

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ
СВЧ ДИАПАЗОНА**

Руководство к лабораторной работе по дисциплинам «Электродинамика
и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны»,
«Распространение радиоволн и АФУ»
для студентов специальностей 210302, 210303, 210304, 210312, 210313,
210403, 210401, 210405.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

Утверждаю
Зав. каф. СВЧиКР
_____ С.Н. Шарангович
“ ____ “ _____ 2011 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ
СВЧ ДИАПАЗОНА**

Руководство к лабораторной работе по дисциплинам «Электродинамика
и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны»,
«Распространение радиоволн и АФУ»
для студентов специальностей 210302, 210303, 210304, 210312, 210313,
210403, 210401, 210405.

Разработчики:

доц. каф СВЧ и КР
_____ Ж.М.Соколова,
доц. каф СВЧ и КР
_____ Е.В.Падусова

Содержание

1	Цель работы	4
2	Основные положения теории	4
2.1	Бегущие волны в волноводе	4
2.2	Стоячие волны в волноводе	10
3	Экспериментальная часть	12
3.1	Установка для эксперимента	12
3.2	Порядок выполнения работы	15
3.2.1	Домашнее расчетное задание	15
3.2.2	Снятие дисперсионных характеристик	16
3.2.3	Исследование поля в волноводе в запердельном режиме и распределение E , и H_ϕ в коаксиальной линии	17
3.2.4	Исследование структуры полей	18
3.2.4	Правила построения структуры полей	21
3.2.5	Процесс построения структуры полей	22
4	Контрольные вопросы	23
5	Содержание отчета	24
6	Список использованной литературы	25

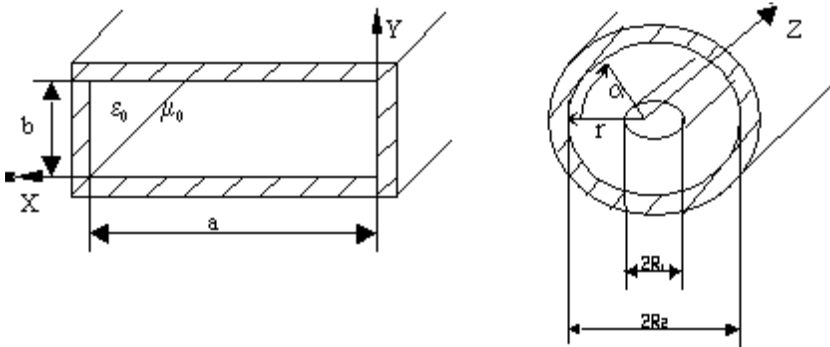
1. Цель работы.

- 1.1 . Ознакомление с основными особенностями распространения электромагнитных волн в передающих линиях СВЧ диапазона: прямоугольном и коаксиальном волноводах.
- 1.2 . Снятие и исследование дисперсионных характеристик.
- 1.3 . Исследование структуры электромагнитных полей в прямоугольном и коаксиальном волноводах.

2. Основные положения теории

2.1. Бегущие волны в волноводах

Прямоугольный и коаксиальный волноводы относятся к линиям закрытого типа (рис 1), поэтому вся энергия, передаваемая по ним, сосредоточена во внутренней области, экранированной от внешней среды. Электромагнитное поле в экранированных линиях передачи характеризуется структурой поля, то есть пространственным распределением векторов \vec{E} и \vec{H} полей, которые можно изобразить, зафиксировав момент времени.



$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq x \leq a \\ 0 \leq y \leq b \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{внутренняя область} \\ \text{прямоугольного волновода} \end{array} \quad \text{a)}$$

$$\left. \begin{array}{l} R_1 \leq r \leq R_2 \\ 0 \leq \alpha \leq 2\pi \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{для коаксиального} \\ \text{волновода} \end{array} \quad \text{б)}$$

Рис.1 Прямоугольный (а) и коаксиальный (б) волноводы.

Для волноводов теоретически возможно бесконечное количество структур полей, в дальнейшем именуемых типами волн. На практике используются наиболее простые или низшие типы волн. Выделить эти типы волн из бесконечного множества можно выбором соответствующих размеров поперечного сечения волновода при заданном рабочем диапазоне длин волн $\lambda_{\min} \div \lambda_{\max}$.

Широко распространённым типом волны является тип Т –поперечно электромагнитный. Для него характерно отсутствие продольных составляющих электромагнитного поля: E_z и H_z . Примером линии, по которой могут распространяться поперечные волны, является двухпроводная линия (рис.2).

Двухпроводная линия может передавать очень широкий диапазон частот, но в диапазоне СВЧ использоваться не может в связи с большими потерями на излучение.

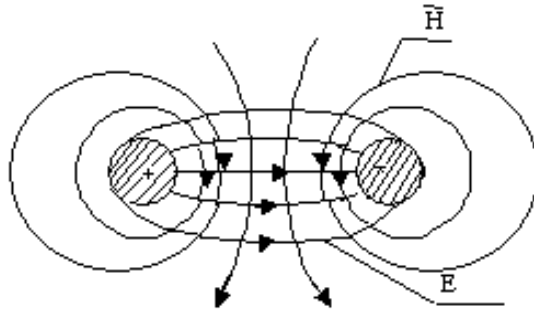


Рис.2 Структура поля волны типа Т в двухпроводной линии при $z = \text{const}$.

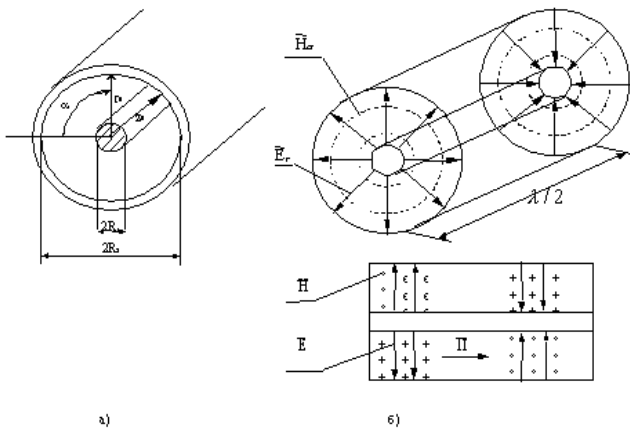


Рис.3 Структура поля бегущей Т волны в коаксиальном волноводе

Коаксиальная линия (рис.3) относится к двухпроводным линиям. В ней могут, с одной стороны, распространяться волны типа Т, а с другой стороны, как линии волноводного типа, в ней могут распространяться более сложные волны, имеющие поперечные и продольные составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} . Для передачи энергии, в основном, применяются коаксиальные линии, по которым распространяются только Т волны. Для этого достаточно выполнить для минимальной длины волны передаваемого диапазона следующее условие

$$\lambda_{\min} \geq \pi(R_2 + R_1)$$

В такой линии электромагнитное поле будет представлено двумя компонентами:

$$E_r = \frac{A}{r} \cdot e^{j(\omega \cdot t - \kappa \cdot z)} \quad (1)$$

$$H_\alpha = \frac{A}{rZ_W} \cdot e^{j(\omega \cdot t - \kappa \cdot z)},$$

где $A=E_0 \cdot R_1$, E_0 -напряженность электрического поля у поверхности внутреннего проводника;

Z_W - характеристическое сопротивление среды, для воздушного заполнения $Z_W=120 \cdot \pi$ Ом;

$\kappa = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_\kappa}$ - фазовая постоянная волны в коаксиальной линии;

λ_κ - длина волны в коаксиальной линии. При воздушном заполнении $\lambda_\kappa=\lambda$;

λ - длина волны в свободном пространстве;

$R_1 \leq r \leq R_2$ -текущая координата;

$e^{j(\omega \cdot t - \kappa \cdot z)}$ - волновой множитель волны, бегущей вдоль оси z.

На рисунке 3б изображена структура поля в коаксиальной линии для бегущей волны типа Т.

Прямоугольный волновод (рис.1а) в отличие от коаксиальной линии является однопроводной или односвязной линией, в которой поперечные волны в принципе существовать не могут.

По волноводам распространяются волны типа Н ($H_z \neq 0, E_z = 0$) и волны типа Е ($E_z \neq 0, H_z = 0$), для которых характерно наличие критической частоты $f_{кр}$. Критическая частота разделяет частотный диапазон на полосы пропускания ($f > f_{кр}$) электромагнитных волн и не пропускания ($f < f_{кр}$). Для частот $f > f_{кр}$ электромагнитные поля имеют волновой характер, а составляющие поля содержат множитель $e^{j(\omega t - \beta z)}$; для частот $f < f_{кр}$ (запредельный режим волновода) этот множитель приобретает вид $e^{j\alpha x} \cdot e^{-\beta \cdot z}$, который определяет затухающий характер полей вдоль оси z. Критическая частота и критическая длина волны $\lambda_{кр}$ определяются для прямоугольного волновода формулами:

$$f_{кр} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}; \quad \lambda_{кр} = \frac{c}{f_{кр}}, \quad (2)$$

где m, n- целые положительные числа;

c- скорость света;

a, b – размеры поперечного сечения волновода, причем $a > b$.

Комбинация чисел m и n характеризует конкретный тип волны $E_{m n}, H_{m n}$. Отметим, что кроме критической частоты каждый тип волны имеет собственную, отличную от других, структуру поля. Индекс m определяет количество вариаций (полупериодов тригонометрической функции), укладываемых по оси x, а n - по оси y.

Основным или низким типом волны в прямоугольном волноводе является тип H_{10} , для которого $m=1, n=0$ и критическая частота $f_{крH_{10}} = \frac{c}{2a}$, а критическая длина волны равна $\lambda_{крH_{10}} = 2a$ и имеет наибольшую величину из всех возможных для данного волновода критических длин волн.

Для того чтобы по прямоугольному волноводу распространялась только волна H_{10} необходимо выполнить условия:

$$f_{крH_{10}} < f_{\min} \div f_{\max} < f_{крH_{20}} \quad (3a)$$

или

$$\lambda_{крH_{20}}, \lambda_{крH_{01}} < \lambda_{\min} \div \lambda_{\max} < \lambda_{крH_{10}} \quad (3б)$$

или с учётом размеров волновода ($a > b, a > b$)

$$\begin{aligned} a &< \lambda_{\min} \div \lambda_{\max} < 2a \\ b &< (\lambda_{\min} \div \lambda_{\max}) / 2 \end{aligned} \quad (3)$$

Электромагнитное поле волны H_{10} определяется выражениями:

$$\left. \begin{aligned} H_z &= H_{z0} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{a} \\ H_x &= jH_{x0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{a} \\ E_y &= -jE_{y0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{a} \end{aligned} \right\} e^{j(\omega t - \beta \cdot z)} \quad (4)$$

где E_{y0} , H_{x0} , H_{z0} - вещественные амплитуды соответствующих компонент поля;

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_b} \text{ - фазовая постоянная волны для волновода;}$$

λ_b - длина волны в волноводе.

Из (4) следует, что электромагнитное поле имеет три компоненты (проекции векторов), ориентированных вдоль соответствующих осей координат, каждая из которых зависит от двух координат x , z и не зависит от оси y , т.е. однородно по оси y . Функции $\sin \frac{\pi \cdot x}{a}$ и $\cos \frac{\pi \cdot x}{a}$ определяют характер изменения компонент вдоль оси x . По оси z волна является бегущей, на что указывает множитель $e^{j(\omega t - \beta \cdot z)}$. Отметим, что $\beta \neq k$ на одной и той же частоте.

Структура поля бегущей волны H_{10} , построенная на основании уравнений (4), приведена на рисунке 4. В уравнении (4) сделаны преобразования

$$j = e^{j\pi/2}; \quad \operatorname{Re} e^{j(\omega t - \beta z)} = \cos(\omega t - \beta z);$$

$$\operatorname{Re} e^{j(\omega t - \beta z + \pi/2)} = \sin(\omega t - \beta z).$$

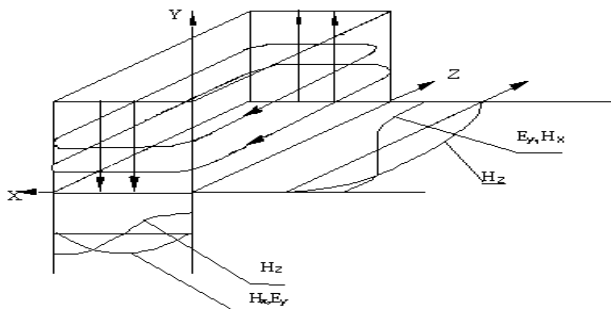


Рис.4. Структура поля волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе.

Любая передающая линия характеризуется электрическими параметрами, к которым относятся: фазовая постоянная β , длина волны $\lambda_{\text{в}}$, фазовая скорость $V_{\text{ф}}$, групповая скорость $V_{\text{ГР}}$, характеристическое сопротивление $Z_{\text{в}}$, предельная мощность $P_{\text{пред}}$, постоянная затухания α . Для волноводов все перечисленные параметры зависят от частоты. Зависимость от частоты параметров линии передачи называется дисперсией и определяется поведением коэффициента дисперсии K_{δ} , который определяется формулой:

$$K_{\delta} = \sqrt{\varepsilon_r - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2} = \sqrt{\varepsilon_r - \left(\frac{f_{\text{кр}}}{f}\right)^2}, \quad (5)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей волновод. Для волновода, заполненного воздухом, $\varepsilon_r = 1$. Из формулы (5) следует, что при изменении λ от 0 до $\lambda_{\text{кр}}$ при $\varepsilon_r=1$ коэффициент K_{δ} изменяется от 1 до 0. Рассматриваемый ниже прямоугольный волновод относится к односвязным (однопроводным) системам.

Зависимость параметров односвязных волноводов от частоты определяется формулами:

1. Фазовая постоянная $\beta = k \cdot K_{\delta}$; (6)

2. Длина волны в волноводе $\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda}{K_{\delta}}$; (7)

3. Фазовая скорость волны в волноводе $v_{\text{ф}} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{K_{\delta}}$; (8)

4. Групповая скорость волны в волноводе $v_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{d\beta} = c \cdot K_{\delta}$; (9)

5. Характеристическое сопротивление волновода $Z_{\text{в}} = \frac{120 \cdot \pi}{K_{\delta}}$; (10)

6. Предельная мощность $P_{\text{пред}} = \frac{E_{\text{пр}}^2 \cdot a \cdot b}{4 \cdot 120 \cdot \pi} \cdot K_{\delta}$, (11)

где $E_{\text{пр}} = 30$ кВ/см предельная напряженность поля в воздухе при нормальном атмосферном давлении;

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$$

-поверхностное сопротивление стенок волновода, с удельной проводимостью σ , равной $5,8 \cdot 10^7$ Сим/м, магнитная проницаемость стенок $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

7. Величина затухания волны

$$\alpha^{H_{10}} = \frac{R_s}{120 \cdot \pi \cdot b} \cdot \frac{\left(1 + \frac{2 \cdot b \cdot \lambda^2}{a^3}\right)}{K_\delta} \quad (12)$$

Для коаксиальной линии с воздушным заполнением на волне типа T критическая длина волны $\lambda_{кр} = \infty$, $K_\delta = 1$ и основные параметры легко получить из (6)-(10).

Отметим только отличающиеся параметры:

$$P_{перед}^T = \frac{\pi E_{np}^2 R_1^2}{120\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}; \quad (13)$$

$$\alpha_T = \frac{R_s}{2 \cdot 120\pi \cdot R_2} \cdot \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (14)$$

где R_1, R_2 радиусы внутреннего и внешнего проводников (рис. 1).

Для коаксиальных кабелей с диэлектрическим заполнением $\epsilon_r \neq 1$, поэтому для волны типа T величина $K_\delta = \sqrt{\epsilon_r}$, а электрические параметры в соответствии с (6)–(10) будут зависеть от ϵ_r .

2.2. Стоячие волны в волноводе

Структуру поля в волноводе экспериментально можно снять, создав в нём режим стоячей волны, для чего на конце волновода подключается коротко замыкающая металлическая пластинка. В результате в волноводе возникают падающая и отраженная волны, которые, складываясь, образуют стоячую волну, структура ее определяется выражениями:

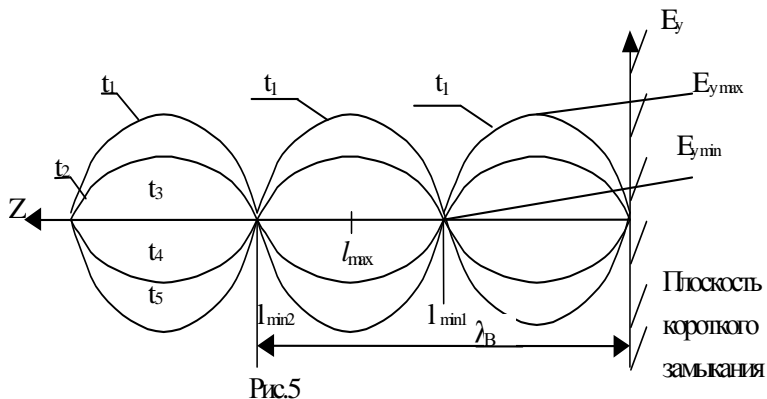
$$\left. \begin{aligned} H_z &= H_{z0} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{a} \cdot \sin \beta \cdot z \\ H_x &= H_{x0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{a} \cdot \cos \beta \cdot z \\ E_y &= -E_{y0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{a} \cdot \sin \beta \cdot z \end{aligned} \right\} e^{j \cdot \omega \cdot t}, \quad (15)$$

где координата z отсчитывается от короткозамыкателя.

Из уравнений (15) следует, что поперечные составляющие поля E_y и H_x в стоячей волне будут сдвинуты друг относительно друга по оси z на $\frac{\lambda_B}{4}$. Они пульсируют во времени и распределены вдоль оси z согласно функциям $\sin \beta z$ и $\cos \beta z$. Например, распределение составляющей E_y по оси z для волновода показано на рисунке 5. Из рисунка 5 видно, что

- 1) амплитуда напряженности электрического поля стоячей волны $E_{y0} \sin(\beta z)$ вдоль оси линии z изменяется по гармоническому закону;
- 2) в точках $z=l_{\min}$, где $\beta z=r\pi/2$, амплитуда напряженности равна нулю. Эти точки называются узлами, $r = 0, 1, 2, \dots$;
- 3) в точках $z=l_{\max}$, где $\beta z=(2r-1) \pi/2$, амплитуда напряженности будет максимальна. Эти точки называются пучностями;
- 4) расстояние между соседними узлами и соседними пучностями равно половине длины волны в линии ($\lambda_B/2$); а расстояние между ближайшими пучностью и узлом равно четверти длины волны бегущей в волноводе;
- 5) Минимумы напряжений в стоячей волне будут острее, чем максимумы.

Режим стоячих волн используется не только для исследования структуры полей, но позволяет также произвести измерения длины волны в волноводе λ_B , а следовательно снять зависимость всех перечисленных выше параметров при изменении частоты.



Структуру поля можно исследовать индикаторами поля: электрическим и магнитным диполями. С помощью измерительной линии можно измерить длину волны: $\lambda_g = 2|l_{\min 2} - l_{\min 1}|$,
 $\lambda_g = 4|l_{\max} - l_{\min}|$.

3 Экспериментальная часть

3.1. Установка для эксперимента

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 6. Генератор стандартных сигналов работает в диапазоне 1,9 ÷ 3,7 ГГц. Сигнал с генератора (1) поступает на циркулятор (2), далее на коаксиальную (3) и волноводную (5) измерительные линии, затем на волновод с отверстиями (11) и волновод с передвижным коротко замыкающим (КЗ) поршнем (12). Волна, отраженная КЗ поршнем, направляется циркулятором в согласованную нагрузку (8), тем самым исключается ее воздействие на работу генератора. Для исследования полей используются электрический и магнитный зонды, устройство которых показано на рисунке 7. Общим элементам в устройстве зондов присвоены одинаковые позиционные номера.

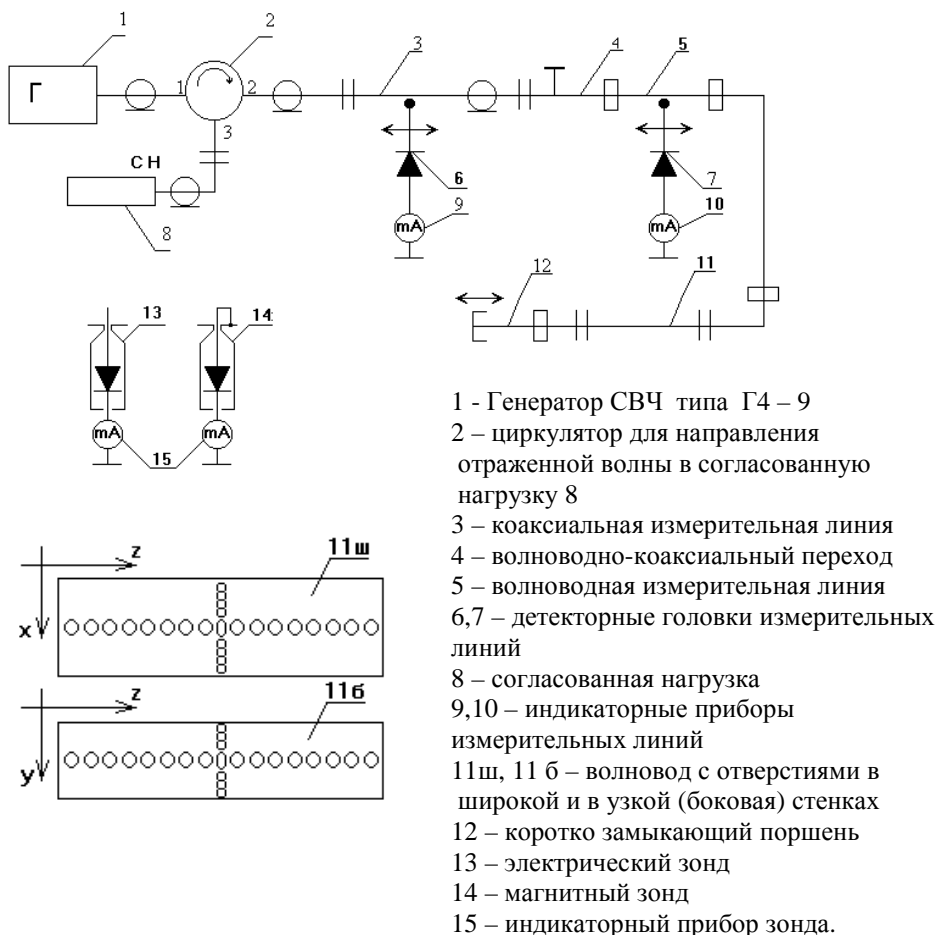
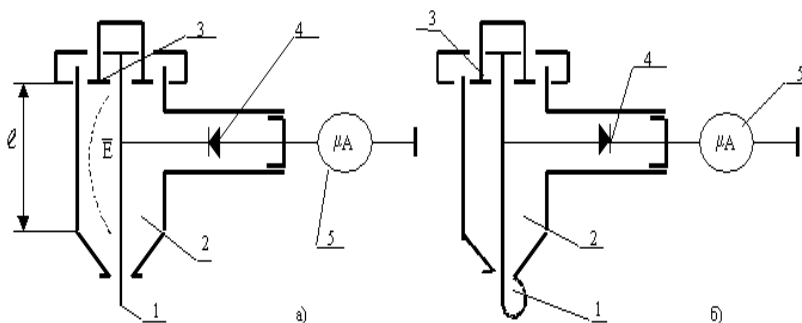


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

Ниже приведены рисунки, поясняющие устройство электрического и магнитного зондов (рис. 7). Зонды по принципу работы – типичные детекторные приемники сигнала, отличающиеся только элементами связи, электрический и магнитный диполи. Электромагнитная энергия через элемент связи (1) поступает в резонатор (2), в котором находится детектор (4). Если частота колебаний сигнала, распространяющегося в волноводе, попадает в полосу частот, настроенного резонатора, то часть энергии из волновода ответвляется в резонатор, и в цепи зонда будет

протекать постоянный ток, вызывающий отклонение стрелки микроамперметра (направление включения детектора произвольно).



1-штырь (электрический диполь) или 1-петля (магнитный диполь); 2- коаксиальный резонатор, длина которого l ; 3-поршень настройки резонатора на частоту f ; 4-кристаллический детектор - полупроводниковый диод; 5-индикаторный прибор.

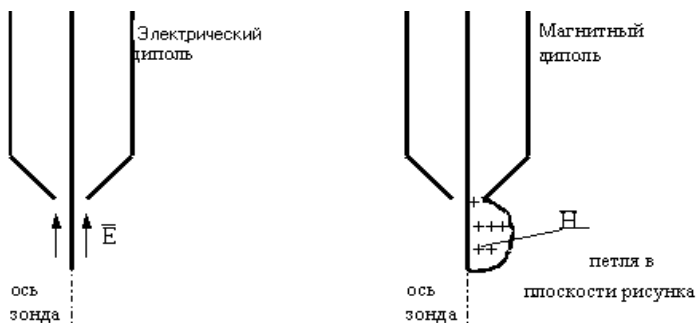


Рис. 8

Рис 7. Схемы устройства зондов: а - электрического; б - магнитного.

Показания стрелочного прибора пропорциональны квадрату напряженности поля в точке погружения зонда в волновод, т.к. ВАХ детектора имеет квадратичную зависимость, поэтому при построении эпюр из показаний нужно извлекать квадратный корень.

Электрический диполь реагирует на электрическое поле, параллельное его оси. Если ось электрического диполя направляется в волноводе по оси x , то при этом снимается E_x компонента, по оси y – поведение компоненты E_y .

Магнитный диполь реагирует на магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости петли (рис.8). Поэтому, при исследовании компоненты $H_x(x, z)$ следует правильно ориентировать магнитный зонд (рисунок 7.б).

Измерительные линии (волноводная и коаксиальная) представляют устройства, состоящие из соответствующих передающих линий с длиной продольной щелью. У волноводной линии эта щель находится в середине широкой стенки. Вдоль этих щелей на специальной каретке перемещается электрический зонд (рисунок 7а). На линии укреплен линейка для фиксации координаты зонда во время измерений, а на каретке расположена шкала нониуса, позволяющая получить измерения координатной точки с точностью 0,05мм.

Внимательно рассмотрите секцию волновода с отверстиями (рис. б), предназначенную для исследования структуры электромагнитного поля. Обратите внимание на то, что отверстия находятся как на широкой (горизонтальной) стенке (11ш, рис. 6), так и на боковой (11б, рис. 6). Радиус отверстий мал (2 мм), центры отверстий расположены на расстоянии 8 мм. В широкой и узкой стенках имеется ряд из 17 отверстий, направленных по оси z , и ряд из 9 отверстий в широкой стенке направлен по оси x , а в боковой – 5 отверстий по оси y . На конце волновода с отверстиями находится секция с подвижным короткозамыкателем - поршнем. Положение поршня может фиксироваться. Назначение поршня – создание отраженной волны и установление максимума амплитуды полей в центральной отверстии при исследовании структуры.

3.2 Порядок выполнения работы

3.2.1 Домашнее расчетное задание

- 3.2.1.1. Рассчитайте критическую частоту и критическую длину волны H_{10} для волновода (2) сечением $a \times b = 72 \times 34 \text{ мм}^2$. Отметьте их в таблице 1.
- 3.2.1.2. Рассчитайте теоретические (отмечаются индексом «Т») коэффициенты $K_{\sigma T}$ и $1/K_{\sigma T}$, пользуясь формулой (5) в диапазоне частот генератора $1,9 \div 3,7 \text{ ГГц}$ с шагом $\Delta f = 200 \text{ МГц}$. Внесите расчетные значения в таблицу 1 (далее) Постройте графики зависимостей $K_{\sigma T}$ и $1/K_{\sigma T}$ от частоты.

E_r											
$E_{r\text{отн}} = \frac{E_r}{E_{r\text{max}}}$											
H_α											
$H_{\alpha\text{отн}} = \frac{H_\alpha}{H_{\alpha\text{max}}}$											

$f \leq f_{\text{кр}}$ в волноводе (см. п. 3.2.1). Снимите зависимость поля $E_y(z)$ в измерительной волноводной линии и $E_r(z)$ и $H_\alpha(z)$ в коаксиальной линии. Координату z изменять от 0 до 20 см с интервалом 2 см. Поле $H_\alpha(z)$ снимается магнитным зондом. Занесите данные в таблицу 2 и нарисуйте графики – эпюры $E_{y\text{отн}}(z)$, $E_{r\text{отн}}(z)$ и $H_{\alpha\text{отн}}(z)$ на рисунке 3.5.

Сделайте выводы о распределении электромагнитных полей в линиях (волноводной и коаксиальной) при $f < f_{\text{кр}}$ волновода.

3.2.4 Исследование структуры полей

3.2.4.1 **Снятие структуры электрического поля** (E_y) производится в плоскости XOZ с помощью электрического зонда.

Установите на генераторе частоту из диапазона 2, 4÷3,7 ГГц (по заданию преподавателя), близкую к 3 ГГц. Определите для этой частоты длину волны в волноводе.

Введите электрический зонд в центральное отверстие горизонтальной стенки волновода. Добейтесь максимума показаний стрелочного прибора, перемещением КЗ поршня.

Передвигая зонд 13 в поперечном направлении (вдоль оси x от первого до девятого отверстия), снимите зависимость $E_y(x)$. Данные занесите в таблицу 3. Перемещая зонд по оси z , снимите зависимость $E_y(z)$. Данные занесите в таблицу 3.

Постройте графики нормированных функций E_y
 $E_{y \text{ отн}}(x) = \left(\frac{E_y(x)}{E_{y \text{ max}}(x)} \right)^{\frac{1}{2}}$ и $E_{y \text{ отн}}(z) = \left(\frac{E_y(z)}{E_{y \text{ max}}(z)} \right)^{\frac{1}{2}}$ (Сделайте
 номер рисунка 3.6а, б).

Таблица 3

Распределение $E_y(x,z)$ в плоскости XOZ																	
$N_{\text{отв}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$E_y(x)$																	
$\frac{E_y(x)}{E_{y(x)\text{max}}}$																	
$E_y(z)$																	
$\frac{E_y(z)}{E_{y(z)\text{max}}}$																	
$E_x(z)$																	
$E_x(y)$																	

3.2.4.2. Исследуйте компоненту электрического поля $E_x(z)$ и $E_x(y)$ в волноводе с отверстиями в боковой плоскости с помощью электрического зонда. Сделайте выводы о поведении этой компоненты по осям Z и Y . Данные внесите в таблицу 3.

3.2.4.3. **Исследование структуры магнитного поля.** В боковой стенке YOZ отрезка волновода с отверстиями снимите магнитным зондом компоненты $H_z(y)$, $H_z(z)$, $H_y(z)$, $H_y(y)$. Занесите данные и их нормированные значения в таблицу 4.

Таблица 4

Магнитное поле вблизи боковой стенки волновода																	
$N_{\text{отв}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$H_z(y)$																	
$\frac{H_z(y)}{H_z(y)_{\text{max}}}$																	
$H_z(z)$																	
$\frac{H_z(z)}{H_z(z)_{\text{max}}}$																	
$H_y(y)$																	
$H_y(z)$																	

По данным табл.4 постройте графики зависимостей полей $H_{z_{\text{отн}}}(y)$ и $H_{z_{\text{отн}}}(z)$ в боковой стенке (рис 3.7а, б) и сделайте выводы о поведении исследованной компоненты H_y .

3.2.4.4. Проведите исследование компоненты $H_z(x, z)$ в широкой стенке волновода. Для этого магнитный зонд следует перемещать вначале вдоль оси x , а затем, вдоль оси z . Данные занесите в таблицу 5 и поведите нормировку результатов эксперимента.

3.2.4.5. Для исследования компоненты $H_x(x, z)$ переместите КЗ поршень на расстояние $\lambda_B/4$ от ранее зафиксированного положения (величина λ_B определена в п. 3.2.4.1).

Введите магнитный зонд в центральное отверстие широкой стенки волновода и добейтесь максимального показания стрелочного прибора при движении его по оси z . Снимите зависимость $H_x(x)$, перемещая зонд вдоль оси x , и $H_x(z)$, перемещая зонд вдоль оси z . Данные поместите в таблицу 5.

Таблица 5

Магнитное поле в плоскости широкой стенки волновода при смещенном положении КЗ пластины																	
$N_{\text{отв}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	1	2	3	4	5	6	7									
$H_x(x)$																	
$H_x(z)$																	
$H_z(x)$																	
$H_{x \text{ отв}}(x)$																	
$H_{x \text{ отв}}(z)$																	
$H_{z \text{ отв}}(x)$																	
$H_{z \text{ отв}}(z)$																	

По данным таблицы 5 постройте зависимости $H_{x \text{ отв}}(x)$, $H_{x \text{ отв}}(z)$ (рис. 3.8а, б), $H_{z \text{ отв}}(x)$ и $H_{z \text{ отв}}(z)$ (рис 3.9).

3.2.4.6. Магнитным зондом исследуйте компоненты $H_z(z)$ и $H_\alpha(z)$ магнитного поля в коаксиальной линии, перемещая зонды вдоль оси z в пределах длины волны. Электрическим зондом исследуйте поведение $E_z(z)$. Данные внесите в таблицу 6 (заготовьте ее сами). Постройте графики относительных величин компонент на рис.3.10.

3.2.5. Правила построения структуры полей.

Структура полей E и H в данной работе строится по эпорам. Эпюра — это графически построенная зависимость нормированной компоненты поля от одной координаты.

В направлении оси z за эпюру принимается изменение поля на расстоянии $\lambda_B/2$ — длины стоячей волны. При увеличении расстояния до $p\lambda_B/2$ картина эпюр, а следовательно и полей, будут повторяться p раз. При построении структуры поля в случае снятых p эпюр, необходимо изменять направление векторов полей на противоположное через каждые $\lambda_B/2$ (для каждой эпюры).

При построении структуры электромагнитного поля в волноводе по эпюрам руководствуйтесь двумя правилами:

а) если составляющая поля (компонента) перпендикулярна направлению, по которому она изменяется (например $E_y(x)$ — это $E_y \perp x$ или $H_z(x)$ — это $H_z \perp x$), то при построении структуры поля графически это изменение отображается изменением густоты линий по заданному направлению (max функции — max густоты, min функции — min густоты);

б) если составляющая параллельна направлению, по которому она изменяется (например, $H_x(x)$ или $H_z(z)$), то графически это изменение отображается изменением её длины.

В общем случае, когда компонента зависит от двух координат (например $H_x(x,z)$), то следует менять ее длину (например H_x по x) и густоту линий (H_x по z), т.е. каждому конкретному сечению $z = \text{const}$ будет соответствовать определенная длина (H_x).

3.2.6. Процесс построения структуры полей

3.2.6.1. На рис.3.11 изображено сечение короткозамкнутого волновода длиной $l = \lambda_B/2$ в двух плоскостях XOZ при $y = 0,5b$ и YOZ при $x = 0,5a$. Начало координат находится на короткозамыкателе. Рядом с этими сечениями следует построить эпюры полей, снятых в пункте 3.2.4.

3.2.6.2. Построение структуры поля E . Изобразите на рисунке 3.11 на заготовленных осях эпюры компоненты E_y и, пользуясь правилами п. 3.2.5, нарисуйте картину силовых линий электрического поля. Помните, что линии электрического поля всегда перпендикулярны металлическим стенкам волновода, т.е. начинаются и оканчиваются на них.ё

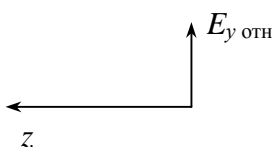
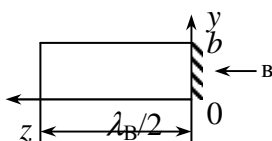
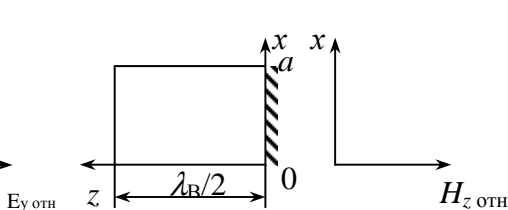
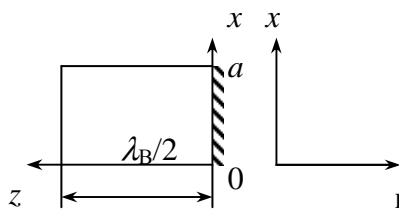


Рис.3.11

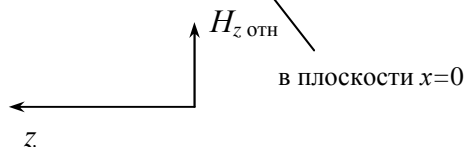
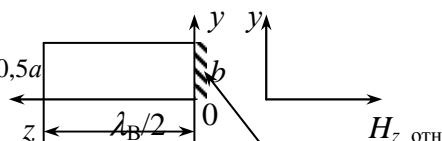


Рис.3.12

3.2.6.2. Построение структуры компоненты $H_z(x, z)$. На рисунке 3.12 представлены два сечения отрезка КЗ волновода длиной $\lambda_B/2$ в плоскостях $y = b$ и $x = 0$. Изобразите эпюры, полученные в п.п. 3.2.4.3÷3.2.4.5, а, учитывая правила п. 3.2.5, нарисуйте структуру компоненты $H_z(x, y, z)$, изменяя густоту и длину, а также направление линий, в соответствии с эпюрами.

3.2.6.3. Построение картины поля компоненты $H_x(x, z)$ осуществляется в следующем порядке. На рис. 3.13 (совершенно аналогичном рис.3.11) изобразите эпюру $H_x(z)$, которая принимает максимальные значения на концах отрезка: $z=0$ и $z=\frac{\lambda_B}{2}$. Затем постройте эпюру $H_x(x)$. Пользуясь правилами построения поля, изобразите линии поля $H_x(x, z)$.

3.2.6.4. Совместите рисунки 3.12, 3.13. Учтите при построении, что линии магнитного поля являются замкнутыми кривыми, и Вы получите структуру исследованного магнитного поля (рис. 3.14).

3.2.6.5. Нарисуйте в своем отчете структуру электромагнитного поля стоячей волны, совместив рисунки 3.11, 3.14 в сечениях XOZ и YOZ, (рис.3.15). Постройте объемную картину исследованного поля стоячей волны в прямоугольном волноводе (рис. 3.16), сравните ее со структурой бегущей волны (рис. 4).

3.2.6.6. Сделайте выводы, анализируя структуру полученного электромагнитного поля, определите значения индексов m и n , тип волны, отметьте поведение векторов E и H вблизи граничных поверхностей. Установите, какие составляющие поля отсутствуют, от каких координат поле зависит, а по каким оно одномерно и т.д.

3.2.6.7. Постройте картину электромагнитного поля в коаксиальной линии в режимах стоячей и бегущей волн (рис 3.17а, б), пользуясь данными п. 3.2.4.6. Отметьте особенности полей в разных режимах, определите тип волны.

4 Контрольные вопросы

1. Какие передающие линии называются многосвязными?
2. Какие типы волн используются для передачи энергии в коаксиальных линиях и в прямоугольных волноводах?

3. Какие составляющие электромагнитного поля имеет волна типа Т в коаксиальной линии?
4. Что обозначают индексы m и n у волн E_{mn} и H_{mn} ?
5. Какой физический смысл имеет множитель $e^{j(\omega t - \beta z)}$ в выражениях составляющих полей в волноводе?
6. Какой физический смысл имеют сомножители $\sin(\beta z)$ и $\cos(\beta z)$ в выражениях полей стоячих волн в линиях?
7. Чем отличаются структуры полей бегущей и стоячей волн для волны типа H_{10} ?
8. Чему равна критическая длина волны в коаксиальной линии для Т-волны и прямоугольном волноводе?
9. Какое выражение применяется для волнового сопротивления волны H_{10} ?
10. Что такое структура электромагнитного поля?
11. Вдоль какой координаты надо ориентировать ось электрического зонда, чтобы можно было зафиксировать наличие составляющей E_y ?
12. Как следует ориентировать плоскость петли для того, чтобы обнаружить составляющие H_x и H_z в волноводе?
13. Назовите характерные признаки волны типа Т?
14. Какой должна быть поляризация плоской волны, падающей на вертикальную стенку волновода, чтобы в нем возникла волна H_{10} ?
15. Как связаны размеры поперечного сечения волновода с минимальной (λ_{\min}) и максимальной (λ_{\max}) длинами волн заданного диапазона для волны H_{10} ?
16. Назовите основной признак волны типа E в волноводе?
17. Сколько вариаций поля укладывается по осям x и y волны H_{21} ?
18. Как устроена волноводная измерительная линия?
19. Чему равна напряженность электрического поля E_y волны H_{10} на короткозамкнутом конце волновода?
20. Почему для снятия структуры поля в волноводе просверлены отверстия? Нельзя ли их заменить щелями? Если нельзя, то почему?
21. Как Вы поступите, если при измерении длины волны вдоль измерительной линии уже не укладывается целая полуволна?
22. Для чего и как проводится нормировка результатов эксперимента?
23. Для чего производится настройка резонатора зонда?
24. Что произойдет с полем в волноводе, если частоту генератора сделать ниже критической?

5. Содержание отчёта

Отчёт о проделанной работе должен включать:

- цель работы и схему экспериментальной установки;

- расчетные и экспериментальные частотные характеристики прямоугольного волновода и коаксиальной линии, их анализ;
- результаты проделанной работы по пунктам 3.2.3 ÷ 3.2.4 в виде таблиц и эюр - экспериментальных зависимостей составляющих векторов E и H от координат, определение на их основе типа волны в прямоугольном волноводе;
- структуры электромагнитного поля в волноводе для этого типа волны в режимах стоячих и бегущих волн;
- результаты исследования структуры полей в коаксиальной линии;
- оценка возможных ошибок измерения длины волны на рабочей частоте;
- выводы по результатам каждого пункта работы;

6. Список использованной литературы

1. Б.М. Петров Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов. - М.: Горячая линия- Телеком, 2007.-558 с. **(100)**
2. Л.А.Боков Электромагнитные поля и волны: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003-214 с. **(50)**
3. Замотринский В.А., Падусова Е.В., Соколова Ж.М., Шангина Л.И. Электромагнитные поля и волны: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006.-175с. **(40)**