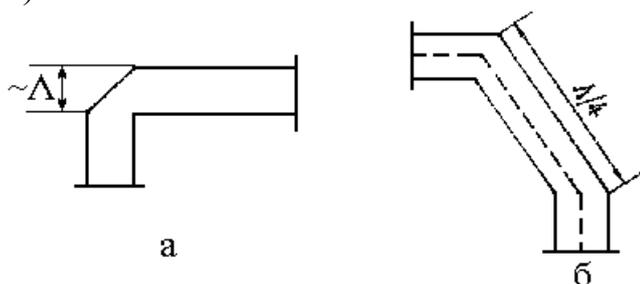


Рис.2.4. Волноводные изломы

Концентрация силовых линий электрического поля в области резких изломов снижает электрическую прочность тракта. Этот недостаток в значительной мере устраняется в двойных изломах (рис.2.4.б) и в плавных изгибах (рис.2.5). Причём, чем больше радиус плавного изгиба, тем меньше отражение от него. Практически отражения электромагнитных волн пренебрежимо малы при радиусе изгиба порядка 3...5 длин волн в волноводе.

Известно, что силовые линии вектора  $\mathbf{E}$  основной волны  $H_{10}$  прямоугольного волновода начинаются и заканчиваются на широких стенках волновода и перпендикулярны к ним. Силовые линии вектора  $\mathbf{H}$  представляют собой замкнутые витки, расположенные в плоскостях, параллельных широким стенкам волновода (рис.2.5).

Если изгиб (излом) прямоугольного волновода осуществляется параллельно силовым линиям электрического поля (рис.2.5.а), то такой изгиб называется  $\mathbf{E}$ -плоскостным изгибом. Если изгиб осуществляется параллельно силовым линиям магнитного поля (рис.2.5.б), то он называется  $\mathbf{H}$ -плоскостным изгибом (изломом).

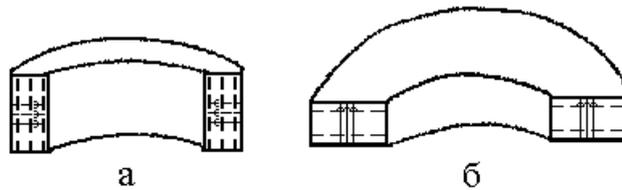


Рис.2.5. Плавные волноводные изгибы (повороты)

--- Н - силовые линии магнитного поля  
 — Е - силовые линии электрического поля

## 2.4. Волноводные разветвители

Для распределения высокочастотной энергии по волноводным каналам в заданном отношении используют *разветвители*. Одним из наиболее широко встречающихся видов разветвителей является Т-образное разветвление или волноводный тройник. Если плоскость разветвления совпадает с плоскостью, в которой лежат силовые линии вектора  $E$  основной волны  $H_{10}$ , то такой тройник называется  $E$ -тройником или тройником  $E$ -типа (рис.2.6), в случае разветвления в плоскости магнитных силовых линий –  $H$ -тройником или тройником  $H$ -типа (рис.2.7).

Обозначим условно плечи тройников буквами А, Б, В.

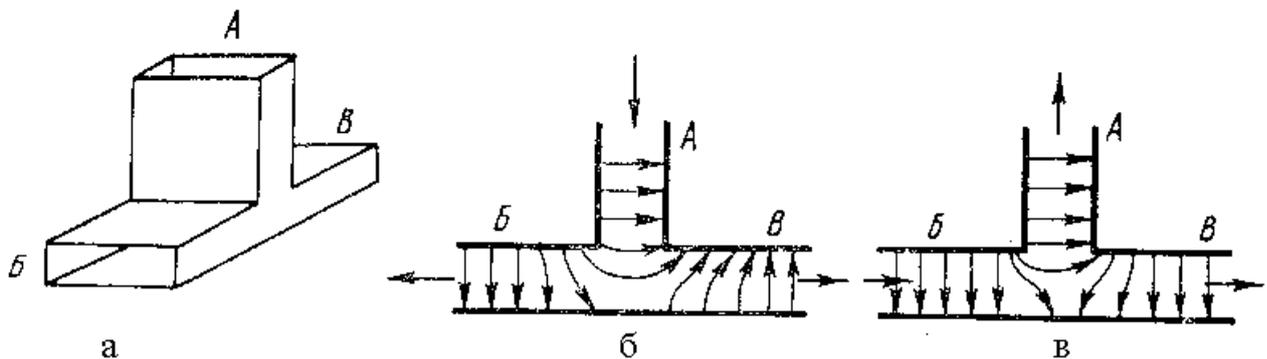


Рис.2.6. Волноводный  $E$ -тройник

Рассмотрим работу  $E$ -тройника. Если волна  $H_{10}$  распространяется по волноводу А к месту разветвления (рис.2.6.б), то она будет ответвляться в волноводы Б и В, и на одинаковых расстояниях от места разветвления в этих волноводах волны будут в противофазе. Отсюда следует, что если по волноводам Б и В к месту разветвления придут волны в противофазе, то они будут переходить в волновод А, совпадая по фазе и, следовательно, в этом волноводе будут складываться. В противоположном случае, когда по волноводам Б и В к волноводу А подходят волны, имеющие одинаковые фазы, ответвляясь в волновод А, они в этом волноводе будут иметь противоположные фазы и при одинаковых амплитудах уничтожатся. Если же волна движется вдоль волновода БВ, то часть энергии ответвляется в волновод А (рис.2.6.в).

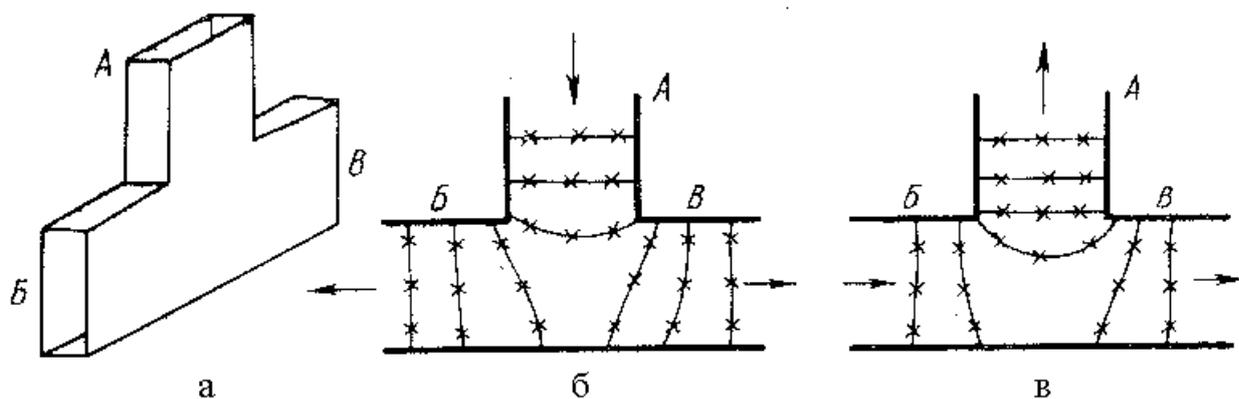


Рис.2.7. Волноводный Н-тройник

Рассмотрим работу Н-тройника. Если волна  $H_{10}$  подходит по волноводу А к месту разветвления (рис.2.7.б), то волны, ответвляющиеся в волноводы Б и В, на равных расстояниях от места разветвления, имеют одинаковые фазы. На рис. 2.7.б крестики изображают направление электрических силовых линий перпендикулярно к плоскости рисунка («от нас»), а тонкие линии – показывают фронт волны. Справедливо и обратное свойство Н-тройника – если к разветвлению по волноводам Б и В приходят волны с одинаковой фазой, то они будут ответвляться в волновод А также с одинаковыми фазами и складываться. Но если по волноводам Б и В к волноводу А подходят волны с одинаковыми амплитудами, но противоположными фазами, то они не будут возбуждать волн в волновод А. При движении волны вдоль волновода БВ часть её энергии ответвляется в волновод А (рис.2.7.в).

В дальнейшем плечи тройников будем обозначать цифрами 1, 2, 3 (рис.2.10, 2.11).

Волноводные разветвители могут иметь также 4 плеча, т.е. представлять собой 8-полюсник. Такие соединения называются мостовыми. Мост характеризуется тем, что волны в выходных плечах равны по величине и имеют постоянный фазовый сдвиг в рабочем диапазоне частот. Наиболее широкое распространение получило мостовое устройство – двойной волноводный тройник (рис.2.12). Если три плеча моста нагружены на согласованные нагрузки, а четвертая обеспечивает пропускание основной волны  $H_{10}$ , то двойной волноводный тройник проявляет следующие замечательные свойства. Сигнал, поданный в Е-плечо, делится на 2 равные части и противофазно проходит в плечи 2 и 3, а в плечо 4 не попадает. Сигнал, поданный в Н-плечо делится поровну между плечами 2 и 3 на синфазные волны и не проходит в Е-плечо. Если в плечи 2 и 3 поданы синфазные колебания, то они сложатся в Н-плече, а если противофазные, то сложение произойдет в Е-плече. Таким образом, между противоположными парами плеч 2-3 и 1-4 существует взаимная развязка: сигнал, поданный в плечо 2, не проходит в плечо 3 (и наоборот); сигнал, поданный в плечо 1, не проходит в плечо 4 (и наоборот).

Анализ свойств СВЧ-устройств наиболее упрощается при представлении

их эквивалентной схемой в виде многополюсника (четырёх-, шести-, восьмиполюсников). Применение эквивалентных схем позволяет строго описать явления в волноводных линиях передачи, работающих на низшем типе колебаний. Преимущество таких эквивалентных схем заключается в том, что к ним применим аппарат матричного исчисления. В теории СВЧ наиболее распространена волновая матрица рассеяния [S].

## 2.5. Анализ распределения поля в плечах разветвителя с помощью матрицы рассеяния

Представление волноводных устройств с помощью матриц рассеяния позволяет в простой компактной форме описывать сложные волноводные тракты. Матрица рассеяния даёт количественную связь амплитуд всех выходящих из узла волн с амплитудами входящих в него (заданных) волн. В литературе входящие волны называют также падающими, а выходящие – отраженными. На рис.2.8 изображен случай, когда в устройство подается возбуждающая (падающая) волна лишь в одно из плеч  $E_1^+$ . Данная волна распределяется между плечами этого узла ( $E_2^-$ ,  $E_3^-$ ,  $E_4^-$ ), а часть её ( $E_1^-$ ) отражается обратно в генератор.

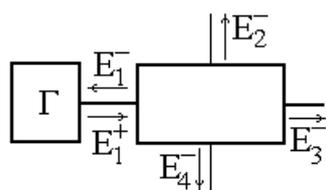


Рис.2.8

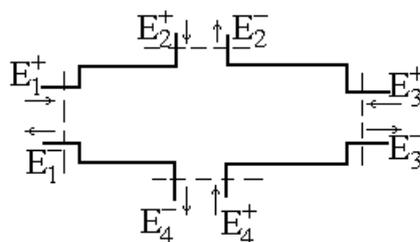


Рис.2.9

Если же подать возбуждающие амплитуды  $E^+$  во все плечи (рис.2.9), то естественно полагать, что в формировании амплитуд напряжённости отражённой волны, например, в плече 1 будут участвовать все падающие волны:  $E_1^- = S_{11}' E_1^+ + S_{12}' E_2^+ + S_{13}' E_3^+ + S_{14}' E_4^+$ , где  $S_{11}'$ ,  $S_{12}'$ ,  $S_{13}'$ ,  $S_{14}'$  – коэффициенты пропорциональности. В общем случае падающие и отраженные волны связаны матричным уравнением вида

$$\begin{bmatrix} E_1^- \\ E_2^- \\ E_3^- \\ E_4^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_2^+ \\ E_3^+ \\ E_4^+ \end{bmatrix} \text{ или } [E^-] = [S'] \cdot [E^+]. \quad (2.1)$$

В расчётной практике удобнее пользоваться не абсолютными значениями амплитуд поля  $E$  (или  $H$ ), а их нормированными значениями. Если провести нормирование амплитуд волн и ввести специальный коэффициент  $\dot{U} = E/E^1$ , где  $E^1$  – амплитуда бегущей волны с мощностью  $P=1\text{Вт}$ , то уравнение (2.1) преобразуется к виду

$$[v^-] = [S] \cdot [v^+], \quad (2.2)$$

где коэффициент  $\dot{v}$  является безразмерной (нормированной) амплитудой волны, связанной с переносимой мощностью  $P$  волны соотношением

$$|\dot{v}| = \sqrt{P} \quad \text{или} \quad P = |\dot{v}|^2. \quad (2.3)$$

Коэффициенты  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$ ,  $S_{44}$  представляют собой коэффициенты отражения в соответствующих плечах узла при условии отсутствия падающих волн в других плечах. Все остальные коэффициенты являются коэффициентами передачи. Например,  $S_{12}$  – коэффициент передачи из второго плеча в первое при отсутствии падающей волны в первом плече. Коэффициенты  $S_{mn}$  устанавливаются расчётным или экспериментальным путём.

Так как в СВЧ устройствах напряженность поля в линии изменяется от точки к точке, то вводят понятие "плоскость отсчета", относительно которой определены коэффициенты матрицы. На рис.2.9 плоскости отсчета каждого плеча условно обозначены пунктирными линиями.

Приведём матрицы рассеяния разветвителей, используемых в настоящей лабораторной работе. Матрицы других распространенных СВЧ устройств можно найти, например, в [2] или [4].

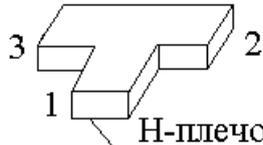
#### Волноводный E–тройник с согласованным плечом 1



$$[S] = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -\sqrt{2} & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Рис.2.10

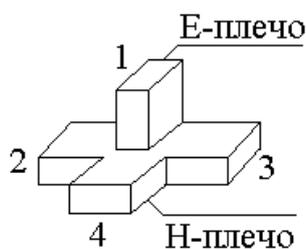
#### Волноводный H–тройник с согласованным плечом 1



$$[S] = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & -1 & 1 \\ \sqrt{2} & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Рис.2.11

### Двойной волноводный тройник

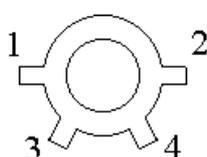


$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис.2.12

Двойной волноводный тройник состоит из E- и H-тройников, имеющих те же плоскости отсчёта.

### Волноводный кольцевой мост



$$[S] = -\frac{j}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис.2.13

В качестве примера расчета распределения поля в СВЧ устройствах с помощью матрицы рассеяния решим задачу следующего содержания. Найдем распределение мощностей волн в волноводно-кольцевом мосте (рис.2.13), в плечи 2 и 3 которого поданы сигналы от передатчиков с мощностью 900Вт. Сдвиг фазы колебаний векторов напряжённости поля в плечах составляет  $180^\circ$ . В плечо 1 включена антенна, согласованная по входному сопротивлению. В плечо 4 подключена согласованная нагрузка. Требуется определить распределение мощностей в плечах моста.

Учитывая, что коэффициенты матрицы рассеяния определены по нормированной амплитуде поля, а не по мощности, находим (с учетом сдвига фаз) комплексные амплитуды падающих волн:

$$\dot{v}_1^+ = 0, \dot{v}_2^+ = -30, \dot{v}_3^+ = 30, \dot{v}_4^+ = 0.$$

Составим следующую схему расчёта на матрице заданного моста

$$[S] = \frac{-j}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow v_1^- = -j(\dot{v}_1^+ \cdot 0 - \dot{v}_2^+ \cdot 1 + \dot{v}_3^+ \cdot 1 + \dot{v}_4^+ \cdot 0) / \sqrt{2}, \\ \rightarrow v_2^- = -j(-\dot{v}_1^+ \cdot 1 + \dot{v}_2^+ \cdot 0 + \dot{v}_3^+ \cdot 0 + \dot{v}_4^+ \cdot 1) / \sqrt{2}, \\ \rightarrow v_3^- = -j(\dot{v}_1^+ \cdot 1 + \dot{v}_2^+ \cdot 0 + \dot{v}_3^+ \cdot 0 + \dot{v}_4^+ \cdot 1) / \sqrt{2}, \\ \rightarrow v_4^- = -j(\dot{v}_1^+ \cdot 0 + \dot{v}_2^+ \cdot 1 + \dot{v}_3^+ \cdot 1 + \dot{v}_4^+ \cdot 0) / \sqrt{2}. \end{array} \right.$$

Поскольку сигналы подаются в плечи 2 и 3, значит,  $\dot{U}_1^+ = \dot{U}_4^+ = 0$ .

$$\text{Тогда } \dot{U}_1^- = -j(\dot{U}_3^+ - \dot{U}_2^+)/\sqrt{2},$$

$$\dot{U}_2^- = -j(\dot{U}_4^+ - \dot{U}_1^+)/\sqrt{2},$$

$$\dot{U}_3^- = -j(\dot{U}_1^+ + \dot{U}_4^+)/\sqrt{2},$$

$$\dot{U}_4^- = -j(\dot{U}_2^+ + \dot{U}_3^+)/\sqrt{2}.$$

В нашем случае  $\dot{U}_2^+ = -30$  и  $\dot{U}_3^+ = 30$ , поэтому

$$\dot{U}_1^- = -j(30 + 30)/\sqrt{2} = -j60/\sqrt{2},$$

$$\dot{U}_2^- = -j(0 - 0)/\sqrt{2} = 0,$$

$$\dot{U}_3^- = -j(0 + 0)/\sqrt{2} = 0,$$

$$\dot{U}_4^- = -j(-30 + 30)/\sqrt{2} = 0.$$

Распределение мощностей по плечам моста:

$$P_1^- = |-j60/\sqrt{2}|^2 = 1800 \text{ Вт}, \quad P_2^- = 0 \text{ Вт}, \quad P_3^- = 0 \text{ Вт}, \quad P_4^- = 0 \text{ Вт}.$$

Ответ показывает, что произошло сложение мощностей передатчиков в антенне, подключённой к плечу 1.

Другие примеры расчёта распределения поля по плечам СВЧ устройств с помощью матрицы рассеяния можно найти, например, в [4].

### 3. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

3.1. Изучить конструкции элементов волноводных трактов.

3.2. Экспериментально определить частотную зависимость модуля коэффициента отражения *согласованной волноводной нагрузки* при помощи измерительной линии.

3.3. Экспериментально на этих же частотах определить частотную зависимость модуля коэффициента отражения элементов: *волноводного изгиба* и *волноводного излома*.

3.4. Измерить распределение поля в плечах разветвителя *двойного волноводного тройника*.

3.5. Рассчитать распределение поля в плечах двойного волноводного тройника. Сравнить экспериментальные и теоретические результаты.

3.6. Исследовать мост из двух двойных волноводных тройников.

## 4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка позволяет определить значения модуля коэффициента отражения от согласованной нагрузки, волноводных изгибов и изломов, и их частотную зависимость (структурная схема на рис.4.1.а), а также распределение поля в разветвляющих устройствах (структурная схема на рис.4.1.б).

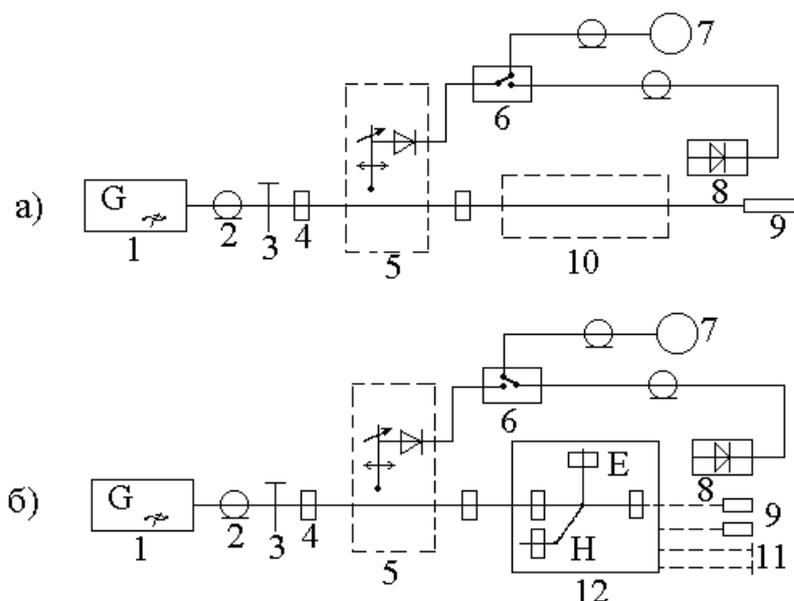


Рис.4.1. Структурные схемы лабораторной установки (1 - генератор; 2 - коаксиальный волновод (коаксиальная линия); 3 - коаксиально-волноводный переход; 4 - прямоугольный волновод; 5 - измерительная линия (ИЛ); 6 - переключатель вида работ (ПВР); 7 - измерительный прибор; 8 - детекторная секция; 9 - согласованная нагрузка; 10 - исследуемый СВЧ поворот (излом); 11 - короткозамыкатель; 12 - исследуемый двойной волноводный тройник (мост из двух двойных волноводных тройников))

## 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка к проведению экспериментального исследования заключается в настройке резонатора измерительной линии в резонанс с частотой колебаний волны, поступающей от генератора. Генератор включается в сеть заранее для достижения устойчивого температурного режима. При настройке измерительной линии ее нагружают короткозамыкающей пластиной, переключатель ПВР устанавливают в положение «измерительная линия».

Методики настройки измерительной линии и определения коэффициента бегущей волны  $K_{БВ}$  отработаны на предыдущих занятиях.

## 5.1. Исследование согласованной нагрузки

Подключив согласованную волноводную нагрузку к выходу ИЛ, измерить  $K_{БВ}$  линии на 3...5 дискретных значениях длин волн в диапазоне от  $1,1a$  до  $1,6a$  ( $a$  – внутренний размер широкой стенки волновода). По данным измерений рассчитать значения модуля коэффициента отражения при помощи формулы

$$|\Gamma_{CH}| = \frac{1 - K_{БВ}}{1 + K_{БВ}}, \quad (5.1)$$

где

$$K_{БВ} = \sqrt{\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}}, \quad (5.2)$$

$\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\max}$  – минимальное и максимальное показания индикаторного прибора.

Данные измерений и расчёта необходимо свести в таблицу типа табл.5.1.

Таблица 5.1

Результаты экспериментального исследования согласованной нагрузки

Название исследуемого элемента	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	$K_{БВ}$	$ \Gamma_{CH} $	$\lambda$ , см	f, ГГц

Построить частотную характеристику  $|\Gamma_{CH}| = F(f)$ .

## 5.2. Исследование волноводных поворотов и волноводных изломов

К выходу измерительной линии подключить поочередно заданные преподавателем образцы волноводных изгибов и изломов. К выходу волноводного изгиба или излома подключить согласованную нагрузку, предназначенную для устранения отражения электромагнитных волн.

Провести измерения необходимые для определения  $K_{БВ}$  в тракте и вычисления подобные, описанным в п.5.1. Результаты занести в таблицу типа табл.5.2.

Следует обратить внимание на то, что в исследуемом тракте отраженная волна формируется как самим поворотом (изгибом) волновода, так и нагрузкой, согласование с которой изменяется в диапазоне частот. Следовательно, в результате эксперимента определяется суммарный коэффициент отражения  $\Gamma_{\Sigma}$ , являющийся суммой комплексных коэффициентов отражения от согласованной нагрузки и элемента

$$\dot{\Gamma}_{\Sigma} = \dot{\Gamma}_{CH} + \dot{\Gamma}_{\text{э}}. \quad (5.3)$$

Вычислив по определённым значениям  $K_{БВ}$  величины  $|\Gamma_{сн}|$  и  $|\Gamma_{\Sigma}|$ , расчет значения  $|\Gamma_{\Delta}|$  можно провести по приближённой формуле

$$|\Gamma_{\Delta}| \approx |\Gamma_{\Sigma}| - |\Gamma_{сн}|. \quad (5.4)$$

Таблица 5.2

Результаты экспериментального исследования волноводных изгибов и изломов

Название исследуемого элемента	Радиус изгиба, см	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	$K_{БВ}$	$ \Gamma_{\Sigma} $	$ \Gamma_{\Delta} $	f, ГГц

По данным табл.5.2 построить частотные характеристики модулей коэффициентов отражения  $|\Gamma_{\Sigma}| = \varphi(f)$  и  $|\Gamma_{\Delta}| = \varphi(f)$ .

### 5.3. Исследование двойного волноводного тройника и моста из двух двойных волноводных тройников

Экспериментальное исследование этого пункта программы выполняется с использованием переносного датчика мощности – детекторной секции (переключатель ПВР в положении "детекторная секция"). Измерительная линия здесь служит в роли переходного устройства от коаксиального волновода к элементам с прямоугольным сечением.

5.3.1. Определить степень развязки между плечами Е и Н двойного волноводного тройника. Для этого к выходу измерительной линии подключить плечо Е (плечо 1) двойного волноводного тройника (см. рис.2.12), к плечу Н (плечо 4) подключить детекторную секцию. К боковым плечам 2 и 3 подключить поочередно пары следующих типов нагрузок:

- а) согласованные нагрузки;
- б) короткозамыкающие нагрузки (короткозамыкатели);
- в) согласованную нагрузку в плечо 2 и короткозамыкающую нагрузку в плечо 3.

Провести аналогичные измерения при возбуждении двойного волноводного тройника в плече Н и подключении детекторной секции к плечу Е.

Степень развязки между плечами Е и Н двойного волноводного тройника (при возбуждении плеча Е) определяется по формуле

$$P_{EH} = 10 \lg \frac{P_E}{P_H}, \text{ дБ}, \quad (5.5)$$

а при возбуждении плеча Н

$$P_{HE} = 10 \lg \frac{P_H}{P_E}, \text{ дБ}. \quad (5.6)$$

Данные измерений и расчётов занести в таблицу типа табл.5.3.

Таблица 5.3

Результаты экспериментального исследования степени развязки между плечами двойного волноводного тройника

Возбуждаемое плечо	$P_E$	$P_H$	$P_{EH}$ , дБ	$P_{HE}$ , дБ	Номера плеч с согласованными нагрузками	Номера плеч с КЗ-нагрузками
Е				-	2 и 3	-
				-	-	2 и 3
				-	2 (3)	3 (2)
Н			-		2 и 3	-
			-		-	2 и 3
			-		2 (3)	3 (2)

5.3.2. Определить распределение мощностей в боковых плечах двойного волноводного тройника при возбуждении

а) плеча Е и подключения согласованных нагрузок в плечо Н и поочерёдно к одному из боковых плеч;

б) плеча Н и подключения согласованных нагрузок в плечо Е и поочерёдно к одному из боковых плеч.

Результаты измерений занести в таблицу типа табл.5.4.

Таблица 5.4

Результаты экспериментального исследования распределения мощности в плечах двойного волноводного тройника

Возбуждаемое плечо	$P_2$	$P_3$	Согласованные нагрузки в плечах
Е		-	3, 4
	-		2, 4
Н		-	3, 1
	-		2, 1

5.3.3. Рассчитать распределение поля в плечах двойного волноводного тройника для одного из приведённых в табл.5.4 случаев (по заданию преподавателя). Расчёт произвести с помощью матрицы рассеяния двойного волноводного тройника (см. в п.2.5).

5.3.4. Определить развязку между плечами Е и Н моста из двух волноводных тройников (рис.5.1).

Для этого необходимо подключить исследованный ранее двойной волноводный тройник к мостовому устройству, содержащему ещё один двойной волноводный тройник. Возбуждая поочерёдно плечи Е и Н в первом двойном волноводном тройнике, подключая детекторную секцию в плечи Е и Н второго двойного волноводного тройника и согласованные нагрузки в свободные плечи, определить распределение мощностей в плечах Е и Н, а также степень развязки между плечами Е и Н. Результаты измерений и расчётов занести в таблицу типа табл.5.5.

Таблица 5.5

Результаты экспериментального исследования степени развязки между плечами Е и Н моста из двух двойных волноводных тройников

Возбуждаемое плечо	$P_E$	$P_H$	$P_{EH}$ , дБ	$P_{HE}$ , дБ
Е				-
Н			-	

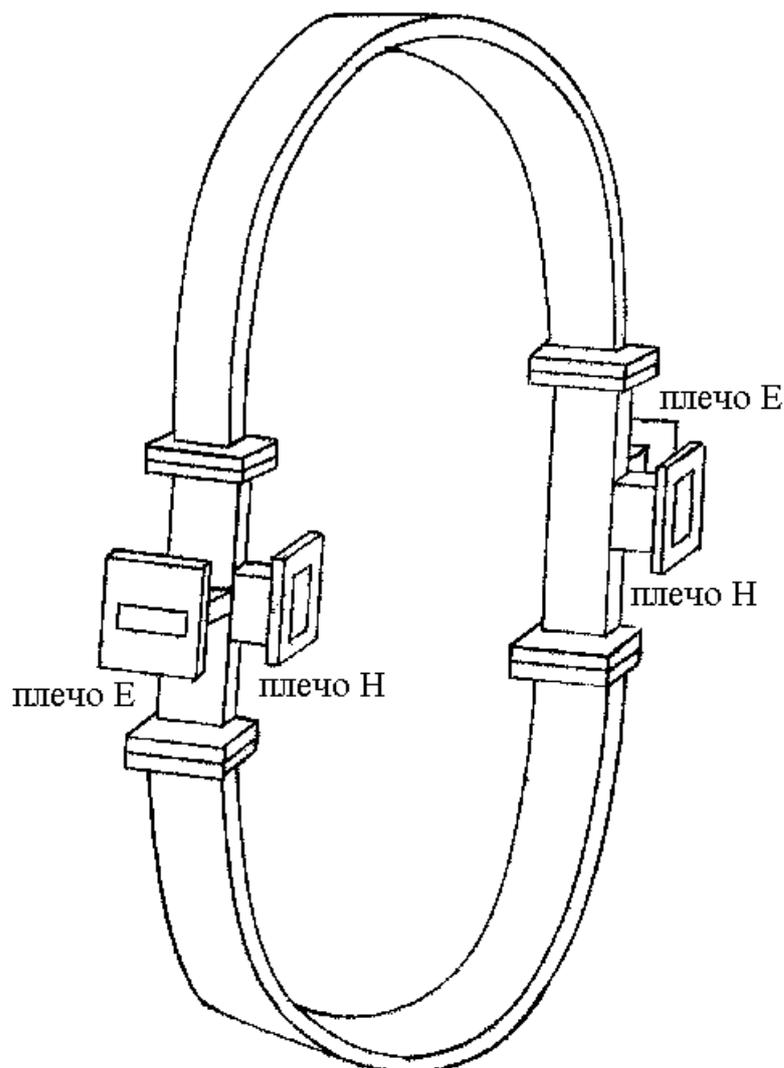


Рис.5.1. Мост из двух двойных волноводных тройников

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

- 6.1. Структурные схемы измерений (рис.4.1 и рис.4.2).
- 6.2. Данные экспериментальных исследований (табл. 5.1...5.5) и расчёта.
- 6.3. Выводы.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Нарисуйте структуру поля основной волны в прямоугольном волноводе. Укажите плоскости, в которых лежат, соответственно, силовые линии электрического и магнитного поля ([1] §14.1, [2] §3.5, [3] §19.6).

7.2. Нарисуйте волноводные повороты в плоскостях  $E$  и  $H$ . Свяжите названия поворотов со структурой поля волны  $H_{10}$  ([2] §6.9, [3] §24.1).

7.3. Какими параметрами характеризуется волноводный поворот? Как с помощью измерительной линии определить эти параметры? ([2] §6.9).

7.4. Как зависит качество волноводного поворота от его радиуса? Как выбирают среднюю длину поворота на практике? ([2] §6.9).

7.5. Для чего предназначена поглощающая (согласованная) нагрузка? Объясните принцип её действия и нарисуйте её конструкции ([2] §8.3, [3] §24.2).

7.6. Нарисуйте Т-образные волноводные  $H$  и  $E$ -тройники. Свяжите названия тройников со структурой поля волны  $H_{10}$  ([1] §17.9, [2] §6.6, [3] §24.8).

7.7. Какими свойствами обладает волноводный  $H$ -тройник? Объясните свойства  $H$ -тройника, рассматривая случай синфазного и противофазного питания со стороны боковых плеч (с помощью рисунков) ([1] §17.9, [2] §6.6).

7.8. Нарисуйте силовые линии поля в  $H$ -тройнике при возбуждении  $H$ -плеча тройника ([1] §17.9, [2] §6.6).

7.9. Какими свойствами обладает волноводный  $E$ -тройник? Объясните свойства  $E$ -тройника, рассматривая случаи синфазного и противофазного питания со стороны боковых плеч (с помощью рисунков) ([1] §17.9, [2] §6.6).

7.10. Нарисуйте силовые линии поля в  $E$ -тройнике при возбуждении  $E$ -плеча ([1] §17.9, [2] §6.6).

7.11. Нарисуйте двойной волноводный тройник (двойной Т-образный мост). Укажите плечи  $E$  и  $H$  и свяжите их названия со структурой поля волны  $H_{10}$  ([1] §17.9, [2] §6.6, [3] §24.11).

7.12. Какими свойствами обладает двойной волноводный тройник? Объясните свойства двойного волноводного тройника, используя свойства  $H$  и  $E$ -тройников и рассматривая случаи их синфазного и противофазного возбуждения со стороны боковых плеч ([1] §21.2, [2] §6.8).

7.13. Какими параметрами характеризуется двойной волноводный тройник? Как определяют эти параметры? ([2] §6.6, §6.8).

7.14. Для чего предназначена детекторная секция (детекторная головка)? Нарисуйте волноводную детекторную секцию и объясните принцип её действия ([2] §8.6).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ, том 1. – М.: Высшая школа, 1970.
3. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1978.
4. Габзалилов Г.Ф., Ликонцев Д.Н. Консультация по выполнению контрольных работ по дисциплине «Техническая электродинамика» для студентов заочного отделения специальностей 0703, 0708. – Т.: ТЭИС, 1987.

**Лабораторная работа №5**  
**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСОВ ВОЛНОВОДНЫХ**  
**НАГРУЗОК С ПОМОЩЬЮ ИМПЕДОМЕТРА»**

**1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Ознакомиться с устройством волноводного импедометра и способом измерения импеданса (полного сопротивления) волноводных нагрузок. Определить величину импеданса волноводных диафрагм.

**2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

В технике сверхвысоких частот (СВЧ) часто геометрические размеры волновода выбираются такими, чтобы по нему распространялась волна одного типа. Для прямоугольного волновода это волна  $H_{10}$ . Теоретически в одноволновом режиме прямоугольный волновод вполне может быть заменён двухпроводной линией с таким же коэффициентом фазы распространения волны и с той же мощностью передачи. Параметры эквивалентной двухпроводной линии находятся из условия передачи одинаковой мощности по этим двум системам.

Для прямоугольного волновода с воздушным заполнением при распространении в нём волны  $H_{10}$  волновое сопротивление эквивалентной линии равно

$$\rho_{\text{э}} = \frac{2b}{a} * \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (2.1)$$

где  $a, b$  – соответственно размеры широкой и узкой стенок волновода;  
 $\lambda$  - длина волны.

Поле в нагруженном волноводе на расстояниях больших длины волны в волноводе  $\Lambda$  от нагрузки определяется, в основном, падающей и отражённой волнами низшего типа.

Отношение напряжённости электрического поля отражённой волны в каком-либо сечении к напряжённости электрического поля падающей волны в этом же сечении называют комплексным коэффициентом отражения

$$\dot{\Gamma} = \dot{E}_{\text{отр}} / \dot{E}_{\text{пад}}. \quad (2.2)$$

Эквивалентной схемой нагруженного волновода является двухпроводная линия, нагруженная на сопротивление, обеспечивающее такой же коэффициент отражения, что и в волноводе. Эквивалентные схемы позволяют применять для описания волноводов теорию длинных линий. Так для входного импеданса нагруженного волновода можно записать [1]

$$\dot{Z}_{\text{вх}}(z) = \rho_{\text{э}} \frac{1 + \dot{\Gamma}(z)}{1 - \dot{\Gamma}(z)}. \quad (2.3)$$

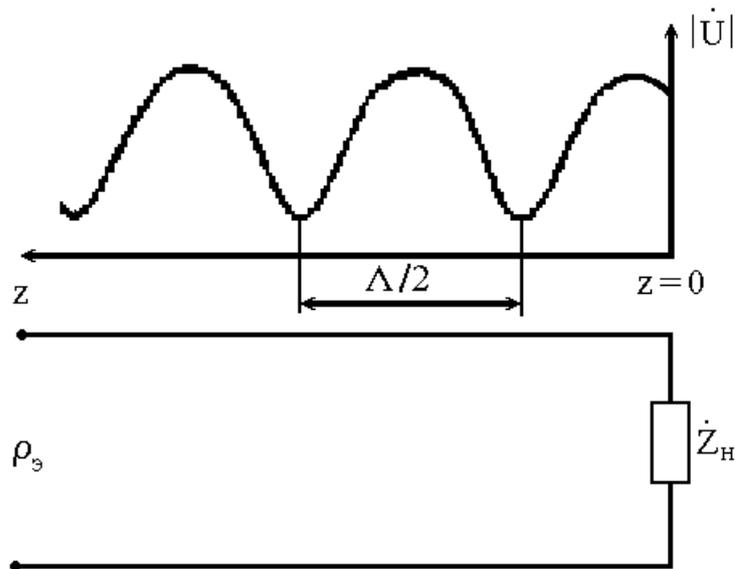


Рис. 2.1. Эквивалентная схема

На рис.2.1 представлена эквивалентная схема нагруженного волновода и распределение амплитуды напряжения вдоль линии. Начало координат помещено в сечении, где включена нагрузка

$$\dot{\Gamma}(z) = \dot{\Gamma}(0)e^{-2i\beta z}, \quad (2.4)$$

где  $\beta=2\pi/\Lambda$  – фазовая постоянная распространения волны в волноводе;

$\dot{\Gamma}(0)$  – комплексный коэффициент отражения от нагрузки, определяемый по формуле

$$\dot{\Gamma}(0) = |\dot{\Gamma}_н| e^{i\varphi_n}, \quad (2.5)$$

где  $|\dot{\Gamma}_н|$ ,  $\varphi_n$  – модуль и фаза коэффициента отражения от нагрузки.

Комплексный коэффициент отражения является периодической функцией координаты  $z$  с периодом  $\Lambda/2$ , следовательно, и входное сопротивление  $Z_{вх}(z)$  – также периодическая функция.

Для нахождения импеданса нагрузки достаточно определить по результатам измерений значение коэффициента отражения (модуль и фазу) в сечении на расстоянии от нагрузки, равном целому числу длин полуволн  $z = n \Lambda/2$ , где  $n$  – целое число.

$$\dot{Z}_н = \rho_э \frac{1 + \dot{\Gamma}(n \cdot \Lambda/2)}{1 - \dot{\Gamma}(n \cdot \Lambda/2)}, \quad (2.6)$$

$$\dot{\Gamma}(0) = \dot{\Gamma}(n \cdot \Lambda/2). \quad (2.7)$$

Определение коэффициента отражения удобно производить с помощью волноводного импедометра (см. ниже).

Волноводный импедометр предназначен для определения величины импеданса (комплексного сопротивления) волноводных нагрузок. Структурная схема прибора представлена на рис. 2.2.

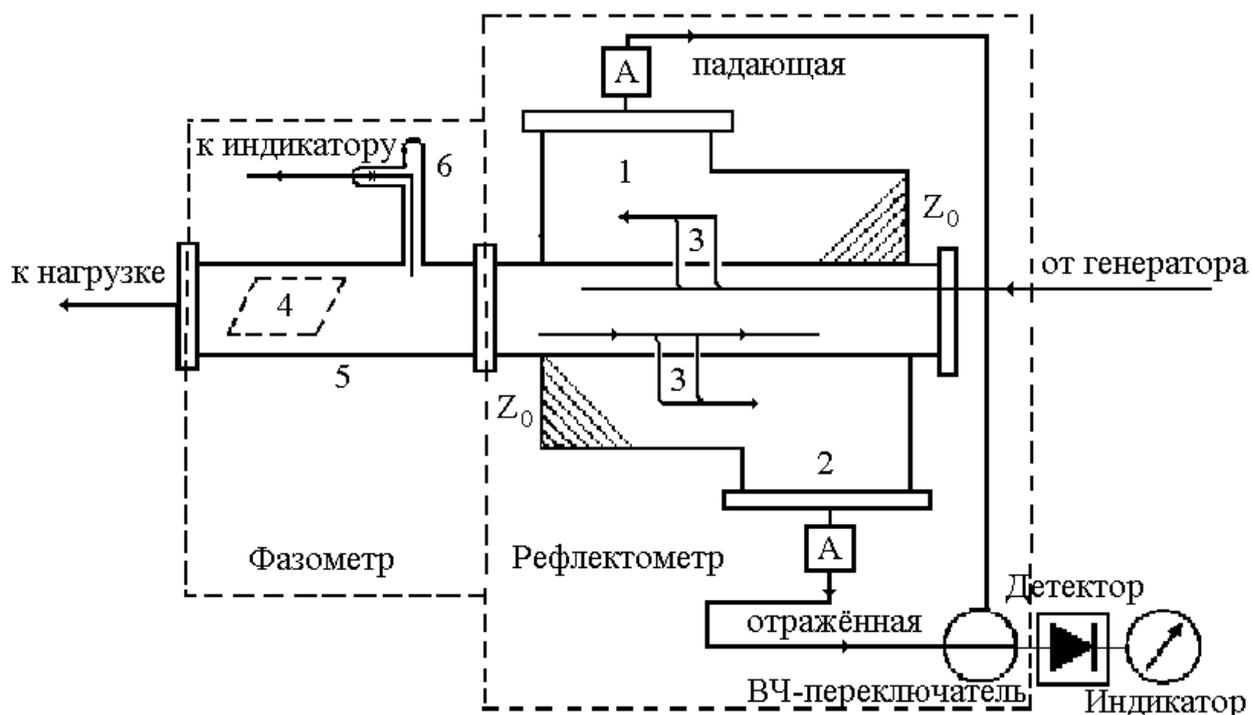


Рис. 2.2. Структурная схема волноводного импедометра

Импедометр состоит из двух частей: рефлектометра и фазометра.

*Рефлектометр* представляет собой два направленных ответвителя, включенных в противоположных направлениях, и служит для измерения модуля, коэффициента отражения. Конструктивно ответвители представляют собой отрезки волноводов 1 и 2 (см. рис.2.2) таких же геометрических размеров, что и основной, имеющих общую широкую стенку с основным волноводом и связанных с ним системой отверстий 3. На концах волноводов 1 и 2 стоят согласованные нагрузки  $Z_0$ . К выходу первого волновода отводится только падающая волна, а к выходу второго - только отраженная.

Для выравнивания ослабления в волноводах 1 и 2, на их выходах установлены переменные ослабители – аттенюаторы. С помощью высокочастотного переключателя волноводы 1 и 2 подключаются к детектору с индикаторным прибором. Индикатор, при квадратичной характеристике детектора регистрирует уровни  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , пропорциональные квадрату напряженности электрических полей падающей и отраженной волн. Поэтому модуль коэффициента отражения определяется по формуле

$$|\dot{\Gamma}| = \sqrt{\alpha_2/\alpha_1}. \quad (2.8)$$

Из формулы (2.4) видно, что модуль коэффициента отражения в любом сечении одинаков, и равен модулю коэффициента отражения от нагрузки

$$|\dot{\Gamma}_н| = |\dot{\Gamma}|.$$

Фазометр состоит из фазовращателя 5 и неподвижной детекторной головки 6, и служит для измерения фазы коэффициента отражения. Детекторная головка состоит из металлического штыря – зонда, введенного внутрь волновода, и детектора и служит для регистрации напряженности электрического поля. Зонд связан с коаксиальным резонатором, который необходимо настраивать в резонанс с частотой электромагнитных волн в волноводе, для получения максимальной чувствительности измерительного прибора. Высокочастотное поле резонатора детектируется кристаллическим диодом, включенным в цепь измерительного прибора.

Фазовращатель 5 представляет собой отрезок волновода с таким же поперечным сечением, как и основной волновод, внутри которого, параллельно узкой стенке может передвигаться тонкая диэлектрическая пластина. Фазовращатель изменяет фазу проходящей волны. В общем случае, в волноводе существуют падающая и отраженная волны, и в любом сечении  $z_1$  поле определяется суперпозицией этих волн. Так, если отраженная волна в сечении  $z_1$  приходит в фазе с падающей, то общее поле будет максимальным, если в противофазе – то минимальным. Если каким-либо образом менять фазу отраженной волны, то в сечении  $z_1$  поле будет меняться от минимального значения до максимального. В фазовращателе фазу проходящей волны изменяют перемещением диэлектрической пластины, Рассмотрим это подробнее. Фазовая скорость волны в волноводе, заполненном диэлектриком с параметрами  $\epsilon_a, \mu_a$ , равна

$$v_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}}, \quad (2.9)$$

где  $\epsilon_a, \mu_a$  – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;  
 $f$  – частота электромагнитного поля;  
 $f_{кр}$  – критическая частота волны в волноводе.

Длина волны в волноводе определяется выражением

$$\Lambda = \frac{v_{\phi}}{f} = \frac{1}{f \cdot \sqrt{\epsilon_a \mu_a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (2.9.a)$$

где  $\lambda_{кр}$  – критическая длина волны (в прямоугольном волноводе  $\lambda_{кр}=2a$ ).

Формула (2.9) показывает, что с увеличением диэлектрической проницаемости происходит уменьшение фазовой скорости волны, т.е. её замедление. Если волновод частично заполнен диэлектриком, то в формулах (2.9) и (2.9.a) необходимо абсолютную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_a$  заменить на эффективную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_{эф}$ . Эффективная проницаемость  $\epsilon_{эф}$  зависит от размеров и абсолютной диэлектрической проницаемости пластины. Так как распределение

электрического поля вдоль широкой стенки волновода неравномерное (см. рис.2.3), то  $\epsilon_{эф}$  зависит также от расположения пластины в волноводе.

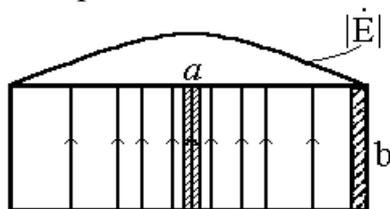


Рис. 2.3. Расположение пластин фазометра в прямоугольном волноводе

Так, если пластина расположена вблизи узкой стенки волновода, где напряженность электрического поля мала, значение  $\epsilon_{эф}$  также мало, поэтому влияние пластины на скорость распространения волны и, следовательно, фазу, незначительно. Если же расположить пластину в центре волновода, где напряженность поля максимальна, значение  $\epsilon_{эф}$  будет большим, поэтому влияние пластины будет наибольшим и замедление максимальным. Таким образом, перемещая пластину от узкой стенки к середине волновода, можно управлять фазой проходящих волн. Пластина берётся достаточно тонкой, чтобы поглощение в ней электромагнитной энергии было малым, и делается в виде призмы для уменьшения отражений от неё.

Фазу коэффициента отражения от произвольной нагрузки можно найти сравнением её с известной фазой коэффициента отражения от короткозамыкающей пластины. Напомним, что фаза коэффициента отражения от короткозамыкающей пластины равна  $\pi$ . Допустим, что при подключении к волноводу короткозамыкающей пластины, с помощью фазовращателя получен узел напряжённости электрического поля в сечении, где расположен зонд детекторной головки. Очевидно, что для получения узла при произвольной нагрузке с фазой коэффициента отражения  $\varphi_H$  необходимо внести такой дополнительный сдвиг  $\Delta\varphi$  с помощью фазовращателя, чтобы  $\varphi_H + \Delta\varphi = \pi$ . Из этого условия находится  $\varphi_H$

$$\varphi_H = \pi - \Delta\varphi. \quad (2.10)$$

Шкала фазовращателя представляет собой круг, на котором нанесены деления от 0 до 250. Так как расчет импеданса нагрузок удобнее производить не с помощью формулы (2.3), а с использованием диаграммы полных сопротивлений, то градуировку шкалы фазовращателя необходимо произвести в долях  $\Lambda$ . Для этого воспользуемся режимом стоячих волн, получающимся в закороченном волноводе. Абсолютная величина напряжённости электрического поля стоячей волны определяется

выражением

$$|\dot{E}| = E_m \left| \text{Sin}\left(2\pi \frac{\Delta z}{\Lambda}\right) \right|. \quad (2.11)$$

График этой зависимости приведён на рис. 2.4.

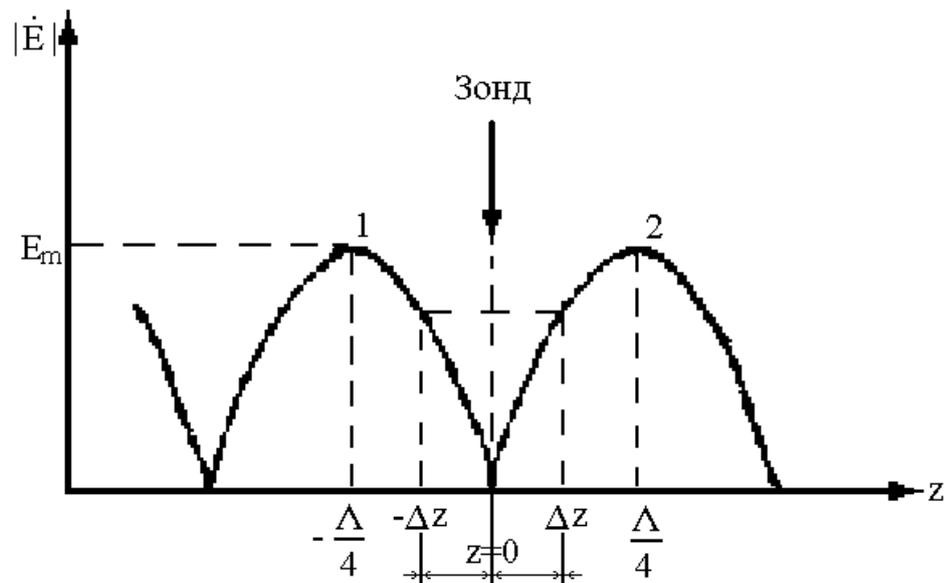


Рис. 2.4

Отсчёт значений  $z$  будем вести от сечения, где расположен зонд детекторной головки ( $z = 0$ ), тогда относительное смещение  $\Delta z/\Lambda$  может быть положительным или отрицательным. Если детектор имеет квадратичную характеристику, то показания детектора  $\alpha$  пропорциональны квадрату напряжённости электрического поля

$$\alpha \sim |E|^2. \quad (2.12)$$

Вращая ручку фазовращателя, получаем для ряда показаний шкалы  $m_1, m_2, \dots, m_N$  ряд показаний индикатора  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ . С помощью формул (2.11) и (2.12) можно вычислить, соответствующие полученным показаниям, смещения  $\Delta z_1/\Lambda, \Delta z_2/\Lambda, \dots, \Delta z_N/\Lambda$ . Построив график зависимости показаний шкалы фазовращателя  $m$  от смещений  $\Delta z/\Lambda$ , получим градуировочную кривую фазометра.

Используя эту кривую, можно определить дополнительный фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$ , вносимый фазовращателем для получения минимума напряжённости электрического поля в сечении, где расположен зонд детекторной головки

$$\Delta\varphi = -2\beta\Delta z = -4\pi\Delta z/\Lambda. \quad (2.13)$$

И далее по формуле (2.10) можно определить фазу коэффициента отражения от нагрузки.

Ниже приведена методика определения импеданса нагрузок с помощью волноводного импедометра.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 3.1. Включить генератор и дать ему прогреться в течение 5...10 минут.
- 3.2. Произвести калибровку рефлектометра. Для этого необходимо:

а) прижать винтами короткозамыкающую пластину к открытому концу волновода.

б) подключить измерительный прибор к выходу, идущему от переключателя падающей и отражённой волн. Вращением ручек аттенуаторов рефлектометра добиться одинаковых показаний измерительного прибора в положениях "ПАДАЮЩАЯ" и "ОТРАЖЁННАЯ" ВЧ-переключателя.

3.3. Произвести градуировку фазометра. Для этого надо подключить измерительный прибор к выходу детекторной головки фазометра. Волновод при этом должен быть закорочен.

Шкалу фазовращателя установить на нулевое деление. Вращая ручку шкалы фазометра, найти максимальное показание  $\alpha_m$  измерительного прибора (точка 1 на рис 2.4) и записать показание шкалы фазовращателя  $m_1$ . Рассчитать значения:  $0,9\alpha_m$ ,  $0,67\alpha_m$ ,  $0,344\alpha_m$ ,  $0,095\alpha_m$ . Вращая ручку шкалы фазометра, поочерёдно устанавливая на шкале измерительного прибора значения:  $0,9\alpha_m$ ,  $0,67\alpha_m$ ,  $0,344\alpha_m$ ,  $0,095\alpha_m$  и 0, записать показания шкалы фазометра  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ ,  $m_5$ ,  $m_6$ . Последняя точка совпадает с узлом поля. Продолжая вращать ручку фазометра в том же направлении, установить на шкале измерительного прибора значения:  $0,095\alpha_m$ ,  $0,344\alpha_m$ ,  $0,67\alpha_m$ ,  $0,9\alpha_m$ ,  $\alpha_m$  и записать соответствующие им значения:  $m_7$ ,  $m_8$ ,  $m_9$ ,  $m_{10}$ ,  $m_{11}$ . Полученные значения записать в таблицу типа таблицы 3.1.

Таблица 3.1.

Результаты градуировки фазометра

$\alpha/\alpha_m$	1,000	0,900	0,670	0,344	0,095	0	0,095	0,344	0,670	0,900	1,000
$\alpha$											
M											
$\Delta z/\Lambda$	-0,25	-0,20	-0,15	-0,10	-0,05	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25

Выбранные уровни показаний измерительного прибора соответствуют значениям  $\Delta z/\Lambda$ , приведённым в таблице 3.1. По данным этой таблицы строится градуировочный график (см. пример на рис.3.1), отображающий зависимость между показаниями шкалы фазовращателя  $m$  и относительными смещениями  $\Delta z/\Lambda$ .

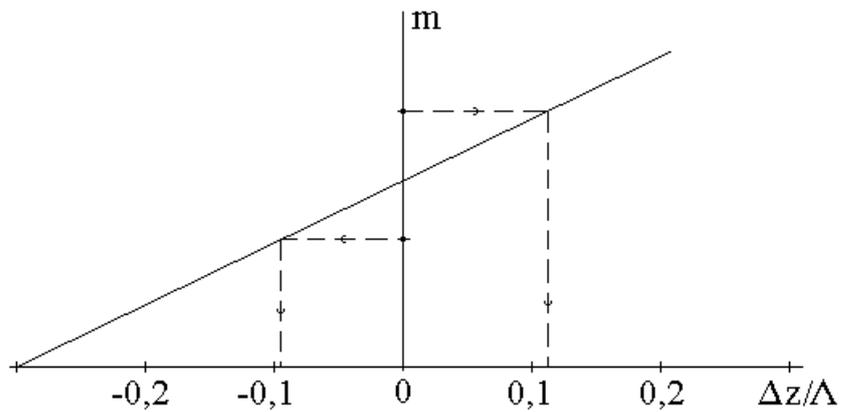


Рис. 3.1. Пример градуировочной кривой фазометра

3.4. Определить модуль коэффициента отражения  $|\dot{\Gamma}|$  от нагрузки и относительное смещение минимумов напряженности электрического поля  $\Delta z/\Lambda$  для нагрузок, которые выдаются преподавателем. Нагрузки представляют собой диафрагмы, устанавливаемые на конце волновода вместо короткозамыкающей пластины. Совместить с риской шкалы фазометра деление  $m_0$ , соответствующее нулевому показанию измерительного прибора при закороченном волноводе. Вращая ручку шкалы фазометра вправо и влево, найти ближайший минимум напряженности электрического поля. Отметить показание шкалы фазометра  $m$  и, используя градуировочный график, найти относительное смещение минимума  $\Delta z/\Lambda$ . (см. пример на рис. 3.1)

Подключить измерительный прибор к кабелю ВЧ-переключателя и переводя переключатель в положения "ПАДАЮЩАЯ" и "ОТРАЖЕННАЯ" записать уровни падающей  $\alpha_1$  и отраженной  $\alpha_2$  волн. Вычислить по формуле (2.8) модуль коэффициента отражения. Прodelать тоже самое для других нагрузок.

Коэффициент бегущей волны  $K_{БВ}$  связан с модулем коэффициента отражения  $|\dot{\Gamma}|$  выражением

$$K_{БВ} = \frac{1 - |\dot{\Gamma}|}{1 + |\dot{\Gamma}|}$$

3.5. По значениям модуля коэффициента отражения  $|\dot{\Gamma}|$  (или коэффициента бегущей волны  $K_{БВ}$ ) и относительного смещения  $\Delta z/\Lambda$  по диаграмме полных сопротивлений (рис. 3.2), найти нормированный импеданс нагрузок.

Если  $\Delta z/\Lambda$  положительно, то «движок» диаграммы (воображаемую линию, соединяющую центр диаграммы с величиной  $\Delta z/\Lambda$  на её окружности) надо вращать к нагрузке, если отрицательно – к генератору.

Результаты измерений и расчёта занести в таблицу типа табл. 3.2

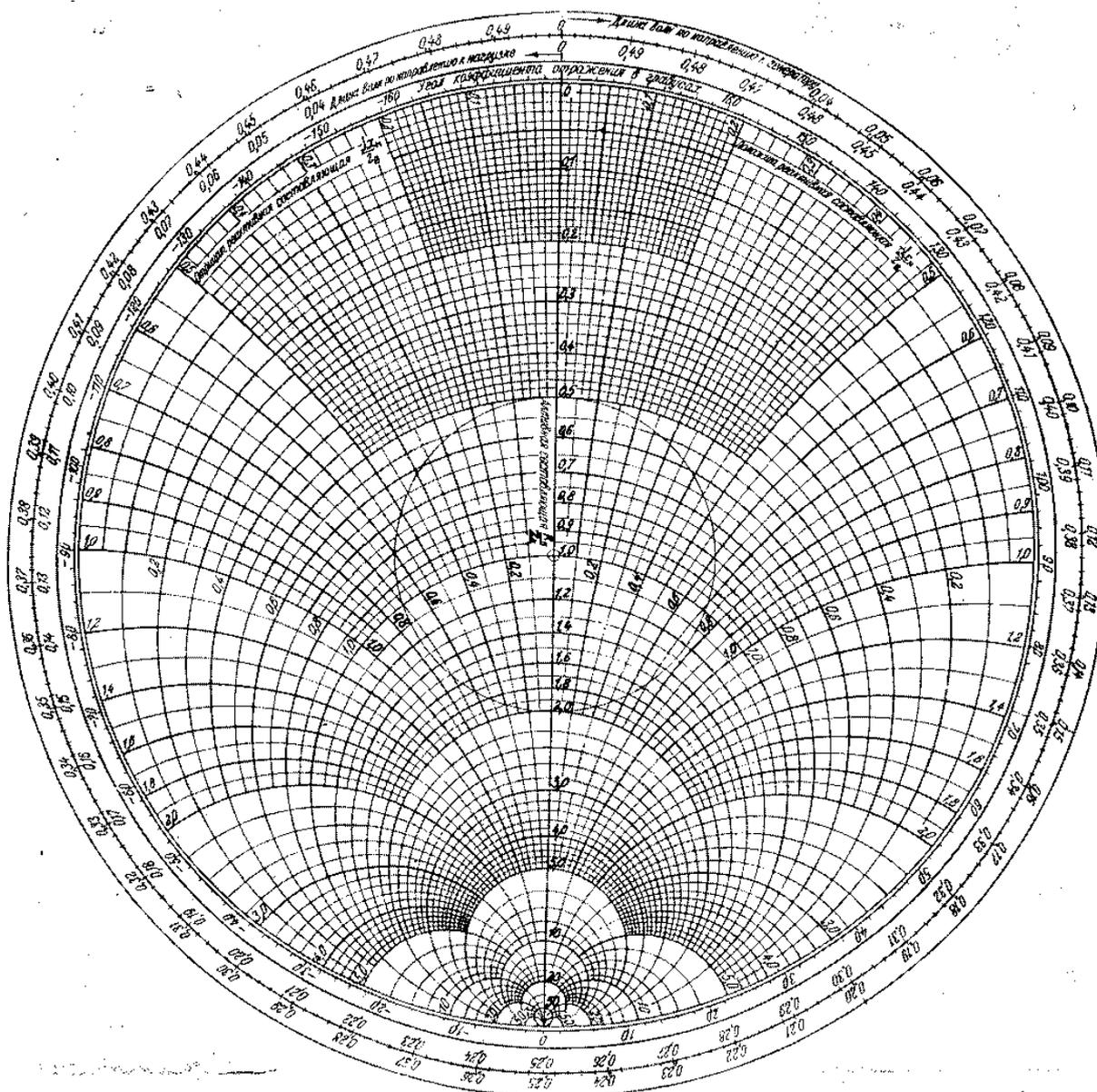


Рис. 3.2. Диаграмма полных сопротивлений

Таблица 3.2

Результаты экспериментального исследования

№	Номер и размеры диафрагмы	m	$\Delta z/\Lambda$	$\alpha_{\text{пад}}$	$\alpha_{\text{отр}}$	$ \Gamma $	$K_{\text{БВ}}$	$Z_{\text{н}}$

Методика определения полного сопротивления нагрузки с помощью диаграммы полных сопротивлений приведена также в методическом руководстве к выполнению лабораторных работ № 1 и 2 «Исследование режимов работы прямоугольного и коаксиального волноводов» по

дисциплинам «Электромагнитные поля и волны» и «Электродинамика и распространение радиоволн».

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт должен содержать:

- 4.1. Структурную схему импедометра.
- 4.2. Градуировочные таблицу и график.
- 4.3. Таблицу с результатами экспериментального исследования.
- 4.4. Выводы.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Назовите условия одноволнового режима ([1] §14.1, §15.1, [2] §3.7, §5.6, [3] §19.2, §19.12).

5.2. Нарисуйте распределение амплитуды поперечного электрического поля вдоль волновода для различных нагрузок (активной, реактивной, комплексной) ([1] §16.2, [2] §7.1).

5.3. Что называется коэффициентом отражения? Что характеризуют модуль и фаза коэффициента отражения? ([1] §16.2, [2] §7.1).

5.4. Нарисуйте структуру поля волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе ([1] §14.1, [2] §3.5, [3] §19.6).

5.5. Запишите выражение для амплитуды напряжённости электрического поля волны  $H_{10}$  в поперечном сечении волновода вдоль его широкой стенки и постройте график  $E=\varphi(a)$  ([1] §14.1, [2] §3.5).

5.6. Какие физические процессы происходят около неоднородности в волноводе? ([1] §16.1, [2] §6.9).

5.7. Что называется направленным ответвителем? ([1] §17.5, [2] §8.8, [3] §24.10).

5.8. Для чего предназначен импедометр? Из каких устройств он состоит? ([2] §8.9).

5.9. Для чего нужна и как производится градуировка рефлектометра?

5.10. Для чего нужен фазометр? Из каких частей он состоит? ([2] §8.12, [3] §24.4).

5.11. Что называется фазовращателем? Изменением какого параметра электромагнитной волны можно регулировать сдвиг по фазе между волнами на входе и выходе фазовращателя? ([2] §5.5, §8.12, [3] §24.4).

5.12. Почему при перемещении диэлектрической пластины в фазовращателе меняется фазовая скорость, а следовательно, и сдвиг фаз? ([2] §5.5).

5.13. Для чего нужна и как производится градуировка фазометра?

5.14. Что называется диафрагмой? Нарисуйте емкостную и индуктивную диафрагму в прямоугольном волноводе и объясните их принцип действия ([1] §17.2, [2] §6.5).

5.15. Покажите на диаграмме полных сопротивлений где «откладываются» значения:

- а) модуля коэффициента отражения;
- б) активной составляющей нормированного полного сопротивления;
- в) реактивной составляющей нормированного полного сопротивления ([1] §16.4, [2] §7.3).

5.16. Как, зная модуль и фазу коэффициента отражения, определить по круговой диаграмме полных сопротивлений нормированное сопротивление нагрузки? ([1] §16.4, [2] §7.4).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Том 1. – М.: Высшая школа, 1970.
3. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1978.

Методическое руководство к лабораторным работам № 3,4,5 по дисциплинам «Электромагнитные поля и волны» и «Антенны и устройства СВЧ» рассмотрено на заседании кафедры АФУ 23.02.04 г. (протокол № 16 от 19.04.2004) и рекомендовано к печати.

Отв. редактор доц. Ликонцев Д.Н.

Составители:

доц. Ликонцев Д.Н. (работы № 3,4,5)

ст. преп. Кан В.С. (работа №3)

Редакционно-корректорная комиссия:

редактор доц. Романенко Б.А.

корректор ст. преп. Павлова С.И.