

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Бирючков Никита Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование структуры электромагнитных полей в
призматическом полем резонаторе**

Электромагнитный практикум , 2 курс, группа №18352

Научный руководитель:

к. т. н. Черноусов Ю. Д.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

доцент Костюрина А. Г.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к. т. н. Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Аннотация

В данной работе проводились исследования структуры электромагнитной волны моды H_{10n} в прямоугольном полом резонаторе. В соответствии с уравнениями Максвелла и граничными условиями эта мода характеризуется наличием поперечной компоненты электрического поля, а также поперечной H_x и продольной H_z компонент магнитного поля. На этом типе волны компоненты E_z , E_x и H_y отсутствуют. В работе исследовалось наличие или отсутствие указанных компонент полей в прямоугольном резонаторе на моде H_{10} , с помощью электрического и магнитного датчиков. Использовалась установка, включающая СВЧ-анализатор цепей, измерительную линию, датчики полей – электрические и магнитные диполи. Структура полей изучалась по картине стоячей волны в прямоугольном резонаторе. Использовалась измерительная линия P1-7 и анализатор цепей Agilent N5230A. Картина стоячей волны регистрировалась передвижным зондом измерительной линии, СВЧ сигнал с которого подавался на анализатор цепей. Экспериментальные данные зависимости $E_y(z)$ и $H_x(z)$ хорошо согласуются с теоретической моделью и уравнениями Максвелла. Резонатор возбуждался на одной из резонансных частот. Выбирался индекс моды колебаний и измерения проводились на резонансной частоте этой моды.

Содержание

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть	
2.1. Поперечные электромагнитные волны. Общее решение волнового уравнения.....	7
2.2. Структура ТЕ волны в прямоугольном волноводе и призматическом резонаторе.....	11
3. Экспериментальная часть	
3.1. Экспериментальная установка:	
а) Анализатор цепей;.....	14
б) Резонатор;.....	15
в) Измерительная линия;.....	15
г) Датчики электрического и магнитного поля.....	15
3.2. Эксперименты	
а) Эксперимент 1. Измерение зависимости компоненты E_y от z с помощью датчика электрического поля в прямоугольном волноводе;.....	17
б) Эксперимент 2. Измерение зависимости компоненты E_y от z с помощью датчика электрического поля в прямоугольном резонаторе на резонансной частоте;.....	17
в) Эксперимент 3. Измерение зависимости величины потока магнитной компоненты поля от угла поворота датчика магнитного поля.....	19
г) Эксперимент 4. Измерение зависимости компоненты H_x от z на резонансной частоте с помощью датчика магнитного поля.....	20
4. Обработка результатов и выводы.....	21

Введение:

В курсовой работе исследовался полый резонатор. Современные типы полых резонаторов можно разделить на три основные группы: резонаторы, сводящиеся к отрезкам коаксиальной линии ; резонаторы квазистационарного типа; резонаторы, которые можно рассматривать как отрезки однородных волноводов. Используемый нами резонатор является отрезком прямоугольного волновода сечения 72×34 мм, по краям которого установлены диафрагмы ввода и вывода мощности. Волноводами называются передающие линии, которые выполнены в виде полый металлической трубы, не содержащей внутренних проводников. Такая труба служит для передачи энергии на сверхвысоких частотах (диапазон $30 \text{ МГц} < f < 3000 \text{ ГГц}$). Волноводы бывают различных сечений, в данной работе использовался отрезок волновода прямоугольного сечения, который имеет преимущества по сравнению с обычными передающими линиями. А именно, обладает наибольшей прочностью конструкции, практически не имеет потерь на излучение, так как электромагнитное поле целиком заключено внутри трубы. В работе рассматривается структура поля в призматическом резонаторе, знание которой позволяет правильно её использовать, осуществлять связь с другими устройствами – волноводами, ускоряющими системами, вентилями, окнами связи и др. Также можно определить точки, между которыми наиболее вероятен пробой, вычислить амплитуду электрического и магнитного полей, и понять в чем состоит особенность распространения волны моды H_{10} в призматическом резонаторе. Распространение волн в резонаторе можно представить в виде интерференции элементарных (парциальных) волн типа ТЕМ. Волны, как показано на рис. 1.1, многократно отражаясь, создают картину (речь о которой пойдёт ниже), предсказываемую уравнениями

Максвелла. Количественный анализ парциальных волн является более трудоёмкой задачей, чем формальный анализ с помощью уравнений поля. Но также из рис. 1.1 видно, фазовая скорость волны больше скорости света ($v_\phi \propto \frac{c}{\sin\theta}$), что значительно осложняет изучение структуры полей. Использование резонатора позволяет исследовать стоячую волну, полученную при интерференции двух встречных волн. При $\theta = 90^\circ$ волна не распространяется, а колеблется между пластинами. За угол отвечает параметр $\lambda_{кр} = \frac{2a}{n} = \frac{\lambda}{\cos\theta}$, где a – поперечные размеры резонатора, а n – константа моды волны, λ – длина волны в свободном пространстве. Таким образом, при $\lambda > \lambda_{кр}$ волна не распространяется, а при $\lambda < \lambda_{кр}$ – распространяется ($\theta < 90^\circ$).

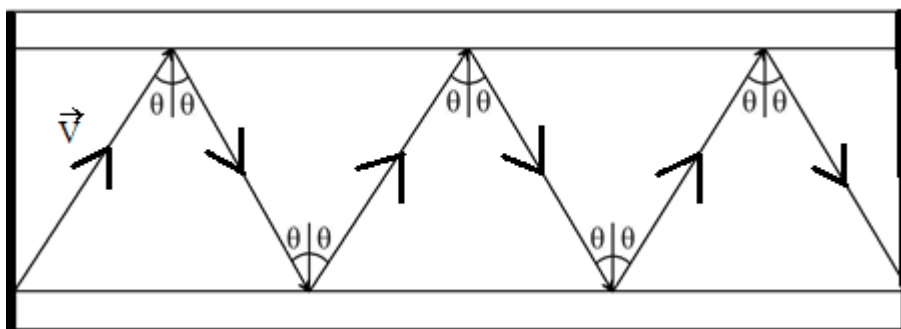


Рис.1.1. Распространение волны типа ТЕМ между параллельными проводящими плоскостями в резонаторе. $\vec{V}$ - вектор скорости

Из уравнений Максвелла следует, что электромагнитные волны, распространяющиеся в свободном пространстве, являются поперечными. Существует 3 типа поперечных волн: ТЕМ (transverse electromagnetic) поперечная электромагнитная, характеризующаяся $E_z=0$, $H_z=0$, ТЕ (transverse electric) или волны типа H_{mn} с $E_z=0$ и ТМ (transverse magnetic), волны типа E_{mn} с $H_z=0$. ТЕМ представляет собой волну векторы электрической и магнитной напряжённости лежат в плоскости перпендикулярной направлению распространения (рис. 2.1). Фазовая скорость такой волны равна скорости света. В свободном пространстве, согласно следствиям уравнений Максвелла (1.2), может существовать только такая волна.

$$\begin{aligned}\nabla^2 E_z + k^2 E_z &= 0, \\ \nabla^2 H_z + k^2 H_z &= 0.\end{aligned}\quad (1.2)$$

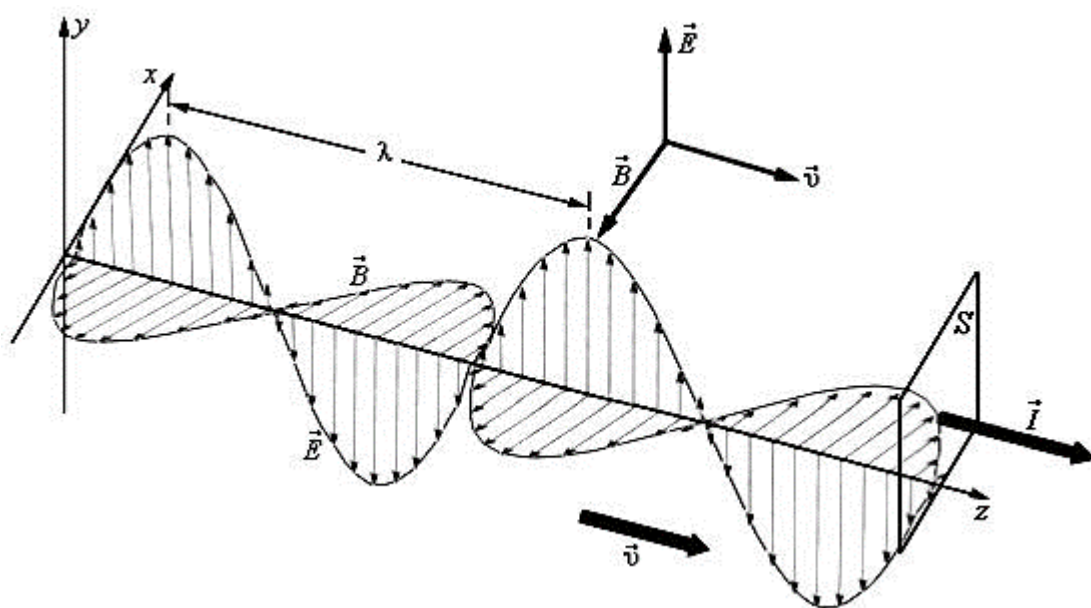


Рис. 2.1. Структура ТЕМ волны, $\vec{B}$ – вектор магнитной напряжённости, $\vec{E}$ – вектор электрической напряжённости, λ – длина волны, $\vec{i}$ – вектор распространения волны.

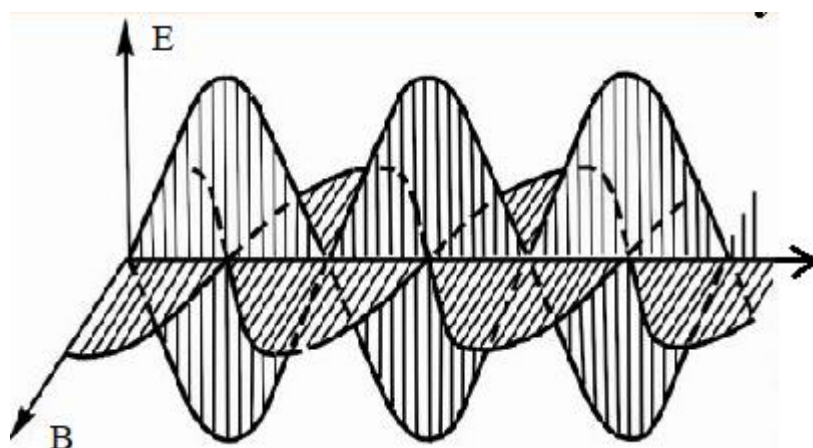


Рис. 2.2. Структура стоячей волны, $\vec{B}$ – вектор магнитной напряжённости, $\vec{E}$ – вектор электрической напряжённости.

Электромагнитные волны не взаимодействуют, а подчиняются принципу суперпозиции (суммарное действие равно сумме действий). Стоячая волна также подчиняется принципу суперпозиции. Стоячая волна образуется, когда две встречные волны - падающая и отраженная накладываются друг на друга. Падающая волна создаётся генератором, отраженная образуется за счет закорачивания волновода проводящей пластиной. Благодаря такому явлению можно определить зависимость амплитуды стоячей волны от продольной

координаты и интерпретировать характеристики бегущей волны.

2. Теоретическая часть

2.1 Поперечные электромагнитные волны. Общее решение волнового уравнения.

Из уравнений Максвелла следует, что в свободном пространстве может распространяться только одна мода - поперечная электромагнитная волна. В коаксиальном волноводе может существовать волна типа ТЕМ (transverse electromagnetic) – поперечная электромагнитная, характеризующаяся тем, что $E_z=0$, $H_z=0$, в прямоугольном волноводе могут существовать волны ТЕ (transverse electric) или волны типа H_{mn} с $E_z=0$ и ТМ (transverse magnetic) – волны типа E_{mn} с $H_z=0$. В прямоугольном волноводе индексы m означают количество попуолновых паттернов по ширине волновода и n – количество попуолновых паттернов по высоте волновода. Исходные уравнения Максвелла, описывающие электромагнитное поле в пространстве между проводниками, не содержащих свободных зарядов:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}; \quad (2.1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\mu \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}; \quad (2.2)$$

$$\text{div } (\epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}) = 0; \quad (2.3)$$

$$\text{div } (\mu \mu_0 \mathbf{H}) = 0, \quad (2.4)$$

где ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные. Представив в комплексной форме векторы $\mathbf{E} = \mathbf{E}_m e^{j\omega t}$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}_m e^{j\omega t}$, ω – циклическая частота колебаний, уравнения (2.1) – (2.2) можно переписать в симметричном относительно векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ виде:

$$\text{rot } \mathbf{H} = j\omega \epsilon' \epsilon_0 \mathbf{E}; \quad (2.5)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -j\omega \mu \mu_0 \mathbf{H}; \quad (2.6)$$

$$\text{div } \mathbf{E} = 0; \quad (2.7)$$

$$\text{div } \mathbf{H} = 0, \quad (2.8)$$

где $\epsilon' = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$ – комплексная диэлектрическая постоянная, учитывающая

потери в среде. Уравнения (2.5) – (2.8) сводятся к волновым, обозначая за $k^2 = \omega^2 \varepsilon' \varepsilon_0 \mu \mu_0$ получим:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0, \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0. \quad (2.10)$$

Так как все 6 уравнений имеют одинаковую форму, то нахождение компонент поля в прямоугольных координатах сводится к решению скалярного дифференциального уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial^2 L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 L}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 L}{\partial z^2} + k^2 L = 0, \quad (2.11)$$

где L – одна из компонент электрического или магнитного поля.

Общим решением волнового уравнения для произвольной передающей линии находится разделением переменных по методу Фурье.

$$L = D \cos(\xi x - \varphi) \cos(\eta y - \psi) e^{j\omega t - \gamma z}, \quad (2.12)$$

где ξ и η – поперечные волновые числа передающей линии, задающие конфигурацию поля в плоскости поперечного сечения волновода, а D – амплитудный множитель. Величина

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

называется постоянной распространения волны. Её физический смысл заключается в том, что α обуславливает затухание волны вдоль оси z , а β является фазовой постоянной. Таким образом, при чисто действительном значении γ распространение волны не происходит, а при только мнимой – волна распространяется без затухания. В дальнейшем будет предполагаться, что $\gamma = j\beta$, тогда $\sigma = 0$. Из этого следует, что $\varepsilon' = \varepsilon$, а $k^2 = \omega^2 \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0$.

Подставив уравнение (2.12) в уравнения (2.9) и (2.10) получим:

$$\nabla_{xy}^2 L + \gamma^2 L + k^2 L = 0, \quad (2.13)$$

где $\nabla_{xy}^2 L = \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 L}{\partial y^2}$ – двумерный лапласиан поперечного сечения волновода.

Рассматривая пространство неограниченное проводниками,

$$\begin{aligned}\nabla_{xy}^2 \mathbf{E} &= \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = 0, \\ \nabla_{xy}^2 \mathbf{H} &= \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0.\end{aligned}\quad (2.14)$$

Из уравнения (2.13) и значений k и γ можно получить, что $\beta = \gamma = \omega\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}$, так как фазовая скорость волны равна $v_\phi = \frac{\omega}{\beta}$, то в свободном пространстве и при $\varepsilon = \mu = 1$ фазовая скорость становится равной скорости света

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \cong 3 * 10^8 \text{ м/сек.}$$

В передающей линии неравенство волновых числе k и γ может быть только при $\nabla_{xy}^2 \mathbf{E} \neq 0$ или $\nabla_{xy}^2 \mathbf{H} \neq 0$. Вводя обозначение

$$k^2 - \beta^2 = k_{кр}^2 = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}}, \quad (2.15)$$

можно получить соотношение, определяющую длину волны в любой передающей линии,

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon\mu - (\frac{\lambda}{\lambda_{кр}})^2}}. \quad (2.16)$$

Это выражение показывает наличие дисперсии в передающих линиях. Как было показано во введении, $\lambda_{кр}$ определяет возможность распространения волн.

Выражения для компонент поля имеют вид:

$$\begin{aligned}H_x &= \frac{1}{k^2 + \gamma^2} (j\omega\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x}), \\ H_y &= -\frac{1}{k^2 + \gamma^2} (j\omega\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial x} + \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y}), \\ E_x &= -\frac{1}{k^2 + \gamma^2} (j\omega\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma \frac{\partial E_z}{\partial x}), \\ E_y &= \frac{1}{k^2 + \gamma^2} (j\omega\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial x} - \gamma \frac{\partial E_z}{\partial y}).\end{aligned}\quad (2.17)$$

Решение волнового уравнения для призматического резонатора:

В работе рассматривался резонатор как отрезок прямоугольного волновода, закороченный на обоих концах. Принимая размер l длиной волновода и a, b - размеры поперечного сечения.

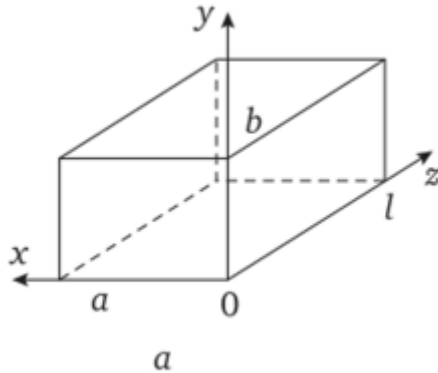


Рис. 2.3. Отрезок прямоугольного

$$l = p \frac{\lambda_B}{2}; (p = 1, 2, 3 \dots) \quad (1.18)$$

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}; \quad (1.19)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda_{кр}^2} + \left(\frac{p}{2l}\right)^2}}; \quad (1.20)$$

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} + \frac{p^2}{l^2}}} \quad (1.21)$$

Непосредственное решение волнового уравнения для призматического резонатора является аналогичным решением для прямоугольного волновода, даёт результаты, совпадающие с (1.21). Таким образом, формула (1.21) может быть использована для точных расчетов призматических резонаторов, если отсутствуют неоднородности внутри резонатора и на его стенках. В прямоугольном волноводе возможны волны типов E_{mn} и H_{mn} . Следовательно, в призматическом резонаторе существуют резонансы E_{mnp} и H_{mnp} . Индекс p соответствует числу полуволин, укладывающихся на длине резонатора, т.е. имеет тот же смысл, что и индексы m и n . При $l > a > b$ волна моды H_{10} характеризуется индексами $m=1, n=0, p=1$. Для резонатора в отличие от

волновода, возбужденного в режиме бегущей волны, характерен сдвиг на $\frac{\lambda_B}{4}$ между поперечными составляющими электрического и магнитного полей. Наличие такого сдвига вытекает из существования чисто стоячей волны. Перенос энергии в каком-либо направлении отсутствует, т.е. векторное произведение $[\mathbf{E}\mathbf{H}]$ равно нулю.

2.2 Структура ТЕ волны в прямоугольном волновом и призматическом резонаторе.

Как было отмечено выше, для волны ТЕ (transverse electric) $E_z=0$. Для описания структуры полей представим H_z в виде

$$H_z = D_1 \cos(\xi x - \varphi) \cos(\eta y - \psi) e^{j\omega t - \gamma z}, \quad (2.18)$$

Подставляя данное выражение в уравнения (2.17) и пользуясь граничными условиями,

$$E_x = 0 \text{ при } y = 0 \text{ и } y = b,$$

$$E_y = 0 \text{ при } x = 0 \text{ и } x = a, \quad (2.19)$$

получим математическое описание полей для H_{mn} , (не пренебрегая периодичностью тригонометрических функций) обозначая за $D = jD_1 \frac{\mu\mu_0}{k^2 + \gamma^2}$ и не забывая предположение об отсутствии потерь, уравнения поля примут вид:

$$E_x = D\omega \frac{\pi n}{b} \cos\left(\frac{\pi m}{a} x\right) \sin\left(\frac{\pi n}{b} y\right);$$

$$E_y = -D\omega \frac{\pi m}{a} \sin\left(\frac{\pi m}{a} x\right) \cos\left(\frac{\pi n}{b} y\right);$$

$$E_z = 0;$$

$$H_x = D \frac{\beta}{\mu\mu_0} \frac{\pi m}{a} \sin\left(\frac{\pi m}{a} x\right) \cos\left(\frac{\pi n}{b} y\right);$$

$$H_y = D \frac{\beta}{\mu\mu_0} \frac{\pi n}{b} \cos\left(\frac{\pi m}{a} x\right) \sin\left(\frac{\pi n}{b} y\right);$$

$$H_z = -jD \frac{\pi^2}{\mu\mu_0} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \cos\left(\frac{\pi m}{a}x\right) \cos\left(\frac{\pi n}{b}y\right). \quad (2.20)$$

В работе рассматривается волна моды H_{10} , подставив в (2.20) $m = 1, n = 0$ получим уравнения для этого типа волн:

$$\begin{aligned} E_y &= -D \frac{\pi\omega}{a} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right); \\ H_x &= D \frac{\beta\pi}{\mu\mu_0 a} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right); \\ H_z &= -jD \frac{\pi^2}{\mu\mu_0 a^2} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right); \\ E_x &= H_y = E_z = 0. \end{aligned} \quad (2.21)$$

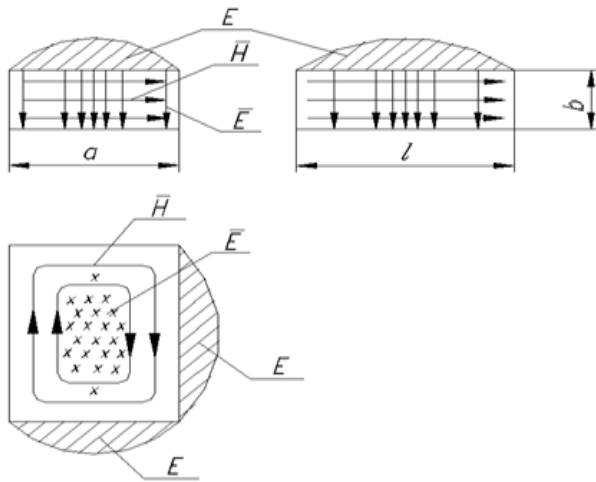


Рис. 2.4. Структура и эюры поля в призматическом резонаторе при виде колебаний H_{101}

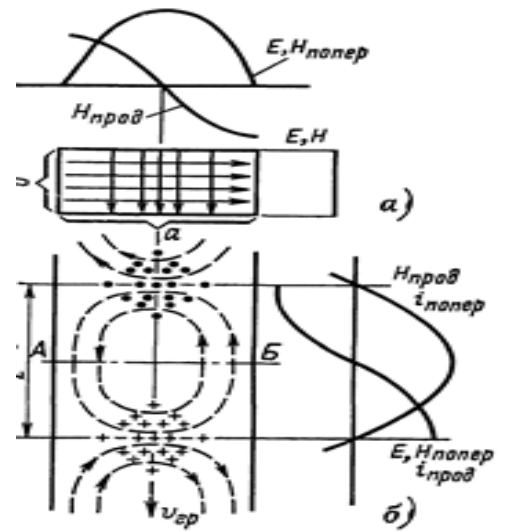


Рис.2.5. Структура поля волны H_{10} прямоугольном волноводе.
а- в поперечном сечении волновода; б- вдоль продольной оси волновода (а- размер широкой стенки; б- размер узкой стенки)

Как видно из рис. 2.5 в режиме бегущей волны максимальное значение E_y находится там же где расположено максимальное значение H_x . Для стоячей волны в призматического резонаторе уравнения, описанные выше (2.18–2.21), также выполняются, так как рассматриваем резонатор как отрезок волновода. Основным отличием структуры поля в резонаторе является сдвиг

максимумов компонент электрического и магнитного полей на $\frac{\lambda_B}{4}$. Данный сдвиг можно пронаблюдать на рис. 2.6 и 2.4.

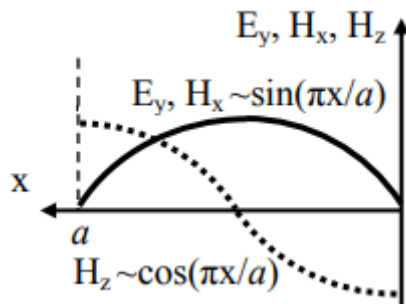


Рис.2.6. Графики зависимости E_y и H_x от координаты в резонаторе

Рассматривали зависимость $E_y(z)$, потому что её можно пронаблюдать с помощью измерительной линии. При этом в линии устанавливается стоячая волна, представляющая собой интерференцию двух волн, распространяющихся навстречу друг другу. Как будет показано ниже, зависимость поперечной компоненты электрического поля от продольной координаты z имеет вид:

$$E_y = K \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_B} z - \zeta\right), \quad (2.22)$$

где K и ζ нормировочные константы.

Измерив амплитуду стоячей волны от координаты z путём перемещения зонда вдоль измерительной линии, можно сопоставить теоретическую зависимость с экспериментальной. Расчётная кривая в соответствии с уравнением и соответствующие экспериментальные данные приведены ниже. Вводя магнитный зонд в отверстие торца резонатора соответствующим образом можно измерить зависимость амплитуды поля H_x от z . Как можно показать, зависимость поперечной координаты магнитного H_x от z должна иметь вид:

$$H_x = K \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_B} z\right); \quad (2.23)$$

3.Экспериментальная часть

3.1.Экспериментальная установка

В данной работе была собран специальный стенд для исследования структуры полей в призматическом полом резонаторе. Стенд (рис.3.1) содержит анализатор цепей Agilent N5230A – 1, измерительная линия – 2, призматический резонатор, содержащий измерительную линию – 2 с подсоединенными отрезками волновода 3,4 . Измерительная линия снабжена передвижным зондом – 5 для измерения амплитуды стоячей волны в резонаторе . Коаксиальные вводы 6,7 служат для ввода и вывода СВЧ мощности в измерительную схему.

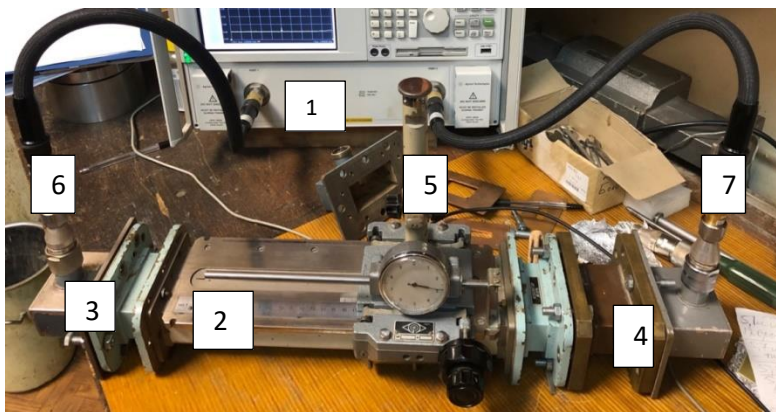


Рис. 3.1. Измерительный стенд

Схема установки:



Рис 3.2. Измерительная схема:1 –Анализатор цепей 2,3- Коаксиальные волноводы, 4-подвижный зонд,5- измерительный призматический резонатор

а) Agilent N5230A – это прибор, который формирует СВЧ- сигнал и измеряет характеристики прохождения этого сигнала через тестируемое устройство и характеристики отражения сигнала от его портов.

Данный прибор может работать в различных режимах и на разных частотах.

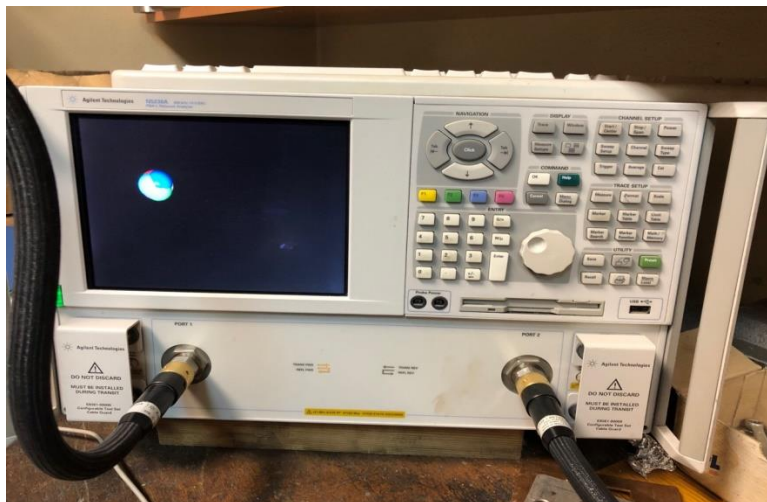


Рис.3.3. Анализатор цепей Agilent N5230A

б) Измерительная линия представляет собой отрезок прямоугольного волновода с продольной щелью по его широкой стенке. Для определения положения зонда на измерительной линии закреплена измерительная линейка.

в) Призматический резонатор включает в себя измерительную линию и два дополнительных отрезка волновода на боковых гранях, имеет поперечные размеры 72 * 34 мм. Продольный размер резонатора составлял 44 см. По краям волновода установлены диафрагмы для ввода и вывода СВЧ - мощности. На его верхней грани сделано продольное отверстие, куда вставляется датчик электрического поля. Для волны типа H_{10} отверстие в

резонаторе сделано таким образом, чтобы измерительный прибор и измерительная линия не вносили искажений в распространение поля вдоль линии, а именно по середине широкой стенки, где поперечные токи равны нулю.

г) Датчики электрического и магнитного полей:

В работе использовался датчик электрического поля, вставленный в измерительную линию, на его конце находится плоская металлическая пластина, на которой собирались индуцированные заряды.



Рис.3.4 Датчик электрического поля

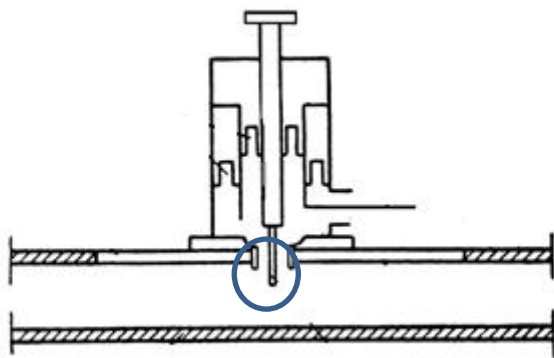


Рис.3.5. Устройство датчика электрического поля

Датчик магнитного поля:

Для измерения магнитной составляющей поля использовался датчик, представляющий металлический стержень, на конце которого находится металлическая петля. Поместив её внутрь резонатора, сквозь металлическую петлю протекает поток магнитного поля пропорциональный напряжению, которое регистрирует анализатор цепей.

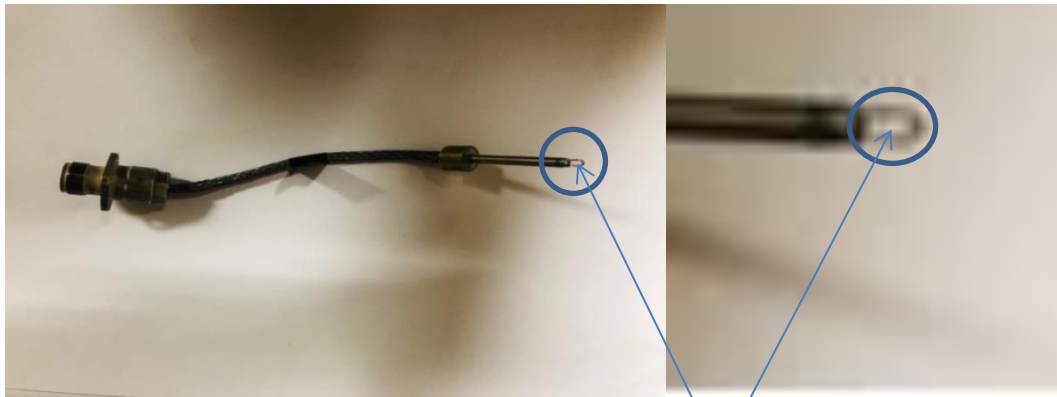


Рис.3.6. Датчик магнитного поля

Петля магнитного датчика

3.2 Эксперименты

а) Эксперимент 1. Измерения $E_y(z)$ датчиком электрического поля в прямоугольном волноводе волны моды H_{10} .

Для исследования структуры волны моды H_{10} в волноводе, был собран прямоугольный волновод и проведены измерения с помощью экспериментальной установки. В эксперименте мы передвигали зонд по измерительной линии и снимали зависимость амплитуды напряжения от координаты, которая пропорциональна электрической компоненте поля. По полученным данным был построен график. Данный график удовлетворяет уравнению 2.22 и его можно экстраполировать графиком $E_y(z) =$

$$0.0137 \left| \sin\left(\frac{2\pi}{15.4} z - 2.826\right) \right|.$$

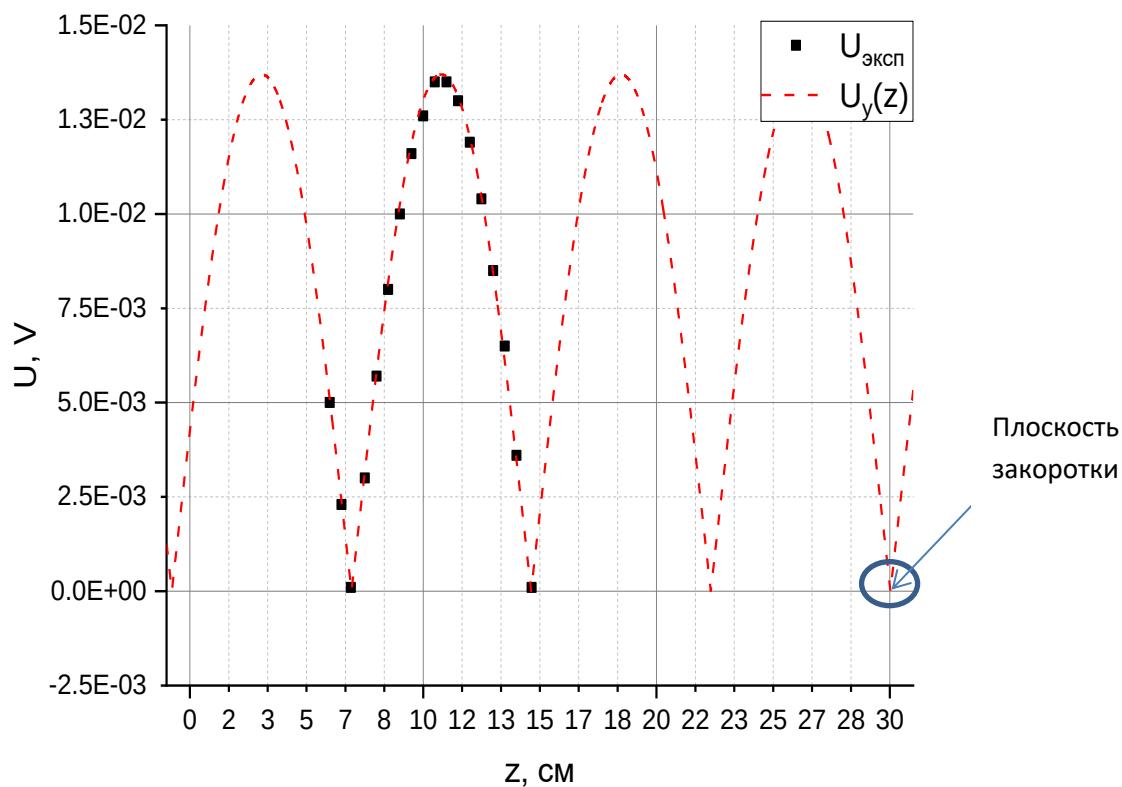


Рис. 3.7. Зависимость амплитуды электрической компоненты поля в резонаторе от координаты в измерительной линии

б) Эксперимент 2. Измерения $E_y(z)$ датчиком электрического поля в призматическом резонаторе на резонансной частоте волны моды H_{10n} .

В данном эксперименте был собран металлический полый резонатор, представляющий собой отрезок прямоугольного волновода, на боковых гранях которого установлены металлические диафрагмы. Рис. 3.8 и 3.9 иллюстрируют амплитудно-частотную характеристику волны моды H_{10n} . Из полученных резонансных частот выбрали частоту $f=3.16$ GHz.

Плоскость закоротки

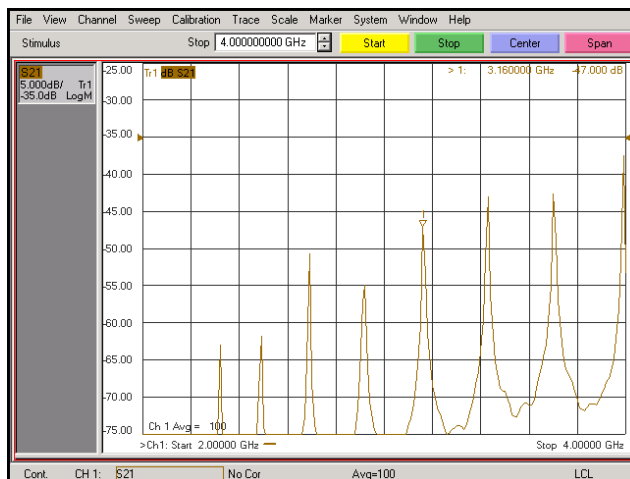


Рис.3.8. Амплитудно-частотная характеристика резонатора в широкой полосе частот

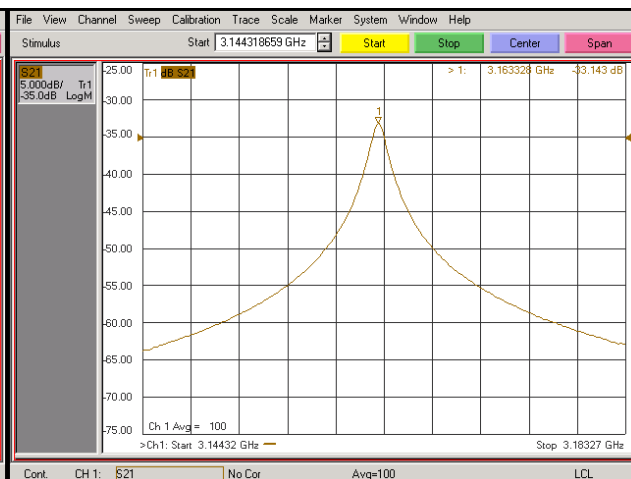


Рис.3.9. Амплитудно-частотная характеристика резонатора в узкой полосе частот

Измерив, выяснили, что узлы волны находятся на 4.8 см и 11.1 см, а пучности на 1.7см, 8см, 14,3см из этого следует, что длина волны равна 12,6 см. По экспериментальным данным построили график $U_y(Z)$ рис. 3.10.

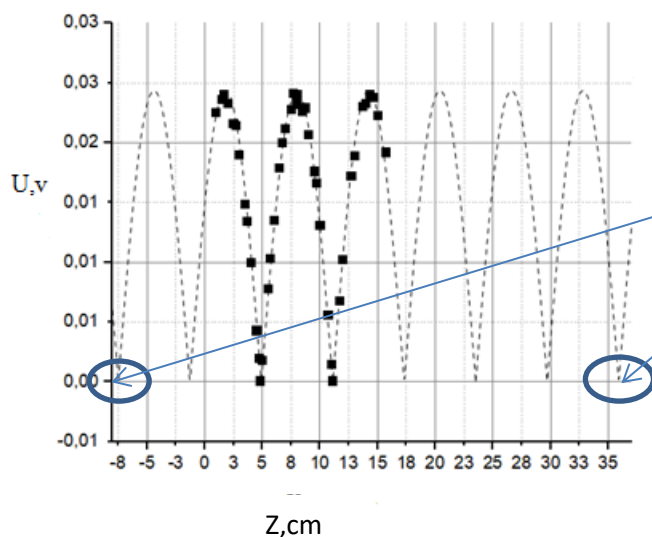


Рис. 3.10. Зависимость амплитуды электрической компоненты поля в резонаторе от координаты в измерительной линии

По рис. 3.10 видно, что минимумы амплитуды волны приходятся на диафрагмы резонатора, что соответствует теории – уравнениям Максвелла. Вследствие конструктивных особенностей резонатора, в эксперименте 2 удалось исследовать две полуволны. Длина одной полуволны составила $\frac{\lambda_B}{2} = 6,3\text{см}$, а длина резонатора, ограниченная диафрагмами составляет 44см,

следовательно в резонаторе находится 7 полуволн, поэтому для данного резонатора индекс $n=7$. Таким образом, на данной частоте в данном резонаторе устанавливаются колебания с модой H_{107} . Рис. 3.10 показывает зависимость электрической компоненты поля от координаты в измерительной линии и его можно экстраполировать графиком функции $E_y(z) = 0,024 \left| \sin \left(\frac{\pi z}{6,2} - 2,48 \right) \right|$

в) Эксперимент 3. Измерение зависимости величины потока магнитной компоненты поля от угла поворота датчика магнитного поля.

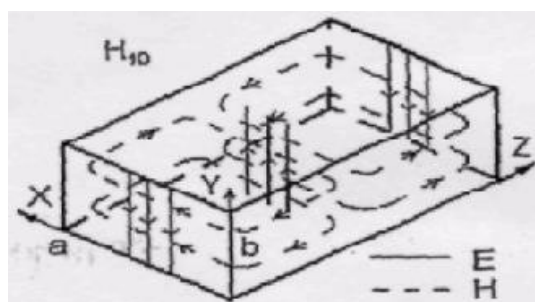


Рис.3.11. Структура бегущей волны моды H_{10} в прямоугольном волноводе

Как видно из уравнений (2.21) и рисунка 3.11 магнитная компонента электромагнитного поля лежит в плоскости широкой стенки волновода. Направление магнитного поля можно измерить с помощью магнитного зонда, представляющего замкнутую петлю на конце коаксиальной линии. С этой целью следует поместить петлю через отверстия в полость волновода и сориентировать её определённым образом. Эти эксперименты были выполнены.

Таблица 1. Зависимость величины магнитной составляющей поля от угла поворота датчика.

U, mV	2	22	30
α^0	0	45	90

Измерялась зависимость сигнала с зонда от угла его поворота относительно теоретического положения плоскости петли магнитного поля. Измеренная зависимость приведена в таблице 1. Как видно из таблицы, при

совпадении плоскости измерительной петли и плоскости магнитного поля уровень сигнала равен нулю. Если угол между петлями был равен 90 градусов, то амплитуда сигнала максимальна. Это говорит о том, что магнитное поле в волноводе поляризовано, и оно лежит в плоскости, как показано на рис. 2.2.

г) Эксперимент 4. Измерение зависимости компоненты H_x от оси z на резонансной частоте с помощью датчика магнитного поля.

В данном эксперименте к боковой части призматического резонатора была прикреплена закоротка с отверстием. В это отверстие вставляли датчик магнитного поля и исследовали зависимость амплитуды напряжения от глубины погружения датчика в резонатор. По экспериментальным данным был построен график (рис. 3.12).

Из уравнений (2.21) можно сделать вывод, что максимумы H_z и E_y смещены относительно друг от друга на расстояние $\lambda_v/4$. Для подтверждения этого факта в центре заглушки было просверлено отверстие для ввода магнитного

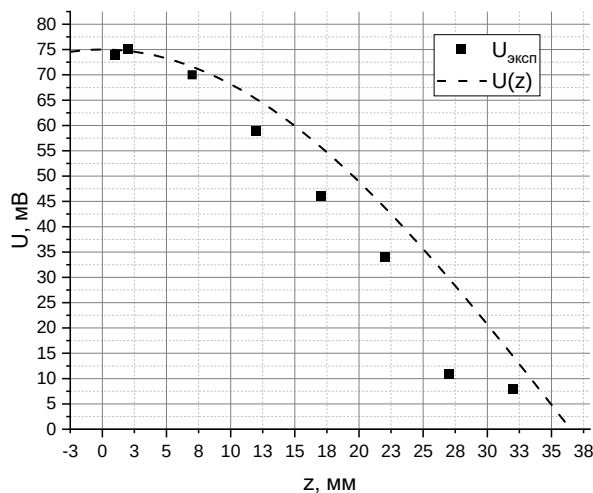


Рис.3.12. Зависимость амплитуды компоненты H_x магнитного поля от координаты в измерительной линии

датчика. Погружая датчик, сориентированный под углом 90° к горизонту, в волновод, была получена зависимость величины сигнала от глубины погружения. Измерения проводились при частоте 3.16 ГГц. Результаты измерений приведены на рис. 3.12. Ноль отсчитывался от проделанного в

заглушке отверстия. Зависимость амплитуды магнитной компоненты имеет вид:

$$U(z) = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_B} z\right) \quad (3.1).$$

По формуле (2.16) можно вычислить $\lambda_B/4 = 36,5$ мм. Константа $A=75$ вычислена с учётом максимального значения экспериментальных данных. Данная картина экспериментальных точек объясняется из следующих соображений. Во-первых, размеры петли в магнитном датчике конечны и составляют порядка 4 мм, что является около 10% от $\lambda_B/4$, во-вторых, функция $\cos(x)$ мало зависит от значения аргумента при малых x . Таким образом, чем глубже датчик погружается в волновод, тем больше становится разница между потоком через его части, это можно увидеть на рис. 3.12 – с увеличением координаты z разница между экспериментальными и теоретическим значения увеличивается.

Обработка результатов и выводы

В работе была изучена структура электромагнитной волны моды H_{10} в волноводе прямоугольного сечения и структура волны моды H_{10n} в призматическом резонаторе. Показано, что для исследованного резонатора $n=7$. Структура полей внутри резонатора описывается уравнениями Максвелла и граничными условиями, которые накладываются материальной и геометрической структурой резонатора. В соответствии с уравнениями (2.21) данная мода имеет поперечную компоненту $E_y(x)$, и $H_x(x)$, а также продольную компоненту $H_z(x)$. В режиме стоячих волн зависимость поперечной компоненты электрического поля $E_y(z)$ имеет вид (2.22), а поперечная компонента магнитного поля вид (3.1). Измерения проводились в режиме стоячей волны с помощью передвижного зонда измерительной линии и магнитного датчика, вводимого в отверстие в заглушке. Зависимость

поперечной компоненты электрического поля $E_y(z)$ хорошо описывается соотношением (2.22), что видно из графиков рис. 3.7 и рис. 3.10. Из рис. 3.7 также видно, что в соответствии с экстраполяцией картины стоячей волны минимум стоячей волны приходится на плоскость закоротки, а из рис. 3.10 видно, что минимумы (узлы) стоячей волны находятся на боковых гранях резонатора, то есть там, где расположены диафрагмы. Таким образом, расчётным и экспериментальным путём показано, что в плоскости диафрагм электрические поля падающей и отражённой волн вычитаются и дают нулевое значение.

Также путём поворота магнитного датчика было установлено, что магнитная компонента поля в волноводе поляризована в плоскости широкой стенки волновода. Кроме того, путём изменения положения магнитного датчика в волноводе было выяснено, что максимумы магнитной и электрической компонент смещены относительно друг друга на расстояние $\lambda_v/4$. В целом, приведенные расчёты и выполненные эксперименты позволили выяснить структуру электрической и магнитной компоненты электромагнитного поля в волноводе. Тем самым было получено ещё одно экспериментальное подтверждение уравнений Максвелла. При изучении магнитной компоненты поля было выяснено, что из-за конечных размеров петли магнитного диполя возникает расхождение экспериментальных данных с теоретическими. Для получения более точных измерений характерный продольный размер петли, следует существенно уменьшить, и этот размер должен быть много меньше $\lambda_v/4$.

Список использованной литературы

1. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ : учеб. пособие для вузов / под редакцией академика Н.Д. Девяткова, 2-е изд. перераб. и доп. М. : «Высшая школа», 1970. – 299 с.
2. Осипов К.Д. Справочник по радиоизмерительным приборам / Пасынков В.В. Советское радио, 1964. – 117 с.
3. Бобков Ю.Ю. Методические указания к выполнению лабораторной работы №1/ под редакцией КЛ. Горбачёва, Минск БГУИР, 2012. – 46 с.

