

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» для бакалавров направлений подготовки 210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 210400.62 «Радиотехника», специалистов направления подготовки 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

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
“ ____ “ _____ 2013 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ
СВЧ ДИАПАЗОНА**

Руководство к лабораторной работе по дисциплинам
«Электродинамика и распространение радиоволн», «Электромагнитные
поля и волны» для бакалавров направлений подготовки 210700.62
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 210400.62
«Радиотехника», специалистов направления подготовки 210601.65
«Радиоэлектронные системы и комплексы»

Разработчики:
доц. каф. СВЧ и КР
_____ Ж.М. Соколова
проф. каф. СВЧ и КР
_____ А.Е. Мандель
доц. каф. СВЧ и КР
_____ А.В. Фатеев
Зав.лаб. ЭДиРРВ
_____ А.Н. Никифоров

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	14
3.2.1	Домашнее расчетное задание	14
3.2.2	Снятие дисперсионных характеристик	15
3.2.3	Исследование структуры полей	16
3.2.4	Правила построения структуры полей	19
3.2.5	Процесс построения структуры полей	20
4	Контрольные вопросы	21
5	Содержание отчета	22
6	Список использованной литературы	23

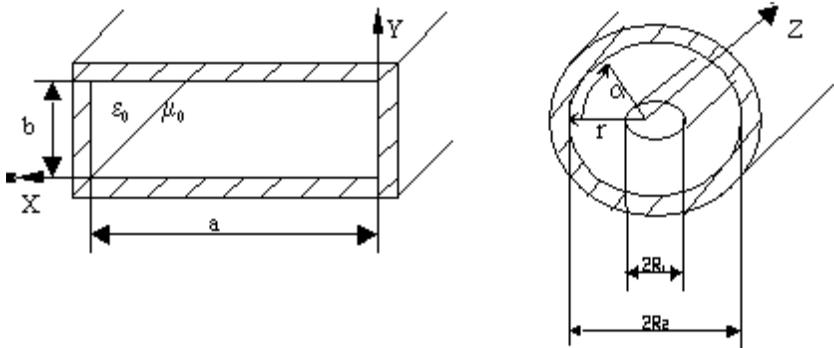
1. Цель работы.

- 1.1 . Ознакомление с основными особенностями распространения электромагнитных волн в передающих линиях СВЧ диапазона: прямоугольном и коаксиальном волноводах.
- 1.2 . Снятие дисперсионных характеристик для указанных линий передачи.
- 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.



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

а)

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

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 является тип **волны 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) и коаксиальные линии.

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

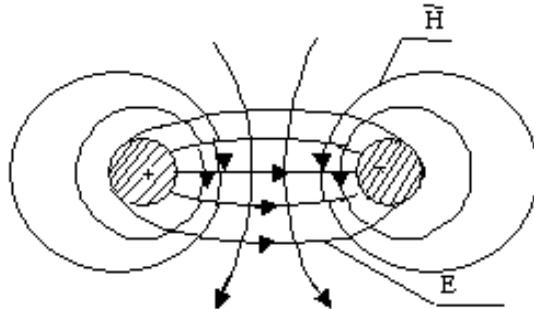


Рис.2 Структура поля волны типа Т в двухпроводной линии при $z\text{-const}$.

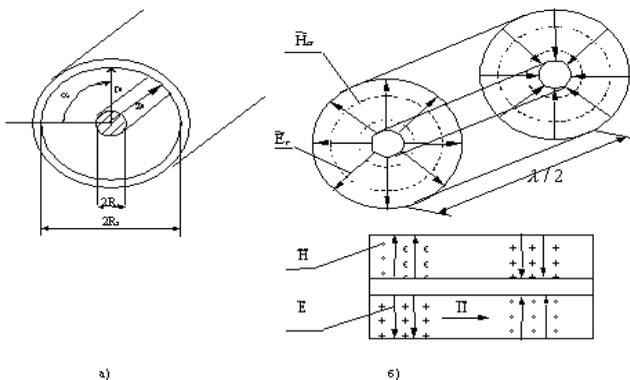


Рис.3 Структура поля бегущей Т волны в коаксиальном волноводе

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, 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

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

где R_1 , R_2 радиусы проводников коаксиальной линии $R_1 < R_2$.

В такой линии электромагнитное поле будет представлено двумя компонентами:

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{A}{r} \cdot e^{j(\omega t - \kappa \cdot z)} \\ H_\alpha &= \frac{A}{r Z_W} \cdot e^{j(\omega t - \kappa \cdot z)}, \end{aligned} \quad (1)$$

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;

$e^{j(\omega t - \kappa \cdot z)}$ - 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 H_{mn} (когда $H_z \neq 0$, $E_z = 0$) и волны типа E_{mn} (при этом $E_z \neq 0$, $H_z = 0$), 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 нижним 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 $\lambda_{гдH_{10}} = 2a$ 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 ($a > b$),

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

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. поле 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

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

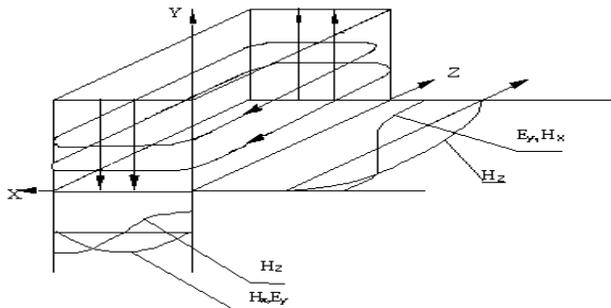


Рис.4. Структура поля волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе.

Любая передающая линия характеризуется электрическими параметрами, к которым относятся: фазовая постоянная β , длина волны λ_v , фазовая скорость V_ϕ , групповая скорость $V_{Гр}$, характеристическое сопротивление Z_w , предельная мощность $P_{пред}$, 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:

$$K_\delta = \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2} = \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}, \quad K_{\delta'} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\delta\delta}}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{\delta\delta}}{f}\right)^2} \quad (5)$$

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

Зависимость параметров односвязных волноводов от частоты определяется формулами:

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

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

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

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

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

6. Предельная мощность $P_{пред}^{H_{10}} = \frac{E_{np}^2 \cdot a \cdot b}{4 \cdot 120 \cdot \pi} \cdot K_\delta$, (11)

где E_{np} – 30 кВ/см предельная напряженность поля в воздухе при нормальном атмосферном давлении;

7. Величина затухания волны

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

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

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

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 и длину волны в любой передающей линии, в том числе и в волноводе, экспериментально можно снять, только в **режиме 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:

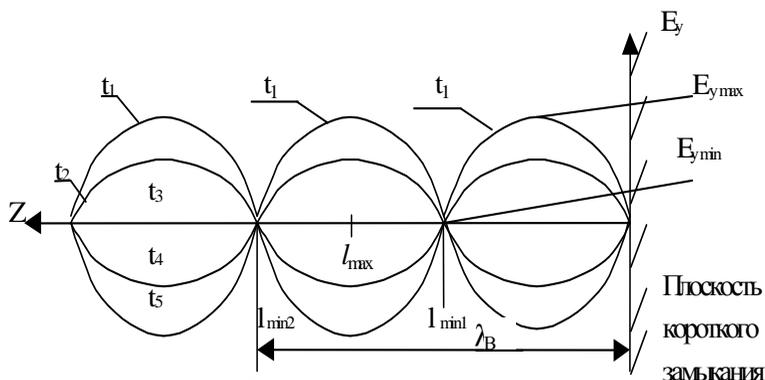
$$\left. \begin{aligned} H_z &= H_{z0} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{a} \cdot \sin \beta \cdot z \\ H_x &= H_{x0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{a} \cdot \cos \beta \cdot z \end{aligned} \right\} e^{j\omega t}, \quad (15)$$

$$E_y = -E_{y0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{a} \cdot \sin \beta \cdot z$$

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 $\frac{\lambda_A}{4}$. 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 $\beta z = p\pi/2$, амплитуда напряженности равна нулю. Эти точки называются узлами, $p = 0, 1, 2, \dots$;
- 3) в точках $z=l_{\max}$, где $\beta z = (2p-1)\pi/2$, 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.



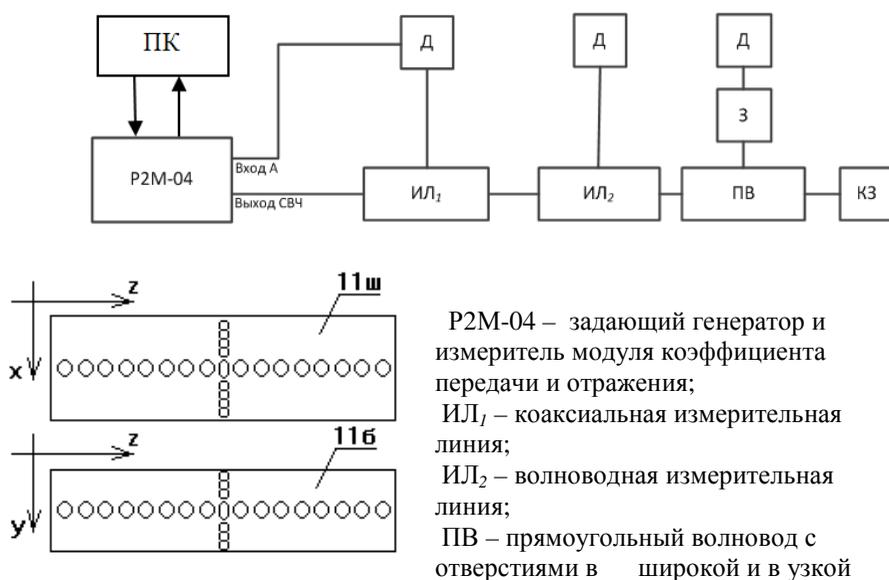
Режим стоячих волн используется не только для исследования структуры полей, но позволяет также произвести измерения длины волны в волноводе $\lambda_{\text{в}}$, а следовательно снять зависимость всех перечисленных выше параметров при изменении частоты.

Структуру поля можно исследовать индикаторами поля: электрическим и магнитным диполями. С помощью измерительной линии можно измерить длину волны двумя способами:

$$\lambda_g = 2|l_{\min 2} - l_{\min 1}|, \text{ или } \lambda_a = 4|l_{\max} - l_{\min 1}|. \quad (16)$$

3 Экспериментальная часть

3.1. Установка для эксперимента



Р2М-04 – задающий генератор и измеритель модуля коэффициента передачи и отражения;
 ИЛ₁ – коаксиальная измерительная линия;
 ИЛ₂ – волноводная измерительная линия;
 ПВ – прямоугольный волновод с отверстиями в широкой и в узкой

(боковая) стенках;

Д – детектор один, последовательно подключается при экспериментах к разным измерительным линиям и зондам;

З – электрический и магнитный зонды;

КЗ – коротко замыкающий поршень;

ПК – персональный компьютер –

* для установки и управления рабочей частотой на Р2М-04;

*для снятия и фиксации относительных значений мощности в заданных точках;

*для перевода относительных значений мощности (см. п. 2) в абсолютные значения мощности с помощью программы онлайн-калькулятор (<http://profi-radio.ru/online-raschet.html>);

*построение характеристик по нормированным значениям

.Рис. 6. Схема экспериментальной установки

Сигнал с выхода измерительного прибора P2M-04 поступает на коаксиальную и волноводную измерительные линии, затем на волновод с отверстиями и волновод с передвигшим коротко замыкающим (КЗ) поршнем. Отражается и, следовательно, в линии создается стоячая волна. Для исследования полей используются электрический и магнитный зонды, устройство которых показано на рисунке 6

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 6. Сигнал с выхода измерительного прибора P2M-04 поступает на коаксиальную и волноводную измерительные линии, затем на волновод с отверстиями и волновод с передвигшим коротко замыкающим (КЗ) поршнем. Отражается и, следовательно, в линии создается стоячая волна. Для исследования полей используются электрический и магнитный зонды, устройство которых показано на рисунке 7.

Ниже приведены рисунки, поясняющие устройство электрического и магнитного зондов (рис. 7). Зонды - электрический и магнитный диполь. Конструктивно отличаются только элементами связи с электромагнитными полями (штырь и петля) передающих линий.

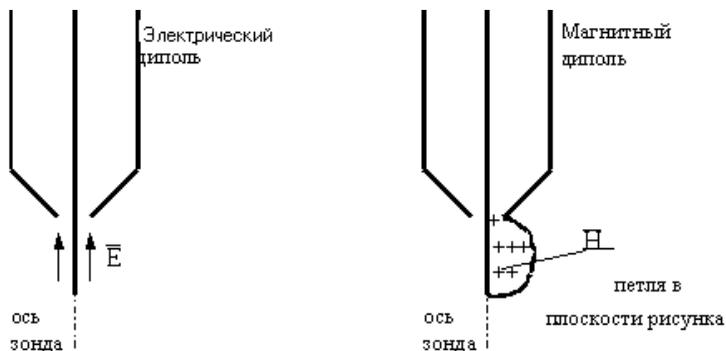


Рис 7. Схемы устройства электрического и магнитного зондов

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.7). Поэтому, при исследовании компоненты $H_x(x, z)$ следует правильно ориентировать магнитный зонд.

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. 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. 6), 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 соответствующих полей в центральном 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 $a \times b = 72 \times 34$ мм². 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 $1,9 \div 3,7$ ГГц с шагом $\Delta f = 200$ МГц. Внесите расчетные значения в таблицу 1 (далее) Постройте графики зависимостей $K_{\sigma T}$ и $1/K_{\sigma T}$ от частоты.

3.2.1.3. Рассчитайте теоретические дисперсионные зависимости $\lambda_{BT}(f)$, $\frac{V_{\partial\partial}}{\tilde{N}}(f)$, $Z_{\text{вн}10}(f)$ и $\lambda_{BT}(\lambda)$, $\frac{V_{\Phi T}}{C}(\lambda)$, $Z_{\text{вн}10}(\lambda)$ в этом же частотном диапазоне.

Внесите расчеты в домашнюю таблицу и постройте графики этих зависимостей. Сделайте выводы о пределах изменения теоретических параметров при изменении частоты.

3.2.1.4. Изобразите распределение поля в волноводе в запредельном режиме и поля E_r и H_ϕ в коаксиальной линии. Сделайте выводы о характере распределения электромагнитных полей в волноводной и коаксиальной линиях при $f < f_{\text{кр}}$ волновода.

3.2.2. Снятие дисперсионных характеристик

3.2.2.1. Определите, какие элементы и устройства установки будут использоваться при снятии только дисперсионных характеристик в волноводе и коаксиальной линии.

3.2.2.2. Включить прибор P2M и компьютер. Проверить login, ввести пароль. Запустите программу Graphit по управлению прибором P2M.

В появившемся окне, выберите прибор P2M-04 с IP-адресом 192.168.1.247. Во вкладке «Профиль» загрузите профиль «transmission line» (S:\328_ОПИС_ЛАБ\ЭДиРРВ\transmission_line.gpr).

$E_y(z)$																		
$E_x(z)$																		
$E_x(y)$																		

3.2.3.2. 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.

3.2.3.3. Снятие **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 в таблицу 3.

Таблица 3

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	
$H_z(y)$																		
$H_z(z)$																		
$H_y(y)$																		
$H_y(z)$																		

По данным табл.3 постройте графики зависимостей полей $H_z(y)$ и $H_z(z)$ в боковой стенке (рис 3.5а, б) и сделайте выводы о поведении исследованной компоненты $H_y(y, z)$.

3.2.3.4. 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 4 .

3.2.3.5. 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. 3.2.3.1).

Введите магнитный зонд в центральное отверстие широкой стенки волновода и добейтесь максимального показания 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 4.

Таблица 4

Магнитное поле в плоскости широкой стенки волновода при смещенном положении КЗ пластины																	
$N_{\text{отв}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$H_x(x)$																	
$H_x(z)$																	
$H_z(x)$																	
$H_z(z)$																	

По данным таблицы 4 постройте зависимости $H_x(x)$, $H_x(z)$ (рис. 3.6а, б), $H_z(x)$ и $H_z(z)$ (рис 3.7а,б).

3.2.3.6. 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 5 (заготовьте ее сами). Постройте графики компонент на рис.3.8.

3.2.4. Правила построения структуры полей.

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

В направлении оси z за эяюру принимается изменение поля на расстоянии $\lambda_B/2$ — длины стоячей волны. При увеличении расстояния до $p\lambda_B/2$ картина эяюр, 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 её 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 компоненты (H_x).

3.2.5. Процесс построения структуры полей

3.2.5.1. На рис.3.10 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 3.2.3.

3.2.5.2. Построение структуры поля E . Изобразите на рисунке 3.10 на заготовленных осях эпюры компоненты E_y и, пользуясь правилами п. 3.2.4, нарисуйте картину силовых линий электрического поля. Помните, что линии электрического поля всегда перпендикулярны металлическим стенкам волновода, т.е. начинаются и оканчиваются на них.

3.2.5.3. Построение структуры компоненты $H_z(x,z)$. На рисунке 3.11 представлены два сечения отрезка КЗ волновода длиной $\lambda_B/2$ в плоскостях $y = b$ и $x = 0$. Изобразите эпюры, полученные в п.п. 3.2.3.3+3.2.3.5, а, учитывая правила п. 3.2.4, нарисуйте структуру компоненты $H_z(x, y, z)$, изменяя густоту и длину, а также направление линий, в соответствии с эпюрами.

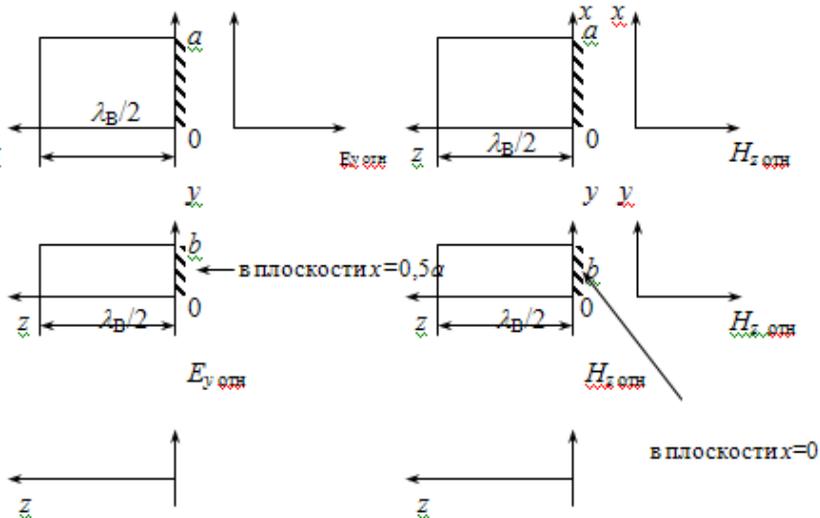


Рис.3.10

Рис.3.11

3.2.5.4. Построение картины поля компоненты $H_x(x, z)$ осуществляется в следующем порядке. На рис. 3.12 (нарисуйте сами, совершенно аналогичном рис.3.11) изобразите эпюру $H_x(z)$, которая принимает максимальные значения на концах отрезка: $z=0$ и $z=\frac{\lambda \hat{a}}{2}$.

Затем постройте эпюру $H_x(x)$. Пользуясь правилами построения поля, изобразите линии поля $H_x(x, z)$.

3.2.5.5. Совместите рисунки 3.11, 3.12. Учтите при построении, что линии магнитного поля являются замкнутыми кривыми, и Вы получите структуру исследованного магнитного поля (рис. 3.13).

3.2.5.6. Нарисуйте в своем отчете структуру электромагнитного бполя стоячей волны, совместив рисунки 3.10, 3.13 в сечениях XOZ и YOZ, (рис.3.14). Постройте объемную картину исследованного поля стоячей волны в прямоугольном волноводе (рис. 3.15), сравните ее со структурой бегущей волны (рис. 4).

3.2.5.7. 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 однородно и т.д.

3.2.5.8. Постройте картину электромагнитного поля в коаксиальной линии в режимах стоячей и бегущей волн (рис 3.16а, б), пользуясь данными п. 3.2.3.6. 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 Е 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 3.2.2 ÷ 3.2.4 в виде таблиц и эпюры - 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. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие/ Боков Л.А., Замотринский В.А., Мандель А.Е. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013.- 410с

2. Б.М. Петров Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов. - М.: Горячая линия- Телеком, 2007.-558 с. **(100)**
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)**