

# **УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ**

Тамбов  
◆Издательство ГОУ ВПО ТГТУ◆  
2010

УДК 528.029.4/66  
ББК □840.4273  
М194

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета

Рецензент

Доктор педагогических наук, профессор  
*Н.Я. Молотков*

М194      Устройства СВЧ и антенны : метод. указания / сост. Н.А.  
Малков. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 28 с. – 100 экз.

Даны методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны», в которых изучается принцип действия сверхвысокочастотных устройств и измеряются их параметры.

Предназначены для студентов направления 210300 «Радиотехника» всех форм обучения.

УДК 528.029.4/66

ББК □840.4273

© Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический  
университет» (ГОУ ВПО ТГТУ), 2010

Министерство образования и науки Российской Федерации  
**Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»**

## **УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ**

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ  
для студентов направления 210300 «Радиотехника»  
всех форм обучения



---

Тамбов  
Издательство ГОУ ВПО ТГТУ  
2010

Учебное издание

## УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ

Методические указания

Составитель

МАЛКОВ Николай Аркадьевич

Редактор Л.В. Комбарова

Инженер по компьютерному макетированию И.В. Евсеева

Подписано в печать 29.04.2010

Формат 60×84/16. 1,62 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 147

Издательско-полиграфический центр ГОУ ВПО ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКОВ

*Цель работы.* 1. Изучить методы исследования четырёхполюсников с помощью матрицы рассеяния [1, 2].  
2. Приобрести навыки исследования четырёхполюсника с помощью матрицы рассеяния.

### Содержание работы

При выполнении лабораторной работы необходимо:

- исследовать эквивалентные схемы некоторых классов четырёхполюсников;
- определить их матрицы рассеяния.

### Методические указания

#### 1.1. Матрица рассеяния и эквивалентные схемы волноводных четырёхполюсников

1.1.1. Любая неоднородность в волноводном тракте может рассматриваться как четырёхполюсник СВЧ (рис. 1.1, а). Полная информация о свойствах четырёхполюсника содержится в его матрице рассеяния [S], которая связывает комплексные амплитуды падающих и расходящихся волн в отсчётных плоскостях  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 1.1, а).

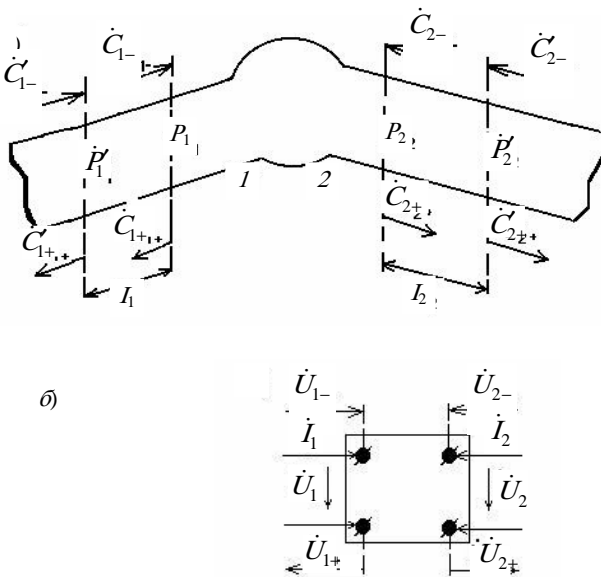
$$\begin{aligned} \dot{C}_{1+} &= \dot{S}_{11} \dot{C}_{1-} + \dot{S}_{12} \dot{C}_{2-}; \\ [S] &= \begin{bmatrix} \dot{S}_{11} & \dot{S}_{12} \\ \dot{S}_{21} & \dot{S}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11} e^{i\varphi_{11}} & \dot{S}_{12} e^{i\varphi_{12}} \\ \dot{S}_{21} e^{i\varphi_{21}} & \dot{S}_{22} e^{i\varphi_{22}} \end{bmatrix}; \\ \dot{C}_{2+} &= \dot{S}_{21} \dot{C}_{1-} + \dot{S}_{22} \dot{C}_{2-}. \end{aligned}$$

При этом  $S_{ij} \leq 1$ ,  $-\pi \leq \varphi_{ij} \leq \pi$ .

Выбор положения отсчётных плоскостей четырёхполюсника достаточно произволен и обычно диктуется соображениями удобства. При переносе отсчётных плоскостей по направлению от неоднородностей в сечении  $P'_1$  и  $P'_2$  (рис. 1.1, а) матрица рассеяния [S] преобразуется в матрицу [S'] с другим значением элементов:

$$\begin{aligned} \dot{S}'_{11} &= \dot{S}_{11} e^{-i2k_1 l_1}; & \dot{S}'_{12} &= \dot{S}_{12} e^{-ik_1(l_1+l_2)}; \\ \dot{S}'_{21} &= \dot{S}_{21} e^{-ik_2(l_1+l_2)}; & \dot{S}'_{22} &= \dot{S}_{22} e^{-i2k_2 l_2}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $k_j$  – волновое число подводящих волноводных линий;  $l_j$  – электрическая длина.



**Рис. 1.1. Волноводный четырёхполюсник**

Элементы [S'] отличаются от элементов [S] только фазовыми множителями.

1.1.2. Четырёхполоснику с волноводными подводящими линиями можно сопоставить эквивалентную модель в виде четырёхполосника классической теории цепей, к которому подключены линии, работающие на волне Г (ТЕМ). Состояние четырёхполосника характеризуется при этом комплексными амплитудами напряжений и токов  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ , а режим в линиях – комплексными амплитудами падающих и расходящихся волн напряжения и тока ( $\dot{U}_{1-}, \dot{U}_{1+}, \dot{U}_{2-}, \dot{U}_{2+}, \dot{I}_{1-}$  и т.д.). Эквивалентность четырёхполосника СВЧ и его модели понимается в смысле равенства их  $S$ -матриц.

1.1.3. Если четырёхполосник на рис. 1.1, б взаимный, то его можно представить эквивалентной схемой, состоящий из элементов с сосредоточенными параметрами. Например, часто применяют Г- и П-образные схемы. Элементы эквивалентной схемы должны быть подобраны так, чтобы матрица рассеяния на модели (рис. 1.1, б) совпала с матрицей рассеяния оригинала – четырёхполосника СВЧ.

## 1.2. Матрицы рассеяния и эквивалентные схемы некоторых классов четырёхполосников

1.2.1. В наиболее общем случае элементы матрицы рассеяния четырёхполосника независимы друг от друга, и для полного его описания нужно знать модули и фазы всех четырёх элементов  $S$ -матрицы – всего 8 вещественных величин. Однако существует несколько широких классов четырёхполосных устройств, у которых между элементами  $S$ -матрицы имеются связи. Учёт этих связей позволяет получить существенные упрощения как при теоретическом рассмотрении четырёхполосников, так и при их экспериментальном исследовании.

1.2.2. Четырёхполосники, в объёме которых отсутствуют анизотропные включения типа намагниченного феррита, являются взаимными устройствами. Их матрицы рассеяния симметричны относительно главной диагонали:

$$\dot{S}_{12} = \dot{S}_{21}, \quad S_{12} = S_{21}, \quad \varphi_{12} = \varphi_{21}.$$

1.2.3. Четырёхполосники, сообщающиеся с внешним пространством только через подводящие волноводы и не содержащие поглощающих материалов, образуют класс реактивных четырёхполосников. Матрицы рассеяния таких устройств унитарны, т.е.

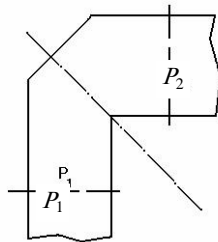
$$[S][S]^* = [1],$$

где  $[S]^*$  – матрица, эрмитово-сопряжённая матрице  $[S]$ ;  $[1]$  – единичная матрица.

1.2.4. Часто встречаются плоскость симметрии. Примером такого является волноводный уголок (рис. 1.2). В диагональные элементы одинаковы:

$$\dot{S}_{11} = \dot{S}_{22}, \quad S_{11} = S_{22}, \quad \varphi_{11} = \varphi_{22}.$$

1.2.5. Часто встречаются препятствие малой протяжённости вдоль оси



четырёхполосники, имеющие поперечную плоскость симметрии. Матрица рассеяния таких четырёхполосников

четырёхполосники, в объёме которых имеется волновод. Как пример, на рис. 1.3, а приведён

Рис. 1.2. Волноводный уголок

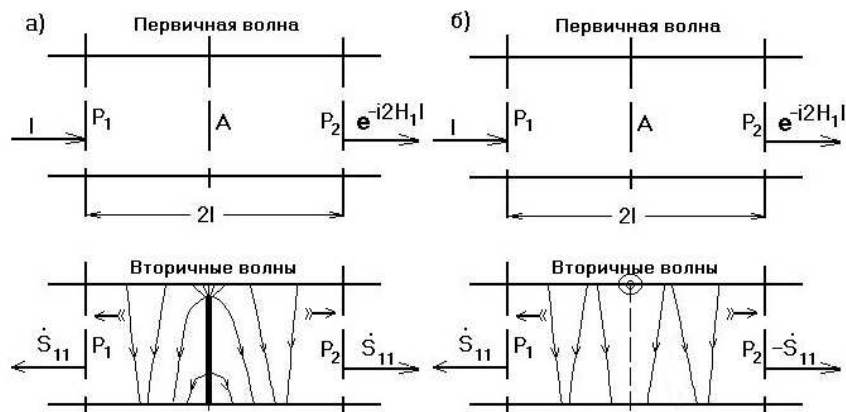


Рис. 1.3. Симметрично и антисимметрично рассеивающие четырёхполосники

тонкий штырь, перпендикулярный широким стенкам прямоугольного волновода. Рассмотрим процессы в этой структуре при возбуждении её волной единичной амплитуды, падающей слева. Под влиянием электрического поля этой волны в штыре возникает ток (он создаёт вторичные волны, расходящиеся от штыря, причём их электрическое поле зеркально симметрично относительно плоскости  $A$ ). Следовательно, амплитуды вторичных волн на  $P_1$  и  $P_2$  равны между собой и штырь поэтому можно назвать симметричным рассеивающим препятствием. Волна, излучённая штырём налево, есть единственная волна, уходящая от четырёхполосника через сечение  $P_1$ . Следовательно, её амплитуда на  $P_1$  равна элементу  $\dot{S}_{11}$  матрицы рассеяния. В то же время волна, уходящая от четырёхполосника через сечение  $P_2$ , образуется наложением двух волн, бегущих в одном направлении – первичной (её амплитуда равна на  $P_1 - e^{-i2kl}$ ) и вторичной (её амплитуда на  $P_2$

в силу симметричности поля равна  $\dot{S}_{11}$ ). Сумма амплитуд этих волн есть по смыслу элемент  $\dot{S}_{21}$  матрицы рассеяния. Таким образом,  $\dot{S}_{21}$  и  $\dot{S}_{11}$  симметрично рассеивающего четырёхполюсника связаны соотношением:

$$\dot{S}_{21} = \dot{S}_{12} = e^{-i2k_1 l} + \dot{S}_{11}. \quad (1.2)$$

На рисунке 1.3, б приведён пример антисимметричного рассеивающего препятствия – поперечная щель в широкой стенке волновода. Амплитуды волн, излученных щелью направо и налево, отличаются только знаком. Поэтому

$$\dot{S}_{21} = \dot{S}_{12} = e^{-i2k_1 l} - \dot{S}_{11}. \quad (1.3)$$

Учёт специальных свойств четырёхполюсников отражается и на их эквивалентных схемах. В частности, эквивалентные схемы реактивных четырёхполюсников содержат только реактивные сопротивления и проводимости. Т- и П-образные схемы (рис. 1.4), соответствующие четырёхполюсникам с плоскостью симметрии, сами симметричны ( $Z_1 = Z_3$ ). Для случая симметрично или антисимметрично рассеивающих четырёхполюсников эквивалентные схемы могут быть сведены к параллельной проводимости или к последовательному сопротивлению. Для этого нужно только отсчётные плоскости  $P_1$  и  $P_2$  совместить с плоскостью симметрии четырёхполюсника. Ниже приводятся известные выражения, позволяющие по элементам  $\mathcal{S}$ -матрицы симметричного четырёхполюсника рассчитать величины сопротивлений и проводимости эквивалентных Т- и П-образных схем:

$$\frac{Z_1}{\rho} = \frac{Z_3}{\rho} = \frac{1 + \dot{S}_{11} - \dot{S}_{12}}{1 - \dot{S}_{11} + \dot{S}_{12}}; \quad \frac{Z_2}{\rho} = \frac{2\dot{S}_{12}}{(1 - \dot{S}_{11})^2 - \dot{S}_{12}^2}; \quad (1.4)$$

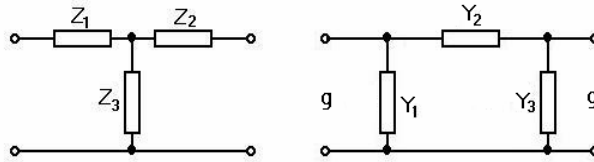


Рис. 1.4. Т- и П-образная схемы

$$\frac{Y_1}{g} = \frac{Y_3}{g} = \frac{1 + \dot{S}_{11} - \dot{S}_{12}}{1 - \dot{S}_{11} + \dot{S}_{12}}; \quad \frac{Y_2}{g} = \frac{2\dot{S}_{12}}{(1 - \dot{S}_{11})^2 - \dot{S}_{12}^2}, \quad (1.5)$$

где  $\rho$  и  $g = 1/\rho$  – волновое сопротивление и волновая проводимость линий, подключаемых к четырёхполюсникам (рис. 1.4).

1.2.6. Если четырёхполюсник одновременно принадлежит к нескольким из рассмотренных классов, то число независимых параметров, определяющих его  $\mathcal{S}$ -матрицу, оказывается существенно меньше 8. Например, симметричный четырёхполюсник в виде отрезка волновода с поперечной щелью (см. рис. 1.3, б) имеет  $\mathcal{S}$ -матрицу вида

$$[\mathcal{S}] = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11} e^{i\varphi_{11}} & e^{-i2k_1 l} - \dot{S}_{11} e^{i\varphi_{11}} \\ e^{-i2k_1 l} - \dot{S}_{11} e^{i\varphi_{11}} & \dot{S}_{11} e^{i\varphi_{11}} \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

целиком определяемую модулем и фазой элемента  $\dot{S}_{11}$  и электрическим расстоянием между плоскостями отсчёта  $2k_1 l$ .

1.2.7. Четырёхполюсник одновременно взаимный, реактивный, симметричный и симметрично рассеивающий имеет  $\mathcal{S}$ -матрицу, все элементы которой выражаются через фазу элемента  $\dot{S}_{11}$  ( $\varphi_{11}$ ) и электрическое расстояние между отсчётными плоскостями  $2k_1 l$ :

$$[\mathcal{S}] = \begin{bmatrix} -\cos(2k_1 l + \varphi_{11}) e^{i\varphi_{11}} & -i \sin(2k_1 l + \varphi_{11}) e^{i\varphi_{11}} \\ -i \sin(2k_1 l + \varphi_{11}) e^{i\varphi_{11}} & -\cos(2k_1 l + \varphi_{11}) e^{i\varphi_{11}} \end{bmatrix}. \quad (1.7)$$

Заметим, что поскольку величина  $-\cos(2k_1 l + \varphi_{11})$  в формуле (1.7) есть модуль  $\dot{S}_{11}$ , т.е. неотрицательная величина, то угол  $2k_1 l + \varphi_{11}$  находится в одном из следующих интервалов  $(-\pi, -\pi/2)$  или  $(\pi, \pi/2)$ .

Примерами таких четырёхполюсников являются индуктивные диафрагмы, индуктивные штыри и розетки индуктивных штырей в прямоугольном волноводе, представленные на рис. 1.5.



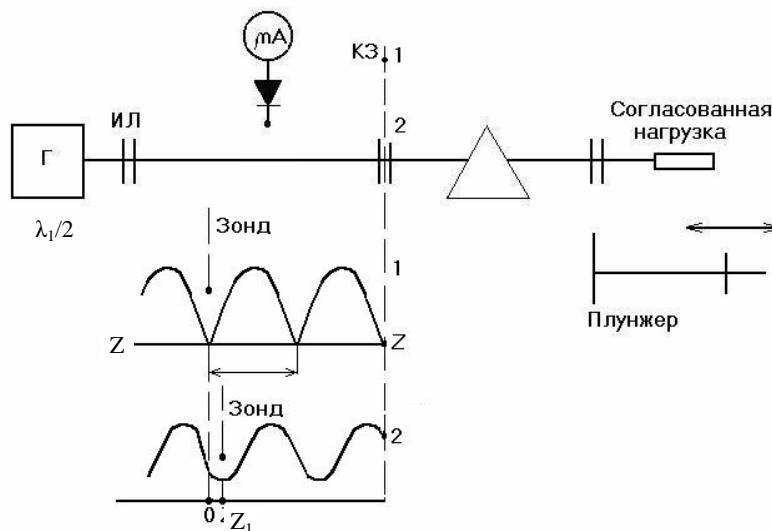
**Рис. 1.5. Взаимные, реактивные, симметричные и симметрично рассеивающие препятствия**

### 1.3. Лабораторная установка

Схема лабораторной установки приведена на рис. 1.6. В неё входят: генератор СВЧ Г, измерительная линия ИЛ с индикаторным прибором, короткозамыкатель КЗ, согласованная нагрузка, плунжер с подвижным короткозамыкателем и набор исследуемых волноводных четырёхполюсников.

### 1.4. Задание и указания к выполнению работы

1.4.1. В данном пункте задания требуется исследовать четырёхполюсник в виде волновода с поперечной щелью. Как следует из формулы (1.6), измерению подлежат модуль и фаза элемента  $S_{11}$  матрицы рассеяния, т.е. собственный коэффициент отражения четырёхполюсника, когда к его выходу подключена согласованная нагрузка. Порядок измерения следующий.



**Рис. 1.6. Лабораторная установка**

1.4.1.1. Включается генератор и устанавливается частота, заданная преподавателем. Измерительная линия закорачивается короткозамыкателем КЗ. В ИЛ при этом устанавливается стоячая волна (режим 1).

1.4.1.2. Резонатор ИЛ настраивается по максимуму показаний индикатора. Зонд ИЛ устанавливается в один из узлов стоячей волны. Отсчёт по шкале перемещений ИЛ принимается за нуль координаты  $z$ . Измеряется длина волны в волноводе  $\lambda_1$ .

1.4.1.3. Короткозамыкатель КЗ заменяется исследуемым четырёхполюсником, к выходу которого подключается согласованная нагрузка. В ИЛ устанавливается режим смешанных волн (режим 2).

1.4.1.4. Зонд ИЛ устанавливается в минимум поля и измеряется смещение минимума  $z_1$  относительно условного нуля. По найденному  $z_1$  определяется фаза  $\varphi_{11}$ :

$$\varphi_{11} = -\frac{4\pi}{\lambda_1} z_1 + (2m+1)\pi, \quad (1.8)$$

причём целое число  $m$  выбирается таким образом, чтобы  $\varphi_{11}$  лежало в интервале  $(-\pi, \pi)$ .

1.4.1.5. Измеряется  $K_{об}$  в линии:  $K_{об} = \sqrt{\frac{a_{\min}}{a_{\max}}}$ , где  $a_{\min}$ ,  $a_{\max}$  – показания индикаторного прибора при установке зонда в минимум и максимум поля. По величине  $K_{об}$  рассчитывается  $S_{11}$  матрицы рассеяния:

$$S_{11} = \frac{1 - K_{об}}{1 + K_{об}}. \quad (1.9)$$

1.4.1.6. Измеряется расстояние между отсчётными плоскостями четырёхполюсника  $2l$  и рассчитывается электрическая длина  $2k_1 l = 4\pi l / \lambda_1$ .



1.4.1.7. По формуле (1.6) рассчитываются все  $S$  элементы матрицы.

1.4.1.8. По формулам (1.4), (1.5) вычисляются величины сопротивлений всех элементов Т-образной эквивалентной схемы.

1.4.1.9. Рассчитываются элементы  $S$ -матрицы и эквивалентной схемы при переносе отсчётных плоскостей в плоскость симметрии четырёхполюсника, которая проходит через продольную ось щели. Эквивалентная схема должна при этом преобразовываться в продольное сопротивление.

1.4.2. В данном пункте задания требуется исследовать один из четырёхполюсников, приведённых на рис. 1.5.

Измерения следует провести по методике пункта 1.4.1.

Обратите внимание на то, что согласно (1.7), для нахождения всех элементов  $S$ -матрицы достаточно определить только  $\phi_{11}$ . Поэтому определение  $K_{\text{бв}}$  и последующий расчёт  $S_{11}$  кажется излишним. Это действительно так, если  $S_{11}$  близко к единице. Тогда в линии в режиме 2 устанавливается волна, близкая к стоячей, её минимумы чётко фиксируются, и  $\phi_{11}$  по формуле (1.8) определяется с достаточной точностью. Величина  $S_{11}$ , найденная по  $K_{\text{бв}}$ , служит только для контроля результатов: значение  $S_{11}$ , рассчитанное по  $K_{\text{бв}}$  должно оказаться близким к  $\dot{S}_{11} = -\cos(2k_1l + \phi_{11})$ , вычисленному через  $\phi_{11}$ . Если же  $S_{11}$  заметно меньше 1, то координаты минимумов определяются с существенной погрешностью. В этом случае обработчику экспериментальных данных нужно вести так. По найденному с помощью формулы (1.9) значению  $S_{11}$  известному параметру  $2k_1l$  находится  $\phi_{11}$  как корень уравнения

$$-\cos(2k_1l + \phi_{11}) = S_{11}. \quad (1.10)$$

Это уравнение имеет два корня. Один из них  $(2k_1l + \phi''_{11})$  лежит в интервале  $(-\pi, -\pi/2)$ , другой  $(2k_1l - \phi''_{11})$  – в интервале  $(\pi/2, \pi)$ . Соответственно и  $\phi_{11}$  из (1.10) находится неоднозначно: получаем два значения  $-\phi'_{11}$ ,  $\phi''_{11}$ . Из них истинным является, то которое ближе к  $\phi_{11}$ , найденному методом смещения минимума по формуле (1.8).

1.4.3. При весьма малых значениях  $S_{11}$  измерения по методу пунктов 1.4.1 и 1.4.2 дают весьма неточные результаты, так как начинает сказываться отличие применяемой нагрузки от идеально согласованной. В таких случаях следует применять метод смещения узлов, описанный в разделе 1.6. Нагрузка на рис. 1.6. заменяется волноводным плунжером, проводятся измерения с подразделами 1.6.1 – 1.6.5. Элементы  $S$ -матрицы определяются в таком порядке: по формуле (1.6) вычисляется  $S_{11}$ , затем по  $S_{11}$ , находятся два корня уравнения (1.10)  $\phi'_{11}$ ,  $\phi''_{11}$ , и отбирается тот, который ближе к экспериментально определённому по формуле (1.2).

## 1.5. Содержание отчёта

1. Схема лабораторной установки с указанием типа приборов и номеров исследуемых четырёхполюсников.
2. Таблицы и графики всех величин, полученных в результате измерений и расчётов.
3. Рассчитанные матрицы рассеяния.
4. Рассчитанные параметры эквивалентных схем.
5. Вывод и замечания по работе.

## 1.6. Измерение элементов матрицы рассеяния четырёхполюсника СВЧ методом узлов

Определение элементов  $S$ -матрицы четырёхполюсников методом смещения узлов производится в такой последовательности.

1.6.1. ИЛ закорачивается на правом конце, зонд ИЛ устанавливается в узле стоячей волны, и отсчёт по шкале перемещений ИЛ  $a_1$  принимается за условный нуль для ИЛ. Зонд ИЛ не смещать!

1.6.2. Вместо короткозамыкателя к выходу ИЛ присоединяется плунжер ПЛ. Плунжер устанавливается в положение  $a_2$ , при котором зонд ИЛ снова оказывается в узле стоячей волны. Отсчёт  $a_2$  по шкале ПЛ принимается за условный нуль для ПЛ.

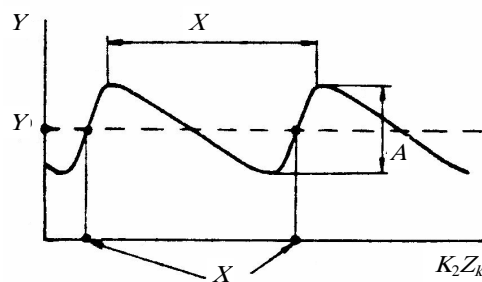


Рис. 1.7. График разности угловых смещений

1.6.3. Исследуемый четырёхполюсник включается между ИЛ и ПЛ. ПЛ последовательно устанавливается в положения  $z_{k1} = a_2$ ,  $z_{k2} = \dots$ ; определяются соответствующие положения узлов в ИЛ:  $z_{y1}, z_{y2}, \dots$

1.6.4. По найденной функции  $Z_y = f(z_k)$  рассчитываются угловые смещения  $K_1 Z_y$  и  $K_2 Z_k$  ( $K_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$ ,  $K_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2}$  – волновые числа в ИЛ и ПЛ) и строится график их разности  $Y = K_1 Z_y - K_2 Z_k$  в зависимости от  $K_2 Z_k$  (рис. 1.7).

1.6.5. По графику угловых смещений узлов  $Y = y(K_2 Z_k)$  можно найти величины, определяющие  $S$ -матрицу. По вертикальному размаху кривой  $A$  определяется  $S_{11}$ :

$$S_{11} = \sin \frac{A}{2}. \quad (1.10)$$

По постоянной составляющей  $y_0$  определяется  $\varphi_{12}$  (с неопределённостью  $\pm \frac{\pi}{2}$ ):

$$\varphi_{12} = (2n+1) \frac{\pi}{2} - y_0 \pm \frac{\pi}{2}. \quad (1.11)$$

Целое число  $n$  (положительное или отрицательное) подбирается так, чтобы оба значения  $\varphi_{12}$  оказались в интервале  $(-\pi, \pi)$ .

По абсциссе  $x_0$  точки пересечения кривой  $Y = y(K_2 Z_k)$  с линией  $Y = y_0$  на возрастающем участке графика находится  $\varphi_{11}$ :

$$\varphi_{11} = 2m\pi - 2(x_0 + y_0). \quad (1.12)$$

Целое число  $m$  (положительное или отрицательное) подбирается так, чтобы  $\varphi_{11}$  оказалось в интервале  $(-\pi, \pi)$ .

Неопределённость  $\varphi_{12}$  обычно может быть устранена путём привлечения дополнительной информации об  $S$ -матрице.

### 1.7. Контрольные вопросы

1. В чём состоит физический смысл элементов  $S$ -матрицы?
2. Как влияет на  $S$ -матрицу сдвиг плоскостей отсчёта?
3. В чём состоит основное достоинство модели четырёхполосника СВЧ в виде классического четырёхполосника с подключаемыми к нему линиями с волной ТЕМ?
4. В каком смысле должны быть эквивалентны эта модель и её оригинал – четырёхполосник СВЧ?
5. Сколько можно предложить эквивалентных схем четырёхполосника СВЧ?
6. В каких случаях  $S$ -матрица является симметричной?
7. В каких случаях  $S$ -матрица является унитарной?
8. В каких случаях в  $S$ -матрице равны диагонали?
9. Поясните, почему у симметрично или ассиметрично рассеивающих четырёхполосников связаны элементы  $\dot{S}_{11}$  и  $\dot{S}_{21}$ ?
10. Как сказывается на эквивалентных схемах четырёхполосников наличие у них специальных свойств: реактивности и т.д.?
11. Опишите методику измерения элементов  $S$ -матриц, симметрично рассеивающих четырёхполосников СВЧ.
12. Почему для четырёхполосников с  $S_{11} < 1$  неидеальность нагрузки сильно сказывается на точности измерения?
13. Можно ли найти элементы  $S$ -матрицы четырёхполосника по экспериментально найденному собственному  $K_{\text{об}}$ ?
14. Как следует проводить экспериментальное определение элементов  $S$ -матрицы слабо рассеивающих четырёхполосников?

Лабораторная работа 2

## ИССЛЕДОВАНИЕ РУПОРНЫХ АНТЕНН

*Цель работы:* изучить конструкцию рупорных антенн, исследовать диаграммы направленности и поляризационные характеристики рупорных антенн.

### Методические указания

При выполнении работы необходимо:

1. Снять диаграммы направленности в плоскостях  $H$  и  $E$  пирамидальной рупорной антенны (антенна 1) и открытого конца волновода (антенна 3).
2. Снять диаграмму направленности в горизонтальной плоскости пирамидальной рупорной антенны с квадратным раскрытием (антенна 2).
3. Снять поляризационные характеристики пирамидальной рупорной антенны с квадратным раскрытием, открытого конца волновода и определить их коэффициенты эллиптичности.

#### 2.1. Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят следующие основные элементы:

1. Комплект исследуемых рупорных антенн: пирамидальный рупор (антенна 1), рупорная антенна с квадратным раскрытием (антенна 2), открытый конец волновода (антенна 3).
2. Поворотный штатив с лимбом на  $360^\circ$ .

3. Детекторная секция.
4. Измерительный прибор № 109 или усилитель низкой частоты.
5. Клистронный генератор.
6. Вспомогательная антенна в виде пирамидального рупора.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 2.1.

Вспомогательная антенна, выполняющая роль облучателя, возбуждается клистронным генератором.

Клистронный генератор состоит из отрезка прямоугольного волновода и установленного на нём клистрона. Высокочастотный зонд клистрона погружён через отверстие в широкой стенке волновода в его внутреннюю полость и возбуждает в волноводе волну  $H_{10}$ . Исследуемая антенна (из комплекта) работает в режиме приёма. Она подсоединена к фланцу детекторной секции трубочками, что обеспечивает быструю замену исследуемых антенн.

Имеется возможность регулировать уровень принимаемой мощности путём перемещения плунжера детекторной секции.

Вольт-амперную характеристику диода детекторной секции считать квадратичной, поэтому показания прибора  $\alpha$  будут пропорциональны принимаемой мощности.

При необходимости построения диаграммы направленности по напряженности поля необходимо из показания прибора  $\alpha$  извлечь квадратный корень.

Исследуемая антенна вместе с детекторной секцией закрепляются на поворотном штативе. Для снятия диаграммы направленности поворотный штатив обеспечивает возможность вращения исследуемой антенны в горизонтальной плоскости на  $360^\circ$ . Угол поворота отсчитывается по лимбу.

Рассмотрим принцип действия её

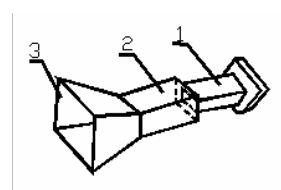


Рис. 2.2

при её генератора

Это  $45^\circ$

излучаемое в пространство, имело малую круговую поляризацию, необходимо, чтобы сдвиг фаз между волнами  $H_{10}$  и  $H_{01}$  равнялся  $90^\circ$ .

В данной антенне сдвиг между волнами  $H_{10}$  и  $H_{01}$  достигается фазирующей секцией, которая имеет прямоугольное сечение с различными, но близкими по размеру сторонами. Волна, распространяющаяся вдоль меньшей стороны секции, имеет большую фазовую скорость, чем волна, распространяющаяся вдоль большей стороны секции. Если на входе фазирующие секции  $H_{10}$  и  $H_{01}$  имели одинаковые фазы, то на выходе между волнами  $H_{10}$  и  $H_{01}$  будет иметься некоторый сдвиг фаз. Длина фазирующей секции выбрана такой, которая обеспечивает сдвиг фаз между волнами, равным  $90^\circ$ .

Таким образом, на выходе фазирующей секции имеются две, приблизительно равные по амплитуде, но взаимно перпендикулярные и сдвинутые по фазе на  $90^\circ$  электромагнитные волны, которые создают поле эллиптической поляризации. Рупорный раскрыв антенны 3 обеспечивает получение диаграммы направленности антенны.

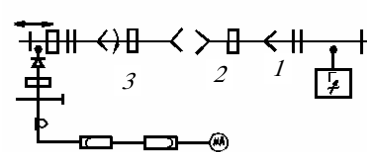


Рис. 2.1

получения эллиптической волны в антенне 2 работе в режиме передачи.

Плоскополяризованная волна типа  $H_{10}$  от поступает через отрезок волновода (рис. 2.2) в фазирующую секцию 2.

достигается поворотом фазирующей секции на относительно входного волновода. Чтобы поле,

## 2.2. Порядок выполнения работы

2.2.1. Присоединить исследуемую антенну к детекторной секции на поворотном штативе.

2.2.2. Установить исследуемую антенну и вспомогательную на одинаковой высоте и на расстоянии 0,5 ... 1,5 м друг от друга.

2.2.3. Для снятия диаграммы направленности в плоскостях  $H$  и  $E$  необходимо обеспечить вертикальную и горизонтальную поляризацию антенн соответственно.

2.2.4. Включить блок питания и усилитель.

2.2.5. Развернуть исследуемую антенну на штативе так, чтобы максимум главного лепестка диаграммы направленности совпадал с нулевым направлением шкалы поворотного штатива.

2.2.6. Снять диаграммы направленности для антенн 1 и 3 в  $E$  и  $H$  плоскостях, для антенны 2 в любой плоскости.

Для этого, вращая стойку поворотного штатива исследуемой антенны влево и вправо от  $0^\circ$ , снять показания измерительного прибора через  $5^\circ$  поворота стойки в пределах  $\pm 35^\circ$ .

**Примечание.** В снятой диаграмме направленности должны быть обязательно отмечены характерные точки максимума и минимума и не менее 6 – 10 промежуточных точек в пределах главного лепестка.

2.2.7. Результаты измерений занести в табл. 2.1.

2.2.8. По данным таблицы 2.1 построить нормированные диаграммы направленности антенн 1, 2, 3 на одном графике в прямоугольной системе координат.

2.2.9. Определить ширину диаграмм направленности по мощности каждой антенны и результат занести в отчётную табл. 2.1.

2.2.10. Снять поляризационные характеристики рупорной антенны с прямоугольным раскрывом и открытого конца волновода:

– установить исследуемую антенну (2 и 3) на поворотном штативе в положение, соответствующее максимальному приёму энергии;

– вращая исследуемую антенну вокруг оси в вертикальной плоскости в пределах от 0° до 180°, снять показания измерительного прибора через каждые 10° угла поворота.

2.2.11. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

2.2.12. По данным табл. 2.2 построить поляризационные характеристики для антенн 2 и 3 на одном графике полярной системы координат.

2.2.13. Определить коэффициент эллиптичности в результате написать отчёт.

Таблица 2.1

Град.	Для плоскости $E$				Для плоскости $H$				Антенна 2	
	Антенна 1		Антенна 3		Антенна 1		Антенна 3			
	$\alpha$ [дел]	$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$	$\alpha$ [дел]	$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$	$\alpha$ [дел]	$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$	$\alpha$ [дел]	$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$	$\alpha$ [дел]	$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$
35										
.										
.										
.										
5										
0										
-5										
.										
.										
-35										

Таблица 2.2

	$\Delta$ [град]	0°	10°	20°		170°	180°
Антенна 2	$\alpha$ [дел]						
	$\gamma = \sqrt{\alpha}$						
	$\gamma/\gamma_{\max}$						
Антенна 3	$\alpha$ [дел]						
	$\gamma = \sqrt{\alpha}$						
	$\gamma/\gamma_{\max}$						

### 2.3. Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему лабораторной установки.
3. Результаты измерений и вычислений (табл. 2.1 и 2.2).
4. Нормированные диаграммы направленности  $P_H(\theta)$  и  $P_E(\varphi)$  в прямоугольной системе координат.
5. Поляризационные характеристики антенн (2 и 3) в полярной системе координат  $\gamma = f(\Delta)$ .
6. Выводы по работе.

### 2.4. Контрольные вопросы

1. Как изменится фазовая скорость при движении волны внутри рупора от горловины до раскрыва для  $H$ -секториального рупора?
2. Как изменится ширина диаграммы направленности секториального рупора с уменьшением угла раскрыва при его значении больше оптимального?
3. Чему равна оптимальная несинфазность в раскрыве  $H$ -секториального рупора,  $E$ -секториального рупора?
4. Как улучшить амплитудно-фазовое распределение в раскрыве рупоров?
5. Как получить вращающуюся поляризацию в рупоре?

6. Чем отличаются диаграммы направленности открытого конца волновода и пирамидального рупора?
7. Какими параметрами определяются поляризационные характеристики антенн?
8. Какую поляризационную характеристику имеет пирамидальный рупор, рупор с квадратным раскрывом, открытый конец волновода?
9. Перечислить состав лабораторной установки, дать краткую характеристику её элементов, пояснить их принцип действия.

Лабораторная работа 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИРКУЛЯТОРОВ В ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТАХ РЛС

*Цель работы.* 1. Изучить принцип действия и конструкцию СВЧ головки РЛС и волноводных устройств с использованием ферритов [2].

2. Приобрести навыки в методике и практике исследования фазовых и поляризационных циркуляторов.

### Содержание работы

При выполнении лабораторной работы необходимо:

1. Исследовать фазовый циркулятор с волноводно-щелевым и двойным Т-мостом.
2. Исследовать поляризационный ферритовый циркулятор.

### Методические указания

#### 3.1. По изучению принципа действия и конструкции СВЧ головки РЛС

Высокочастотная (в.ч.) головка, представляет собой ряд волноводных широкодиапазонных соединений, осуществляющих передачу высокой частотной энергии магнетрона в антенну и супергетеродинный приём отражённых сигналов (рис. 3.1). Высокая частота, поступающая через циркулятор, направляется антенне. Ферритовый циркулятор с разрядником выполняет роль антенного переключателя и предназначен для защиты приёмного тракта во время передачи от воздействия мощных импульсов магнетрона. В момент прохождения высоко частотного импульса через циркулятор в разряднике защиты приёмника происходит газовый разряд. Такой разряд в плоскости входного окна разрядника создаёт короткое замыкание, обеспечивающее защиту смесительных диодов от выгорания. Часть энергии магнетрона через направленный ответвитель и аттенуатор поступает в смеситель канала автоматической настройки клистрона. На кристаллических диодах балансного смесителя канала АПЧ в результате смешения колебания (импульсных) магнетрона и непрерывных колебаний гетеродина выделяются импульсы промежуточной частоты, идущие далее на усилитель.

Отражённые от цели сигналы принимаются антенной и через циркулятор и разрядник защиты приёмника поступают на балансный смеситель канала сигнала. В результате смешения отражённых сигналов и непрерывных колебаний клистрона образуются сигналы промежуточной частоты.

Высокочастотная головка, представляющая собой ряд волноводных широкодиапазонных соединений и выполняет следующие функции: осуществляет передачу высокочастотной энергии генератора в антенну, осуществляет супергетеродинный приём отражённых сигналов, вырабатывает управляющий импульс промежуточной частоты для системы АПЧ гетеродина.

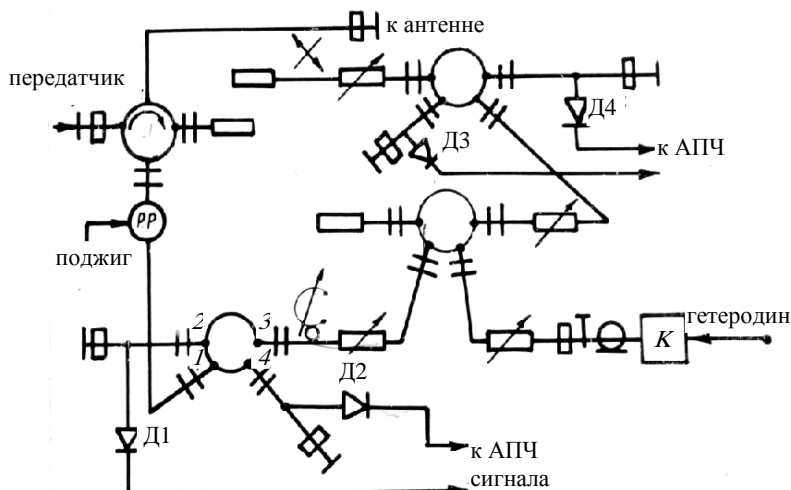


Рис. 3.1

Ферритовый циркулятор (рис. 3.2) обеспечивает работу одной антенны на приём и передачу. Он должен направлять колебания генератора в антенну и защищать при этом чувствительные к перегрузкам детектора преобразователя частоты приёмника. Между импульсами передатчика циркулятор должен с минимальными потерями пропускать принимаемые антенной отражённые от цели в.ч. сигналы и направлять их в преобразователь частоты. Он представляет собой фазосдвигающее устройство, позволяющее осуществлять циркуляцию в.ч. энергии по различным каналам.

Циркулятор состоит из свёрнутого Т-моста (двойного тройника), ферритовой секции и щелевого моста.

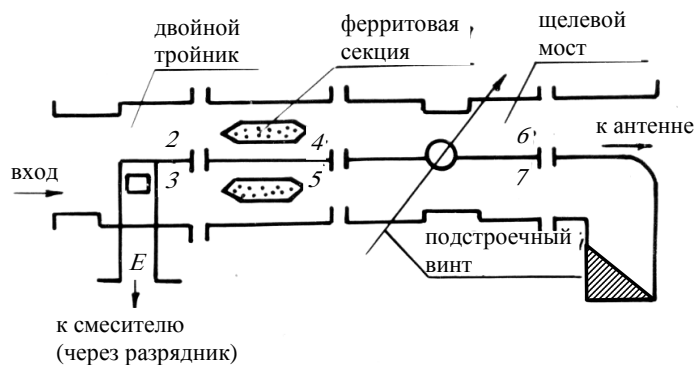


Рис. 3.2

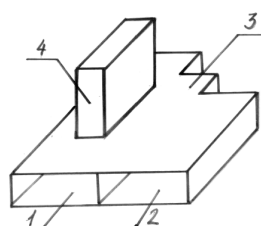


Рис. 3.3. Двойной Т-мост

Свёрнутый двойной Т-мост (рис. 3.3) образное соединение. Это изменение свёрнутом двойном тройнике волны в возбуждении его из канала 3 и в получения хорошего согласования со специальным ступенчатый переход с Ферритовая секция представляет собой стенку. Внутри каждого волновода, вблизи пластины. Расположение пластин выбрано волновода с ферритами в поперечное дифференциальный фазовый сдвиг на  $90^\circ$  в канале 4 при прохождении энергии в одном направлении и в канале 5 при прохождении в другом направлении.

Щелевой мост представляет два прямоугольных волновода, имеющих общую боковую стенку, в которой прорезана щель. Высота её обычно равна высоте волновода, в результате образуется участок сдвоенного волновода, в пределах которого могут распространяться волны, как основная  $H_{10}$ , так и волна следующего порядка  $H_{20}$ .

Высокочастотная энергия магнетрона поступает в плечо 1 Т-моста циркулятора и делится поровну в плечах 2 и 3 (рис. 3.2). Фаза энергии в плече 4 будет отличаться от фазы энергии в плече 5 на  $90^\circ$ . Ранее энергия проходит через щелевой мост, который даёт также сдвиг по фазе на  $90^\circ$ . В результате, в плече 4 получается сдвиг на  $180^\circ$ , а энергия в плечо 7 не пойдёт. Энергия магнетрона поступает в плечо 6 и далее в антенну. Разрядник защиты приёмника, включённый в плечо E загорается при невысоком уровне мощности. Таким образом, на смеситель канала сигнала мощность, способная его перегрузить, не поступает.

Балансный смеситель выполнен в виде волноводного кольцевого моста (рис. 3.4).

На детекторы приходят сигналы равные по величине (примерно) и противоположные по фазе, так как разность хода волны в кольце –  $1/2$ .

В плечо 3 отражённые сигналы сигнала попадает только в смесительные

Входная цепь УПЧ построена так, что противофазе – складываются. Так как на фазе, то они уничтожаются во входных цепях чувствительность растёт.

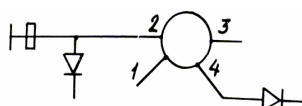


Рис. 3.4. Волноводный кольцевой мост

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

представляет собой видоизменённое двойное Т-заключается в повороте плеч 1 и 2 на  $90^\circ$ . В каналах 1 и 2 находятся в фазе при противофазе при возбуждении из канала 4. Для стороны плеча 3 обычно используется одинарного волновода на сдвоенный.

сдвоенный волновод, имеющий общую узкую общую узкой стенки размещаются ферритовые таким образом, чтобы при помещении магнитное поле обеспечивался бы

### 3.2. Циркулятор поляризационный с использованием эффекта Фарадея

Схема циркулятора с использованием эффекта Фарадея показана на рис. 3.5.

Плечо 1 представляет собой прямоугольный волновод, плавно переходящий в круглый. При этом волна  $H_{10}$  в плече 1 преобразуется в волну  $H_{11}$  круглого волновода. Плечо 3 также представляет собой прямоугольный волновод (широкая стенка его параллельна оси циркулятора), расположенный под углом  $90^\circ$  к прямоугольному волноводу в плече 1 и связанный с круглым волноводом через отверстия связи. Поскольку при возбуждении плеча 1 (рис. 3.6) вектор электрического поля в круглом волноводе ориентирован параллельно оси волновода в плече 3, при этом в плече 3 возбуждаются  $E$ -волны и  $H$ -волны высших типов, для которых волновод плеча 3 является предельным: поэтому энергия из плеча 1 в плечо 3 не ответвляется и поступает на вход отрезка круглого волновода с продольно-намагниченным соленоидом с ферритовым стержнем. Параметры ферритового стержня (диаметр, длина и др.), а также направленность постоянного

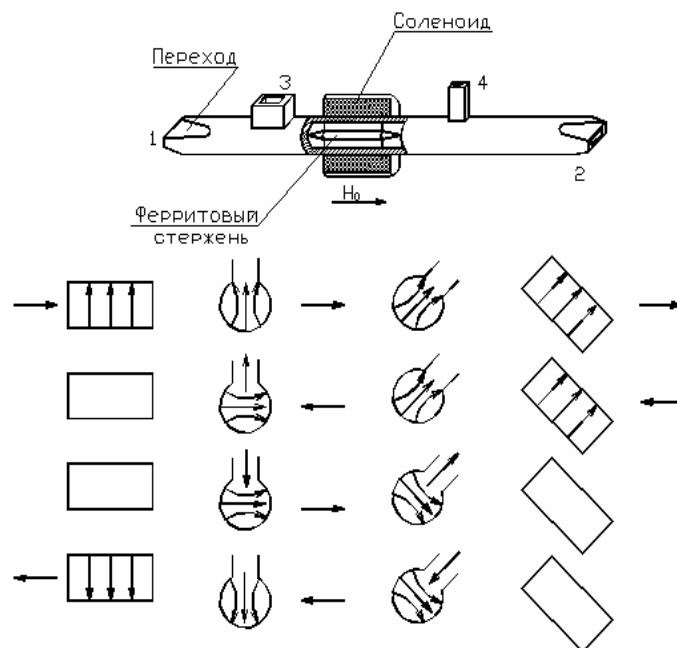


Рис. 3.5

магнитного поля  $H$  подбираются таким образом, чтобы плоскость поляризации волны, прошедшей через отрезок волновода с ферритом, повернулась на  $45^\circ$  по часовой стрелке, если смотреть вдоль вектора  $H_0$ . Плечи 2 и 4 на выходе циркулятора выполнены аналогично плечам 1 и 3. Однако секция с плечами 2 и 4 повернута вокруг оси круглого волновода на  $45^\circ$  относительно аналогичной секции с плечами 1 и 3. Поэтому вектор электрического поля волны на выходе круглого волновода с ферритом оказывается ориентированным вдоль оси волновода в плече 4 и перпендикулярно широким стенкам волновода в плече 2. При этом плечо 4 не возбуждается, поскольку при такой ориентации вектора  $E$  в плече 4 невозможно возбуждение волны  $H_{10}$ , и вся энергия волны поступает на вход плеча 2.

Возбудим волну  $H_{10}$  на входе плеча 2. Пройдя главный переход от прямоугольного волновода к круглому, волна  $H_{10}$  преобразуется в волну  $H_{11}$  и окажется повернутой на  $45^\circ$  относительно исходного положения. Поскольку направление поворота плоскости поляризации не зависит от направления движения волны, то плоскость поляризации повернется на угол  $45^\circ$  по часовой стрелке (если смотреть по направлению  $H$ ) и окажется поляризованной горизонтально. В результате вектор  $E$  оказывается ориентирован параллельно широким стенкам волновода плеча 1, в котором возбуждается волна  $H_{01}$ , для которой 1 является предельным, в относительно широких стенках волновода 3 вектор  $E$  перпендикулярен. При такой ориентации вектора  $E$  энергия волны  $H_{10}$  полностью поступает в плечо 3. Аналогичным образом можно показать, что из плеча 3 волна поступает в плечо 4, а из 4 в 1 (рис. 3.6). Рассмотренное устройство, таким образом, является четырёхплечим циркулятором с последовательностью коммутации плеч  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ . Изменение ориентации поля  $H_0$  на противоположное влечёт изменение за собой направления циркуляции на  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ . Достоинством рассмотренного циркулятора является малая величина намагничивающих полей  $H_0$ . Это обстоятельство, в частности, позволяет получить весьма быстродействующие антенные коммутаторы, производящие переключения каналов за время около 0,15 мкс, которые нашли применение, например, в доплеровских измерителях скорости и угла сноса.

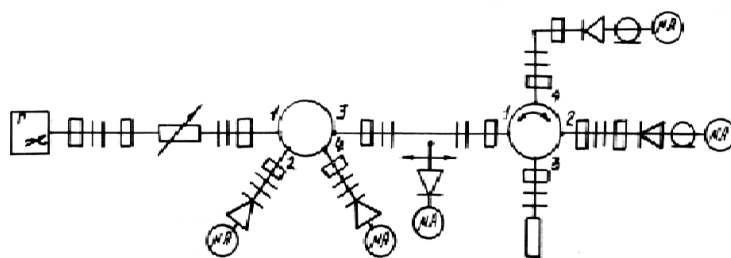


Рис. 3.6

### 3.3. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки для исследования фазового ферритового циркулятора с волноводно-щелевым и двойным Т-мостом приведена на рис. 3.6, составными элементами которого, являются:

- двойной Т-мост, основные плечи которого согнуты под углом  $90^\circ$  и соединены по узкой стенке;
- фазовращатель с ферритовыми пластинками;
- волноводно-щелевой мост;
- постоянный магнит, создающий поперечное магнитное поле;
- поглотительная нагрузка, включённая в  $E$  плечо двойного Т-моста (плечо 3).

В состав лабораторной установки входят:

1. Исследуемый ферритовый циркулятор.

2. Клистронный генератор с блоком питания.
3. Атенюаторы поглотительного типа.
4. Детекторные секции.
5. Измерительные приборы (микроамперметры).
6. Согласованная волноводная оконечная нагрузка.
7. Волноводный кольцевой мост.
8. Соединительные отрезки волноводов.

Схема лабораторной установки для исследования поляризационного ферритового циркулятора приведена на рис. 3.7.

Принцип поляризационного циркулятора основан на использовании эффекта Фарадея (необратимого поворота плоскости поляризации) в круглом волноводе с продольно-намагниченным ферритом.



**Рис. 3.7**

Общий вид поляризационного циркулятора и пояснения его работы показаны на рис. 3.5. Электромагнит запитанный от блока питания, служит для создания поперечного магнитного поля.

### 3.4. Порядок выполнения работы

#### А. Исследование поляризационного циркулятора

Для этого необходимо:

1. Включить клистронный генератор и блок питания нагрузки подмагничивания.
2. Подключить к плечу 2 детекторную секцию.
3. Снять зависимость мощности, проходящей в плечо 2, от величины прямого напряжения на катушке подмагничивания изменяя напряжение блока питания от 0 до 27 В (дискретно через 3 В).
4. Полученные результаты занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27

Примечания: 1. Показания микроамперметра, подключённого к детекторной секции, считать пропорциональными измеряемой мощности, так как вольтамперная характеристика диода детекторной секции близка к квадратичной.

2. Чтобы во время проведения эксперимента стрелка микроамперметра не зашкаливалась, предварительно необходимо экспериментально установить такое напряжение на катушке подмагничивания, при котором показания прибора максимальны. Затем с помощью аттенюатора уменьшить уровень ВЧ энергии, поступающей в циркулятор, установить показания прибора не более 100 делений.

5. Подключить детекторную секцию к плечу 4.
6. Снять зависимость.
7. Полученные данные занести в табл. 3.1.
8. Изменить полярность питания катушки подмагничивания, поменяв местами клеммы питания.
10. Полученные данные занести в табл. 3.2.



	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27

11. По данным табл. 3.1 и 3.2 построить зависимость.

12. По результатам исследования на графиках определить оптимальные токи катушек подмагничивания, при которых обеспечивается наилучшая развязка между плечами 2 и 4.

13. Снять зависимость КСВ в линии от величины и направления подмагничивающего тока.

Б. Исследование фазового циркулятора

Для этого необходимо:

1. Включить клистронный генератор.

2. Подключить к плечу 2 и 3 детекторные секции, а к плечу 4 согласованную нагрузку.

3. Снять показания микроамперметров и определить КСВ.

4. Перестановить детекторную секцию с плеча 2 на плечо 4, а согласованную нагрузку поставить на плечо 2.

5. Снять показания микроамперметров и определить КСВ.

6. Определить развязку между плечами циркулятора и КБВ.

### 3.5. Содержание отчёта

Отчёт о работе должен содержать:

1. Тему и цель лабораторной установки.

2. Схемы лабораторных установок.

3. Таблицы и экспериментальные данные.

4. Графики экспериментальных зависимостей, построенных по данным таблиц.

5. Значения оптимальных токов подмагничивания.

6. Значения развязок, КСВ и КБВ.

7. Выводы по работе.

### 3.6. Контрольные вопросы

1. Поясните эффект Фарадея в ферритах, помещённых в магнитное поле.

2. Поясните явление дифференциального фазового сдвига электромагнитного поля в волноводах с поперечно-намагниченными ферритами.

3. Опишите конструкцию ферритового поляризационного циркулятора.

4. Опишите конструкцию ферритового фазового циркулятора.

5. Поясните свойства двойного Т-моста.

6. Поясните свойства волноводно-щелевого моста.

7. Поясните свойства волноводного кольцевого моста.

8. Опишите принцип действия ферритового поляризационного циркулятора.

9. Опишите принцип действия ферритового фазового циркулятора.

10. Поясните принцип действия головки СВЧ РЛС.

11. Опишите конструкцию головки СВЧ РЛС.

Лабораторная работа 4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЩЕЛЕЙ И ОТВЕРСТИЙ НА КАЧЕСТВО ЭКРАНИРОВАНИЯ РЭА

*Цель работы:* изучить влияние конструктивных неоднородностей в виде щелей и отверстий плоских экранов на характеристики экранирования поля СВЧ.

### Методические указания

При подготовке к данной лабораторной работе необходимо изучить раздел [Перфорированные экраны].

При изучении надо обратить внимание на следующие моменты. Принципы экранирования НЧ и СВЧ различаются. Если на низких частотах экраны РТУ представляют собой специальные металлические конструкции, то большинство конструкций СВЧ являются самоэкранирующимися, например, коаксиальные кабели, волноводы, резонаторы. На СВЧ глубина проникновения поля в проводник много меньше толщины стенок, поэтому проникновение поля через толщину материала стенок СВЧ-устройства практически не происходит. В основном помехи проникают через конструктивные неоднородности в стенках, в частности, через различные щели и отверстия, особенно заполненные диэлектриком, и в местах сочленения СВЧ-устройств. При теоретической оценке качество экранирования отверстия приблизительно представляет линии передач, соединяющими внешнее и экранируемое пространство. Условия возбуждения таких линий и передача энергии по ним определяется формой и размером отверстий, местом расположения их на СВЧ-элементе и рядом других причин. Задача

обеспечения высокого качества экранирования в этом случае тесно сопрягается с задачей согласования неоднородностей с основной линией передачи, так как наличие излучающего отверстия приводит к перераспределению токов и полей в линии, т.е. к согласованному режиму передачи.

При подготовке необходимо также чётко знать определения параметров, по которым оцениваются качество экранирования  $K$ , (на СВЧ им пренебрегают, так как он учитывает проникновение поля помехи через толщину стенок экрана), коэффициент неоднородностей

$$K_n = \frac{E_n}{E_0}, \quad (4.1)$$

учитывающий отношение амплитуды поля помехи  $E_n$ , проникающего через отверстия, к амплитуде внешнего помехонесущего поля  $E_0$ . Зная  $K_n$ , можно найти величину полного экранного затухания

$$A_3 = 20 \lg \frac{1}{K_n}. \quad (4.2)$$

Необходимо помнить, что теоретические расчёты коэффициентов неоднородности носят ориентировочный характер, так как их значение зависит от многих конструктивных и технологических факторов: формы, размеров, ориентации и числа щелей и отверстий, материала и технологии изготовления экрана и т.п. Существенное значение при этом имеют вид поляризации и тип волны экранируемого поля.

Только для простых типов отверстий расчёты можно провести с удовлетворительной точностью. В основном, качество экранирования оценивается экспериментально.

Показано, в частности, что при тонком металлическом экране прорезано  $M$  узких параллельных прямоугольных щелей длиной  $\lambda/2$  (рис. 4.1) и на экран падает нормально к его поверхности плоская линейно поляризованная волна, то коэффициент неоднородностей и экранное затухание  $A_3$  можно оценить по формулам:

$$\begin{aligned} K_n &= M K'_n ; \\ K_n &= 0,13 \frac{\lambda}{R_3} \cos \theta ; \\ A_3 &= 20 \lg \left( \frac{7,7 R_3}{M \lambda \cos \theta} \right), \end{aligned} \quad (4.3)$$

где  $R_3$  – размер экрана в направлении волны;  $\theta$  – угол между нормалью к широкой стороне щели и плоскостью поляризации поля.

Из формул (4.2) и (4.3) видно, что экранное затухание будет велико для щелей, ориентированных параллельно вектору  $\vec{E}$  поля помехи, т.е. прорезанных вдоль линии поверхности токов на стенках экрана.

Для системы  $M$  круглых отверстий в экране, радиусы много меньше длины волны  $\lambda$ . Для тех же условий выражение (4.2) примет вид (обозначения см. на рис. 4.1):

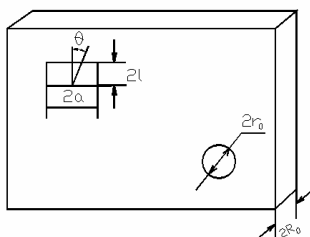


Рис. 4.1

$$\begin{aligned} K_n &= M K''_n ; \\ K_n &= \frac{2}{3\pi} \left( \frac{r_0}{R_3} \right)^3 ; \\ A_3 &= 20 \lg \left[ \frac{4,7}{M} \left( \frac{R_3}{r_0} \right)^3 \right]. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Видно, что чем меньше радиус отверстий  $r_0$ , тем лучше экранирующий эффект.

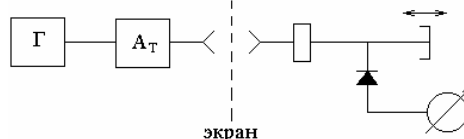


Рис. 4.2

#### 4.1. Описание лабораторной установки

Для исследования влияния разных неоднородностей экранов на характеристики экранирования в лабораторной работе используется установка, собранная по схеме рис. 4.2. Она состоит из генератора, развязывающего аттенюатора, передающего и приёмного рупоров, короткозамыкателя и индикаторного прибора.

#### 4.2. Порядок выполнения работы

В данной работе необходимо экранное затухание для разных конструкций экранов. До измерения необходимо провести теоретические расчёты экранного затухания для исследуемых экранов по формулам (4.1) и (4.2), полагая радиус экрана  $r$  равным длине приемного рупора.

Результаты расчёта занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Частота, ГГц	
$A_3$ , экран № 1	
$A_3$ , экран № 2	
$A_3$ , экран № 3	

По результатам построить графики  $A_3^{\text{расч}}(f)$ .

Порядок выполнения работы следующий:

4.2.1. Собрать установку по блок-схеме рис. 4.2.

4.2.2. В отсутствие экрана измерить напряжение  $U_1$  на выходе детекторной секции с помощью измерительного усилителя.

4.2.3. Установить перед передним рупором экран № 1.

4.2.4. Измерить напряжение  $U_2$  на выходе детекторной секции при наличии экрана.

4.2.5. Рассчитать величину экранного затухания по формуле

$$A_3 = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} = 10 \lg \frac{q_1}{q_2},$$

где  $q$  – показание прибора.

4.2.6. Прodelать измерения по п.п. 2 – 5 с экранами других типов конструкций на нескольких частотах (по указанию преподавателя).

Результаты занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Частота, ГГц	
$U_1$ без экрана	
экран №	
$U_2$ экран №	
экран №	
экран №	
$A_3$ экран №	
экран №	

#### 4.3. Содержание отчёта

В отчёте должно быть представлено следующее:

4.3.1. Сформулирована цель лабораторной работы, основные теоретические положения о влиянии формы, размеров и ориентации отверстий в экране на затухание.

4.3.2. Приведены расчётные формулы и таблицы теоретических расчётов экранного затухания.

4.3.3. Структурная схема измерительной установки, эскизы исследуемых экранов.

4.3.4. Таблицы результатов измерений.

4.3.5. Графики зависимости экранного затухания  $A_3$  от частоты по результатам расчётов и измерения.

4.3.6. Выводы по работе.

#### 4.4. Контрольные вопросы

1. Для какой цели используют отверстия и щели в экранах РТУ?

2. Как следует ориентировать узкие щели в экранах на СВЧ?

3. Каким образом учитывают экранное затухание?

4. Каким образом уменьшают влияние неоднородностей в экранах?

5. Из каких компонентов состоит полное экранное затухание на СВЧ?

6. Как влияет тип материала экрана на экранирование в широком диапазоне частот?

7. Дать определение коэффициента неоднородностей и полного экранного затухания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструирование экранов и СВЧ устройств / под ред. А.М. Чернушенко. – М. : Радио и связь, 1990. – 352с.
2. Фрадин, А.З. Измерения параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков. – М. : Связь, 1972. – 430с.
3. Малков, Н.А. Основы технической электродинамики : учебное пособие / Н.А. Малков, Г.А. Барышев. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2003. – 143 с.
4. Вальднер, О.А. Техника сверхвысоких частот : учебная лаборатория / О.А. Вальднер, О.С. Милованов, Н.П. Собенин. – М. : Атомиздат, 1974. – 232 с.