

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

Кафедра АФУ

**МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ № 1,2,6,7**

по дисциплинам «Электромагнитные поля и волны»  
и «Электродинамика и распространение радиоволн»  
для студентов очного и заочного обучения  
и направлений подготовки «Телевидение,  
радиосвязь и радиовещание», «Радиотехника» и  
«Телекоммуникации»

Ташкент 2004

# Лабораторные работы № 1 и 2 «ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРЯМОУГОЛЬНОГО И КООКСИАЛЬНОГО ВОЛНОВОДОВ»

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В результате выполнения лабораторной работы студенты должны приобрести знания особенностей распространения электромагнитных волн в прямоугольном и коаксиальном волноводах, устройства волноводных измерительных линий, умения в настройке линий передач в режиме бегущей волны, количественном определении степени согласования линии с нагрузкой и величины самой нагрузки, и настройке измерительной линии.

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 2.1. Волны в направляющих системах

В дециметровом и сантиметровом диапазонах, в основном, используются линии передачи закрытого типа, в которых вся энергия сосредоточена в пространстве, экранированном от внешней среды металлической оболочкой.

Основными, широко используемыми линиями передачи закрытого типа, являются коаксиальный волновод (состоящий из соосных круглых провода и экрана), прямоугольный, круглый и эллиптический волноводы.

В направляющих системах могут распространяться волны класса Т (поперечные электромагнитные волны), волны класса Н (поперечно-электрические или магнитные волны), волны класса Е (поперечно-магнитные или электрические волны). Необходимо отметить, что волны класса Т могут распространяться только в тех направляющих системах, в которых имеются два изолированных друг от друга проводника, по которым возможна передача энергии постоянного тока.

В любой направляющей системе возможно существование большого числа типов волн (из классов Е и Н), количество которых зависит от выбора рабочей длины волны  $\lambda_p$ . Однако существует область длин волн, при которой распространение электромагнитных волн в волноводе невозможно (область отсечки), то есть когда рабочая длина волны  $\lambda_p$  больше или равна критической длине волны основного типа волны  $\lambda_{кр}$  ( $\lambda_p \geq \lambda_{кр}$ ). Основным типом волны в волноводе называется волна, обладающая максимальной критической длиной волны. С учётом относительной диэлектрической проницаемости материала, заполняющего волновод, рабочая длина волны должна выбираться из условия

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon}} < \lambda_{кр}, \quad (2.1)$$

где  $\lambda$  - длина волны генератора (длина волны в свободном пространстве).

В воздухе  $\epsilon = 1$  и  $\lambda_p = \lambda$ .

На рис.2.1 и 2.2 приведены картины мгновенного распределения электрического и магнитного полей (в продольном и поперечном сечениях) для основных типов волн  $H_{10}$  и  $H_{11}$  в прямоугольном и круглом волноводах, а на рис.2.3 – для волны класса  $T$  в коаксиальном волноводе. Крестиками на этих рисунках показаны силовые линии, идущие «от нас», а кружочками – идущие «к нам».

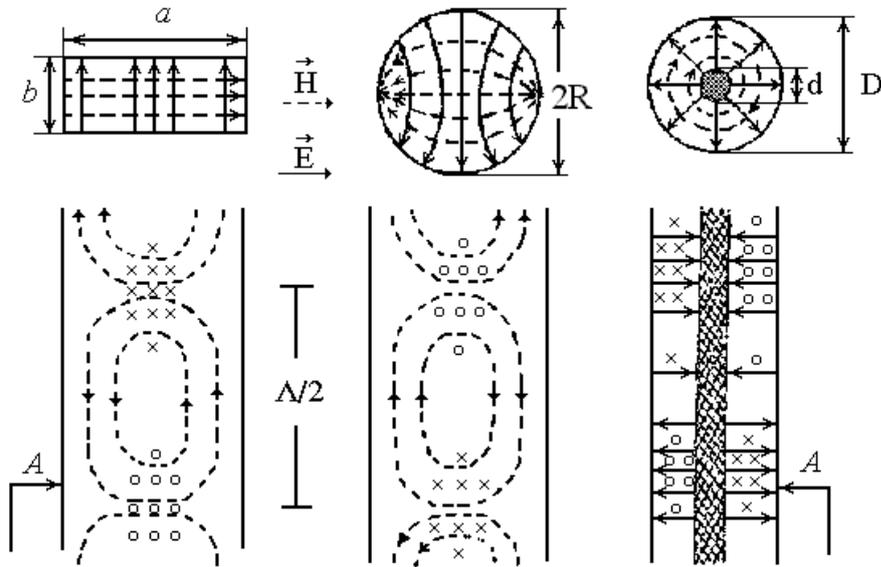


Рис. 2.1

Рис. 2.2

Рис. 2.3

Значения волнового сопротивления  $Z_B$ , фазовой  $v_\phi$  и групповой  $v_{гр}$  скоростей и длины волны  $\Lambda$  в волноводе в одноволновом режиме можно рассчитать по формулам:

– для прямоугольного волновода:

$$Z_B = \frac{2b}{a} \cdot \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda_p/2a)^2}}, \quad (2.2)$$

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - (\lambda_p/2a)^2}}, \quad (2.3)$$

$$v_{гр} = c \cdot \sqrt{1 - (\lambda_p/2a)^2}, \quad (2.4)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda_p}{\sqrt{1 - (\lambda_p/2a)^2}}, \quad (2.5)$$

– для коаксиального волновода :

$$Z_B = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \ln \frac{D}{d}, \quad (2.6)$$

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (2.7)$$

$$v_{гр} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (2.8)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (2.9)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$a$  – внутренний размер широкой стенки прямоугольного волновода;

$b$  – внутренний размер узкой стенки прямоугольного волновода;

$D$  – диаметр оплётки коаксиального кабеля;

$d$  – диаметр центральной жилы коаксиального кабеля.

То, что длина волны в прямоугольном волноводе  $\Lambda$  больше длины волны в свободном пространстве  $\lambda$ , имеет простое физическое объяснение. Так как электромагнитные волны, распространяясь в волноводе, отражаются от его стенок (как показано на рис.2.4), то фронт волны, проходя расстояние  $\lambda_p$  вдоль направления распространения волны, одновременно пройдёт вдоль волновода расстояние, равное  $\Lambda$ .

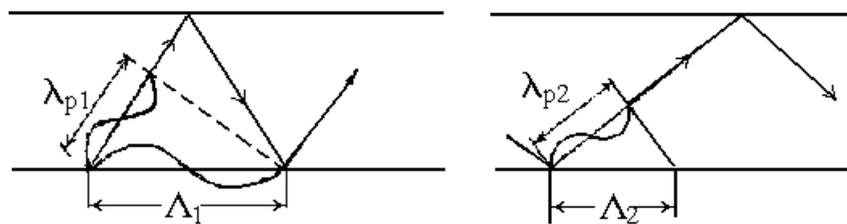


Рис. 2.4. Объяснение, почему длина волны в волноводе больше, чем в свободном пространстве

## 2.2. Выбор рабочей длины волны (частоты) для создания одноволнового режима

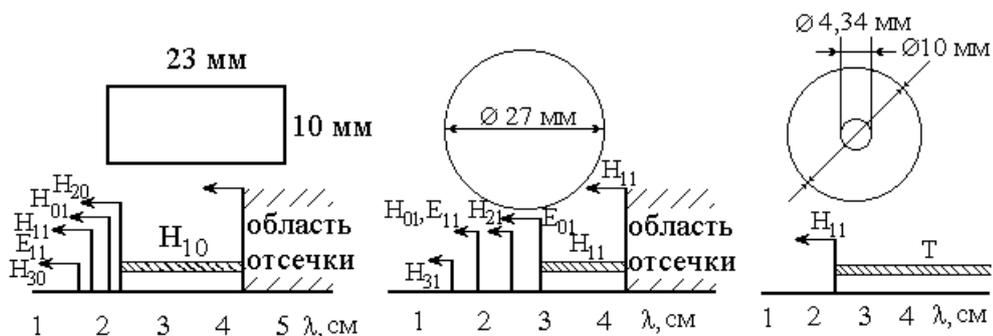


Рис. 2.5

Рис. 2.6

Рис. 2.7

Для наглядности на рис.2.5...2.7 приведены распределения критических длин волн по шкале  $\lambda_p$  для прямоугольного, круглого и коаксиального волноводов. В случае одноволнового (одномодового) режима по волноводу распространяется основная волна. Как видно из рис.2.5, основной волной для прямоугольного волновода является волна  $H_{10}$  с критической длиной волны  $\lambda_{кр}^{H_{10}}=2a$ . Первая волна высшего порядка в прямоугольном волноводе – волна  $H_{20}$  с  $\lambda_{кр}^{H_{20}}=a$ . Следовательно, одноволновый режим будет наблюдаться при выполнении условия

$$a < \lambda < 2a. \quad (2.10)$$

Для круглого волновода (рис.2.6) основной волной является волна  $H_{11}$  ( $\lambda_{кр}^{H_{11}}=3,41R$ ), а первой волной высшего порядка –  $E_{01}$  ( $\lambda_{кр}^{E_{01}}=2,62R$ ), таким образом, одноволновый режим будет выполняться при условии

$$2,62R < \lambda_p < 3,41R. \quad (2.11)$$

В коаксиальном волноводе (рис.2.7) основной волной является волна класса  $T$  ( $\lambda_{кр}^T=\infty$ ), а первой волной высшего порядка – волна  $H_{11}$  с  $\lambda_{кр}^{H_{11}} \approx \pi(D+d)/2$ , т.е. одноволновый режим будет выполняться при условии

$$\pi(D+d)/2 < \lambda_p < \infty. \quad (2.12)$$

На практике, обычно, из-за большого поглощения в области более длинных волн, т.е. близких к критической длине волны основного типа, значение рабочей длины волны выбирают на 20...30% ниже критической длины волны.

### 2.3. Виды амплитудных распределений в волноводе

Рассмотрим влияние характера нагрузки, установленной на конце волновода, на амплитудное распределение вдоль волновода. Вдоль оси волновода, с одноволновым режимом формируется распределение поля, аналогичное распределению поля в обычной двухпроводной линии, которая работает в режиме длинной линии.

Если на конце волновода установлена короткозамыкающая нагрузка, то возникает отраженная волна, сдвинутая по фазе на  $180^\circ$  относительно падающей волны. Амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей волны. В результате наложения этих двух волн возникает стоячая волна (режим стоячей волны). Амплитудное распределение в режиме стоячей волны показано на рис.2.8 сплошной линией. Расстояние между двумя соседними минимумами напряженности поля равно половине длины волны в волноводе. При замене короткозамыкающей нагрузки на согласованную, равную по величине характеристическому сопротивлению волновода, отражённой от нагрузки волны не будет и в волноводе установится режим бегущей волны, при котором амплитудное распределение будет характеризоваться постоянным значением амплитуды распределения поля (пунктирная линия на рис.2.8).

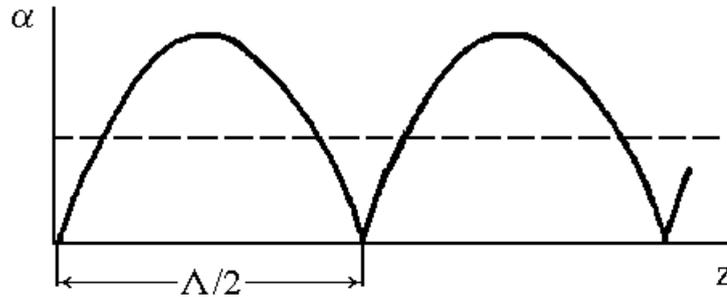


Рис. 2.8. Амплитудное распределение для согласованной нагрузки (пунктирная линия), короткозамыкающей и реактивной нагрузок (сплошная линия)

В тех случаях, когда от сопротивления нагрузки отражается часть падающей волны, в волноводе устанавливается смешанный режим, амплитудное распределение которого показано на рис.2.9. Амплитудное распределение в волноводе удобно характеризовать значением коэффициента бегущей волны  $K_{БВ} = E_{\min}/E_{\max}$ .

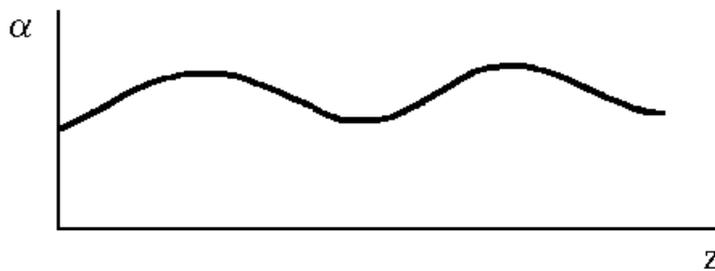


Рис. 2.9. Амплитудное распределение при произвольной нагрузке

#### 2.4. Конструкция волноводных измерительных линий

Для регистрации амплитудного распределения в волноводах используются волноводные измерительные линии. Конструкции этих линий, выполненные на отрезках прямоугольного и коаксиального волноводов, показаны на рис.2.10 и рис.2.11. Отличие измерительных линий состоит в разнице конструкций направляющих систем, вдоль которых перемещается измерительная головка с зондом, принцип действия которой и конструкция одинаковы для обеих измерительных линий.

Измерительная головка представляет собой объемный резонатор с короткозамыкающим поршнем, служащим для настройки объемного резонатора, с СВЧ диодом. Зонд располагается вдоль силовых линий электрического поля в волноводе. Электродвижущая сила (ЭДС), возникающая в зонде, пропорциональна напряженности поля в месте расположения зонда.

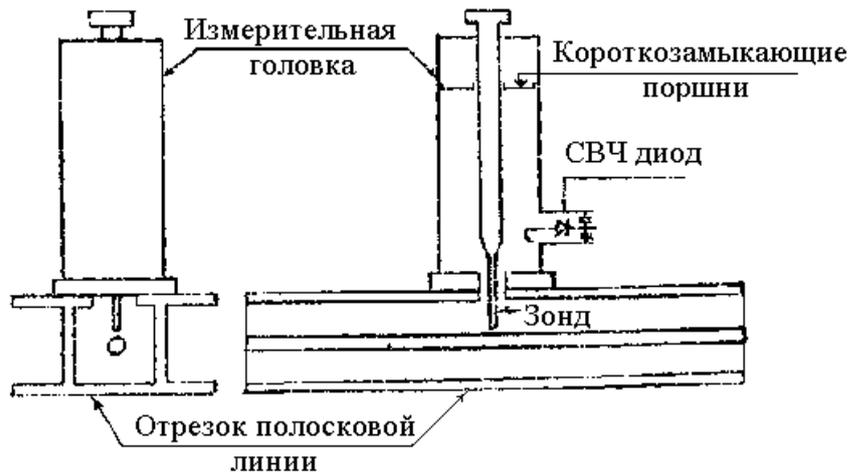


Рис. 2.11

Эта ЭДС возбуждает объемный резонатор, создавая в нем электромагнитные колебания. Резонатор настраивается на частоту колебаний в направляющей системе, что приводит к максимальному усилению сигнала на выходе резонатора. С объемным резонатором связан кристаллический СВЧ диод, играющий роль преобразователя СВЧ колебаний в низкую частоту модуляции генератора. По принципу действия объемный резонатор схож с обычным колебательным контуром на более низких частотах.

Перемещая зонд вдоль волновода, можно найти распределение амплитуд напряженности поля и длину волны в волноводе. Регистрация амплитудного распределения производится при помощи микроамперметра, подключенного к СВЧ диоду. Ввиду того, что характеристика СВЧ диода квадратична, при определении значений  $K_{БВ}$ , необходимо взять корень из показаний микроамперметра ( $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$ )

$$K_{БВ} = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}}$$

Иногда на практике используется коэффициент стоячей волны

$$K_{СВ} = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}}$$

Коэффициент бегущей волны связан с модулем коэффициента отражения  $|\Gamma|$  соотношениями:

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

## 2.5. Виды нагрузочных сопротивлений

В настоящей лабораторной работе используются следующие виды нагрузок: согласованная нагрузка, короткозамыкающая нагрузка и реактивная нагрузка. Согласованная нагрузка представляет собой отрезок волновода, в котором находится вставка из смеси порошкового железа с

полистиролом, поглощающая электромагнитную энергию волны. Реактивная нагрузка представляет собой отрезок волновода, вдоль которого перемещается короткозамыкающий поршень. Амплитудное распределение, получаемое при реактивной нагрузке, сходно с амплитудным распределением при короткозамыкающей нагрузке, однако минимумы напряженности поля этих распределений смещены на величину  $\Delta z$ . Иногда на практике встречаются произвольные нагрузки, характеризующиеся активным и реактивным сопротивлениями.

## 2.6. Расчет сопротивления нагрузки с помощью круговой диаграммы полных сопротивлений (диаграммы Вольперта)

Круговая диаграмма полных сопротивлений устанавливает взаимную связь между составляющими полного сопротивления нагрузки, нормированных к волновому сопротивлению волновода ( $R_H/Z_B$ ,  $X_H/Z_B$ ), и модулем и фазой коэффициента отражения  $|\Gamma_H|$  и  $\varphi_H$ . Вместо значений  $|\Gamma_H|$  можно использовать значения коэффициента бегущей волны  $K_{БВ}$  или коэффициента стоячей волны  $K_{СВ}$ , т.к. они связаны между собой.

Приведенные вместе на одном рисунке, окружности  $R_H/Z_B = \text{const}$  (рис. 2.12) и окружности  $X_H/Z_B = \text{const}$  (рис. 2.13), образуют круговую диаграмму полных сопротивлений в полярной системе координат. Каждая точка этой круговой диаграммы соответствует нормированному комплексному сопротивлению.

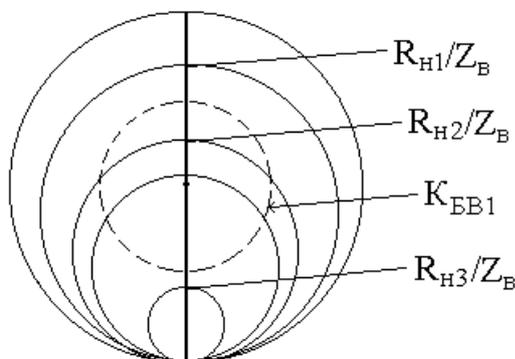


Рис. 2.12.

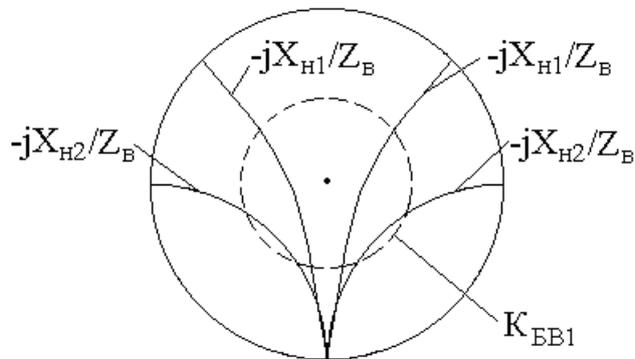


Рис. 2.13.

Центры окружностей постоянных значений активного нормированного сопротивления лежат на прямой, которая является осью симметрии круговой диаграммы. На этой оси нанесены значения активных нормированных сопротивлений от нуля до бесконечности. Значения  $K_{БВ}$  совпадают на этой оси со значениями нормированного активного сопротивления от 0 до 1, а значения  $K_{СВ}$  совпадают со значениями нормированного активного сопротивления на этой оси от 1 до бесконечности.

Центры окружностей постоянных значений нормированного реактивного сопротивления лежат на прямой, перпендикулярной оси симметрии круговой диаграммы и находятся вне диаграммы. Значения реактивных сопротивлений нанесены на внешней окружности, центр которой находится на оси

диаграммы в точке  $R_H/Z_B=1$ . Две внешние окружности круговой диаграммы отградуированы в относительных сдвигах волн  $\Delta z/\lambda=(z_{\min}-z_{\min K3})/\lambda$  к генератору и к нагрузке (за точку отсчета берется координата узла  $z_{\min K3}$  при короткозамыкающей нагрузке).

Значения нормированных реактивных сопротивлений в правой части круговой диаграммы имеют индуктивный, а в левой части – емкостной характер. На круговой диаграмме может быть укреплена прозрачная линейка, вращающаяся относительно центра диаграммы. На линейке могут быть нанесены деления, соответствующие значениям  $K_{БВ}$ ,  $|\Gamma|$  или  $K_{СВ}$ .

Исходными данными для определения нормированного значения сопротивления нагрузки являются величина нормированного сдвига  $\Delta z/\lambda$ , значение  $K_{БВ}$  ( $K_{СВ}$  или  $|\Gamma_H|$ ). Сначала определяется величина нормированного сдвига  $\Delta z/\lambda=(z_{\min}-z_{\min K3})/\lambda$ , причем за положительное направление принимается такое, при котором координата минимума амплитудного распределения  $z_{\min}$  ближе к генератору, чем координата узла при коротком замыкании.

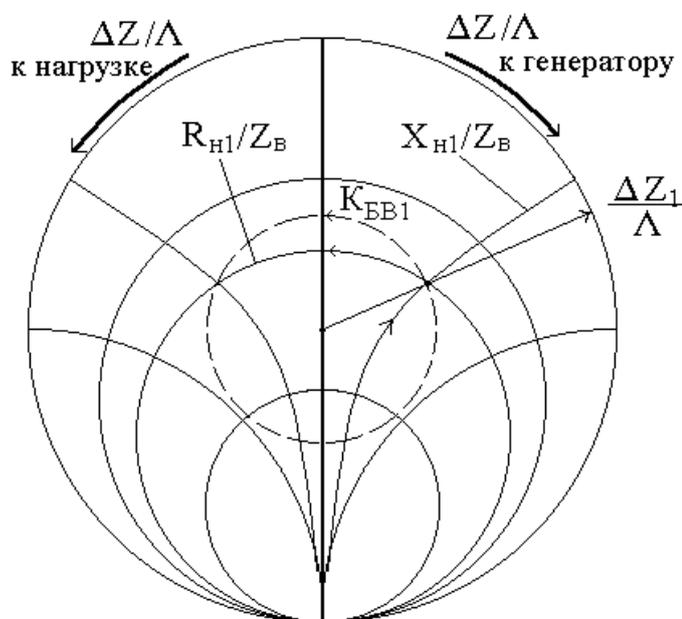


Рис. 2.14.

Найдя значение нормированного сдвига волны  $\Delta z/\lambda$  к генератору (к нагрузке), необходимо отложить это значение на внешней окружности круговой диаграммы и соединить эту точку воображаемой прямой линией (прозрачной линейкой) с центром диаграммы ( $R_H/Z_B=1$ ). Далее необходимо провести окружность с радиусом, равным значению  $K_{БВ}$  в волноводе. Центр этой окружности также находится в центре круговой диаграммы. Точка пересечения, проведенной прямой линией и окружности  $K_{БВ}$ , обладает комплексным нормированным сопротивлением. Значение активной составляющей этого сопротивления определяется путем переноса этой точки по линиям окружности активного сопротивления (или параллельно ей) на ось симметрии круговой диаграммы, где отложены значения  $R_H/Z_B$ , а значение

реактивного сопротивления – путем переноса точки пересечения по линии окружности реактивного сопротивления (или параллельно ей) на внутреннюю окружность круговой диаграммы (см. рис.2.14, 2.15).

Пример 1:  $\Delta z/\lambda$  (к генератору)=0,112;  $K_{БВ}=0,33$ ;  $Z_H/Z_B=0,5+i0,7$ .

Пример 2:  $\Delta z/\lambda$  (к нагрузке)=0,188;  $K_{БВ}=0,33$ ;  $Z_H/Z_B=1,4-i1,4$ .

Полное комплексное сопротивление нагрузки определяется путем перемножения комплексного нормированного сопротивления на волновое сопротивление направляющей системы  $Z_B$ .

Значение  $Z_B$  для коаксиального волновода равно 50 Ом, а для прямоугольного волновода  $Z_B$  можно рассчитать по формуле (2.2).

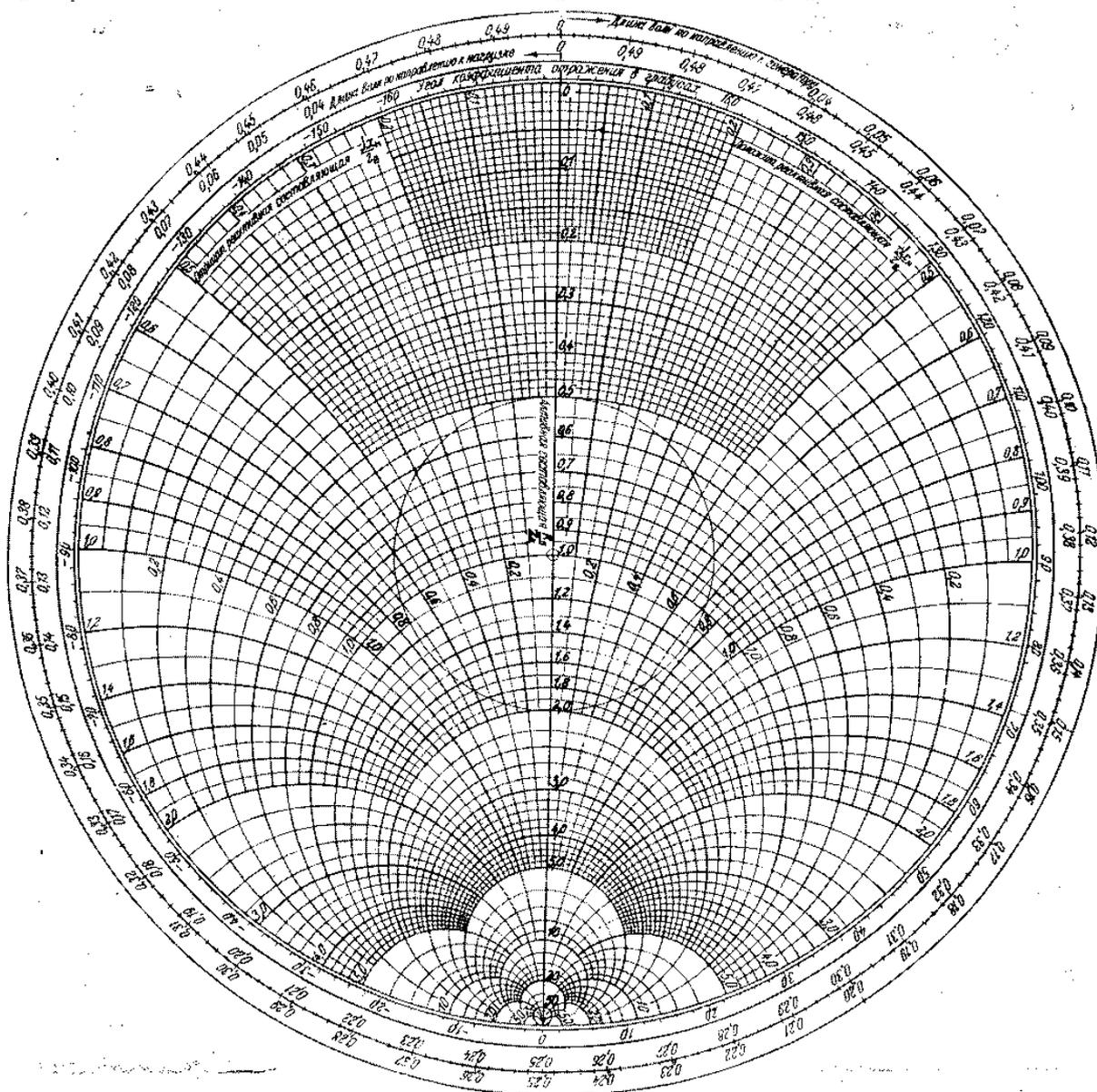


Рис. 2.15. Круговая диаграмма полных сопротивлений

### 3. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

3.1. Изучить устройство, принцип действия волноводной измерительной линии.

3.2. Рассчитать и установить одноволновый режим в волноводе.

3.3. Снять амплитудное распределение поля в волноводе при различных нагрузках. Определить значения длины волны и коэффициент бегущей волны ( $K_{БВ}$ ) в линии.

3.4. По экспериментальным данным определить характер и величину сопротивления нагрузки. Сравнить расчётные и полученные с помощью диаграммы Вольперта значения сопротивления нагрузки.

3.5. Рассчитать значения длин волн в прямоугольном волноводе при поочередном заполнении его различными видами диэлектриков.

### 4. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка позволяет определить вид амплитудного распределения поля вдоль волновода, длину волны в волноводе и комплексное сопротивление нагрузки. Структурная схема установки приведена на рис.4.1.

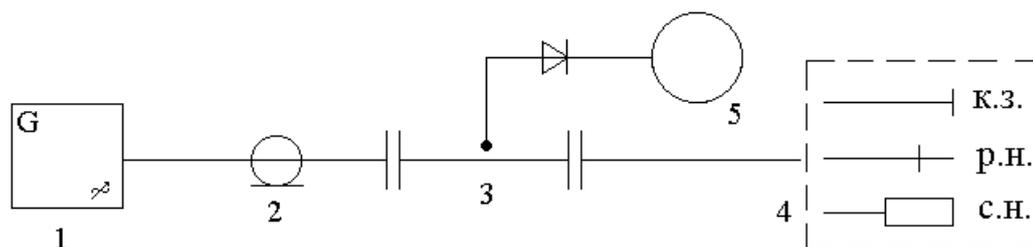


Рис. 4.1. Структурная схема лабораторной установки (1 - генератор; 2 - соединительный отрезок коаксиального (либо прямоугольного) волновода; 3 - измерительная линия; 4 - набор волноводных нагрузок (короткозамы - кающей, реактивной и согласованной); 5 - индикаторный прибор.)

### 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### 5.1. Расчётная часть к первому заданию

5.1.1. Рассчитать по размерам поперечного сечения волновода верхнюю  $\lambda_{В}$  и нижнюю  $\lambda_{Н}$  границы одноволнового режима и соответствующие им частоты  $f_{В}$  и  $f_{Н}$ .

5.1.2. Определить среднюю длину волны  $\lambda = (\lambda_{В} + \lambda_{Н})/2$  и частоту  $f = (f_{В} + f_{Н})/2$  одноволнового режима.

5.1.3. Выбрать два значения частоты генератора  $f_1, f_2$  (но не на краях диапазона) для создания одноволнового режима в волноводе.

5.1.4. Рассчитать значения длин волн в волноводе  $\Lambda_1, \Lambda_2$  с воздушным заполнением, соответствующие частотам  $f_1, f_2$ .

## 5.2. Порядок проведения эксперимента на первом занятии

*Построение амплитудных распределений при короткозамыкающей и согласованной нагрузках. Измерение длины волны в волноводе*

5.2.1. Включить генератор и дать ему прогреться в течение 10...15 минут.

5.2.2. Установить в волноводе режим стоячей волны, для чего к выходу измерительной линии подключить короткозамыкающую нагрузку.

5.2.3. Настроить измерительную линию на частоту генератора при помощи перемещения короткозамыкающих поршней в измерительной головке линии, добиваясь максимального показания индикаторного прибора. При отсутствии показаний индикаторного прибора изменить местоположение головки на измерительной линии и настройку повторить.

5.2.4. Перемещая головку вдоль измерительной линии (изменяя координату  $z$ ), снять амплитудное распределение поля в волноводе  $\alpha=\varphi(z)$ , то есть зависимость показаний индикаторного прибора  $\alpha$  от расстояния  $z$ .

5.2.5. Изменяя частоту генератора  $f_1$  на  $f_2$ , повторить операции 5.2.3 и 5.2.4. Результаты измерений занести в таблицу типа табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты экспериментального определения вида амплитудного распределения при ..... нагрузке

		min			max			min			max	
$\alpha$ , мкА												$f_1=...$ МГц
$z$ , мм												
$\alpha$ , мкА												$f_2=...$ МГц
$z$ , мм												

5.2.6. По результатам измерений построить графики амплитудного распределения поля в волноводе  $\alpha=\varphi(z)$ .

5.2.7. Определить экспериментально значения длин волн в волноводе  $\Lambda_1, \Lambda_2$  и сравнить их с рассчитанными значениями.

5.2.8. Установить на выходе измерительной линии согласованную нагрузку вместо короткозамыкающей нагрузки и снять амплитудное распределение аналогично пункту 5.2.4. Результаты измерений занести в таблицу типа табл. 5.1 и построить график амплитудного распределения.

5.2.9. Сделать выводы.

### 5.3. Расчётная часть ко второму занятию

5.3.1. Рассчитать значение волнового сопротивления волновода с воздушным заполнением.

5.3.2. Для частоты, заданной преподавателем, рассчитать значения длин волн в прямоугольном волноводе с различным диэлектрическим заполнением. Значения относительных диэлектрических проницаемостей  $\epsilon$  применяемых диэлектриков приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Значения относительных диэлектрических проницаемостей диэлектриков

№ диэл. вставки	Материал диэлектрической вставки	$\epsilon$
1	Полистирол	2,56
2	Полиэтилен	2,25
3	Фторопласт	2,08
4	Плексиглас	2,59
5	Бакелит	3,68
6	Тефлон	2,08

### 5.4. Порядок проведения эксперимента на втором занятии

*Измерение и расчёт значений нормированного сдвига и коэффициента бегущей волны, необходимых для определения полного сопротивления нагрузки*

5.4.1. Для частоты  $f_2$  определить координаты всех узлов амплитудного распределения в режиме стоячей волны. Данный пункт выполняется, если после выполнения пунктов 5.2.1...5.2.4 генератор выключался.

5.4.2. Определить длину волны  $\Lambda$  в волноводе.

5.4.3. Подключить к выходу измерительной линии реактивную нагрузку, предварительно отключив короткозамыкающую или согласованную нагрузку.

5.4.4. Определить координаты узлов  $Z_{\min}$  п.н. амплитудного распределения в волноводе для трёх положений  $L$  короткозамыкающего поршня.

5.4.5. Определить значения  $K_{БВ}$  в волноводе при короткозамыкающей и реактивной нагрузках.

5.4.6. Определить величину и направление сдвига  $\Delta z$  – расстояния между ближайшим узлами амплитудных распределений при реактивной и короткозамыкающей нагрузках (для трёх положений короткозамыкающего поршня  $L$ ). Направление сдвига определяется относительно координаты узла при коротком замыкании.

5.4.7. Отнормировать значения  $\Delta z$  к длине волны  $\Lambda$  в волноводе.

5.4.8. Результаты измерений и расчётов занести в таблицу типа табл. 5.3.

Результаты экспериментального исследования

L	10 (15)	20 (25)	30 (35)
$Z_{\min K3}$			
$Z_{\min}$			
$\Delta Z$			
$\Delta Z/\Lambda$			
$K_{БВ}$			

## 5.5 Определение полного сопротивления нагрузки

5.5.1. По известным значениям  $\Delta z/\Lambda$  и  $K_{БВ}$  с помощью диаграммы полных сопротивлений (диаграммы Вольперта) определить нормированные значения составляющих комплексного сопротивления нагрузки. Методика определения приведена в разделе 2 описания настоящей лабораторной работы.

5.5.2. Определить значение комплексного сопротивления волноводной нагрузки.

5.5.3. Сделать выводы.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

- 6.1. Структурную схему лабораторной установки.
- 6.2. Расчёт диапазона частот одноволнового режима.
- 6.3. Результаты расчёта длин волн в волноводе.
- 6.4. Амплитудные распределения поля в волноводе в виде таблиц и графиков.
- 6.5. Результаты определения комплексного сопротивления нагрузки.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Нарисуйте коаксиальную линию, прямоугольный и круглый волноводы ([1] §13.1, [2] §3.1, §4.1, §5.1, [3] §19.1, §19.11, §19.19).

7.2. По какому признаку классифицируются направляемые электромагнитные волны? Какие направляемые электромагнитные волны называются поперечными (**T**), какие – электрическими (**E**), а какие – магнитными (**H**)? ([1] §13.2, [2] §2.7, [3] §17.3).

7.3. Какие классы направляемых электромагнитных волн могут существовать в коаксиальной линии, а какие – в волноводах? ([1] §13.5, [3] §17.3).

7.4. Что называется длиной волны? ([1] §13.4, [3] §18.2).

7.5. Что называется критической частотой (или критической длиной волны) направляющей системы? При каком соотношении рабочей частоты (рабочей длины волны) и критической частоты (критической длины волны) волна определённого типа будет распространяться по волноводу? ([1] §13.4, [2] §2.4, §3.7, [3] §18.2).

7.6. Напишите выражение для длины волны в волноводе ([1] §13.4, [3] §18.2).

7.7. Какая волна называется основной (низшей) волной направляющей системы? ([1] §14.1, §14.2, §14.4, [2] §2.7, [3] §18.8)

7.8. Нарисуйте график распределения напряжённости электрического поля вдоль прямоугольного (коаксиального) волновода при следующих видах нагрузок: короткое замыкание; согласованная нагрузка; комплексная нагрузка ([1] §16.1, §16.2, [2] §7.1, [3] §21.2).

7.9. Объясните принцип действия измерительной линии ([2] §8.7).

7.10. Объясните смысл коэффициентов  $K_{БВ}$ ,  $K_{СВ}$ . Как связаны между собой модуль коэффициента отражения,  $K_{БВ}$ ,  $K_{СВ}$ ? ([2] §7.1, [3] §21.2).

7.11. Разъясните понятие «критическая длина волны» волновода ([1] §13.4, [3] §18.2).

7.12. Каково условие одноволнового режима в прямоугольном (коаксиальном) волноводе? ([1] §14.4, §15.7, [2] §4.4).

7.13. В чём преимущества одноволнового режима? ([1] §14.4, §15.7, [2] §4.4).

7.14. Разъясните понятие «основная волна» волновода ([1] §14.1, §14.2, §14.4, [2] §2.7, [3] §18.8).

7.15. Нарисуйте структуру поля основной волны в прямоугольном волноводе ([1] §14.1, [2] §3.5, [3] §19.6).

7.16. Нарисуйте структуру поля основной волны в коаксиальном волноводе ([1] §14.4, §15.7, [2] §4.4).

7.17. Объясните, почему длина волны в прямоугольном волноводе больше, чем в свободном пространстве ([1] §14.4, §15.7, [2] §4.4).

7.18. Как изменится длина волны в волноводе при изменении его диэлектрического заполнения? ([1] §14.4, §15.7, [2] §4.4).

7.19. Нарисуйте и объясните зависимость фазовой и групповой скоростей от длины волны для основной волны в прямоугольном волноводе ([1] §14.4, §15.7, [2] §4.4).

7.20. Где на круговой диаграмме полных сопротивлений шкалы модуля коэффициента отражения,  $K_{БВ}$ ,  $K_{СВ}$ ? ([1] §16.4, [2] §7.3).

7.21. Приведите методику определения полного сопротивления нагрузки по круговой диаграмме полных сопротивлений (диаграмме Вольперта) ([1] §16.4, [2] §7.3).

7.22. Как можно определить значение  $K_{БВ}$  по круговой диаграмме полных сопротивлений, если известно значение комплексного нормированного сопротивления нагрузки? ([1] §16.4, [2] §7.3).

## ЛИТЕРАТУРА

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

**Лабораторная работа № 6**  
**«ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО**  
**ПОЛЯ ВОЛН КЛАССА Т В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ**  
**НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ»**

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить основные закономерности процесса распространения электромагнитных волн класса **T** в направляющих системах.
2. Изучить метод электростатической аналогии.
3. Освоить методику экспериментального исследования структуры электромагнитного поля волны класса **T** в поперечном сечении направляющей системы.
4. Экспериментально подтвердить теоретические положения о структуре электромагнитного поля волн класса **T**.

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 2.1. Некоторые положения теории направляющих систем

Для передачи энергии электромагнитных волн от источника к потребителю (например, от передатчика к антенне) в практике используются направляющие системы (Направляющие системы, в которых в качестве рабочего типа используется класс волны **T**, принято также называть линиями передачи).

Направляющая система, у которой поперечное сечение и электромагнитные свойства заполняющей её среды остаются неизменными в продольном направлении (как правило, это ось *z*), называется регулярной.

Основной задачей анализа полей в направляющих системах является определение структуры поля – получение расчётных формул составляющих векторов поля, построение по ним силовых линий и эпюр распределения поля для некоторого времени  $t = \text{const}$ .

При расчёте структуры поля пользуются следующей методикой:

по уравнению Гельмгольца определяют одну из продольных составляющих векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ ;

затем, используя уравнения Максвелла, через продольные составляющие определяют поперечные.

Для упрощения записей рассмотрим реализацию этой методики в прямоугольной системе координат, например для продольной составляющей вектора  $\vec{E}$ . Так как направление распространения совпадает с осью *z*, то в расчётную формулу будет входить множитель  $e^{-\gamma_1 z}$ , где  $\gamma_1$  – продольный коэффициент распространения, показывающий изменение амплитуды и фазы направленной волны. Тогда искомую функцию можно представить в виде

или

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_z(x, y, z) &= \mathbf{E}_z(x, y) \cdot e^{-\gamma_1 z} \\ \mathbf{H}_z(x, y, z) &= \mathbf{H}_z(x, y) \cdot e^{-\gamma_1 z}.\end{aligned}\quad (2.1)$$

В выбранной системе координат требуется решение однородного волнового уравнения Гельмгольца вида

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}_z}{\partial z^2} + k^2 \mathbf{E}_z = 0. \quad (2.2)$$

Применив правила взятия частных производных из слагаемых функции (2.1), перепишем (2.2)

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}_z}{\partial y^2} + (\gamma_1^2 + k^2) \mathbf{E}_z = 0, \quad (2.3)$$

где  $k$  – коэффициент распространения в неограниченном (свободном) пространстве.

Величину  $(\gamma_1^2 + k^2)$  называют поперечным коэффициентом распространения  $\gamma_2^2$ , т.е.

$$\gamma_2^2 = \gamma_1^2 + k^2. \quad (2.4)$$

Если решить дифференциальное уравнение (2.3) методом разделения переменных, то получим

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(x, y, z) &= [\mathbf{E}_1 \cdot \sin(\gamma_{2x} \cdot x) + \mathbf{E}_2 \cdot \cos(\gamma_{2x} \cdot x)] \times \\ &\times [\mathbf{E}_3 \cdot \sin(\gamma_{2y} \cdot y) + \mathbf{E}_4 \cdot \cos(\gamma_{2y} \cdot y)] \cdot e^{-\gamma_1 z}.\end{aligned}\quad (2.5)$$

При решении задачи по нахождению продольной составляющей  $\mathbf{H}_z$  ответ будет подобен выражению (2.5).

Коэффициенты  $\gamma_{2x}$  и  $\gamma_{2y}$  называют поперечными волновыми числами, они связаны с коэффициентом  $\gamma_2$  соотношением

$$\gamma_{2x}^2 + \gamma_{2y}^2 = \gamma_2^2 \quad (2.6)$$

Из решения уравнения Гельмгольца (2.5) видно, что продольная составляющая электромагнитного поля в плоскости поперечного сечения изменяется по синусам и косинусам. Постоянные  $\gamma_{2x}$  и  $\gamma_{2y}$  определяют период изменения (вариации) поля в поперечной плоскости. Каждой паре поперечных волновых чисел соответствует своя структура поля направляемой волны (свой тип волны).

Для определения поперечных составляющих поля  $\mathbf{E}_x$ ,  $\mathbf{E}_y$ ,  $\mathbf{H}_x$  и  $\mathbf{H}_y$  воспользуемся первым и вторым уравнениями Максвелла, записанными в прямоугольной системе координат. В проекциях уравнений на оси координат, частные производные составляющих векторов  $\mathbf{E}_x$ ,  $\mathbf{E}_y$ ,  $\mathbf{H}_x$  и  $\mathbf{H}_y$  по оси  $z$  превращаются в произведения вида, например,

$$\frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial z} = \frac{\partial [\mathbf{E}_y(x, y) \cdot e^{-\gamma_1 z}]}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{E}_y(x, y)}{\partial z} \cdot (-\gamma_1).$$

Так как в регулярных волноводах без потерь в каждом поперечном сечении распределение поля остаётся неизменным, то  $\frac{\partial \mathbf{E}_y(x, y, z)}{\partial z} = -\gamma_1 \cdot \mathbf{E}_y(x, y)$ , и в сокращённой форме записи  $-\gamma_1 \cdot \mathbf{E}_y(x, y) = -\gamma_1 \cdot \mathbf{E}_y$ .

С учётом указанного, проекции первого уравнения приобретают вид:

$$\frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial y} + \gamma_1 \mathbf{H}_y = j\omega \varepsilon_a \mathbf{E}_x, \quad (2.7.a)$$

$$-\gamma_1 \mathbf{H}_x - \frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial x} = j\omega \varepsilon_a \mathbf{H}_y, \quad (2.7.б)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{H}_x}{\partial y} = j\omega \varepsilon_a \mathbf{E}_z. \quad (2.7.в)$$

а второго уравнения:

$$\frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial y} + \gamma_1 \mathbf{E}_y = j\omega \mu_a \mathbf{H}_x, \quad (2.8.a)$$

$$-\gamma_1 \mathbf{E}_x - \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial x} = j\omega \mu_a \mathbf{E}_y, \quad (2.8.б)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial y} = j\omega \mu_a \mathbf{H}_z. \quad (2.8.в)$$

Используя эти уравнения, определяем зависимость поперечных составляющих от координат через продольные составляющие. Используя уравнения (2.8.б) и (2.7.a), найдём расчётную формулу для составляющей  $\mathbf{E}_x$ , а другие составляющие определяются из комбинации других проекций первого и второго уравнений Максвелла. При преобразованиях следует использовать также равенство  $(\gamma_1^2 + \omega^2 \varepsilon_a \mu_a) = \gamma_2^2$ . В результате несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_x &= -\frac{1}{\gamma_2^2} \left( j\omega \varepsilon_a \frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial y} + \gamma_1 \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial x} \right), \\ \mathbf{E}_y &= \frac{1}{\gamma_2^2} \left( j\omega \varepsilon_a \frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial x} - \gamma_1 \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial y} \right), \\ \mathbf{H}_x &= \frac{1}{\gamma_2^2} \left( j\omega \varepsilon_a \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial y} - \gamma_1 \frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial x} \right), \\ \mathbf{H}_y &= -\frac{1}{\gamma_2^2} \left( j\omega \varepsilon_a \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial x} + \gamma_1 \frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (2.9)$$

В каждом типе конструкции волновода для каждого типа волны в нём коэффициент  $\gamma_2$  различен. Его определение составляет одну из основных задач в теории волноводов.

Многообразие типов волн в реальных линиях передачи можно свести к четырём основным классам: **T**-волны, **E**-волны, **H**-волны и гибридные **EH** и **HE**-волны.

**T**-волной называют поперечную электромагнитную волну (ЭМВ), вектора напряжённости электрического и магнитного полей которой лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения (т.е.  $\mathbf{E}_z$  и  $\mathbf{H}_z=0$ ). В **E**-волне отсутствует  $\mathbf{H}_z$ , в **H**-волне –  $\mathbf{E}_z$ , а в гибридной волне существуют обе продольные составляющие ( $\mathbf{E}_z \neq 0$ ,  $\mathbf{H}_z \neq 0$ ).

## 2.2. Волны класса T

Как указано выше, к **T**-классу относятся ЭМВ, у которых отсутствуют продольные составляющие векторов, т.е.  $\mathbf{E}_z = \mathbf{H}_z = 0$ . Подстановка этого условия в формулы (2.9) даёт равенства

$$\gamma_2^2 \mathbf{E}_x = \gamma_2^2 \mathbf{E}_y = \gamma_2^2 \mathbf{H}_y = \gamma_2^2 \mathbf{H}_x = 0. \quad (2.10)$$

Так как ЭМВ в линии передачи должна существовать, то хотя бы одна пара проекций векторов, например  $\mathbf{E}_x$  и  $\mathbf{H}_y$  не равны нулю. Это (2.10) возможно тогда, когда  $\gamma_2 = 0$ , т.к.  $\mathbf{E}_x = 0 / \gamma_2^2$  может быть не равно нулю только в случае неопределённости.

Из (2.4) получим

$$\gamma_1^2 = -k^2 \text{ или } \gamma_1 = jk, \quad (2.11)$$

что равносильно утверждению – в линиях с волной класса **T** ЭМВ распространяется, имея такие же параметры, как и в свободном пространстве.

Равенство нулю коэффициента  $\gamma_2$  говорит также о том, что структура **T**-поля поперечном сечении не зависит от частоты, будет одинаковой на любой частоте вплоть до  $f=0$  ( $\lambda=\infty$ ), т.е. на постоянном токе.

С другой стороны, в любой линии передачи

$$\gamma_1^2 = \gamma_2^2 - k^2.$$

Если пренебречь потерями энергии в отрезках волноводов с высокой проводимостью

$$\gamma_1 = \alpha + j\beta \approx j\beta,$$

т.е.

$$j\beta = \sqrt{\gamma_2^2 - k^2},$$

или

$$\beta = \sqrt{k^2 - \gamma_2^2},$$

что показывает – в линиях с волнами с  $\gamma_2 \neq 0$  (классы **E** и **H**)  $k > \gamma_2$ , или  $(2\pi/\lambda) > \gamma_2$ , или

$$\lambda < 2\pi/\gamma_2. \quad (2.12)$$

Формулу (2.12) следует толковать следующим образом: в волноводах с дисперсными типами волн (**E**, **H**, **EH** и **HE**) проходит без ослабления волна не с любой длиной, а волны с длиной менее некоторого критического значения

$$\lambda_{кр} < 2\pi/\gamma_2. \quad (2.13)$$

В линиях же с **T**-волной  $\lambda_{кр}=\infty$ , т.е. проходят любые волны и постоянный ток. Для обеспечения прохождения постоянного тока необходимо иметь не менее двух проводов. Волноводы должны иметь два или более число проводов.

Отмеченные особенности позволяют сделать следующие выводы:

- структура поля волн класса **T** в поперечном сечении направляющей системы совпадает со структурой соответствующих статических полей в этой же системе;

- волны класса **T** могут распространяться только в тех направляющих системах, которые допускают существование статических полей (этому условию удовлетворяют направляющие системы, состоящие не менее чем из двух изолированных друг от друга проводников, например, двухпроводная, коаксиальная, полосковые линии).

Установив идентичность структуры волн класса **T** и статических полей в поперечном сечении направляющей системы, необходимо также указать на их отличие друг от друга. В направлении продольной оси направляющей системы поле волн класса **T** имеет волновой характер, тогда как у статических полей структура поля не зависит от координаты  $z$  (в регулярной направляющей системе). Кроме того, у волн класса **T** величины векторов поля изменяются во времени, тогда как в статических полях величины векторов постоянны.

### 2.3. Моделирование электростатического поля в электролитической ванне

Для проведения экспериментальных исследований электростатическое поле часто моделируют электрическим полем постоянного тока (стационарным полем) [3]. Возможность моделирования обусловлена аналогией между электрическим полем постоянного тока и электростатическим полем, которая заключается в следующем.

Рассмотрим уравнения электростатического поля в однородном диэлектрике при отсутствии свободных зарядов

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad \text{div } \vec{E} = 0 \quad (2.14)$$

и уравнения электрического поля постоянного тока в однородной проводящей среде при отсутствии сторонних источников тока

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad \text{div } \vec{j} = 0, \quad (2.15)$$

где  $\vec{j}$  – вектор плотности тока проводимости. Вследствие закона Ома  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$  ( $\sigma$  – проводимость среды), уравнение  $\text{div } \vec{j} = 0$  эквивалентно уравнению  $\text{div } \vec{E} = 0$ .

Как видно из уравнений (2.14) и (2.15), оба поля являются потенциальными, а потенциалы обоих полей удовлетворяют одному и тому же уравнению Лапласа

$$\text{div } \vec{E} = -\text{div}(\text{grad}\phi) = -\nabla^2\phi = 0. \quad (2.16)$$

Считая форму, размеры и взаимное расположение проводящих тел идентичными в обоих полях, можно утверждать, что, если граничные условия для потенциала на поверхности проводящих тел одинаковы, то и решения уравнения (2.16) в обоих случаях будут одинаковы.

Известно, что в электростатическом поле поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью, а в электрическом поле постоянного тока поверхность проводника уже не является эквипотенциальной, так как ток, проходящий по проводнику, создает на нём падение напряжения.

*Однако, если поверхность проводника является границей раздела с плохо проводящей средой, то с большой степенью точности поверхность проводника можно считать эквипотенциальной и, следовательно, граничные условия для потенциала в обоих полях будут совпадать.*

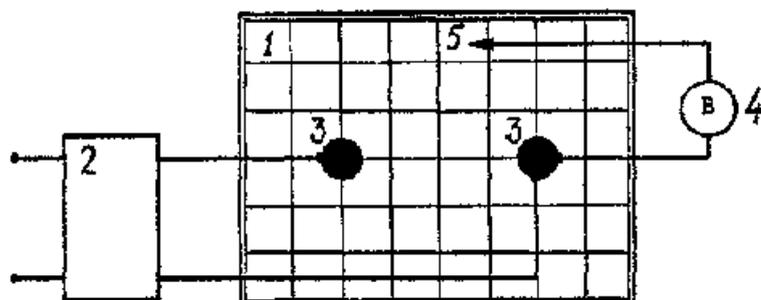
*Указанная аналогия позволяет экспериментально исследовать электростатическое поле в электролитической ванне. В электролитической ванне, заполненной водопроводной водой (плохо проводящая среда), располагают нужным образом металлические электроды заданной формы, к которым прикладывается постоянная разность потенциалов. Измеряя разность потенциалов между одним из проводников и различными точками в электролите между проводниками с помощью высокоомного вольтметра, можно определить координаты точек с одинаковыми потенциалами и, следовательно, провести эквипотенциальные линии.*

При исследовании в электролитической ванне на постоянном токе наблюдается поляризация электродов. Для устранения этого явления исследования проводят на переменном токе низкой частоты (с частотой 50 Гц).

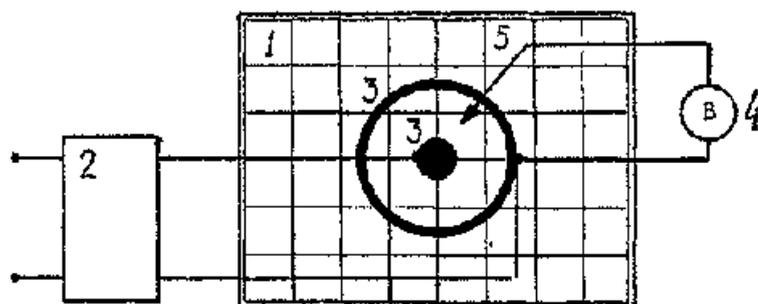
### 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка состоит из электролитической ванны, на дне которой нанесена координатная сетка, устройства питания и вольтметра переменного напряжения с зондом. Электролитом ванны служит вода. Устройство питания состоит из трансформатора, понижающего напряжение сети с 220 В до 30 В.

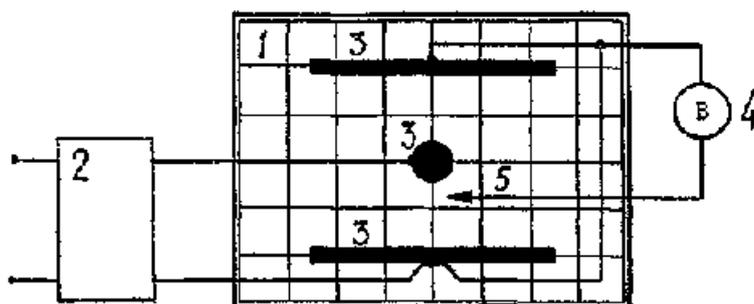
Для проведения исследований имеется набор металлических электродов, позволяющих моделировать электростатическое поле в поперечных сечениях: двухпроводной линии, коаксиальной линии, симметричной и несимметричной полосковых линий. Соответствующие схемы экспериментальных установок представлены на рис. 3.1а...3.1г.



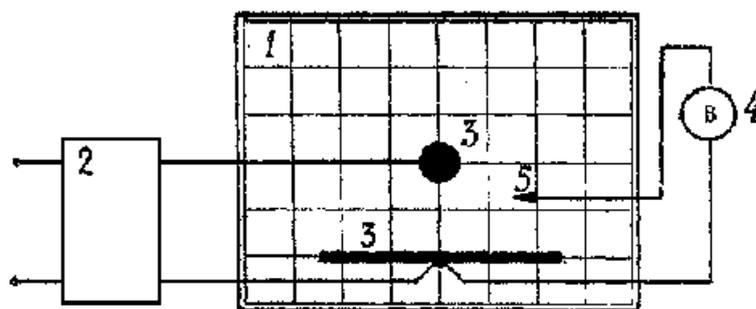
а) Схема установки для исследования структуры электромагнитного поля волны класса Т в поперечном сечении двухпроводной линии



б) Схема установки для исследования структуры электромагнитного поля волны класса Т в поперечном сечении коаксиального кабеля



в) Схема установки для исследования структуры электромагнитного поля волны класса Т в поперечном сечении симметричной полосковой линии



г) Схема установки для исследования структуры электромагнитного поля волны класса Т в поперечном сечении несимметричной полосковой линии

Рис. 3.1. Схемы экспериментальных установок (1 – электролитическая ванна, 2 – понижающий трансформатор, 3 – электроды, 4 – вольтметр, 5 – зонд)

#### 4. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

4.1. Определить координаты точек семейства эквипотенциальных линий смоделированного в электролитической ванне электростатического поля в поперечном сечении:

- а) двухпроводной линии,
- б) коаксиальной линии,
- в) симметричной или несимметричной полосковой линии (по заданию преподавателя).

4.2. Построить по полученным данным силовые линии магнитного и электрического полей волн класса Т в поперечном сечении указанных направляющих систем.

**ВНИМАНИЕ!** При выполнении работы необходимо неукоснительно соблюдать правила техники безопасности, обращая особое внимание на следующее:

- а) сборку схем, а также необходимые изменения в схемах проводить при выключенном источнике питания;
- б) прикасаться к электродам, электролиту при включенном источнике питания категорически воспрещается;
- в) зонд необходимо перемещать одной рукой, держа его за изолированную часть; другая рука в это время не должна касаться каких-либо частей лабораторной установки.

#### 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Убедившись в том, что источник питания выключен, заполнить электролитическую ванну электролитом (водопроводной водой).

5.2. Разместить в электролитической ванне электроды и собрать в соответствии с рис. 3.1 схему для проведения экспериментального исследования.

5.3. После проверки правильности сборки схемы преподавателем или лаборантом включить источник питания и установить напряжение между электродами  $U=20$  В (при исследовании поля двухпроводной линии  $U=25$  В).

5.4. Поместить зонд в электролит между электродами. Передвигая зонд, найти какую-либо точку, в которой потенциал равен  $\varphi_1=5$  В.

5.5. Перемещая зонд так, чтобы показание вольтметра не менялось, заносить в таблицу 5.1 координаты  $x$  и  $y$  точек эквипотенциальной линии, отстоящих друг от друга на расстоянии порядка 2 см.

5.6. Повторяя действия, описанные в п.п. 5.4 и 5.5, определить координаты точек эквипотенциальных линий с потенциалами  $\varphi_2=10$  В,  $\varphi_3=15$  В и (только при исследовании поля в двухпроводной линии)  $\varphi_4=20$  В..

5.7. Выключить источник питания и собрать следующую схему. Повторить действия, описанные в п.п. 5.3...5.6. Результаты измерения занести в таблицу, аналогичную таблице 5.1, и т.д.

Таблица 5.1

Результаты исследования структуры электромагнитного поля волны класса **T** в поперечном сечении .....

$\varphi_1=5$ В	x																		
	y																		
$\varphi_2=10$ В	x																		
	y																		
$\varphi_3=15$ В	x																		
	y																		
$\varphi_4=20$ В	x																		
	y																		

5.8. По данным таблиц построить семейства электрических и магнитных силовых линий электромагнитного поля волн класса **T** в поперечном сечении исследуемых направляющих систем.

Эквипотенциальные линии проводятся по точкам, координаты которых получены в результате эксперимента.

Силовые линии электрического поля проводятся перпендикулярно эквипотенциальным линиям. При этом нужно помнить, что поверхности проводников являются эквипотенциальными. Так как вектор  $\vec{E}$  направлен в сторону убывания потенциала, то его силовые линии должны начинаться на поверхности проводника с большим потенциалом. Кроме того, чем ближе к поверхности проводника располагается соседняя эквипотенциальная линия, тем больше силовых линий должно приходиться на единицу длины границы проводника.

Силловые линии магнитного поля волн класса  $T$ , как указывалось выше, совпадают с эквипотенциальными линиями электростатического поля. Направление силовых линий магнитного поля определяется с помощью выражения  $\vec{H}_\perp = \frac{1}{Z_c} [z_0, \vec{E}_\perp]$ .

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет должен содержать:

- 6.1. Название и цель лабораторной работы.
- 6.2. Схемы лабораторной установки.
- 6.3. Таблицы с результатами экспериментального исследования;
- 6.4. Построенные по результатам экспериментального исследования картины силовых линий электромагнитного поля волн класса  $T$  в поперечном сечении исследуемых направляющих систем.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Какие электромагнитные волны называются волнами класса  $T$ ? ([1] §13.2; [2] §§2.4, 2.7; [3] §§17.2, 17.3).

7.2. Что называется критической частотой (критической длиной волны)? Чему равна критическая частота (критическая длина волны) для волн класса  $T$ ? ([1] §§13.4, 13.5; [2] §2.4; [3] §§18.2, 18.3).

7.3. Условие распространения электромагнитной волны в направляющей системе в общем виде и конкретно для волны класса  $T$  ([1] §13.4; [2] §2.4; [3] §§18.2, 18.3).

7.4. С какой фазовой скоростью распространяется волна класса  $T$  в направляющих системах? ([1] §13.5; [2] §2.3; [3] §18.3).

7.5. Какому уравнению удовлетворяют векторы напряженности электромагнитного поля волн класса  $T$  в поперечном сечении направляющей системы? ([1] §13.5; [2] §2.3).

7.6. В каких направляющих системах могут распространяться волны класса  $T$ ? ([1] §13.5; [2] §2.5; [3] §17.3).

7.7. Какая существует связь между векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  волн класса  $T$ ? Каково взаимное расположение векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ ? ([1] §13.5; [3] §18.3).

7.8. Укажите, в чем состоит сходство и различие в структурах поля волн класса  $T$  и электростатического поля в одной и той же направляющей системе? ([1] §13.5).

7.9. Дайте определение вектора напряженности электрического поля. В каких единицах он измеряется? ([1] §1.2; [3] §2.3).

7.10. Что называется силовой линией вектора поля? ([1] §1.4; [3] §2.3).

7.11. Что называется эквипотенциальной линией (поверхностью)? ([1] §6.2).

7.12. Как расположены силовые линии вектора  $\vec{E}$  относительно эквипотенциальных линий? ([1] §6.2).

7.13. В чем состоит метод электростатической аналогии? ([1] §7.7; [3] §8.2).

7.14. Изобразите с помощью силовых линий структуру поля волн класса **T** в поперечном сечении двухпроводной линии, коаксиальной линии, симметричной и несимметричной полосковых линий. ([1] §§13.5, 14.5; [3] §§19.9, 20.2).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. т.1. – М.: Высшая школа, 1970.
3. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1978.
4. Пименов Ю.В. и др. Техническая электродинамика. – М.: Радио и связь, 2000.

**Лабораторная работа № 7**  
**«ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ**  
**НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД»**

**1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1.1. Изучение явлений отражения и преломления электромагнитных волн на плоских границах раздела сред.

1.2. Измерение количественных характеристик указанных явлений.

**2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

2.1. Плоская электромагнитная волна, падая из среды с параметрами  $\epsilon_{a1}$  и  $\mu_{a1}$  на плоскую границу со средой, параметры которой  $\epsilon_{a2}$  и  $\mu_{a2}$  ( $\epsilon_a$  и  $\mu_a$  – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемость среды, соответственно), в общем случае частично отражается от границы, а частично проходит во вторую среду, меняя направление распространения. Совместим плоскость  $xoz$  (рис.2.1) с границей раздела.

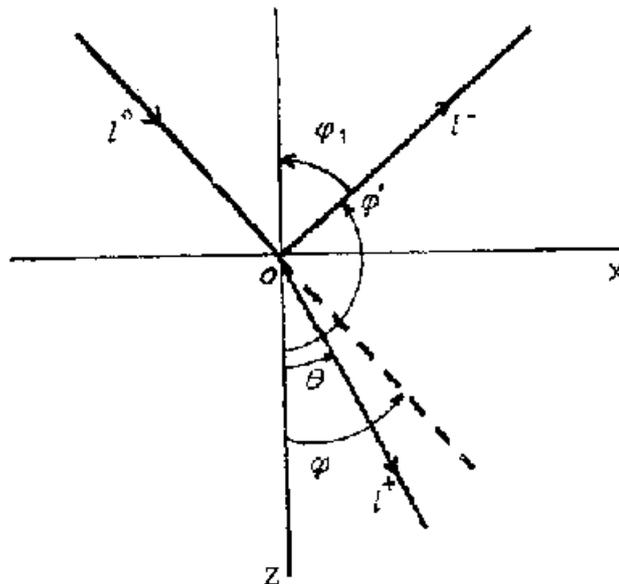


Рис.2.1. Геометрия отражения и прохождения волны

Плоскость  $xoz$ , проходящая через нормаль (ось  $z$ ) к границе раздела и направление распространения падающей волны  $\vec{l}^0$ , называется *плоскостью падения волны*.

Отраженная и прошедшая (преломленная) волны также будут плоскими, а направления их распространения  $\vec{l}^-$  и  $\vec{l}^0$  будут лежать в плоскости падения волны.

Угол  $\varphi$  между направлением распространения падающей волны и нормалью к границе раздела (угол отсчитывается от положительного направления оси  $z$ ) называется *углом падения волны*.

Угол  $\varphi'$  между направлением распространения отраженной волны и нормалью к границе раздела определяет в общем угол отражения. Однако в геометрической оптике, которой мы следуем, *углом отражения*  $\varphi_1$  называют угол дополняющий  $\varphi'$  до  $180^\circ$ .

Угол  $\theta$  между направлением распространения прошедшей (преломленной) волны и нормалью к границе раздела называется *углом преломления*.

Связь между величинами углов  $\varphi$ ,  $\varphi'$  и  $\theta$  выражается *законами Снеллиуса*:

$$\varphi' = \pi - \varphi, \quad (2.1)$$

$$\frac{\sin \theta}{\sin \varphi} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{a2} \mu_{a2}}}{\sqrt{\varepsilon_{a1} \mu_{a1}}}. \quad (2.2)$$

2.2. Вектор напряженности электрического поля падающей волны  $\bar{E}^\circ$ , перпендикулярный направлению распространения, в общем случае может быть расположен по-разному относительно плоскости падения. Но, так как он всегда может быть представлен в виде суммы двух взаимно перпендикулярных векторов, то достаточно рассмотреть два случая: вектор  $\bar{E}^\circ$  лежит в плоскости падения волны и вектор  $\bar{E}^\circ$  перпендикулярен плоскости падения волны.

В первом случае поляризация волны называется *параллельной*. При этом вектор  $\bar{E}^\circ$  имеет две проекции на оси координат  $E_x^\circ$  и  $E_z^\circ$ , а вектор  $\bar{H}^\circ$  - одну  $H_y^\circ$  (рис.2.2.а). Векторы  $\bar{E}^-$  и  $\bar{E}^+$  отраженной и преломленной волн также лежат в плоскости падения волны.

Во втором случае поляризация волны называется *нормальной*. При этом вектор  $\bar{E}^\circ$  имеет одну проекцию  $E_y^-$ , а вектор  $\bar{H}^\circ$  - две,  $H_x^\circ$  и  $H_z^\circ$ . Векторы  $\bar{E}^-$  и  $\bar{E}^+$  отраженной и преломленной волн также перпендикулярны плоскости падения волны.

2.3. *Коэффициентом отражения R* называется отношение комплексных амплитуд напряженностей электрического поля отраженной волны  $\bar{E}^-$  и падающей волны  $\bar{E}^\circ$ , т.е.

$$R = \bar{E}^- / \bar{E}^\circ. \quad (2.3)$$

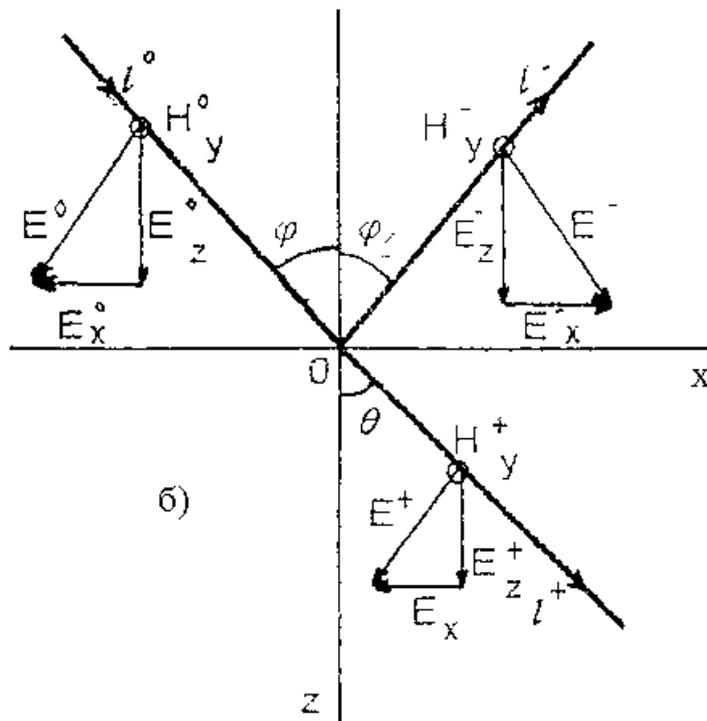
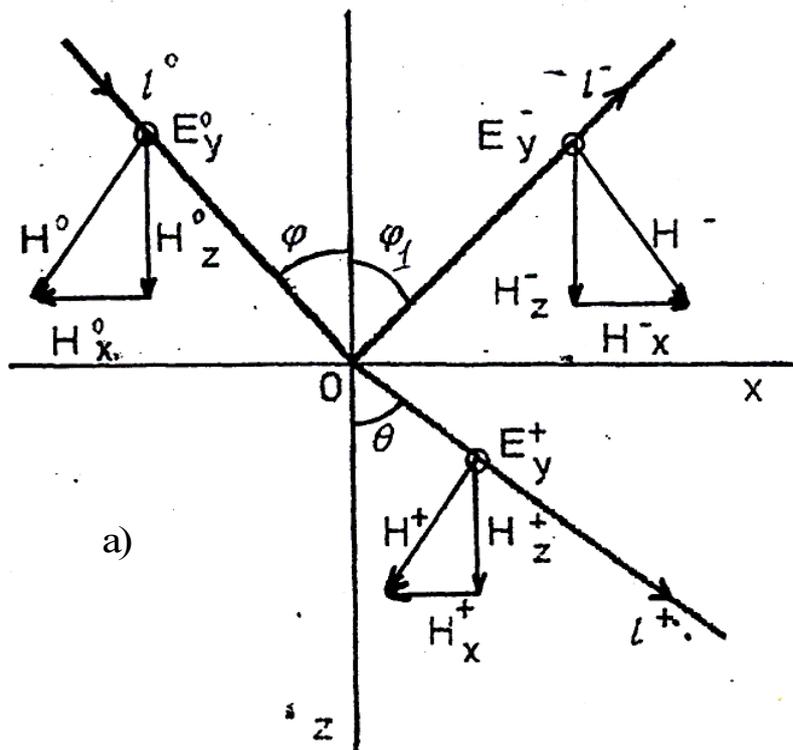


Рис.2.2. К пояснению нормальной и параллельной поляризаций

Коэффициентом прохождения  $\chi$  называется отношение комплексных амплитуд напряженностей электрического поля преломления волны  $\bar{E}^-$  и падающей волны,  $\bar{E}^0$  т.е.

$$\chi = \bar{E}^- / \bar{E}^0. \quad (2.4)$$

Отметим, что  $R$  и  $\chi$  являются в общем случае комплексными величинами. Их модули характеризуют отношение амплитуд соответствующих волн, а аргументы – сдвиг фаз между этими полями на границе раздела.

В случае параллельной поляризации (рис.2.2.а):

$$R_{\parallel} = \frac{Z_{c1} \cos \varphi - Z_{c2} \cos \Theta}{Z_{c1} \cos \varphi + Z_{c2} \cos \Theta}, \quad (2.5)$$

$$\chi_{\parallel} = \frac{2Z_{c2} \cos \varphi}{Z_{c1} \cos \varphi + Z_{c2} \cos \Theta}, \quad (2.6)$$

а в случае нормальной поляризации (рис.2.2.б):

$$R_{\perp} = \frac{Z_{c2} \cos \varphi - Z_{c1} \cos \Theta}{Z_{c2} \cos \varphi + Z_{c1} \cos \Theta}, \quad (2.7)$$

$$\chi_{\perp} = \frac{2Z_{c2} \cos \varphi}{Z_{c2} \cos \varphi + Z_{c1} \cos \Theta}, \quad (2.8)$$

где  $Z_{c1} = \sqrt{\mu_{a1}/\varepsilon_{a1}}$ ,  $Z_{c2} = \sqrt{\mu_{a2}/\varepsilon_{a2}}$  - волновые сопротивления первой и второй среды, соответственно.

Выражения (2.5)...(2.8) часто называют формулами Френеля.

2.4. В случае падения плоской электромагнитной волны на плоскую поверхность проводника волна отражается. В проводниках волновое сопротивление определяется выражением

$$Z_{c2} = \sqrt{\frac{\mu_{a2} \omega}{\sigma_2}} e^{i\pi/2},$$

где  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота,

$\sigma$  - удельная проводимость среды.

Для идеального проводника волновое сопротивление равно нулю. Поэтому при падении плоской волны из диэлектрика на поверхность идеального проводника независимо от угла падения из формул (2.5)...(2.8) следует:

$$R_{\parallel} = 1, \quad R_{\perp} = -1, \quad \chi_{\parallel} = \chi_{\perp} = 0 \quad (2.9)$$

и, следовательно, волна полностью отражается, а поле внутри идеального проводника отсутствует.

Реальные металлы имеют конечную проводимость, но ввиду того, что проводимость металлов велика, во всем диапазоне радиочастот волновое сопротивление металлов близко к нулю. Следовательно, при любых углах падения волны, модуль коэффициента отражения незначительно отличается от единицы.

2.5. В случае падения плоской электромагнитной волны на плоский слой диэлектрика толщиной  $d$ , расположенный в воздухе (рис.2.3) падающая на верхнюю границу слоя волна частично отражается, а частично проходит в слой. При достижении нижней границы слоя волна опять частично отражается, а частично выходит из слоя. Отраженная от нижней границы слоя волна падает на верхнюю границу, где опять частично отражается, а частично выходит из слоя и т.д. Очевидно, что волна, отраженная от слоя, представляет собой наложение бесконечного числа волн, распространяющихся в одинаковом направлении (под углом к оси  $z$ ). Эти волны отличаются друг от друга амплитудами и фазами, которые зависят от числа отражений волны внутри слоя. Аналогичный вывод можно сделать относительно волны, прошедшей через слой диэлектрика.

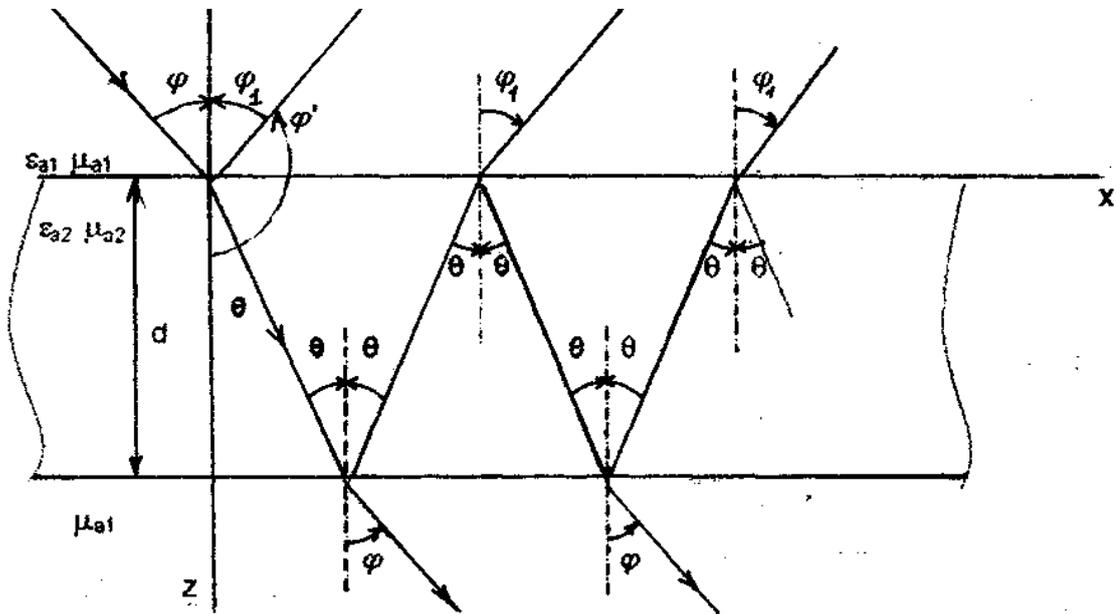


Рис. 2.3. Падение плоской волны на слой диэлектрика

Заметим, что направление распространения прошедшей через слой диэлектрика волны совпадает с направлением распространения падающей волны.

Суммируя комплексные амплитуды всех волн, составляющих отраженную волну, для коэффициентов отражения волн от слоя  $R_{сл}$  и прохождения волны  $\chi_{сл}$  через слой можно получить выражения:

$$R_{сл} = \frac{R_{12} (1 - e^{-i2k_2 d \cos \Theta})}{1 - R_{12}^2 e^{-i2k_2 d \cos \Theta}},$$

$$\chi_{сл} = \frac{(1 - R_{12}^2) e^{-i2k_2 d \cos \Theta}}{1 - R_{12}^2 e^{-i2k_2 d \cos \Theta}},$$

где  $R_{12}$  – коэффициент отражения при падении волны на границу слоя из воздуха, определяемый в случае параллельной поляризации по формуле (2.5), а при перпендикулярной поляризации по формуле (2.7).

$k_2 = 2\pi\sqrt{\varepsilon_2}/\lambda$ , а угол  $\Theta$  определяется из второго закона Снеллиуса (2.2).

Модули коэффициентов отражения и прохождения равны:

$$|R_{сл}| = \frac{|R_{12}| \sqrt{1 - 2 \cos(2k_2 d \cos \Theta)}}{\sqrt{1 - 2 \cos(2k_2 d \cos \Theta)}}, \quad (2.10)$$

$$|\chi_{сл}| = \frac{1 - |R_{12}|}{\sqrt{1 - 2 \cos(2k_2 d \cos \Theta)}}. \quad (2.11)$$

2.6. Если обе среды являются диэлектриками, и, следовательно,  $\mu_{a1} = \mu_{a2} = \mu_0$ , то коэффициент отражения нормально - поляризованной волны не может быть равен нулю ни при каком угле падения. При параллельной поляризации существует угол падения

$$\varphi = \arctg \sqrt{\varepsilon_{a2} / \varepsilon_{a1}}, \quad (2.12)$$

называемый *углом Брюстера*, при котором коэффициент отражения равен нулю, и волна полностью проходит во вторую среду.

При падении параллельно - поляризованной плоской волны под углом Брюстера на плоский слой диэлектрика также наблюдается полное

прохождение волны через слой. Это видно из выражений (2.10) и (2.11). Так как при данных условиях коэффициент отражения  $R_{12}=0$ , то модули коэффициентов отражения от слоя диэлектрика и прохождения через этот слой соответственной равны 0 и 1.

### 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка предназначена для исследования явлений отражения и преломления электромагнитных волн на границах раздела сред с различными физическими характеристиками и измерения модулей коэффициентов отражения и прохождения в диапазоне частот 5,3...10,6 ГГц.

Лабораторная установка состоит из передающей части, приемной части и подставки, на которой закрепляются пластины из различных материалов (рис.3.1). Эти пластины имитируют границу раздела двух сред.

Передающая часть антенны содержит генератор СВЧ (1) и рупорную антенну (2). Можно считать, что на расстоянии 7...10 длин волн от рупорной антенны в ограниченной области пространства создается плоская электромагнитная волна. Падая под углом  $\varphi$  на пластину (7), в зависимости от материала пластины и вида поляризации волна может:

- а) полностью отразиться;
- б) частично пройти сквозь пластину и частично отразиться;
- в) полностью пройти сквозь пластину.

Приемная часть состоит из рупорной антенны (2), переменного аттенюатора (3), детекторной секции (4) и стрелочного индикатора (5). Переменный аттенюатор служит для регулировки мощности, поступающей на детекторную секцию от рупорной антенны. Расположенный в детекторной секции, СВЧ диод выпрямляет ток высокой частоты. После выпрямления ток диода поступает на микроамперметр постоянного тока (5). Приемная часть установки укреплена на платформе, которая может перемещаться по окружности с центром в точке 0 (рис.3.1) и, следовательно, может регистрировать как отраженную (положение *а*), так и прошедшую (положение *б*) волны.

При непосредственном присоединении рупорных антенн (2) к волноводу от генератора и аттенюатору (3) в данной установке получается нормальная (относительно плоскости падения волны) поляризация. Для получения параллельной поляризации присоединение рупорных антенн должно производиться через волноводные скрутки.

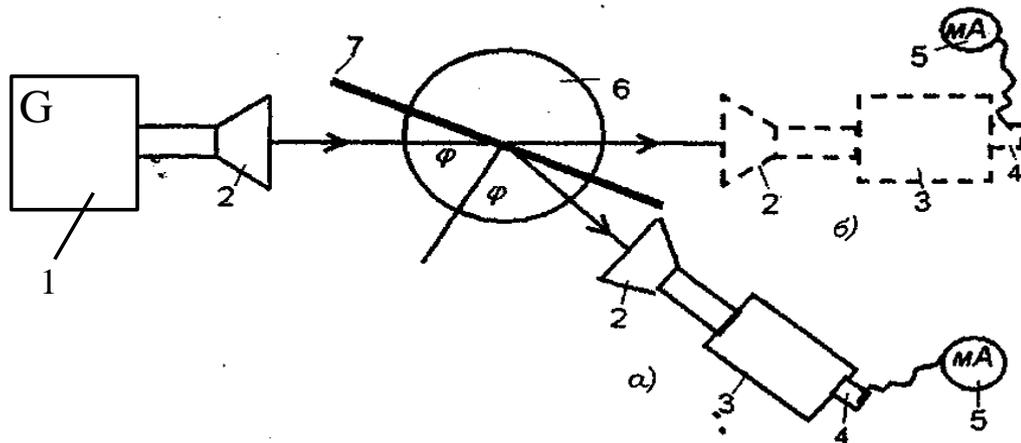


Рис. 3.1. Структурная схема лабораторной установки (1 – генератор СВЧ диапазона, 2 - рупорная антенна, 3 – переменный аттенюатор, 4 – детекторная секция, 5 – индикаторный прибор (микроамперметр), 6 – шкала отсчета углов, 7 – исследуемая пластина).

Так как передающая часть является неподвижной, то угол падения изменяется путем вращения подставки с образцом. Отсчет угла падения производится по шкале, которая поворачивается вместе с образцом. В соответствии с определением, приведенным выше, за ноль отсчета принимается направление перпендикуляра к поверхности исследуемой пластины.

Для экспериментального определения модулей коэффициента отражения и коэффициента прохождения пользуются косвенным методом с использованием переменного аттенюатора, проградуированного в децибелах. Изменяя ослабление аттенюатора, добиваясь неизменных показаний микроамперметра, определяют отношение мощностей отраженной и падающей волн при определении модуля коэффициента отражения, и отношение мощностей прошедшей и падающей волн при определении модуля коэффициента прохождения.

Рассмотрим, например, измерение модуля коэффициента отражения. При расположении приемной антенны в поле падающей волны в тракт приема аттенюатором вводят ослабление  $N_1$  и фиксируют показание микроамперметра, которое составляет порядка 5 мкА. Затем, помещая антенну в поле отраженной волны, уменьшаю ослабление аттенюатора до величины  $N_2$ , при которой показание микроамперметра остается неизменным. Изменение ослабления  $N_2 - N_1$  равно отношению вышеуказанных мощностей, выраженному в децибелах. Так как мощности, принимаемые антенной, пропорциональны квадратам напряженностей соответствующих электрических полей, то можно записать

$$N_2 - N_1 = 10 \lg \left| \bar{E}^- / \bar{E}^0 \right|^2 = 20 \lg \left| \bar{E}^- / \bar{E}^0 \right|.$$

Откуда следует

$$\left| R_{сл} \right| = 10^{(N_2 - N_1)/20} . \quad (2.13)$$

Определение значения коэффициента прохождения производится аналогично, а модуль коэффициента прохождения рассчитывается по формуле

$$\left| \chi_{сл} \right| = 10^{(N_3 - N_1)/20} , \quad (2.14)$$

где  $N_3$  – величина ослабления аттенюатора при расположении приемной антенны в поле прошедшей волны. Заметим, что применение аттенюатора позволяет избежать влияния нелинейной характеристики детектора на результаты измерений.

Следует иметь в виду, что в данной установке фронт падающей волны лишь приближенно считается плоским и волна распространяется в ограниченной области пространства. Также ввиду конечных размеров отражающих поверхностей возможны нежелательные отражения волн от их краев. Эти причины могут вызвать некоторое расхождение результатов измерений с теоретическими результатами расчета.

#### 4. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

4.1. Определить зависимость значений модуля коэффициента отражения от угла падения волны.

4.2. Определить зависимость значений модуля коэффициента отражения от плоского слоя диэлектрика и коэффициента прохождения через этот слой от угла падения волны.

4.3. Определить угол Брюстера.

#### 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Ознакомьтесь с инструкцией по настройке генератора, входящей в комплект установки.

5.2. Включите генератор и после его прогрева в течение 7...10 минут настройте на частоту  $f$ , заданную преподавателем. Рассчитайте соответствующую длину волны  $\lambda$  в свободном пространстве по формуле

$$\lambda = c/f ,$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в свободном пространстве.

5.3. Установите нормальную поляризацию падающей волны. При этом вектор  $\vec{E}$  излучаемой волны должен быть перпендикулярен плоскости падения волны и основанию лабораторного макета. Напоминаем, что вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен широкой стенке прямоугольного волновода.

5.4. Вращая ручку аттенюатора, установите величину его максимального ослабления 50 дБ и расположите приемную антенну против передающей (исследуемая пластина должна отсутствовать). Уменьшая ослабление аттенюатора, добейтесь отклонения стрелки микроамперметра. Перемещая приемную антенну, получите максимальное отклонение стрелки микроамперметра.

5.5. Изменяя ослабление аттенюатора, установите стрелку микроамперметра, например, на деление 5 и запишите показание N1 шкалы аттенюатора.

5.6. Закрепите на подставке металлический лист. Вращая подставку, установите по шкале отсчета угол падения волны  $\varphi$ , равный  $20^\circ$ . Перемещая приемную антенну, определите направление распространения отраженной волны по максимуму показания микроамперметра. Запишите значение угла  $\varphi_1$  (рис.3.1) между нормалью к поверхности металлической пластины и направлением распространения отраженной волны. Изменяя ослабление аттенюатора, установите такое же показание микроамперметра, как и в п.5.5. Запишите показание шкалы аттенюатора N2. Определите значение модуля коэффициента отражения по формуле (2.13). Повторите измерения при других значениях углов падения волны. Результаты измерений и расчета занести в таблицу типа табл.5.1. Снимите металлический лист с подставки.

5.7. Повторите операции п.п.5.4 и 5.5, так как выходная мощность генератора могла немного измениться. Закрепите на подставке одну из диэлектрических пластин по заданию преподавателя. Установите угол падения волны  $20^\circ$ . Определите значение модуля коэффициента отражения так же, как и в п.5.6 и запишите значения N1 и N2 и результаты расчета модуля коэффициента отражения в таблицу типа табл. 5.1. Повторите измерения и расчеты для углов падения волны от  $30^\circ$  до  $70^\circ$  через  $10^\circ$ .

Рассчитайте значения модулей коэффициента отражения по формуле (2.13).

Таблица 5.1

Результаты экспериментального исследования отражающих свойств.....пластины

Поляризация падающей волны .....					
Угол падения волны $\varphi$	Угол отражения волны $\varphi_1$	Величина ослабления $N_1$	Величина ослабления $N_2$	$N_2 - N_1$	Модуль коэффициента отражения
град.	град.	дБ	дБ	дБ	-
$20^\circ$					
$30^\circ$					
...					
$70^\circ$					

5.8. Сняв пластину с подставки, повторить операции п.п.5.4 и 5.5. Так как направление распространения волны, прошедшей через слой диэлектрика, всегда совпадает с направлением распространения падающей волны, то перемещать приемную антенну не потребуется. Установите пластину на подставку. Поворачивая подставку, установите угол падения волны, равный  $0^\circ$ . Изменяя ослабление аттенюатора, установите такое же показание микроамперметра, как в п.5.5. Запишите показания шкалы аттенюатора  $N_3$  в таблицу типа табл.5.2. Определите значение модуля коэффициента прохождения  $\left| \chi_{сл} \right|$  по формуле (2.14). Повторите измерения и расчеты для углов падения волны от  $10^\circ$  до  $70^\circ$  через  $10^\circ$ .

5.9. Установите параллельную поляризацию падающей волны с помощью волноводных скруток. Выполните п.5.4 (диэлектрическую пластину с подставки можно не снимать). Медленно вращая подставку с пластиной, добейтесь максимального показания микроамперметра и запишите величину угла падения волны, при котором через слой проходит максимальная мощность. Полученный угол падения волны и будет являться углом Брюстера. Перемещая приемную антенну в область, где возможны отраженные волны, убедитесь в отсутствии отраженной волны. Используя формулу (2.12), по полученной величине угла Брюстера рассчитайте относительную диэлектрическую проницаемость исследуемого образца. При этом следует учесть, что отношение абсолютных диэлектрических проницаемостей сред равно отношению относительных диэлектрических проницаемостей, и что у воздуха  $\varepsilon_1 = 1$ .

Результаты экспериментального определения величин  
коэффициента прохождения

Поляризация падающей волны .....				
Угол падения волны $\varphi$	Величина ослабления $N_1$	Величина ослабления $N_3$	$N_3 - N_1$	Модуль коэффициента отражения
град.	ДБ	дБ	дБ	-
$0^\circ$				
$10^\circ$				
$20^\circ$				
...				
$70^\circ$				

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет должен содержать:

- 6.1. Структурную схему лабораторной установки.
- 6.2. Заданные вид поляризации поля, частоту и рассчитанное значение длины волны.
- 6.3. Таблицу 5.1 с результатами значений углов отражения и расчета значений коэффициента отражения от металлической поверхности.
- 6.4. Таблицы 5.1 и 5.2 с результатами значений модулей коэффициентов отражения и прохождения для плоского слоя диэлектрика.
- 6.5. Величину угла Брюстера и рассчитанное значение относительной диэлектрической проницаемости исследованного образца.
- 6.6. Графики зависимостей значений модулей коэффициентов отражения и прохождения от угла падения волны.
- 6.7. Выводы.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

- 7.1. Какая электромагнитная волна называется плоской однородной волной? ([1] §9.1; [2] §11.1).
- 7.2. Что называется фазовой скоростью, электромагнитной волны? Как определяется фазовая скорость электромагнитной волны, распространяющейся в однородной изотропной диэлектрической среде, через параметры среды? ([1] С.142; [2] §9.5 С. 112, §11.2).
- 7.3. Что называется длиной волны? Как определяется длина волны через фазовую скорость? ([2] С. 73).
- 7.4. Что называется волновым сопротивлением среды? Как определяется волновое сопротивление диэлектрической среды через параметры среды? ([1] С. 169; [2] §9.5 С. 113).

7.5. Запишите выражения для векторов поля плоской электромагнитной волны, распространяющейся вдоль оси  $Z$  и поляризованной вдоль оси  $X$  прямоугольной системы координат. ([1] §9.1; [2] §11.1, 12.1).

7.6. Что называется вектором Пойтинга? Куда направлен вектор Пойтинга? Что показывает величина вектора Пойтинга? Какой смысл имеет среднее за период значение вектора Пойтинга? ([1] §4.1, §4.5 С. 64; [2] §4.1, С.56).

7.7. Что называется плоскостью падения, углом падения, углом отражения и углом преломления? Покажите указанные выше углы на чертеже. ([1] §10.1, §10.2; [2] §13.2).

7.8. Запишите законы Снеллиуса. ([1] §10.2; [2] §13.2).

7.9. Какие существуют виды поляризации электромагнитных волн? ([1] §9.3; [2] §12.1, §12.2).

7.10. Почему при наклонном падении плоской электромагнитной волны на границу раздела двух сред достаточно рассмотреть только два случая нормальной и параллельной поляризации? ([1] §9.3, §10.1; [2] §13.2).

7.11. Нарисуйте взаимное расположение векторов  $E$  и  $H$  падающей, отраженной и прошедшей (преломленной) волнах при нормальной и параллельной поляризации падающей волны? ([1] §10.2; [2] §13.2).

7.12. Что называется коэффициентами отражения и прохождения? Какой смысл имеют модули и фазы этих коэффициентов? ([1] §10.2; [2] §13.2).

7.13. При каких условиях наблюдается явление полного прохождения электромагнитной волны через границу раздела двух сред? Что называется углом Брюстера? ([1] §10.3; [2] §11.3).

7.14. Чему равно волновое сопротивление проводящей среды? ([1] §9.2; [2] §11.3).

7.15. Что называется идеальным проводником? Чему равно волновое сопротивление идеального проводника? ([1] §9.2, §10.4 С.200; [2] §3.10).

7.16. Чему равен коэффициент отражения от идеального проводника в случаях нормальной и параллельной поляризации падающей электромагнитной волны? ([1] §10.4 С.200; [2] §13.6).

7.17. Как происходит отражение плоской электромагнитной волны от плоского слоя диэлектрика? В каком направлении распространяется отраженная волна? ([1] §10.2 С.185).

7.18. Как происходит прохождение плоской электромагнитной волны на плоский слой диэлектрика в данной лабораторной работе? ([1] §10.2 С.185).

7.19. Как измеряются коэффициенты отражения и прохождения при падении плоской электромагнитной волны на плоский слой диэлектрика в данной лабораторной работе?

7.20. Как определить относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика, используя описанную здесь лабораторную установку?

7.21. Объясните причины расхождения между измерениями и расчетными значениями коэффициентов отражения и прохождения, если оно имеет место?

### ЛИТЕРАТУРА

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

Методическое руководство к лабораторным работам № 1,2,6,7 по дисциплинам «Электромагнитные поля и волны» и «Электродинамика и распространение радиоволн» для студентов очного и заочного обучения и направлений образования «Телевидение, радиосвязь и радиовещание» и «Радиотехника» рассмотрено на заседании кафедры (протокол № 20 от 7.06.2004 г.) и рекомендовано к печати.

Отв. редактор доц. Ликонцев Д.Н.

Составители:

доц. Ликонцев Д.Н. (работы № 1,2,7)

доц. Габзалилов Г.Ф. (работа №6)

Редакционно-корректорная комиссия:

редактор доц. Романенко Б.А.

корректор ст. преп. Павлова С.И.